

# **Grundlagen der modernen Logistik**

## **Methoden und Lösungen**

Siegfried Jetzke

21. Dezember 2014



Siegfried Jetzke  
Grundlagen der  
modernen Logistik

Liebe Eltern

Danke.

*Siegfried Jetzke*

Grundlagen der  
modernen Logistik

Mit 110 Bildern

# Vorwort

Ein Buch über Logistik erscheint wie ein weiteres Buch über eine Fußballweltmeisterschaft. Wozu ist dieses notwendig? Ein Auslöser für das Verfassen liegt im Wesen der Logistik als einem umfassenden Ansatz zur Lösung praktischer Probleme und den hiermit verbundenen, unterschiedlichen möglichen Sicht- und Herangehensweisen, die bisher von den Hauptprotagonisten der Logistik, Maschinenbauingenieuren und Betriebswirten, geprägt wurden. Auf den folgenden Seiten wird Logistik aus Sicht eines Naturwissenschaftlers dargestellt, für den eine Theorie nur dann eine Theorie ist, wenn sie in der Wirklichkeit überprüft werden kann und für den Algorithmen und Experimente ein wichtiger Bestandteil einer Problemlösung sind.

So wie es in weiten Bereichen der produzierenden Industrie gelungen ist, wiederverwendbare Module auf Plattformbasis einzusetzen und den Anteil an Gleichteilen in Produkten zu steigern, muss dieses auch in der Logistik erfolgen, wenn sie ihre Effizienz steigern will. Ein Hindernis ist häufig der Sprachenwirrwarr und die mehr oder minder offen gezeigte Rivalität zwischen Theoretikern und Praktikern: Ein Gespräch zwischen einem Mathematiker, einem Informatiker und einem Lagerleiter endet oftmals in der kollektiven Erkenntnis, nicht gemeinsam arbeiten zu können. Das Streben, selbst einfache Sachverhalte kompliziert und umständlich darzustellen, ist vielerorts zu beobachten. Eine einfache Beschreibung komplexer Sachverhalte gelingt nur selten.

In diesem Buch werden praktische Probleme vorgestellt, theoretische Konzepte beschrieben und die Umsetzbarkeit skizziert. Es wird vereinfacht werden, sowohl die Theorie als auch die Praxis betreffend. Es werden weder vollständige theoretische Modelle entwickelt noch einsatzfertige Lösungen. Die Beschreibung soll die Vielfalt an Aufgaben und Lösungsmöglichkeiten zeigen und Lust auf Vertiefung oder Umsetzung machen, die Potenziale eines Miteinander aufzeigen und befähigen, konkrete Probleme lösen zu können.

In vielen Besprechungen ist „Wir müssen pragmatisch vorgehen“, ein beliebtes Argument, manchmal noch ergänzt um „Wir müssen das Rad nicht immer neu erfinden.“ Dabei wurde *das Rad* bereits vor vielen tausend Jahren erfunden und hat wenig gemeinsam mit denen des 21. Jahrhunderts. Es gibt noch immer neue Entwicklungen und Erfindungen. Auch wenn kein neues erfunden werden soll, so ist zumindest nach einem geeigneten zu suchen. Oder soll für einen Lkw und ein Kinderwagen ein und dasselbe Rad verwendet werden?

Das Lernen durch Fragen, Zuschauen, Zuhören oder durch Lesen ist nicht immer abwegig und einem *learning by doing* mindestens ebenbürtig. Überall dort, wo Leistungen vergleichbar sind, wie z. B. beim Sport, in der Musik oder in den Wissenschaften, ist *learning by training* ein absolutes Muss. Dieses Buch soll dazu beitragen, Probleme, Grenzen und Lösungsmöglichkeiten kennen zu lernen und deutlich machen, dass Logistiker noch lange nicht arbeitslos sind. Möglichkeiten der Kommunikation und Identifikation, leistungsfähige Algorithmen und Rechner, auf denen diese implementiert werden können, bieten Potenziale, die in einem konstruktiven Miteinander auszuschöpfen sind. Alle Probleme und Lösungen der Logistik sind als Teil lebender Systeme zu sehen: Produkte und Kunden sind weder fiktive noch imaginäre Objekte, die sich auf geträumten Straßen bewegen. Alles ist Teil einer realen Welt. Einer Welt, die nicht auf einem

Reißbrett konstruiert werden kann, sondern so existiert, wie wir sie vorfinden. Vorhersagen und Lösungen lassen sich in der Wirklichkeit oder an Modellen überprüfen und sie müssen überprüft werden, um aufwendige Fehlentwicklungen zu vermeiden. Dieses Überprüfen kann wirklich erfolgen, manchmal vielleicht nur als Gedankenexperiment aber nicht nur als Gedankenspiel in Präsentationen. Die Analyse bekannter Abläufe, Simulationen an geeigneten Modellen und vielfältige Testverfahren bieten ausreichend Werkzeuge für ein effizientes Vorgehen: Experimentelles Vorgehen, wie es seit Generationen in vielen Disziplinen erfolgreich praktiziert wird, und nicht Probieren am lebenden Objekt.

### **Konventionen**

Namen und Wörter, die nicht der deutschen Konjugation oder Deklination unterliegen, werden so geschrieben werden, wie in der Landessprache üblich und kursiv. Es wird von einer *mail* und einer *mouse* gesprochen und *Files* nicht *gedownloadet*. Hiermit bleiben Ausdrücke wie *zwei Mäuse* erspart, die beim Versand *gehandelt*, *gehandled* oder gar *gehandlet* werden. Hervorhebungen im Text sind durch *geneigte Buchstaben* zu erkennen. Alle Begriffe, die im Index erscheinen, sind im Text fett gedruckt.

Im Text wird durchgängig die männliche Form verwendet. Ständig sie/er und LeserIn bzw. Leser und Leserin bzw. Leser/in zu verwenden, scheint mir den Inhalt nicht zu verbessern. Ich verspreche nicht, ein möglicherweise zweites Buch in der weiblichen Form zu schreiben.

### **Danksagungen**

Das Schreiben eines solchen Buches ist mit etwas Aufwand verbunden, das Zusammentragen aller erforderlicher Informationen mit reichlich. Danken möchte ich all denen, die mir die Gelegenheit gaben, unterschiedliche Aufgabenstellungen und Lösungsansätze sehen und ihnen zuhören zu dürfen. Entschuldigen möchte ich mich bei all denen, die sich in Beispielen wiederfinden, die verkürzt und überspitzt dargestellt sind und die sich falsch verstanden wissen.

Meiner Frau danke ich für viele hilfreiche Diskussion und ihre Geduld bei dieser doch sehr unsozialen Tätigkeit. Herrn Dr. Peter Steinacker, Sarah Baron, Christoph Brunken, Olaf Essling, Alexander Kutschan, André Schneider und meinen Kindern Kristine und Malte Jetzke danke ich für die mühselige Arbeit des Lesens eines unfertigen Textes. Auch wenn das Schreiben mit  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  und  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  eine wahre Freude ist, haben mir hilfreiche Tricks und Hinweise meiner Tochter sehr viel Zeit und unnötiges Verzweifeln erspart.

### **Wer sollte dieses Buch lesen?**

Dieses Buch ist sowohl für Studierende als auch für Praktiker gedacht, für Lernende und Lösungssuchende. Der Bogen von allgemeinen Anforderungen, über Probleme und technische Möglichkeiten und Lösungen bis hin zu Anwendungen erlaubt es, alle Facetten in diesem Buch wiederfinden zu können. Die einzelnen Kapitel sind so gehalten, dass die Lösungen auch ohne die Beschreibung der mathematischen Möglichkeiten verstanden werden können. Um zu verstehen, wie es zu diesen Lösungen kommt, können die grundlegenden Kapitel zu Rate gezogen werden.

### **Wie geht es weiter?**

Sie werden beim Lesen feststellen, dass nicht alle Probleme der Logistik gelöst, aber einige nützliche Ansätze vorgestellt werden. Wenn Sie Fragen, Anregungen, interessante zu lösende Aufgaben oder Kritik vorbringen möchten, wenden Sie sich bitte an mich. Sie erreichen mich unter *s.jetzke@goodsync.de*.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	.....	<b>5</b>
<b>Einleitung</b>	.....	<b>9</b>
<b>Teil</b>	<b>Logistik</b>	
<b>1</b>	<b>Aufgaben der Logistik</b>	<b>11</b>
1.1	Was ist Logistik?	11
1.2	Integration	13
1.3	Lieferketten	19
1.4	Logistik - gestern und heute	22
1.5	Manufakturen, Ketten, Netzwerke, Bäume	24
1.6	Verantwortungsbereiche	26
<b>Teil</b>	<b>Planung, Regelung, Prognose</b>	
<b>2</b>	<b>Systeme, Modelle und Prozesse</b>	<b>33</b>
2.1	Planung und Prognose – eine notwendige Partnerschaft	33
2.2	Planen, Steuern, Regeln und Lenken	38
2.3	Prozessbeschreibungen	41
2.4	<i>Repositoryum</i>	53
<b>3</b>	<b>Informationslogistik</b>	<b>61</b>
3.1	Daten, Informationen und Wissen	61
3.2	Kennzahlen	70
3.3	Kommunikation	79
<b>Teil</b>	<b>Methoden und Technik</b>	
<b>4</b>	<b>Vom Umgang mit Zahlen</b>	<b>85</b>
4.1	Zahlen und Rechnen	85
4.2	Rechnen mit ...	93
4.3	Suchen und Sortieren	98
4.4	Zufallszahlen	105

4.5	Graphen . . . . .	109
4.6	Graphen und Landkarten . . . . .	117
<b>5</b>	<b>Abstand und Ähnlichkeit von Objekten . . . . .</b>	<b>121</b>
5.1	Gleichheit von Objekten . . . . .	121
5.2	Abstände von Objekten . . . . .	126
<b>6</b>	<b>Datenanalyse . . . . .</b>	<b>145</b>
6.1	Daten – leblos und uninteressant . . . . .	145
6.2	Fehler und Unsicherheiten . . . . .	145
6.3	Analysen . . . . .	148
<b>7</b>	<b>Entscheidungsfindung . . . . .</b>	<b>159</b>
7.1	Analysebasiert . . . . .	159
7.2	Regelbasiert . . . . .	167
7.3	Simulationen . . . . .	174
<b>8</b>	<b>Optimierung . . . . .</b>	<b>185</b>
8.1	Vorgehen . . . . .	185
8.2	Klassische Verfahren . . . . .	190
8.3	Natural analoge Verfahren . . . . .	195
<b>9</b>	<b>Technik für die Logistik . . . . .</b>	<b>211</b>
9.1	Komponenten . . . . .	211
9.2	Rechner . . . . .	214
9.3	Kommunikation . . . . .	219
9.4	Kennzeichnung und Identifikation . . . . .	221
9.5	Ortung . . . . .	229
<b>Teil</b>	<b>Probleme und ihre Lösungen</b>	
<b>10</b>	<b>Probleme und ihre Lösungen . . . . .</b>	<b>239</b>
10.1	Die 8 r der Logistik . . . . .	239
10.2	Problemklassen . . . . .	240
10.3	Anwendungen . . . . .	246
<b>11</b>	<b><i>Virtual Spider</i> - eine virtuelle dezentrale Leitzentrale . . . . .</b>	<b>291</b>
11.1	Die 8 r der Logistik . . . . .	291
11.2	Supply net event management - <i>SNEM</i> . . . . .	295
11.3	<i>goodSync</i> und <i>virtual spider</i> . . . . .	298
<b>Teil</b>	<b>Index</b>	

# Einleitung

Die Bedeutung der Logistik hat in den letzten Jahren unstrittig zugenommen. Die Verwendung des Wortes Logistik ist inflationär gestiegen, wie die Anzahl der Menschen, die sich als Logistiker fühlen oder sich so nennen. Logistik ruft Assoziationen mit Lastwagen oder Gabelstaplern ebenso hervor wie solche mit den Gottschalk-Brüdern, mathematischen Algorithmen, Transpondern oder Telematik. Optimierung ist ein weiteres Wort, dessen Verwendung unaufhaltsam zugenommen hat. Jeder, der aktiv in das wirtschaftliche Leben eingebunden ist, kommt an den Begriffen Logistik und Optimierung oder noch besser an Optimierung logistischer Prozesse nicht vorbei. Der Spruch „Das muss sich rechnen“, ist fester Bestandteil des Spricherepertoires. Wenn aber Optimierung seit vielen Jahren ein Dauerbrenner in allen Unternehmen ist, wieso ist dann mittlerweile nicht alles optimal?

Was bedeutet Optimierung? Wie muss gerechnet werden? Oftmals wird als Ziel einer Optimierungsfragestellung die Senkung der Kosten genannt. Ich hätte gerne einen Beratungsauftrag, bei dem als Honorar ein Drittel der eingesparten Kosten gezahlt wird. Das Ergebnis der Beratung lautet „Ich senke Ihre Kosten auf Null.“ Mein Arbeitsaufwand wäre minimal und selbst bei geringer Einsparung die Effizienz enorm hoch – für mich. Bei der ausschließlichen Betrachtung von Kosten wird oftmals vergessen, dass das Ziel eines Unternehmens nicht die Senkung der Kosten, sondern die Maximierung des Gewinnes sein sollte.

Hier zeigt sich ein Teil der Problemstellung. Wie lautet das Ziel einer Optimierung? Erst wenn das geklärt ist, kommt der zweite Teil. Wie kann dieses erreicht werden? Hierzu bedarf es sowohl organisatorischer Maßnahmen als auch der Anwendung unterschiedlicher Methoden und Techniken. So wie der beste Fußballtrainer mit einer hervorragenden Taktik nur dann eine Meisterschaft gewinnen kann, wenn er konditionell und technisch herausragende Spieler auf den Platz bringen kann, gilt dieses auch für die Logistik. Wichtig ist hierbei das individuelle Können Einzelner und deren perfektes Zusammenspiel. Eine strategisch-verbale Betrachtung ist wichtig, aber nicht ausreichend. Es geht um den zielgerichteten Einsatz konkreter Techniken zur Lösung realer Probleme. Auch künftig müssen Prozesse beherrscht und Aufgaben effizient gelöst werden. Das Verhandlungsgeschick eines Einkäufers reduziert die Kosten für einzukaufende Produkte oder Dienstleistungen, ungeachtet dessen, ob sie benötigt werden.

Oftmals wird die Frage gestellt, ob ein theoretischer oder ein praktischer Ansatz gewählt werden soll. Hier darf keine Entscheidung für das Eine und gegen das Andere getroffen werden. Beides sind zwei verschiedene Gesichter ein und derselben Sache und nur miteinander stark. Für Theoretiker macht es keinen Sinn, für ein in der Welt einzigartiges Problem eine allgemeine Lösung zu suchen. Für Praktiker ist es mühselig festzustellen, ob es eine zu einem konkreten Problem passende Theorie gibt. Häufig verhindert ein winziges Detail die Anwendung eines theoretischen Ansatzes in der Praxis. Sind die Steuerung von Lkws auf einem Werkgelände und die von Gabelstaplern auf dem selben Gelände zwei Probleme oder handelt es sich um ein Problem mit unterschiedlichen Parametern? Gleichheiten zu erkennen und den Theoretiker zu bewegen, seine Theorie leicht zu modifizieren oder den Praktiker zu überzeugen, einen Transport mit den Eigen-

schaften *Lkw* oder *Gabelstapler* zu versehen, ist eine der Herausforderungen an ein konstruktives Miteinander.

Die heutzutage verfügbaren Möglichkeiten der experimentellen Logistik, realisierbar durch Datenerfassung und Simulationen, leisten hierbei wesentliche Hilfestellung. Umsetzungen können nur dann erfolgreich sein, wenn alle Komponenten richtig miteinander verknüpft werden: *Lkw* und *Gabelstapler*, *Fördertechnik* und *Regalbediengeräte* werden als notwendige Technik für die Logistik gesehen. Kommunikation, Datenverarbeitung, Identifikation zwar als äußerst wichtig benannt, fristen aber oftmals ein jämmerliches Schattendasein. In diesem Buch wird diesen Themen ein besonderer Stellenwert zugeordnet, für die Beschreibung mechanischer Maschinen wird auf andere Literatur verwiesen.

Dieses Buch ist in vier Teile untergliedert. Im ersten werden Ziele, Gegenstand und Aufgaben der Logistik beschrieben und eine Strukturierung nach verschiedenen Merkmalen vorgenommen. Der folgende ist der erste von zwei Grundlagenteilen und in diesem wird das notwendige Zusammenspiel von Planung über Lenkung bis zur Prognose und Daten und Wissen beschrieben, im sich anschließenden Teil theoretische Grundlagen aus Mathematik und Informatik. Optimierung und Simulation bilden einen Schwerpunkt. Es werden anhand vereinfachter konkreter Beispiele unterschiedliche Verfahren zur Behandlung komplexer Probleme vorgestellt. Heutzutage verfügbare technische Systeme zur Kommunikation, Identifikation und Ortung, wie *Transponder* und *GPS* werden mit ihren wichtigsten Eigenschaften beschrieben, ohne dabei zu sehr physikalische Details zu beschreiben. In dem folgenden Kapitel werden praktische Probleme, wie *Transport*-, *Routenplanung*, *Bestands-* und *Behältermanagement* sowie die *Lenkung von Lkws* und *Gabelstaplern* zur *Materialbereitstellung* und deren *Lösungen* beschrieben.

Im letzten Kapitel werden die Überlegungen der vorherigen zusammen gebracht und ein Konzept und ein Lösungsansatz zur ganzheitlichen Behandlung logistischer Systeme und dessen Realisierung kurz vorgestellt: *goodSync* als integratives Konzept zur Beherrschung von *supply net event management* mit *virtual spider* als Lösungsansatz.

Elementare mathematische Methoden und technische Möglichkeiten sind ein Teil der beschriebenen Handwerkszeuge. Gleich wichtig sind Verfahren zur Beschreibung dessen, was gemacht wird und gemacht werden soll: Prozessbeschreibungen in ihren unterschiedlichen Sichten und Anwendungsbereichen. Da jedes Werkzeug und jeder Plan stets an einer Realisierung gemessen wird, werden qualitative und quantitative Bewertungsmöglichkeiten beschrieben: Kennzahlen als ein Standardinstrument des Controlling und Simulationen, eine leistungsfähige Komponente der experimentellen Logistik. Ausgestattet mit diesem Werkzeug werden konkrete Probleme beschrieben und Lösungen diskutiert. Zunächst als isoliertes Problem *Routenplanung* und *Behältermanagement* und dann eingebettet in ein dem ganzheitlichen Ansatz unter besonderer Rücksicht der *Informationslogistik* entsprechendes Konzept *supply net event management* (SNEM) und möglichen Realisierungsstufen *goodSync* und *virtual spider*, einer virtuellen dezentralen Leitzentrale, in der einfachste Bausteine mit aufwendigen Optimierungsmethoden und modernen technischen Komponenten zu einer effizienten Umsetzung logistischer Prozesse beitragen helfen. Das Ziel ist es, Methoden bereitzustellen, die Ergebnisse liefern, die Menschen bei ihren Entscheidungen in logistischen Prozessen unterstützen.

Viel Spaß beim Lesen.

+1

*Die Klage über die Schärfe des Wettbewerbs ist oft nur die Klage über den Mangel an Einfällen.*

Klaus C. Hiltrop, Vorstand bei Gardeur aus Lebensmittelzeitung, 2.2006



# Aufgaben der Logistik

## 1.1 Was ist Logistik?

Viele Speditionen wurden in den letzten Jahren zu Logistikern, ohne dabei nicht mehr geändert zu haben als den Schriftzug auf ihren Fahrzeugen: Aus *Großkopf – Spedition* wurde *Großkopf – Spedition und Logistik*.

Auch wenn das Wort Logistik eine gewaltige Faszination ausübt, ist ihre Bedeutung in vielen Unternehmen weit von dem entfernt, was verlangt wird. *Spedition und Logistik* bringt zum Ausdruck, dass Logistik *en passant* erledigt werden kann. Produktverliebtheit, gepaart mit dem Bedürfnis nach einer ordentlich erstellten Bilanz und dem monatlichen Blick auf Renditezahlen prägen das Bild: Ingenieure, Juristen und Bankangestellte bestimmen das Geschehen, nicht die Kunden. Dieses steht in klarem Widerspruch zu der öffentlich vertretenen Bedeutung der Logistik: Logistik als Zauberwaffe zur Beseitigung aller Defizite und Realisierung gewaltiger Potenziale.

In einer Zeit, in der Produkte kaum unterscheidbar sind, müssen andere Alleinstellungsmerkmale generiert werden. Eine Möglichkeit ist die Erweiterung des Qualitätsbegriffes über die Produktsicht hinaus: Ein Auftrag ist erst dann erfolgreich abgeschlossen, wenn der Kunde sagt: „Ich habe genau das erhalten, was ich wollte und wie ich es wollte. Beim nächsten Mal komme ich wieder zu Ihnen.“ Wenn dieser Satz mit minimalem Aufwand bei allen Beteiligten realisiert werden konnte, kann von einer perfekten Auftragsbearbeitung gesprochen und die in der Überschrift gestellte Frage einfach beantwortet werden:

### **Definition .1 Die 8 r der Logistik**

*Logistik ist das Streben nach den acht richtigen r: Die richtige Ware, in der richtigen Menge, in der richtigen Qualität, zum richtigen Zeitpunkt, zu den richtigen Kosten, am richtigen Ort, mit den richtigen Daten und dem richtigen Wissen.*

In der praktischen Umsetzung kann oft beobachtet werden, dass oftmals nicht einfach zu entscheiden ist, was *richtig* oder *nicht richtig* ist. Ist die richtige Ware genau das, was der Kunde bestellt hat? Selbst das bereitet Probleme. Rufen Sie doch bei einem Bäcker in München und einem in Bielefeld an und bestellen jeweils fünf *Krapfen*. Sie werden ohne Nachfrage verschiedene Gebäckstücke erhalten.

Die Bestimmung richtiger Mengen ist eines der zentralen und schwierigsten Themen der Logistik. Die Tatsache, dass Mengen in Zahlen angegeben werden können, kann Sicherheit und Exaktheit höchsten vortäuschen.

Sind Mengen richtig bestimmt, bieten Angaben in Form von Zahlen zumindest die Möglichkeit zu quantitativ greifbaren Aussagen. Die Beantwortung der Frage nach der richtigen Qualität kann kaum frei von subjektiven Kriterien erfolgen.

Beim Zeitpunkt hingegen scheint es wieder klarer und einfacher: Pünktlich soll es sein. Was ist pünktlich? Ist zu frühes Eintreffen pünktlich? Bei einem Festbankett anlässlich einer Preisverleihung soll die Vorspeise um acht Uhr serviert werden. Der Festredner, der im Anschluss an seine Rede den Preis verleihen soll, genießt die öffentliche Aufmerksamkeit und schließt seine Laudatio genau um acht Uhr, um dann mit der Verleihung zu beginnen. Im selben Augenblick öffnen sich *pünktlich* die Türen des Saals und Kellner beginnen, die Vorspeise zu servieren. Ist dieses der richtige Zeitpunkt?

Beim Thema Kosten herrscht ein breiter Konsens: So niedrig wie möglich sollen sie sein. Gleichzeitig erwarten Anteilseigner möglichst hohe Gewinne. Gewinne, die aus Preisen resultieren, die Kunden in Rechnung gestellt werden und bei diesen als Kosten zu verbuchen sind. Niedrige Kosten bei den Kunden bedingen niedrige Preise und somit reduzierte Gewinne bei den Lieferanten.

Konnte früher mit einer Angabe der Art *Ebbesloh 5* der Empfänger problemlos gefunden werden, so haben Kunden heute Liefer-, Rechnungs- und Postanschriften. Und selbst die Angabe eines Straßennamens mit einer Hausnummer ist oftmals nicht ausreichend, es werden Hallen- oder Torbezeichnungen benötigt.

Etwas abstrakter erscheinen die beiden letzten Begriffe. Was bedeuten richtige Daten? Stellen Sie sich ein in graues Papier eingewickeltes Paket ohne jegliche Beschriftung vor, das in der zentralen Postannahme eines großen Unternehmens ankommt. Hier werden die richtigen Daten auf dem Paket benötigt – oder sind es Informationen?

Selbst dieses ist nicht immer ausreichend. Hat ein Briefkasten sein Namensschild verloren, kann das Wissen des Zustellers helfen, einen Brief richtig zuzustellen: Ist es entfernt worden, weil der Besitzer ausgezogen ist oder war schlechtes Befestigungsmaterial der Grund? Wie soll der Briefträger reagieren, wenn er unsicher ist?

Eine andere Formulierung für die Aufgaben der Logistik [nach Hin+00]:

**Weisheit 1.1** *Das Ziel der Logistik ist es, Verschwendung zu vermeiden.*

Als Kandidaten für Aktivitäten, in denen nach Verschwendung gesucht werden muss, kommen

- Überproduktion,
- Wartezeiten,
- Transport,
- schlechte Verarbeitung,
- unnötiger Bestand,
- unnötige Bewegungen,
- Rüstzeiten
- und
- Schäden

in Betracht. Aktivitäten, die aus Sicht eines Kunden den Wert eines Produktes nicht erhöhen, den so genannten *non value adding activities*. Ob eine Tätigkeit zu den *non value adding activities* gehört, kann dadurch ermittelt werden, indem geprüft wird, ob der Kunde bereit ist, dieses zu honorieren. Das Beobachten von Kundenreaktionen bei Hinzufügen oder Weglassen gibt eine eindeutige Antwort. Erhöht das Lesen einer Bedienungsanleitung den Wert eines Produktes? Ist dieses dann auch eine wertschöpfende Tätigkeit? Wird wertschöpfend als etwas verstanden, das dem Unternehmen Gewinn bringt? Sind die Bankgeschäfte eines automobilbauenden Unternehmens wertschöpfend? Wird

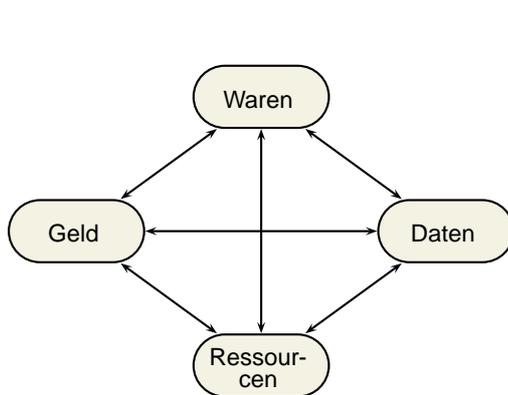
$$\text{Erfolg} = \text{Preis} - \text{Kosten} \quad (1.1a)$$

gesehen, so steigert Effizienz unmittelbar den Erfolg, wohingegen fehlende Effizienz bei

$$\text{Preis} = \text{Kosten} + \text{Gewinn} \quad (1.1b)$$

zu höheren Preisen führt [Shi93]. Das Vermeiden von Verschwendung bedeutet Senkung der Kosten und folglich eine Steigerung des Erfolges. In der zweiten, durch Gleichung (1.1b) ausgedrückten europäischen Sichtweise, werden Kosten als Grundlage einer Preiskalkulation gesehen und eine Kostensenkung erfolgt nicht unter dem selben Druck wie in der japanischen Sichtweise, die durch Gleichung (1.1a) dargestellt ist. In diesem Buch soll stets die Vermeidung von Verschwendung im Blickpunkt stehen, was auch folgendermaßen formuliert werden kann:

**Weisheit 1.2** *Das Ziel der Logistik ist die effiziente Realisierung von Kundenaufträgen.*



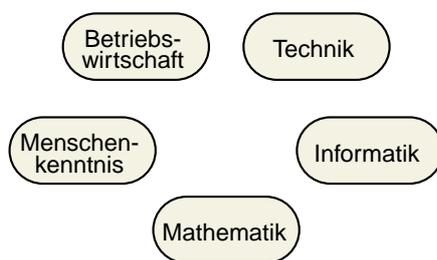
**Abb. 1.1:** *Sichtweisen auf ein Unternehmen*

## 1.2 Integration

Um das in der obigen Weisheit formulierte Ziel erfüllen zu können, müssen folgende grundlegenden Fragen beantwortet werden: „Who are the customers. What do they want?“ [ACN06].

Dieses ist natürlich Aufgabe von Vertrieb und Marketing, die Logistik kann aber Daten liefern, um die Beantwortung zu erleichtern. Aufgabe der Logistik ist zweifelsfrei der zweite Teil der obigen Weisheit, die effiziente Realisierung. Effizienz bedeutet auch, Dinge einfacher zu gestalten. Einfach im Einsteinschen Sinne: „Keep things as simple as possible, but not any simpler.“ Die in Abbildung 1.1 gezeigten Sichtweisen lassen sich nicht auf weniger reduzieren. Logistik soll dazu beitragen, Aufgaben zu lösen, kann Prozesse aber weder aus allen Perspektiven betrachten noch bewältigen.

**Weisheit 1.3** *Aufgaben sind ganzheitlich zu betrachten. Eine effiziente Lösung wird nur durch ein Team kommunizierender Experten möglich, nicht durch Einzelgänger, gleichgültig ob Spezialist oder Generalist.*



**Abb. 1.2:** Säulen der Logistik

Es ist kontraproduktiv, eine Teilaufgabe bis in das kleinste Detail hervorragend zu bearbeiten und dabei angrenzende Gebiete zu beeinträchtigen. Dass dieses oftmals auch überhaupt nicht notwendig ist, zeigt sich beispielsweise daran, dass die Ziele der Logistik in Form der 8 r genauso oder ähnlich im Marketing gefunden werden. So ist es auch das Ziel des Marketings, dafür zu sorgen, die richtigen Produkte an den richtigen Stellen zu platzieren [ACN06]. Hört für einen Logistiker heutzutage manchmal das Denken vielleicht noch bei der Anlieferung der Waren an die Verkaufsstelle auf und sieht ein Vertriebsmitarbeiter nur

die richtige Position der Waren im Regal des Verkaufsraumes, dafür aber den Weg bis zur Produktion nicht, so gibt es hier immerhin schon einen gemeinsamen Teil der Lieferkette, die letzten zehn Meter, der beide beschäftigt und ein gemeinsames Ziel. Glücklicherweise beherrschen beide unterschiedliche Methoden, die sich ergänzen.

Ebenso wenig hilfreich ist es, wenn zu allen Facetten Allgemeinplätze präsentiert werden. Bei der konkreten Realisierung zeigen sich viele Aufgaben, für deren Bewältigung Experten benötigt werden, die ihr Gebiet beherrschen, Verknüpfungen sehen und Schnittstellen gestalten können. Für die in Abbildung 1.1 gezeigten Sichten können die dazu gehörenden Aufgaben kurz umrissen werden.

- Geld  
Hier muss dafür gesorgt werden, dass der Kunde eine Rechnung erhält, und sicher gestellt werden, dass diese beglichen wird. Ebenso sind Zahlungen vorzunehmen, es ist für eine ausreichende Liquidität zu sorgen und eine kostenmäßige Bewertung möglicher Varianten vorzunehmen.
- Ressourcen  
Die Einsatzplanung von Mitarbeitern, Gabelstaplern oder Fahrzeugen muss so sein, dass stets die richtige Menge an Ressourcen verfügbar ist. Wartungsarbeiten können nicht dann stattfinden, wenn ein großer Bedarf vorliegt, aber auch nicht so lange hinaus verzögert werden, bis eine Ressource nicht mehr einsatzfähig ist.

- **Produkte**  
Hier sind alle Fragen zu beantworten, die damit verknüpft sind, die richtigen Güter in der richtigen Qualität bereit zu stellen. Auch wenn es für einen Fahrer keinen Unterschied macht, ob er Mobiltelefone oder Gemüse fährt, sind die bei der Tourenplanung und Lagerung zu bedenkenden Anforderungen sehr unterschiedlich. Produktspezifische Eigenheiten sind in allen Phasen der logistischen Kette zu beachten.
- **Daten**  
Daten stellen die Grundlage jedes wirtschaftlichen Handelns dar, gleichgültig ob sie digital in einem Rechner oder als Erfahrung in dem Kopf eines Menschen gespeichert sind. Der Austausch dieser Daten und die Sicherstellung der Datenquellen entscheidet maßgeblich über Erfolg oder Misserfolg.

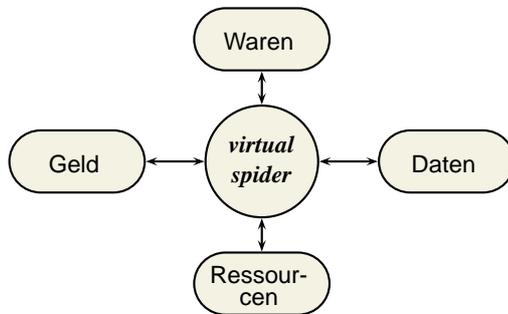
Zur Erfüllung der Aufgaben der Logistik sind Kenntnisse unterschiedlicher Disziplinen notwendig, die eine Person kaum in sich vereinen kann, die Zusammenarbeit von Experten ist erforderlich.

Den unterschiedlichen Sichtweisen und Aufgaben entsprechend sind logistische Fragestellungen multikriterielle Probleme, für die unterschiedliche Ziele mit sich daraus ergebenden Zielkonflikten formuliert werden können. Die Frage, ob eine Produktion so geplant werden soll, dass sie eine optimale Logistik ermöglicht oder die Logistik so, dass sie eine optimale Produktion erlaubt, ist einer dieser Konflikte. Ungeachtet dieser möglicherweise konkurrierenden Ziele sind folgende unstrittig.

- **Reaktionsfähigkeit**  
Ungeplante bzw. unvorhergesehene Ereignisse können nie ausgeschlossen werden. Dieses können Störungen im negativen aber auch positiven Sinne sein: Ein Ereignis kann durch den Ausfall einer Maschine hervorgerufen werden oder aber auch dadurch, dass ein Produkt so hervorragend bei den Kunden einschlägt, dass die Menge kurzfristig erhöht werden muss.
- **Agilität**  
Neben kurzfristigen Reaktionen gibt es auch langfristige Änderungen, auf die sich ein Unternehmen möglichst einfach einstellen können sollte. Wie beweglich ist ein Unternehmen bei sich ändernden Energiepreisen?
- **Lernfähigkeit**  
Reaktion und Agilität beschreiben, dass Änderungen von Rahmenbedingungen aufgefangen werden können. Besser ist es, wenn aus vorliegenden Ereignissen Rückschlüsse auf künftige gezogen werden können. Es soll nicht immer wieder auf gleiche ungeplante Ereignisse reagiert werden müssen, diese sollten irgendwann zu geplanten werden.
- **Schlankheit**  
Dieses entspricht dem Vermeiden von Verschwendung. Schlankheit bezieht sich auf alle nicht werterhöhenden Aktivitäten, sowohl in der Produktion als auch in der Logistik. Sind alle Besprechungen wirklich werterhöhend?
- **Informationsfähigkeit**  
Die Verfügbarkeit von Rechnern und moderner Kommunikationstechnologie schafft Möglichkeiten und führt zu Ansprüchen, die vor wenigen Jahren noch undenkbar waren. Gleichzeitig können durch die Sicherstellung der Informationsfähigkeit bisher ungeahnte Potenziale ausgeschöpft werden. Informationsfähigkeit ist die Fähigkeit, Informationen bereit stellen zu können und bedeutet nicht, dass jeder ungehindert Zugriff auf Informationen erhält.

- **Wirtschaftlichkeit**

Das Einhalten des Wirtschaftlichkeitsprinzips in Form von Minimum- oder Maximumprinzip sollte stets Grundlage jeglichen Handelns sein. Eine effiziente Umsetzung darf dabei nicht außer Acht gelassen werden. Die Verfolgung des Minimumprinzips bedeutet nichts anderes als das Vermeiden von Verschwendung.



**Abb. 1.3:** Kommunikationsstruktur zwischen den Sichten innerhalb eines Unternehmens.

Hierüber hinaus gibt es weitere Forderungen, von denen einige zumindest diskussionswürdig erscheinen.

- **Transparenz**

Der Wunsch nach Transparenz erscheint mehr als zweifelhaft, dessen Umsetzung niemand ernsthaft verfolgen wird. Soll ein Lieferant, Spediteur, Kunde oder Analyst einer Bank die Produktion und Distribution eines Produktes jederzeit verfolgen können? Kalkulationen und Preisverhandlungen wären hinfällig. Nicht nur Banken, auch Wettbewerber, wären begierige Nutzer transparenter Systeme. Statt der Transparenz wird die **Informationsfähigkeit** gefordert.

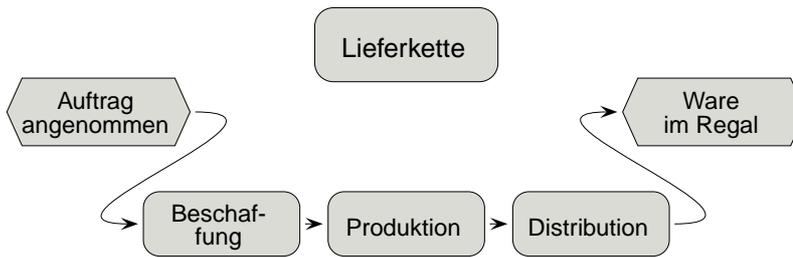
- **Konzentration auf Kernkompetenz**

Was bedeutet es, wenn sich ein Hersteller auf seine Kernkompetenz konzentrieren soll? Ein Automobilwerk soll nur noch Autos zusammenbauen und die konzerneigene Bank abstoßen, der Hersteller von Druckern nur Drucker und weder Tinte noch die Patronen für diese produzieren und die Logistik jeweils von einem Dienstleister realisieren lassen? Dieses würde eine Rückkehr zur Konzentration auf Produkte bedeuten. Nicht die Frage nach Kernkompetenz ist zu stellen, sondern danach, was benötigt wird, um eine positive Wirkung zu erzielen und den Kunden langfristig zu binden.

- **nicht Wertschöpfendes eliminieren**

Wird als wertschöpfend nur das bezeichnet, was den Wert aus der Sicht eines Kunden erhöht, d. h. alle *value adding*-Aktivitäten, müssten Transporte eliminiert werden. Wird als wertschöpfend all das verstanden, was den größten Gewinn verspricht, müssten möglicherweise Tätigkeiten übernommen werden, die nicht zu den Kernkompetenzen gehören. Hier erscheint die Forderung nach dem Vermeiden von Verschwendungen sinnvoller. Nicht jeder Transport kann eliminiert werden, auch auf das Kontrollieren von Lieferpapieren kann nicht vollständig verzichtet werden.

In einer ganzheitlichen Herangehensweise sind Ziele und Anforderungen widerspruchsfrei zu formulieren, ebenso für zeitlich unterschiedliche Betrachtungshorizonte. *Plan-build-run* oder *design-develop-do-discover* stehen für die unterschiedlichen Zeithorizonte aus Projektsicht. Ergebnisse in der Umsetzungsphase hängen von denen der Planungsphase ab. Alles, was in der



**Abb. 1.4a:** Lieferkette – Variante I

Auslöser ist hier, dass der Wunsch definiert ist, d. h. die Auftragsannahme ist Teil der Lieferkette.

Planungsphase nicht oder falsch bedacht wurde, muss später aufwendig behoben werden, *fire fighting* wird zum Tagesgeschäft.

*design, plan*

Das Planen oder Entwerfen erfolgt weit vor der Leistungserbringung. In dieser Phase können, abhängig von der Art der Planung, noch sehr viele bis alle Parameter variiert werden. Die Planungshorizonte können sowohl langfristig, d. h. mehrere Jahre, sein, aber auch mittel- oder kurzfristig. Das Erstellen und Nutzen von **Prognosen**, für das Daten aus verschiedenen Quellen benötigt werden, ist ein Teil der Planung.

*develop, build*

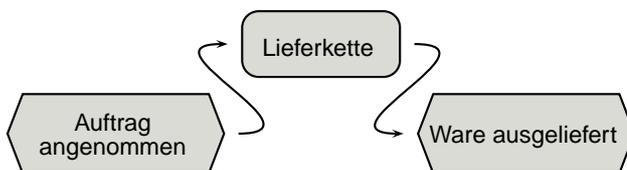
Alle Elemente werden zusammengefügt. Verträge werden abgeschlossen, technische Systeme realisiert und Ressourcen beschafft. In dieser Phase können Planungen in begrenztem Umfang noch problemlos modifiziert werden.

*do, run*

Dieses ist die zeitnahe Umsetzung auf der Grundlage der vorgenommenen Planung. Eingriffe sind nur noch sehr eingeschränkt und mit großem Aufwand möglich. Entscheidungen müssen schnell getroffen werden, ohne dabei andere, gleichzeitige oder folgende, Prozesse zu stören. Dieses erfordert einen angepassten Informationsaustausch und dokumentierte Regeln.

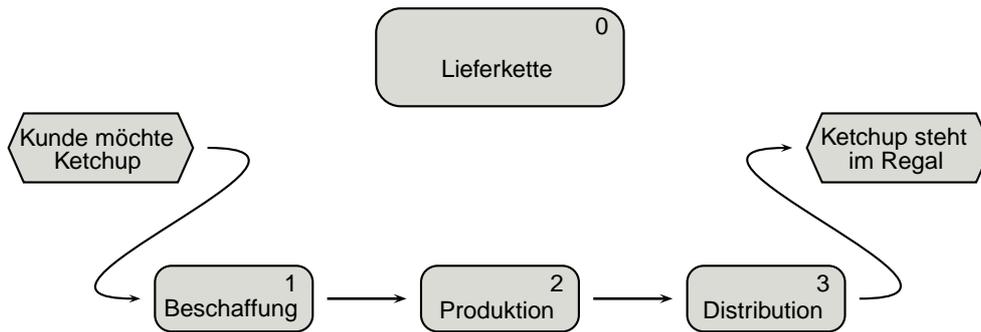
*discover*

Dieses ist die wertschöpfendste Tätigkeit, die sowohl begleitend als auch nachfolgend ausgeführt werden kann. Es gibt keine bessere Informationsquelle als einen bereits realisierten Prozess. Aus geeigneten Kenndaten und Analysen können für künftige Planungen



**Abb. 1.4b:** Lieferkette – Variante II

Auslöser ist hier der angenommene Auftrag, d. h. die Auftragsannahme ist nicht Teil der Lieferkette. Die Lieferkette endet hier mit der Auslieferung der Ware.



**Abb. 1.5:** Lieferkette – Variante III

Auslöser ist hier, dass der Wunsch des Kunden bekannt ist. Beendet wird die Lieferkette, wenn die Ware im Regal steht.

und Umsetzungen wesentliche Rückschlüsse gezogen werden. Dieses Lernen erfolgt durch konventionelles Controlling ebenso wie beispielsweise durch *data mining* [Run00]. Es lassen sich Schwächen und Stärken aufzeigen, Vorgaben ableiten und Daten und Modelle für Prognosen bereit stellen.

Strategische, taktische und operative Sichten sind ebenfalls vor dem Hintergrund unterschiedlicher zeitlicher Horizonte zu sehen. Ein zeitnah zu realisierender Prozess muss im Kontext einer langfristig durchgeführten Planung gesehen werden. Standorte für Produktionsstätten oder Lager werden für mehrere Jahre festgelegt, die Auswahl von Lieferanten hat mehrere Monate oder gar Jahre Bestand ebenso wie eine Entscheidung für oder gegen einen eigenen Fuhrpark. Eine Transport- oder Tourenplanung erfolgt kurzfristig auf der Grundlage der in der Vergangenheit durchgeführten Planungen. Entscheidungen für die verschiedenen Zeithorizonte müssen konsistent sein, die langfristig getroffenen schaffen Restriktionen und schränken die kurzfristigen ein.

Auch wenn dieses zu erheblichen Problemen führen kann, so haben zeitliche Betrachtungen eine sehr angenehme Eigenschaft: Die Zeit läuft immer in eine Richtung. Entscheidungen, die heute getroffen werden, haben keine Rückwirkungen auf solche aus der Vergangenheit. Wenn Vorgaben für die Zukunft gemacht werden, besteht die Möglichkeit, durch Beobachtungen aktueller Entwicklungen Änderungen vornehmen zu können.

Ganz anders sieht es beim Waren- oder Informationsfluss aus. Hier gibt es immer mindestens zwei Blickrichtungen, von denen Prozesse beobachtet und Ereignisse wahrgenommen werden. Waren oder Daten, die einen Absender verlassen, laufen in Richtung eines Empfängers. Das, was der Absender als ausgehend oder *outbound* sieht, ist für den Empfänger eingehend oder *inbound*. Ein Unternehmen, das Reklamationen und Retouren verarbeitet, betreibt *inbound*- und *outbound*-Logistik, die miteinander koexistieren müssen. Sowohl die verschiedenen Blickrichtungen als auch die Integrationsaufgaben auf unterschiedlichen Ebenen führen zu einer Vielzahl von **Schnittstellen**

- im Materialfluss,
- im Datenfluss,

- im Informationsfluss,
- im Abstimmungs- und Entscheidungswesen und
- in der Kommunikation,

die definiert, dokumentiert und gepflegt werden müssen und für die

- Waren-
- Informations-  
und
- Finanzströme

zu synchronisieren sind. Diese Pflege wird insbesondere im Bereich der Technik bedeutend, in der die Einführung neuer Techniken stets mit Aufwand verbunden ist.

Eine wichtige Forderung an die moderne Logistik muss es auch hier sein, dass alle Aufgaben auf einer konsistenten und gemeinsamen Grundlage bearbeitet werden. In allen Phasen können bei allen Akteuren Daten erfasst werden, deren Zusammenführen gewaltige Potenziale birgt, die ausgeschöpft werden können, falls dieses nicht durch fehlende oder unterschiedliche Konventionen, wie z. B. Dezimalkomma oder -punkt, hohen Aufwand verursacht. Nur halbherzig gelöste Sprachprobleme zwischen *Menschen und Menschen*, *Menschen und Maschinen* und *Maschinen und Maschinen* stellen weitere Barrieren dar.

Verschiedene technische Systeme müssen miteinander verbunden und in andere, vielfach seit langem laufende, integriert werden. Zusammen mit Vorgaben von Menschen wird dieser *status quo* oftmals als unabänderbar vorgefunden. Es haben sich Gewohnheiten ergeben, die häufig nicht einmal bekannt sind, manche existieren nur im Unterbewusstsein der Beteiligten. Fahrer fahren mittwochs eine bestimmte Raststätte an, weil es dort vor Jahren an diesem Tag immer leckere Reibekuchen gab. Ein Disponent bestellt stets zehn Prozent mehr als benötigt, was durch eine Minderlieferung des Lieferanten so ausgeglichen wird, dass das System hervorragend funktioniert – solange diese beiden Akteure für Bestellung und Lieferung verantwortlich sind. Vieles ist noch auf Karteikarten archiviert, noch mehr in den Köpfen ausgeschiedener Mitarbeiter. Häufig haben sich eigenständige Sprachen gebildet, die für eine innerbetriebliche Kommunikation bestens geeignet sind, hingegen für Neue oder Externe vollkommen unverständlich oder gar missverständlich.

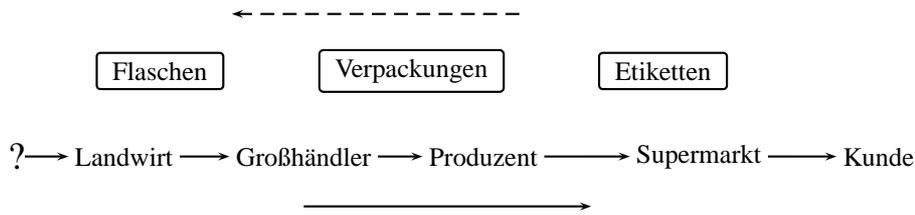
Es ist zunächst schwierig, dieses zu erkennen, und anschließend, dieses zu ändern. Können all diese Gewohnheiten überhaupt verbannt werden, oder wird dadurch ein funktionierendes System nachhaltig gestört. Gilt auch hier der Satz „Never touch a running system!“?

Plantage → Tomatenmark → Ketchup → Kunde

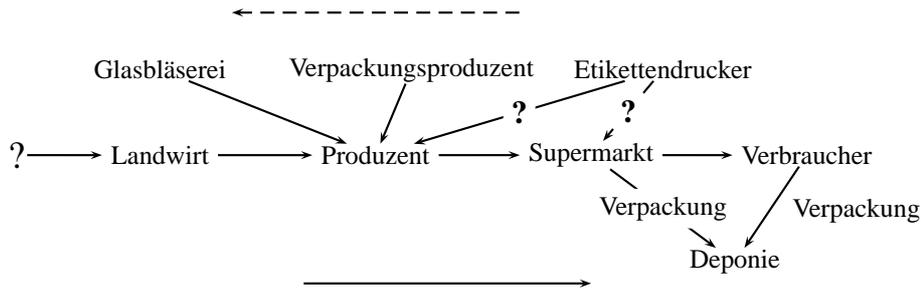
**Abb. 1.6a:** Zu Abbildung 1.5 alternative Darstellung einer Lieferkette für die Produktion von Ketchup.

## 1.3 Lieferketten

Wie sieht das System aus, mit dem sich die Logistik beschäftigt? Einen ersten Eindruck soll die Abbildung 1.4a vermitteln. Auslöser einer jeden Aktivität ist hier das Bekanntwerden eines

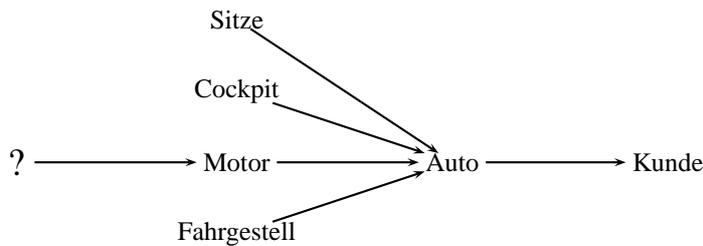


**Abb. 1.6b:** Eine alternative Sicht der Ketchupproduktion. Die gestrichelte Linie stellt den Informationsfluss dar.



**Abb. 1.6c:** Immer noch Ketchup

Kundenwunsches. Alternativ kann auch das Vorliegen eines Auftrages, wie in Abbildung 1.4b gezeigt, die Lieferkette anstoßen. Mit der Auslieferung der Ware beim Kunden ist die Arbeit erledigt. Die durchzuführenden Tätigkeiten beschreiben die **Lieferkette** oder *supply chain* mit auslösendem und abschließendem Ereignis. Für dieses Buch soll, wenn nicht anders gesagt, die Lieferkette dort beginnen, wo klar ist, was geliefert werden soll, d. h. bei Vorliegen des Auftrages. Gespräche über Mengen und Qualitäten sollen abgeschlossen sein. Hiermit wird festgelegt, dass mit Beginn der Lieferkette bereits eine gewisse Menge an nutzbaren Daten vorliegt.



**Abb. 1.7a:** Auch Beispiel einer Lieferkette?

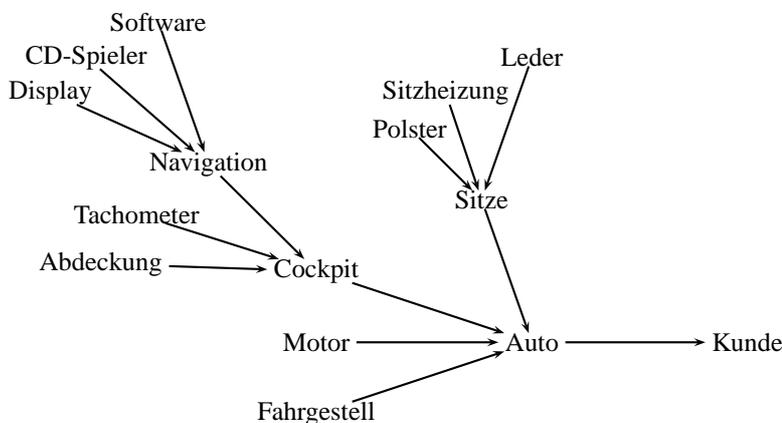
### Definition .2 Lieferkette

Die Lieferkette ist die geordnete Folge von Tätigkeiten, die zur Erfüllung eines Kundenwunsches notwendig sind. Der Anfang des Güterflusses in einer Lieferkette soll dort sein, wo die einzusetzenden Produkte austauschbar sind. Das Ende dort, wo der weitere Verbleib keine Rolle spielt.

Am Beispiel von Tomatenketchup wäre der Anfang aus Sicht des Produzenten dort, wo das Tomatenmark gekauft wird, das Ende bei der Entnahme des Ketchups aus dem Regal des Supermarktes. Diese Sicht, mit dem Fluss von Waren und Daten im Fokus, ist für eine unternehmensweite Betrachtung nicht ausreichend. Als Grundlage sollte jeweils ein **Auftrag** herangezogen werden, der den Auslöser für alle Aktivitäten und jeden Waren-, Geld- und Informationsfluss in einem Unternehmen und in einem Logistiksystem darstellt. Die Auftragsabwicklung ist die zentrale Funktion zur Steuerung von Produktion und Logistik.

**Definition .3 Auftragsabwicklung**

*Die Auftragsabwicklung ist die Übermittlung und datenmäßige Bearbeitung und Kontrolle der Aufträge vom Zeitpunkt der Auftragsaufgabe beim Kunden bis zur Ankunft der Sendungsdokumente und Rechnung beim Kunden [Pfo95]. Die Auftragsabwicklung bildet das Bindeglied zwischen externer Information und interner Umsetzung.*



**Abb. 1.7b:** Aus der Lieferkette wird ein Lieferbaum, in dem, wie in einem richtigen Baum, nicht alle Zweige und Blätter erkannt werden können.

Die im Auftrag aufgeführten Daten sind in der Regel aber nicht unmittelbar für alle Bereiche nutzbar. So ist für einen Verkäufer die Angabe im Auftrag, dass ein Auto mit bestimmten Eigenschaften bestellt wird, ausreichend. Für die Produktion werden Stücklisten benötigt, die Logistik erwartet Aussagen darüber, wie einzelne Teile verpackt und auf einem Fahrzeug gesichert werden sollen.

Ein Auftrag enthält Operations- und Logistikanweisungen [Gud99] oftmals in einer für die Logistik unzureichenden Form: Die Anweisungen beziehen sich nur auf das Zusammenführen einzelner Bestellungen, jedoch nicht auf das Zusammenwirken einzelner Glieder der Logistikkette bzw. von Waren- oder Informationsflüssen. Aus dem Auftrag sind für alle in Abbildung 1.1 dargestellten Sichten die jeweils benötigten Daten zu erzeugen und so zwischen den Akteuren zu verteilen, das alle auf konsistente Daten zugreifen können. Wenn jeder mit jedem spricht, kann dieses schnell zu einem babylonischen Sprachengewirr führen. Soll dann auch noch auf Änderungswünsche zügig reagiert werden können und sind die Verfügbarkeiten einzelner Akteure nicht garantiert, ist die anfänglich vorhandene Datenkonsistenz schnell zerstört. Eine Struktur,

die dieses vermeiden hilft, ist in Abbildung 1.3 gezeigt: Eine zentrale Stelle, ob nun *information broker*, *enterprise application integration* oder *modul manager*, muss dafür sorgen, dass die Daten richtig erfasst, aufbereitet und verteilt werden. *Virtual spider* steht für einen später beschriebenen Ansatz, der die eben genannten Konzepte aufgreift und erweitert.

## 1.4 Logistik - gestern und heute

Sind die Aufgabenstellungen heute so, wie sie seit Generationen bekannt sind oder haben sich diese geändert? Sind vielleicht nur die Rahmenbedingungen jetzt anders als vor vierzig Jahren? Die folgenden Punkte sollen deutlich machen, dass die Änderungen in den letzten Jahren mehr waren als nur eine neue erste Ziffer in der Jahreszahl.

- mögliche Transparenz  
Das Internet und der *Digitale Tachograph* sind nur zwei Beispiele dafür, wie offen heutige Systeme sein können. Die Angreif- und Verletzbarkeit moderner Rechnernetze und folglich auch der Logistik ist eine Konsequenz transparenter Systeme.
- Geschwindigkeit  
Die logistischen Grundforderungen nach den 8 r scheinen immer dann außer Kraft gesetzt, wenn es um Geschwindigkeit geht. Alles muss schnell sein, jeder Änderungswunsch muss instantan umgesetzt werden.
- Mitarbeiter  
War es früher in eng umgrenzten Räumen, in denen Menschen alle ein Ziel verfolgten, leicht möglich, spontan Kollegen zu fragen, so ist dieses in einem System bestehend aus vielen eigenständig agierenden und auf eigenen Vorteil bedachten Einheiten stark eingeschränkt.
- Ressourcen  
Notwendige Ressourcen sind nicht mehr an einen Ort gebunden und unterliegen nicht mehr der eigenen Verantwortung. Waren früher die Fahrzeuge des eigenen Fuhrparks nach eigenem Gusto einsetzbar, so bedarf es heute Absprachen oder Verhandlungen mit den Besitzern der Fahrzeuge.
- Sendungsstruktur  
Die Größe der Sendungseinheiten wird immer kleiner, wodurch die Anzahl der Sendungen und der damit verbundenen Transporte mit dem dazu gehörenden Koordinationsaufwand entsprechend ansteigt.
- **Komplexität**  
Die Verknüpfung verschiedener Akteure führt zu einer erhöhten Komplexität, die Verwendung von Modulen und standardisierten Bauteilen zu einer Reduzierung.
- Fertigungstiefe  
Welchen Einfluss hat die Fertigungstiefe auf die Anforderungen an die Logistik und die Komplexität der Prozesse? Führt eine geringe Fertigungstiefe zu höheren Anforderungen oder nicht? Dort wo früher das Cockpit eines Fahrzeuges in der Abteilung eines Unternehmens zusammengebaut wurde, wird heute ein komplettes Modul angeliefert. Die Notwendigkeit einer rechtzeitigen Anlieferung an die Produktionslinie ist unabhängig davon, wo das Modul gebaut wird. Mussten früher viele hundert Teile zum Bau eines Cockpits rechtzeitig bereitgestellt werden, so ist es heute ein einziges Modul. Die Komplexität war früher, bei größerer Fertigungstiefe, viel größer.

- **Kundenorientierung**  
Die Entwicklung vom Verkäufer- zum Käufermarkt ist ein kontinuierlicher Prozess, es wird angestrebt, die *build-to-stock*-Produktion in eine *build-to-order*-Abwicklung umzuwandeln. Zu welcher Klasse gehören Werbeaktionen? Da hierfür kein Kundenauftrag, vielleicht nur ein gedachter Kundenwunsch vorliegt, ist dieses kein *build-to-order*-Vorgehen. Macht es Sinn, diese zu streichen, nur weil sie nicht einem Paradigma gehorchen?
- **Automatisierung**  
Die zunehmende Automatisierung kann auch in der Logistik Kosten langfristig senken helfen. Automaten und Roboter unterschiedlicher Ausprägung in Produktionsbereichen machen dieses deutlich, seit langem entwickelte Prozesse und Methoden ermöglichen dieses. Hier kann die Logistik viel aus anderen Bereichen lernen, um Potenziale ähnlich ausschöpfen zu können.
- **Internationalisierung**  
Dieses ist mehr als nur ein Ausdruck für viele neue Möglichkeiten für Beschaffung und Absatz. Sprachen, unterschiedliche Standards, die Vielfalt an Kulturen und Lebenseinstellungen schaffen auch nicht zu unterschätzende Aufgaben.
- **Kostendruck**  
Dieses ist einer der am häufigsten verwendeten Begriffe, schlanke Produktion ein Ergebnis. Sollen neben *lean production* auch *lean logistics* und *lean management* angestrebt werden? Die Vermeidung überflüssiger Prozesse und Prozessschritte aber auch Besprechungen ist eine der zentralen Aufgaben moderner Logistik.
- **Umweltbewusstsein**  
In einigen Ländern schränken Bestimmungen zum Schutz der Umwelt mögliche Aktivitäten ein.
- **Kommunikation**  
Kommunikation erfolgte früher persönlich oder handschriftlich, heute oftmals anonym. Authentizität, Menge und Geschwindigkeit auf der einen und menschliche Fähigkeiten auf der anderen Seite waren aneinander angepasst. Heutzutage gibt es eine Vielzahl von Nachrichten von teilweise unbekanntem Absendern, mit dem Effekt, dass Briefe ungeöffnet im Papierkorb landen und *e-mails* ungelesen gelöscht werden. Das Schreiben von Briefen war aufwendig genug, um überflüssiges nicht das Licht der Welt erblicken zu lassen, zugleich war jeder Brief ohne weiteres Zutun ein Dokument.
- **Anforderungen**  
Nachhaltige und anspruchsvolle Aufgaben, wie z. B. die Sicherstellung effizienter Lieferketten erfordern hochqualifizierte Mitarbeiter, deren Aus- und Weiterbildung viel Geld kostet. Öffentliche Ausbildung in sich schnell ändernden Bereichen auf einem hohen Niveau ist nur mit einem zeitlichen Verzug möglich. Die Fähigkeiten von Absolventen verschiedener Einrichtungen muss als Konsequenz den Anforderungen immer hinterherlaufen. Das früher übliche Erlernen von Methodenkompetenz ist aus der Mode gekommen, es werden praktische Lehrinhalte erwartet. Die hierdurch erlangte Kompetenz verschwindet mit der selben Geschwindigkeit wie die sich ändernden Inhalte. Vergleichbar ist dieses mit dem Ansinnen, das Training von Bundesligisten durch weitere Spiele in der Bundesliga oder der *Champions League* zu ersetzen. Die Zunahme an Anforderungen ist in vielen Bereichen wesentlich schneller als die Zunahme an Qualifikation. Dieses trifft im besonderen Maße auf technische, mathematische, informatische und kulturelle Fragen zu. Der durch ausscheidende Mitarbeiter hervorgerufene Wissensverlust hält weiter unvermindert an und eine vielleicht mögliche Kompensation dieses Verlustes durch rechnergestützte Systeme

liegt in weiter Ferne.

- **Algorithmen**  
In den letzten Jahren ist eine Vielzahl von Algorithmen, wie z. B. heuristische Verfahren oder genetische Algorithmen, entwickelt worden, die auch für nur ungenau, besser unscharf, beschreibbare Probleme optimale Lösungen bestimmbar machen. Vor dem Hintergrund der verfügbaren Rechnerleistungen können nun auch Fragen angegangen werden, die vor einigen Jahren in die Kategorie der nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand zu lösenden Probleme einzuordnen waren.
- **Rechner**  
Mit heute verfügbaren Maschinen können riesige Datenmenge erfasst, aufbereitet und analysiert werden. Das Verhalten realer Systeme kann untersucht werden, ohne in diese eingreifen zu müssen. Simulationen erlauben es, bei einer Entscheidungsfindung unterschiedliche Varianten zu betrachten und zu bewerten.
- **Identifikation**  
Objekte lassen sich entlang eines Weges mit unterschiedlichen Methoden identifizieren. Dieses ermöglicht eine bessere Kenntnis laufender Prozesse und, in Verbindung mit geeigneten Analyseverfahren, ein frühzeitiges Erkennen von zu erwartenden Problemen.
- **Unternehmenskultur**  
Unternehmen werden heutzutage oftmals von Managern und nicht mehr von Unternehmern geführt. Die notwendige Leidenschaft geht dabei verloren wie auch der Bezug zu den Produkten und das Verständnis für Abläufe. Dieses wird ersetzt durch die Fokussierung auf kurzfristige Quartalszahlen, Praxisbezug bezieht sich nur noch auf Anleger, nicht auf den Unternehmensgegenstand. *Return of investment*-Betrachtungen sind wichtiger als Prozessverbesserung und Produktentwicklungen, deren Ergebnisse auch in zwei Jahren Kunden noch begeistern können.

**Weisheit 1.4** *Produkte werden immer noch von Menschen für Menschen hergestellt. Es gibt keine Lieferkette, die vollständig ohne Menschen funktioniert.*

## 1.5 Manufakturen, Ketten, Netzwerke, Bäume

Die Entwicklungen von einer Manufaktur der Vergangenheit zu den Lieferketten oder *supply chains* der Gegenwart sollen an einem kleinen konstruierten Beispiel verdeutlicht werden: Der Produktion einer Flasche Ketchup, die der Kunde eines Supermarktes kaufen möchte. Sicher kann diese in einer kleinen Manufaktur in Einzelfertigung erstellt und dann ausgeliefert werden. Für einen derartigen Kundenwunsch ist die Lieferkette, wie in Abbildung 1.5 zu sehen, klar und eindeutig darstellbar. Der hier gezeigte Ablauf ist im Allgemeinen nur ein einziges Glied in einer langen Kette.

Eine etwas andere Darstellung der Ketchupfertigung ist in Abbildung 1.6a zu sehen. Was unterscheidet diese beiden Abbildungen? Die erste beschreibt den Auftragsdurchlauf aus Produkt- und Datensicht: Der Kundenwunsch wird bekannt, bearbeitet und das fertige Produkt wird ausgeliefert. Die zweite Darstellung zeigt die einzelnen Produkt- oder Produktionsstufen bzw. die dafür zuständigen Akteure. Der durchgezogene Pfeil symbolisiert den Warenfluss. Der Ablauf ist zweifelsohne immer noch linear, so dass die einzelnen Stufen als Glieder einer Kette gesehen werden können.

Sind Abbildungen 1.5 und 1.6a Darstellungen, die alles beschreiben? Sicher nicht. Beide sind unvollständig. Einige der fehlenden Bausteine sind in 1.6b bereits gezeigt. Selbst wenn Ketchup nur für den privaten Bedarf hergestellt wird, ist dieses nicht ohne fremde Hilfe möglich. Die Gefäße, in die der Ketchup abgefüllt wird, muss jemand Fremdes liefern. Soll diese Flasche des aus eigenen Tomaten selbst gemachten Ketchups auch noch verschenkt werden, wird etwas zum Verpacken benötigt, eine Beschriftung der Flasche oder ein Etikett sollten ebenfalls nicht vergessen werden. Der einfache und lineare Verlauf enthält Verzweigungen, eingehende und ausgehende, wie in Abbildung 1.6c gezeigt. Die Assoziation mit einer Kette fällt schwer.

In dieser, allein auf den Kundenauftrag ausgerichteten Abbildung ist noch unklar, wie einzelne Funktionen und Produkte einbezogen werden sollen. Woher kommen die Tomaten? Macht es Sinn, diese Kette mit dem Samen beginnen zu lassen? Dieses ist Ansichtssache. Für denjenigen, der die Tomaten anbaut, ist der Samen entscheidend und sollte nicht vergessen werden. Für diejenigen, die Ketchup für ihr Essen haben möchten, ist der Samen sicher belanglos, auch wenn das Vergessen entlang der kompletten Kette auch für sie einschneidende Auswirkungen haben würde.

Was bedeuten die Glieder in den Darstellungen der Lieferketten, wie können wir diese Darstellungen verwenden? Sie zeigen, in welcher Reihenfolge die einzelnen Komponenten auftreten und wieder verschwinden. Diese **Produktsicht** stellt eine weitere Sichtweise derselben Lieferkette dar. Wird Tomatenmark als Grundstoff für die Herstellung betrachtet, beginnt der Warenfluss beim Großhändler, nicht beim Landwirt. Die Distribution endet im Regal des Supermarktes. Ebenso wie die Lieferkette bis zum Ende der Tomatenmarkfertigung nicht Bestandteil der zu betrachtenden Kette ist, gilt dieses auch für den Transport der Flasche vom Regal des Supermarktes bis in den Kühlschrank des Verbrauchers. Für einen Lieferservice ist dieses hingegen ein wesentlicher Bestandteil.

**Weisheit 1.5** *Die gesamte Lieferkette bleibt immer gleich. Der zu betrachtende Ausschnitt ist anwendungsabhängig.*

Eine andere Sicht, die **Organisationssicht** des selben Prozesses ist in Abbildung 1.6b zu finden. Es handelt sich immer noch um eine Kette, in der sich die Reihenfolge aus der Produktsicht ergibt. Zusätzlich eingefügt ist die Richtung des Informationsflusses.

Was ist das beiden Vorgehensweisen in dieser vereinfachten Beschreibung Gemeinsame? Daten werden immer erst dann an die nächste Stelle weitergeleitet, wenn das dazu gehörende Ereignis bereits eingetreten ist. Bisher wurde der Ketchup unverpackt in den Supermarkt geliefert. Bestellt der Produzent nun auch noch Flaschen und Verpackungen, erhält die Kette Äste. Das System funktioniert nur dann, wenn die Flaschen dann vorhanden sind, wenn der Ketchup zum Einfüllen bereit ist und die Verpackungen verfügbar, wenn die Flaschen abgefüllt sind. Bisher nicht beachtete Paletten werden zur Auslieferung benötigt, Schrumpffolie, Etiketten für die Paletten und andere Kleinteile sollen nur für die Darstellung nicht beachtet werden. Im realen Leben sind diese manchmal als C-Teile unbedeutend bezeichneten Bestandteile ebenso wichtig wie alle anderen.

Sind die zu beachtenden Zweige bei der Ketchupproduktion vielleicht noch überschaubar, so ändert sich dieses bei der Betrachtung eines Autos. Abbildung 1.7a zeigt einen Ausschnitt einer Sicht, in der nur Lieferanten auf der ersten Stufe, die *1<sup>st</sup> tier suppliers*, betrachtet werden. Werden die Lieferanten der Lieferanten, die *2<sup>nd</sup> tier suppliers* oder *1<sup>st</sup> tier suppliers* der *1<sup>st</sup> tier suppliers* hinzugenommen, ergibt sich eine Struktur wie in 1.7b zu sehen: Aus der Kette wird ein

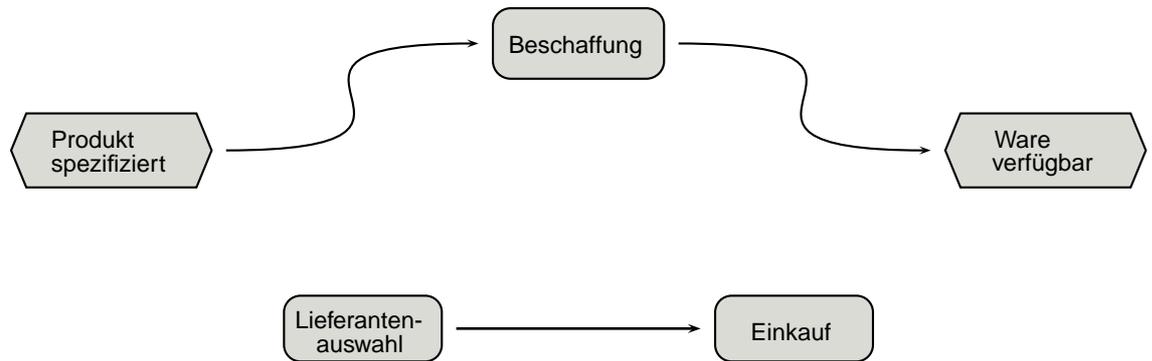


Abb. 1.8: Beschaffung

Netz, es bleibt zu hoffen, dass es ein Baum, ein **Lieferbaum** ist. Logistiker sollten dafür sorgen, dass eine solche Struktur erhalten bleibt.

## 1.6 Verantwortungsbereiche

### 1.6.1 Übersicht und Abgrenzung

Auch wenn Logistik als eine Querschnittsaufgabe mit dem Anspruch eines ganzheitlichen Ansatzes verstanden wird, so kann Logistik nicht alle Aufgaben übernehmen, die es in einem Unternehmen zu erfüllen gibt. Ein Logistiker darf finanzielle Aspekte seines Handelns nicht aus den Augen verlieren, er ist aber sicher weder für Devisenbeschaffung noch für Mahnverfahren verantwortlich, ebenso wenig dafür, dass Verträge mit Mitarbeitern gesetzeskonform abgeschlossen werden.

Stellt die Lieferkette den Rahmen für logistisches Handeln dar, so sind einzelne Elemente konkreter zu beschreiben und abzugrenzen. Für die Unterscheidung von Verantwortungsbereichen und Aufgaben gibt es mehrere Möglichkeiten. Innerhalb der einzelnen in Abbildung 1.4a dargestellten Phasen gibt es unterschiedliche, wiederkehrende Funktionen oder Aufgaben. So sind beispielsweise Lagerhaltung oder Controlling wichtig für alle Phasen. Die einzelnen Funktionen setzen sich wiederum aus mehreren Problemen zusammen: Bei der Lagerhaltung ist es wichtig zu entscheiden, welche Menge wo gelagert wird, wie benötigte Ressourcen eingesetzt werden sollen und wie Waren möglichst effizient zu bewegen sind. Diese Probleme können wiederum vor verschiedenen zeitlichen Horizonten auf sich jeweils ändernder Datenbasis betrachtet werden. Es bieten sich folgende vier Strukturierungsmerkmale an:

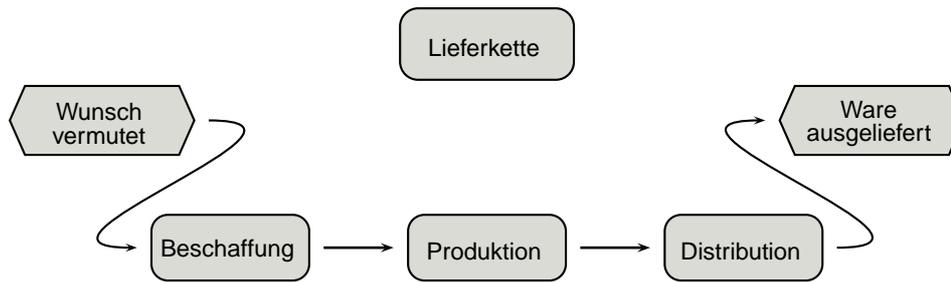


Abb. 1.9: Produktion

- phasenbezogen, und
- funktionsbezogen,
- problembezogen
- zeitbezogen.

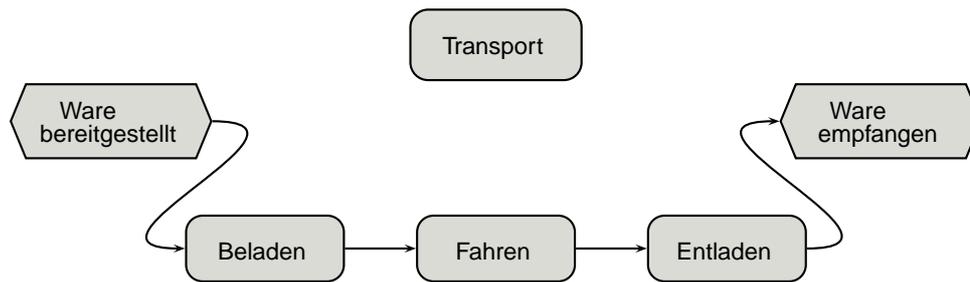
### 1.6.2 Phasenbezogen

Die phasenbezogene Einteilung ist in Abbildung 1.4a dargestellt und soll hier inhaltlich eingegrenzt werden.

- **Beschaffung**  
Die Beschaffung muss dafür sorgen, dass alle benötigten Waren zur Verfügung gestellt werden. Nach Abschluss der Beschaffung kann der Produzent auf die Güter zugreifen. Hierfür ist es ausreichend, dass über eine Rahmenvereinbarung Waren bei einem Lieferanten bereitgestellt werden. Diese müssen nicht vor Ort sein. Das Auswählen von Lieferanten und die Vereinbarungen von Lieferkonditionen und Preisen sind Teile der Beschaffung.
- **Produktion**  
Während der Produktion hat der Ausführende uneingeschränkte Gewalt über Güter und Prozesse bzw. die Prozessergebnisse. Werden einzelne Prozessschritte durch externe Akteure ausgeführt, obliegen diesen die Verantwortlichkeiten für die Schritte dieser Prozesse. Das Ergebnis muss aber von dem Auftraggeber, d. h. dem übergeordneten Produzenten, geprüft und verantwortet werden. Wird der Begriff *Produktion* nicht zu eng verstanden, ist eine Unterscheidung zwischen Handel, produzierenden Unternehmen und Dienstleistungen nicht notwendig.
- **Distribution**  
Mit Beginn der Distribution verlassen die Waren den Verantwortungsbereich des Ausführenden.

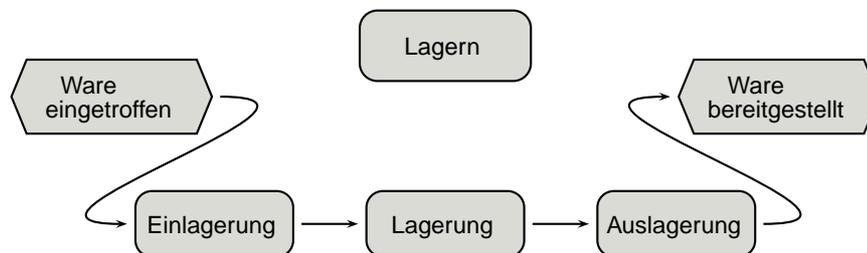
#### **Definition .4 Beschaffung,Produktion,Distribution**

Zur Beschaffung gehören alle Aktivitäten, die notwendig sind, um Waren für den Produzenten verfügbar zu machen. Die Produktion transformiert eingehende Güter in fertige Produkte [GT05]. Die Distribution umfasst die erforderlichen Tätigkeiten, um fertige Produkte zum Kunden zu bringen.



**Abb. 1.10:** *Transport*

Bei allen Definitionen sind jeweils sämtliche Tätigkeiten gemeint, physische, planerische und informatische.

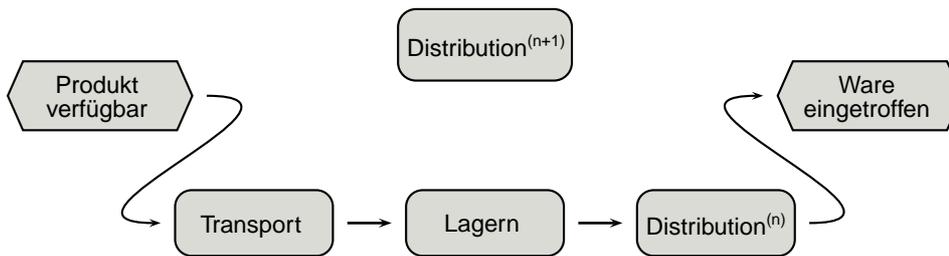


**Abb. 1.11:** *Metaprozess Lagerung - Funktionssicht*

Die in vielen Büchern [z. B. BL98; Sch95] synonym verwendeten Begriffe Materialwirtschaft, Beschaffung und Einkauf werden hier getrennt: Der Einkauf ist Teil der Beschaffung und steht für die kaufmännische Abwicklung des Beschaffungsprozesses, die Festlegung der Materialeigenschaften obliegt der Produktion, Definition der Lieferkonditionen ist Aufgabe der Logistik und das Aushandeln von Preisen Angelegenheit des Einkaufs. Die Auswahl der Lieferanten sollte eine gemeinsam zu entscheidende Frage sein. Materialwirtschaft als alles umfassender Begriff erschwert den Blick auf konkrete Fragestellungen.

In dieser Sichtweise werden keine Zuständigkeiten festgelegt. Ist ein produzierendes Unternehmen für einen Teil der Kette zuständig, so kann ein Handelsunternehmen einen anderen Teil, z. B. die Distribution, verantworten.

Bei dieser phasenbezogenen Betrachtung können **Entsorgungslogistik** oder **Ersatzteillogistik** vermisst werden. Diese sollen natürlich nicht vergessen werden, verlangen aber keine neue oder andere Sichtweise. Ein Ersatzteil ist ein Produkt, das bestellt wird und somit vom Ablauf wie jedes andere Teil zu betrachten ist, auch wenn die Anforderungen bzw. die die Lieferkette beschreibenden Parameter anders sind. Ähnlich verhält es sich mit Entsorgungslogistik. Der Gedanke, dass jemand Müll bestellt, mag abwegig klingen, aber auch hier geht es um eine Ware, in diesem Fall das zu entsorgende Gut, das zu einem Kunden, einem Entsorgungsunternehmen gebracht werden muss.



**Abb. 1.12:** *n*-stufige Distribution Eine einstufige Distribution,  $n = 0$ , ist gleich einem Transportprozess wie in 1.10 dargestellt.

### 1.6.3 Funktionsbezogen

In den einzelnen Phasen gibt es unterschiedliche zu erbringende Funktionen. Hierzu gehören

- Lagerung,
- Transport,
- Bereitstellung,
- Kommissionierung,
- Controlling,
- Disposition,
- Steuerung und
- Lenkung oder Leitung.

Dieses sind Funktionen, die direkt mit dem physischen Warenfluss verbunden sind. Die Planung der Ausführung soll jeweils direkt den einzelnen Funktionen, als eine Teilfunktion, zugeordnet und nicht als eine eigenständige Funktion betrachtet werden.

#### **Definition .5 Lager**

*Lager sind Knoten in einem logistischen Netzwerk, in denen Güter vorübergehend festgehalten und auf einen anderen durch das Netzwerk führenden Weg übergeleitet werden. Güter ändern ihre Eigenschaften nicht [Pfo95]. Unter Lagerung werden alle Aktivitäten zusammengefasst, die in einem Lager erforderlich sind.*

Die Definition des Begriffs Lagerung erscheint auf den ersten Blick der einer Funktion zu widersprechen. Ein Lager macht zunächst einmal nichts anderes als nichts zu machen: Es hält auf. Ob es möglich ist, die Funktionsfähigkeit einer Lieferkette ohne Lagerhaltung sicher zu stellen, wird an späterer Stelle nochmals aufgegriffen. Um die Bedeutung innerhalb der Lieferkette beurteilen zu können, werden hier die unterschiedlichen Aufgaben, die an ein Lager gestellt werden, beschrieben [Sch95]:

- Ausgleich von schwankenden oder nicht synchronen Angeboten und Nachfragen
- Auflösen und Konzentrieren von Warenströmen in einem **Auflöse-** oder **Konsolidierungspunkt** bzw. *break bulk* oder *consolidation point*.
- Das Ausnutzen von Mengeneffekten, um Waren in gegebenen Losgrößen oder in Mengen einkaufen zu können, die niedrigere Preise ermöglichen.

Die Wahrnehmung von Veredelungs- oder Spekulationsaufgaben kann auch eine Rolle spielen, ist jedoch nicht aus logistischer Sicht zu betrachten.

Logistikübergreifend ist Controlling in vielen Bereichen eines Unternehmens zu finden. Für dieses Buch soll für das Controlling folgende Definition Gültigkeit haben:

**Definition .6 Controlling**

*Unter Controlling werden Erfassung, Analyse und Aufbereitung von Prozessdaten zusammengefasst.*

Planung und Steuerung von Prozessen sind kein Bestandteil des Controlling. In vielen Darstellungen beschränkt sich das Controlling ausschließlich auf die Erfassung und Analyse von Daten und ist somit stark vergangenheitsorientiert. Diese Beschränkung muss modifiziert werden. Durch die Schaffung einer auf abgeschlossenen Prozessen basierenden ausreichenden Daten- und Wissensgrundlage ist die Möglichkeit gegeben, die Qualität künftiger Tätigkeiten zu verbessern. Daten dürfen nicht mehr nur ermittelt und analysiert werden, sondern müssen aufbereitet einem **Datenkreislauf** zugeführt werden, an dem einzelne Akteure auch zukünftig teilhaben können.

**Definition .7 Transport**

*Transport ist jede aktive oder passive Überwindung räumlicher Abstände.*

Hiermit ist auch das Fließen einer Flüssigkeit durch eine Pipeline ein Transport, ebenso wie das eigenständige Rutschen eines Objektes von einer Ebene auf eine andere erfasst.

**Definition .8 Kommissionieren**

*Kommissionieren ist das Zusammenstellen von unterschiedlichen Artikeln zu einer neuen Einheit [Koet04].*

Konzentrieren oder Konsolidieren sind somit mögliche Elemente des Kommissionierens. Die Materialbereitstellung kann mit den bis hierher definierten Funktionen als ein zusammengesetzter Prozess verstanden werden.

- a. Das benötigte Material wird aus einem Lager geholt – dieses sind ein oder mehrere Transportvorgänge.
- b. Die benötigten Positionen werden zu einer Transporteinheit zusammengefasst – hierbei handelt es sich um eine Kommissionierung.
- c. Diese Einheit wird an die richtige Stelle gebracht – ein weiterer Transportvorgang wird realisiert.

Zusammengefasst kann die Bereitstellung folgendermaßen definiert werden:

**Definition .9 Bereitstellung**

*Unter Bereitstellung soll das zur Verfügung Stellen des zur Weiterverarbeitung benötigten Materials an einem Arbeitsplatz verstanden werden.*

Die Bereitstellung von Material ist ein Teil der Produktions- und nicht der Beschaffungsphase. Hierdurch wird es ermöglicht, dass die Beschaffung für eine Vielzahl von Teilen einmal durchgeführt wird und dann abgeschlossen ist und die Bereitstellung als Teil der Produktion für jede neu zu produzierende Menge betrachtet werden kann. Als Folge dieser Betrachtungsweise wird dann aus einer *produktionsynchronen Beschaffung* [Pfo95] eine **produktionssynchrone Bereitstellung**. Der Konflikt zwischen den zeitlich sehr unterschiedlichen Betrachtungshorizonten von Beschaffung und Materialversorgung einer Produktionslinie ist damit aufgelöst.

**Definition .10 Disposition**

*Bei der Disposition handelt es sich es um die zeitnahe Zuordnung von Aufgaben oder Gütern zu Ressourcen.*

Die Disposition muss festlegen, welche Waren mit welchem Lkw befördert werden sollen und welcher Fahrer welchen Lkw fahren soll.

#### 1.6.4 Problembezogen

Die in dem letzten Abschnitt vorgenommene Unterteilung bezog sich auf Tätigkeiten, bei denen die Umsetzung und nicht die Planung im Vordergrund steht. Im folgenden sollen logistische Fragestellungen in Problemklassen aufgeteilt werden. Eine erste Gliederung kann nach atomaren und zusammengesetzten Fragestellungen erfolgen. Als atomar sollen all die verstanden werden, bei der eine einzige Frage, wie z. B. „Wie muss ich fahren, damit ich alle Kunden in einer möglichst kurzen Zeit aufsuchen kann?“, gestellt wird. Bei den zusammengesetzten sind stets mehrere der atomaren Probleme zu lösen: Soll der Einsatz von Gabelstaplern optimiert werden, so sind die Standorte von Gabelstaplern und Austauschbatterien ebenso zu berücksichtigen wie die Fahrwege zwischen den verschiedenen Lagerplätzen. Zu den atomaren Problemen gehören

- Regressionsanalyse,
- Bestimmung kürzester Wege,
- Standortplanung,
- Routenplanung,
- Transportplanung,
- Packproblematik,

und zu den zusammengesetzten

- Bestandsmanagement,
- Ressourcenplanung,
- Datenanalyse und
- Prognose.

Da auf all diese Fragen auf den folgenden Seiten des Buches ausführlich eingegangen wird, soll hier keine weitere Diskussion erfolgen.

+1



*Nichts ist leichter, als so zu schreiben, dass kein Mensch es versteht; wie hingegen nichts schwerer ist, als bedeutende Gedanken so auszudrücken, dass jeder sie verstehen muss.*

Arthur Schopenhauer

# 2

## Systeme, Modelle und Prozesse

### 2.1 Planung und Prognose – eine notwendige Partnerschaft

Zwischen der Anfrage eines Kunden oder der ersten Idee für ein Projekt, der damit verbundenen Formulierung einer Aufgabe, dem *start of production (SOP)* und der abgeschlossenen Realisierung liegen oftmals Tage, Monate oder sogar Jahre. Für die Erledigung dieser Aufgabe werden möglicherweise mehrere Personen, verschiedene Werkzeuge und Hilfsmittel benötigt, die nicht ständig und auf Abruf zur Verfügung stehen. Zeit- und Geldbedarf müssen bestimmt und die Deckung sichergestellt werden.

#### **Definition .11 Plan und Planung**

*Ein Plan ist eine Menge von Anleitungen, mit denen eine definierte Aufgabe zielgerichtet bearbeitet werden kann. Die Aufgabe, eine Folge von Aktionen zu finden, die ein Ziel erreichen, wird als Planung bezeichnet [RN04].*

Nach [FMW00] können die folgenden verschiedenen Phasen der Planung definiert werden:

- Erkennung und Analyse eines zu entscheidenden Problems,
- Definition der Ziele und Zielsetzungen,
- Auswahl und Bewertung möglicher Aktivitäten und Lösungen  
und
- Auswahl guter bzw. der geeignetsten Lösung.

Pläne können sehr unterschiedlich sein: Die Bauanleitung für einen einfachen Küchentisch, ein Kochrezept, die persönliche Lebensplanung oder eine optimale Route für eine Fahrt von Hamburg nach München sind Beispiele. Können Pläne vollständig sein und alle Eventualitäten bedacht werden, wenn nur sorgfältig genug gearbeitet wird? Die Anschläge vom 11. September 2001 auf das *world trade center* in New York zeigten, dass dieses nicht immer möglich

ist. Es ist nicht bedacht worden, dass Entführer weder politische Forderungen artikulieren noch Lösegeld fordern.

**Weisheit 2.1** *Es gibt in der Natur kein perfektes System. Jedes Erreichen einer Größe zu 100 % ist nur mit unendlich hohem Aufwand möglich.*

Macht es dennoch Sinn, für Aktivitäten, wie einen Transport oder den Bau einer Maschine, einen Plan zu erstellen? Eine Planung ist zunächst problemlos durchführbar, Unstimmigkeiten oder Fehler treten erst bei einer möglichen Umsetzung bzw. dem Versuch einer Umsetzung auf.

**Weisheit 2.2** *Das Minimalziel einer Planung ist es, bei der Umsetzung das angestrebte Ziel zu erreichen.*

Planungen können durch unterschiedliche Einflüsse behindert werden:

- Ziele werden falsch oder unzureichend definiert,
- mögliche Ereignisse werden nicht bedacht,
- Zusammenhänge werden nicht erkannt,
- Zusammenhänge werden falsch betrachtet,
- Daten werden vergessen  
oder
- falsch verwendet.

Zur Beantwortung der Frage, ob es besser ist, geplant oder ungeplant vorzugehen, sollen ausgewählte Beispiele als Vertreter unterschiedlicher Problemklassen diskutiert werden.

**Beispiel .1 Eine Einladung nach München - Variante I**

*Es ist 10:00Uhr morgens. Sie sitzen in einem Hamburger Büro und erhalten eine telefonische Einladung für ein Essen in München, das am selben Tag mittags um 12:00Uhr beginnen soll.*

**Beispiel .2 Eine Einladung nach München - Variante II**

*Es ist 10:00Uhr morgens. Sie sitzen in einem Hamburger Büro und erhalten eine telefonische Einladung für ein Essen in München, das am selben Tag abends um 20:00Uhr beginnen soll.*

**Beispiel .3 Wettervorhersage**

*Für eine Betriebsfeier im September des kommenden Jahres soll eine Bootstour organisiert werden. Zur Auswahl stehen der erste oder zweite Montag im September. Wegen der großen Anzahl der Mitarbeiter sind die Boote bereits jetzt zu buchen. Wenn die Buchung fest vorgenommen wird, räumt der Verleiher einen Rabatt von 15 % ein.*

**Beispiel .4 Der perfekte Weg zum Lottomillionär**

*Es soll die perfekte Vorgehensweise bestimmt werden, am nächsten Wochenende Lottomillionär zu werden.*

**Beispiel .5 Transport von Geld- und Wertsachen**

*Ein Unternehmen transportiert Geld und Wertsachen. Um die Kosten zu senken, sollen die Fahrtrouten optimiert werden.*

**Beispiel .6 Die Produktion von Ketchup**

*Eine Handelskette möchte, dass jeder Kunde die Menge Ketchup in ihren Regalen vorfindet, die er kaufen möchte. Der Preis soll niedriger sein als der der Wettbewerber.*

Die Lösung für Beispiel .1 ist trivial: Es gibt keine. Jeder noch so geringe Aufwand, der in eine Planung investiert werden würde, ist Verschwendung.

**Weisheit 2.3** *Für unlösbare Probleme ist jede Planung Verschwendung. Es ist wichtig, frühzeitig zu erkennen, ob ein Problem lösbar ist oder nicht.*

Beispiel .2 beschreibt weder ein unlösbares Problem noch eines, bei dem der Ausgang vollkommen unbestimmt ist. Hier kann die Fahrt entweder auf der Grundlage von Erfahrungen oder mit einem gängigen Tourenplanungsprogramm geplant werden. Es gibt mehrere Alternativen, aus denen die beste ausgewählt werden kann.

**Weisheit 2.4** *Für viele Probleme gibt es mehrere Pläne, aus denen der Mensch die beste oder eine gute Alternative auswählen kann.*

Die Frage nach dem richtigen Wochenende für die Bootstour ist nicht zu beantworten, da das Wetter für ein Wochenende des nächsten Jahres nicht vorausgesagt werden kann. Hier lassen sich aber zweifelsohne Alternativen oder zumindest Notfallstrategien finden, die die Durchführung des Betriebsausfluges dennoch möglich machen.

Eine Möglichkeit, einen Plan für die Lösung des Beispiels .4 zu finden, ist wiederum einfach. Es werden die Zahlen genommen, die bereits die Großeltern vor fünfzig Jahren getippt haben oder die häufigsten der letzten 55 Ziehungen. 55, damit mit Sicherheit eine Sylvesterziehung berücksichtigt wird. Beide Pläne sind gleich gut oder auch gleich schlecht. Der beste Plan lautet: Wähle sechs verschiedene Zahlen. Der beste, weil dieser bei gleichem Ergebnis der mit dem geringsten Aufwand ist.

**Weisheit 2.5** *Sind Ereignisse unabhängig voneinander und zufällig, besteht die perfekte Planung darin zu würfeln.*

Für den Transport von Geld- und Wertsachen ist es sicherlich auch möglich, mit verfügbaren Programmen optimale Fahrtrouten zu ermitteln. Soll dieses auch durchgeführt werden? Da Diebe Zugang zu denselben Programmen haben, können diese die Fahrstrecke auch berechnen und einen Überfall hervorragend vorbereiten, d. h. planen. Hier kann die Planung effizienter Prozesse kontraproduktiv wirken, da der Ablauf für alle vorhersehbar wird.

**Weisheit 2.6** *Auch wenn Planungen Abläufe verbessern können, kann es notwendig sein, diese nicht durchzuführen bzw. so, dass Außenstehende nicht erkennen, dass bzw. wie geplant wurde.*

Für die Versorgung des Supermarktes mit Ketchup stellt sich das Problem als schwer und einfach zugleich dar. Schwer wegen seiner Komplexität, einfach, weil es schon vielfach realisiert wurde.

**Weisheit 2.7** *Für regelmäßig wiederkehrende Vorgänge kann ein Plan durch Abschreiben erstellt werden. Für alle anderen zusätzlich erstellten Pläne gibt es hiermit mindestens eine Vergleichsmöglichkeit aus der Vergangenheit.*

Abgesehen von der Mittagseinladung in München können bei allen anderen Problemen Planungen helfen. Im Fall des Lottos ist Planbarkeit eine Frage der Sichtweise. Stellt sich Lotto für einen Spieler als unplanbar dar, so sieht dieses für die Betreiber ganz anders aus. Sie haben zwei Verbündete, das Sportwetten- und Lottogesetz und das Gesetz der großen Zahl. In dem ersten Gesetz wird festgelegt, dass nur ein fester Anteil des Einsatzes als Gewinn ausgeschüttet wird. Selbst wenn an einem Spieltag auf allen Scheinen die richtigen Zahlen stehen würden, macht die Lottogesellschaft immer noch Gewinn. Auch ein kollektiv abgesprochenes Spielverhalten, bei dem alle Teilnehmer die richtigen Zahlen tippen, stellt keine Gefahr dar.

Dort, wo Akteure Ereignisse beeinflussen, kann Planung ganz einfach werden. Lottogesellschaften können per Gesetz keine Verluste machen, eine phantastische Planungsgrundlage. Anders sieht es aus, wenn Ereignisse so beeinflusst werden, dass nur einige Beteiligte davon wissen. Ergebnisse von Fußballspielen, bei denen der Torwart der Heimmannschaft ein Tor mehr zulassen wird als die eigene Mannschaft schießt, erscheinen für nicht Eingeweihte überraschend, oder nicht vorhersehbar, für Eingeweihte sind sie das Ergebnis einer zielgerichteten Planung und deren Realisierung. Für Kunden eines Wettbüros, die die Beeinflussung nicht kennen, eine Situation, die sie meiden sollten. Unterschiedliche Informationen der Beteiligten, oder **asymmetrische Informationen** beeinflussen Planungen entscheidend.

Hier ist es wichtig zu analysieren, welche Gesetzmäßigkeiten einem Vorhaben zugrunde liegen, wer Einfluss nehmen kann und will und welche unabänderlichen Größen einwirken können. Witterung ist stets wichtig, wenn es um Transporte und Verkehr geht, natürlich auch Veranstaltungen und Aktionen. Dieses kann durch das **Beobachten** laufender Aktivitäten und der Umwelt erkannt werden.

Beobachtungen helfen nicht nur, sie sind zwingend notwendig, die Einflüsse für künftige Planungen besser zu verstehen. Dieses umfasst Beobachten im Sinne von Sehen und Analysieren, eine Aufgabe, in der Menschen von Maschinen hervorragend unterstützt werden können. Beobachtungen liefern indes nicht immer die absolute Wahrheit, die Schilderungen dieser noch weniger. Wenn je ein Bewohner aus Shanghai und der Insel Langeoog die Verkehrsdichte auf einem Autobahnteilstück zwischen Hamburg und München beschreiben, ist, auch bei identischem Sachverhalt, kaum mit gleichem Inhalt zu rechnen. Die Zusammenfassung mehrerer Beobachtungen durch Unbeteiligte hat oftmals wenig mit dem Beobachtungsgegenstand zu tun. Die Kant'sche Aussage, dass die Welt, wie sie eigentlich ist, sich ganz erheblich von dem unterscheidet, wie Menschen sie wahrnehmen, hat immer noch Gültigkeit. Zusätzlich zu der Subjektivität ist immer zu bedenken, dass Beobachtungen Momentaufnahmen eines kleinen räumlichen Gebietes sind.

Wenn eine gute Planung durchgeführt werden soll, müssen zusätzlich zur Beobachtung und Analyse offene und versteckte Zusammenhänge erkannt werden, um auf künftige mögliche Verhaltensweisen oder Ereignisse schließen zu können.

Bei vielen Fragen des wirtschaftlichen Handelns und somit auch der Logistik haben wir es mit gleichen Gesetzmäßigkeiten zu tun: Die Reaktion von Verbrauchern auf Rinderwahn ist ähnlich wie die auf Vogelgrippe. Planungen und die Verfolgung der Realisierung ermöglichen es, diese Gesetzmäßigkeiten und Abweichungen zu erkennen. Die Beobachtung verwandter Bereiche und entscheidender Umweltfaktoren liefert relevante externe Einflüsse. Mit diesen Kenntnissen kann aus dem Verhalten von Systemen in der Vergangenheit auf Ereignisse in der Zukunft geschlossen

und die Sicherheit bzw. Unsicherheit dieses Schließens abgeleitet werden: Es können Prognosen erstellt werden.

**Definition .12 Prognose**

*Prognosen sind Vorhersagen für das mögliche Eintreten zukünftiger Ereignisse unter Berücksichtigung von Daten und Erfahrungen aus der Vergangenheit.*

Das Nennen der Lottozahlen des kommenden Samstags ist folglich keine Prognose, die Anzahl der am kommenden Samstag einen Supermarkt aufsuchenden Kunden kann eine Prognose sein. Auch wenn Daten erfasst und analysiert, Zusammenhänge erkannt werden und die Beteiligten ständig lernen, bleibt vieles unsicher. Im Beispiel .2 gibt es viele Unwägbarkeiten. Die, die vielleicht nicht bedacht werden müssen, wie z. B., dass das Auto auf der Fahrt mit einem Motorschaden liegen bleibt. Die Wahrscheinlichkeit hierfür ist nicht null, aber wie soll dieses Ereignis in eine Planung eingebracht werden? Auch bei der Nutzung eines fakrikneuen Leihwagens bleibt die Wahrscheinlichkeit von null verschieden. Wenn das Essen von herausragender Wichtigkeit ist, könnte eine weitere Person gefragt werden, mit einem zweiten Fahrzeug das erste zu begleiten, und im Fall eines Motorschadens dieses Auto zur Verfügung zu stellen. Dieses reduziert die Wahrscheinlichkeit, dass das Ziel wegen eines defekten Motors nicht erreicht wird, erheblich. Planungs-, Organisationsaufwand und Kosten steigen erheblich. Ob ein zweites Fahrzeug zu berücksichtigen ist, hängt von der Zielstellung ab: Mit welcher Wahrscheinlichkeit soll sichergestellt werden, dass wir rechtzeitig ankommen?

Dann gibt es die Einflussgrößen, die berücksichtigt werden können und müssen. Ereignisse wie Tankstopps sind planbar. Wann getankt werden muss, lässt sich mit einer gewissen Unsicherheit berechnen. Wo die nächste Tankstelle auf einer Autobahn zu finden ist, wird häufig genug angezeigt, ungefähre Abstände sind bekannt. Wann tatsächlich getankt wird, hängt vom Fahrer ab. Er kann auf Nummer sicher gehen und so rechtzeitig tanken, dass sichergestellt ist, stets genügend Benzin im Tank zu haben oder risikofreudig stets die letzte mögliche Tankstelle anfahren, um die Anzahl der Tankstopps gering zu halten. Konsequenzen sind, dass zu häufig getankt und damit zu viel Zeit verbraucht wird oder dass das Fahrzeug hundert Meter vor einer Tankstelle liegen bleibt, vielleicht weil es bedingt durch einen Stau mehr verbraucht hat als geplant. Dass ein Auto bei einer Fahrt auf der Autobahn bei Höchstgeschwindigkeit oder im Stau stehend mehr Treibstoff verbraucht als auf einer Fahrt, die über Land führt, ist bekannt. Wie sehr das Nutzen der Kenntnisse über Fahrverhalten und Treibstoffverbrauch perfektioniert ist, zeigen moderne Autorennen, bei denen die richtige *Tankstrategie* den Ausgang eines Rennens beeinflusst.

Staus gehören zu den Ereignissen, für die heute nicht bekannt ist, ob sie sich morgen bilden oder nicht. Aber auch hier herrscht nicht vollkommene Unwissenheit. Die Stauwahrscheinlichkeit hängt von

- der Länge der Fahrstrecke,
  - der Streckenführung,
  - der Tageszeit
- und
- der Jahreszeit bzw. von Urlaubs- und Ferienzeiten ab.

Hinzu kommen Baustellen, Einflüsse, die erfassbar sind. Während der Fahrt gibt es keine Wahrscheinlichkeiten mehr: Entweder es gibt einen Stau oder nicht. Falls einer gemeldet wird, ist die Entscheidung zu treffen, auf der Autobahn zu verbleiben oder eine Umleitung zu wählen. Werden alle möglichen Einflüsse und Alternativen mit allen Kombinationsmöglichkeiten betrachtet,

übersteigen die Planungsvarianten schnell die Möglichkeiten menschlicher Gehirne, die Auswirkungen möglicher Überlegungen erst recht. Es handelt sich um eine *ja-nein*-Entscheidung, es kann nicht ein bisschen Umleitung gefahren werden. Die Kenntnis der zu erwartenden Verzögerung auf der geplanten Strecke ist mit der auf einer möglichen Umleitungsstrecke zu vergleichen.

Hier kommen Rechner ins Geschäft: Sie schaffen es, eine gewaltige Anzahl von Möglichkeiten in kurzer Zeit zu betrachten, zu analysieren und zu bewerten. Es können verschiedene Szenarien betrachtet oder Experimente mit verschiedenen Alternativen durchgeführt und deren Ergebnisse miteinander verglichen werden. Könnten die Rechner verschiedener Fahrzeuge vor, im und hinter dem Stau miteinander kommunizieren, ließen sich online -Planungen für die unmittelbare Zukunft durchführen. Auch hier stellt sich die Frage nach den Interessen der Akteure. Der Inhalt der Kommunikation kann davon abhängig sein, ob die Rechner befreundet oder konkurrierend sind oder als neutral agierende Datenlieferanten programmiert sind.

Um beantworten zu können, welche Alternative gut ist, muss Einigkeit darüber bestehen, was unter dem Ergebnis eines Szenarios verstanden und was als gut bezeichnet werden soll. Oftmals sind qualitativ und quantitativ beschreibbare Größen gleichzeitig zu betrachten. Es werden, unabhängig davon, ob Rechner genutzt werden oder Menschen entscheiden, Bewertungskriterien benötigt. Ist ein nicht entgangenes Essen so viel wert wie die Kosten für die zweite Fahrt und die entgangene Freizeit des Bekannten? Oder ist dieser ein Autonarr, für den die Fahrt Vergnügen ist. Kann eine zweite Fahrt auch dann noch gerechtfertigt werden, wenn durch diese nicht einmal zu 100 % sichergestellt werden kann, dass die Ankunft rechtzeitig ist? Zu betrachten sind **Fehlmengen-** oder auch **Opportunitätskosten**. Nun sollte auch noch berücksichtigt werden, dass sich beide Fahrer abstimmen müssen, da die Tankzyklen anders sind. Was nützt es, wenn das Ersatzfahrzeug im Stau hundert Fahrzeuge hinter dem ersten steht, weil es an einer Zapfsäule warten musste?

Es gibt bei Planungen vieles zu bedenken: Es sind Annahmen und Vereinfachungen zu treffen, die aus der praktischen Anwendung kommen müssen, nicht aus mathematischer Theorie und nicht aus der Informatik – eine weitere Notwendigkeit zur Interdisziplinarität.

## 2.2 Planen, Steuern, Regeln und Lenken

Alles bisherige war Spielerei: Gedanken oder Simulationen auf einem Rechner verursachen weder Kosten noch Schaden und bringen keinen Gewinn – vielleicht Freude. Irgendwann muss der Plan, der von den Planenden als der beste benannt wurde, in die Praxis umgesetzt werden. Dann werden Wahrscheinlichkeiten zu Realitäten: Der Stau, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 20 % angenommen wurde, ist nun da oder nicht. Ist dieses Phänomen vergleichbar mit *Schrödingers Katze*, bei der bis zum Öffnen der Tür die Ungewissheit weder zu noch abgenommen hat? Ganz und gar nicht. Während des Fahrens können zusätzliche Informationen gewonnen und neue Planung getreu des *postponement*-Prinzips durchgeführt werden.

Zur Verdeutlichung sollen für die Abendeinladung nach München verschiedene Alternativen verglichen werden. Das Ziel einer jeden Planung soll es sein, einen Abfahrtszeitpunkt und Vorgaben für die Fahrweise so zu ermitteln, dass ein rechtzeitiges Eintreffen bei möglichst später Abfahrt sehr wahrscheinlich ist. Die Höchstgeschwindigkeit  $v_{\max}$  des benutzten Autos betrage 200 km/h, die Entfernung von München nach Hamburg 780 km. Die Erfahrung sagt, dass eine Durchschnittsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  von 120 km/h realistisch ist, wenn, soweit möglich, mit einer Geschwindigkeit  $v$  von 180 km/h gefahren wird. Könnte  $\bar{v}$  erreicht werden, würde die Fahrzeit

6h30' betragen. Um pünktlich am Ziel anzukommen, wird folgende Handlungsanweisung für die Fahrt formuliert:

### **Regel 2.1 Steuerung**

*Beginne die Fahrt um 13:30Uhr. Fahre mit einer Geschwindigkeit  $v$  von 180 km/h oder mit der durch äußere Einflüsse vorgegebenen  $v^{(ext)}$ .*

Diese Vorgabe ist sehr einfach umzusetzen. Was ist der Nachteil bei diesem Vorgehen? Tritt einmal eine übermäßige Verzögerung ein, wird die verlorene Zeit nicht mehr aufgeholt, obwohl das Auto dieses durchaus leisten könnte.

Eine alternative Planung besteht darin, mit einem Routenplanungsprogramm eine Route für die Fahrt von Hamburg nach München berechnen zu lassen. Diese Planung wird mit einer Geschwindigkeit, die unterhalb der Höchstgeschwindigkeit des benutzten Autos liegt, durchgeführt. Auf der geplanten Strecke werden an markanten Punkten oder besser in festen Abständen von beispielsweise 20 km die Zeiten angeben, die erreicht werden müssten, um rechtzeitig in München anzukommen. An jedem dieser Punkte wird während der Fahrt die tatsächliche Durchgangszeit mit der geplanten verglichen und die Geschwindigkeit gegebenenfalls geändert. Die Anweisung für den Fahrer lautet in diesem Fall:

### **Regel 2.2 Einfache Regelung**

*Fahre jeden Streckenabschnitt mit einer Geschwindigkeit so, dass das Ende des aktuellen Abschnittes pünktlich oder mit möglichst geringer Verspätung erreicht wird.*

Nehmen wir an, dass die Planung wieder auf einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 120 km/h basierte, somit für einen Abschnitt von 20 km zehn Minuten geplant wurden und eine Verzögerung von einer Minute eingetreten ist. Dann müsste der nächste Abschnitt in neun Minuten, also mit einer Geschwindigkeit  $v$  von ungefähr 133 km/h, bewältigt werden. Bei einer Verzögerung von fünf Minuten müsste die Geschwindigkeit bereits 240 km/h betragen, was mit dem zur Verfügung stehenden Fahrzeug nicht möglich ist.

Die obige Regel ist nicht ausreichend, da hier als Ergebnis eine Geschwindigkeit vorgeschlagen werden könnte, die über der Höchstgeschwindigkeit des Autos liegt. Eine alternative Vorgabe ist die folgende:

### **Regel 2.3 Geschwindigkeitsregelung**

*Bestimme eine Geschwindigkeit  $v_t$  so, dass beim Fahren mit dieser Geschwindigkeit das Ende des aktuellen Abschnittes pünktlich erreicht werden würde.*

*Fahre den folgenden Streckenabschnitt mit der Geschwindigkeit  $v = \min(v_{max}, v_t)$ .*

Im Unterschied zu der Steuerung wird bei einer Regelung auf sich ändernde Gegebenheiten reagiert.

### **Definition .13 Regelung und Steuerung**

*Regelung ist die Lenkung von Prozessen unter Berücksichtigung von Ergebnisinformationen. Nach DIN 19226 wird die zu regelnde Größe erfasst und mit der Führungsgröße verglichen. Die Regelgröße beeinflusst sich selbst. Diese Rückkopplung fehlt bei der Steuerung.*

Höchstgeschwindigkeit	P	maximale Zuladung	P
Transportgut	P	Tankvolumen	P
Anzahl Fahrspuren	P	Tankinhalt	Z
geplante Durchgangszeit	S	Verkehrsdichte	Z
Abweichung vom Plan	Z	aktuelle Geschwindigkeit	Z

**Tab. 2.1:** Parameter (P), Zustandsgrößen (Z) und Sollgrößen (S) für Fahrplanung

In vielen Fällen ist dieses immer noch nicht ausreichend. So kann in den Verkehrsnachrichten gemeldet werden, dass auf der noch zu befahrenden Strecke ein Unfall passiert ist, der zu einem Stau führt. Obwohl der Plan bisher eingehalten wurde, kann es sinnvoll sein, schneller als vorgesehen zu fahren, um eine zu erwartende Verzögerung bereits im Vorfeld ausgleichen zu können. Dieses ist das Ergebnis einer Vorhersage oder Prognose, die sagt, dass ein zukünftig zurückzulegender Streckenabschnitt langsamer zurückgelegt werden könnte als geplant. Es wird nicht erwartet, bis der Stau real auftritt, sondern die aktuelle Vorgehensweise wird auf der Grundlage einer Vorhersage geändert. Ein solches Handeln soll als **proaktives Handeln** oder Lenkung bezeichnet werden.

**Fahrausweis bitte  
unaufgefordert  
vorzeigen.**

(a) Hinweis an einem Linienbus

**Benutzung dieses Weges  
bei Schnee und Eis  
auf eigene Gefahr**

(b) ... und auf einem Parkweg

**Abb. 2.1:** Beispiele praktischer Anweisungen bzw. Hinweise

#### **Regel 2.4 Proaktives Handeln oder Lenkung**

*Nimm als Abweichung vom Plan die aktuelle und die durch den Stau zu erwartende Verzögerung. Verfahre wie bei der Regelung in Regel 2.3.*

Auch wenn dieses kompliziert aussehen mag, ist es als Rechnerprogramm sehr einfach umzusetzen. Auch Geschwindigkeitsbegrenzungen können noch berücksichtigt werden, falls diese bekannt sind.

Der Begriff *Lenkung* wird eingeführt, um Missverständnisse mit den etablierten Begriffen Steuerung und Regelung zu vermeiden.

#### **Definition .14 Lenkung**

*Lenkung ist das Durchführen von Prozessen auf der Grundlage eines Vergleiches von Soll-Größen mit Ist-Größen und zu erwartenden Größen.*

Wie würde ein ungeplantes Vorgehen für die Fahrt von Hamburg nach München aussehen? Die Fahrt beginnt irgendwann auf irgendeinem Weg, der durch den Sonnenstand vorgegeben wird mit einer durch den Wind vorgegebenen Geschwindigkeit und endet irgendwann irgendwo.

In vielen Diskussionen und Büchern wird darauf hingewiesen, dass die überholte Praxis einer auf Druck basierenden Logistik zugunsten einer modernen auf Zug oder Sog reagierenden ersetzt werden muss. Was bedeuten diese Prinzipien für die Fahrt nach München? Druck- und Sogprinzip würden zur gleichen Realisierung führen: Es wird immer mit Vollgas gefahren.

**Weisheit 2.8** *Regelung und Lenkung machen die Unterscheidung nach Sog- oder Druckprinzip überflüssig.*

Oftmals wird der Wunsch nach Planung mit dem Vorwurf konfrontiert, dass alles vorhersehbar wird und jegliche **Spontaneität** fehlt, die vielfach vonnöten ist, um nicht in allen Situationen durchschaubar zu sein. So wäre es fatal, wenn der Werttransport aus Beispiel .5 seine Tour zwischen den verschiedenen Filialen der Banken einer Stadt stets in ein- und derselben Reihenfolge planen und dann danach auch fahren würde. Diese Route wäre natürlich bis in das letzte Detail von möglichen Dieben vorhersehbar. Hier hilft die Integration zufälliger oder situationsabhängiger Entscheidungen in den Planungsprozess, die eine Lösung zufällig aussehen lassen, auch wenn sie vollständig nach festen Regeln geplant wurde. So können zehn verschiedene Routen bestimmt werden. Jeden Morgen wird die Temperatur vor einem Bürofenster gemessen und dann die erste Nachkommastelle benutzt, um eine der zehn Touren auszuwählen. Selbst wenn die Diebe herausfinden, wie die Touren ermittelt wurden, bleibt ihnen verschlossen, welche gefahren wird. Um es den Dieben noch weiter zu erschweren, kann ein sehr schlechtes aber nicht defektes Thermometer verwendet werden. Die Tagestour bleibt ein geplanter Vorgang, auch wenn die Realisierungen sehr unterschiedlich sein können. Das Verhalten wird ebenso wenig vorhersagbar wie die Lottozahlen, abgesehen von der Anzahl der Möglichkeiten. Um die Anzahl der Möglichkeiten zu erhöhen, könnten überall dort Zufallsentscheidungen zum Tragen kommen, wo auf der Fahrt zwischen verschiedenen Alternativen entschieden werden kann. Wird statt der Temperatur die Uhrzeit, die der Bordrechner anzeigt, als Entscheidungsgrundlage verwendet, kann eine vollkommen automatisierbare Planung realisiert werden, deren Ergebnis für Beobachter nicht vorhersagbar ist.

## 2.3 Prozessbeschreibungen

Zunächst sollen einige Handwerkszeuge vorgestellt werden, die zum Planen erforderlich sind. Das erste Werkzeug ist der **Skelettierer**: Dieser befreit den Betrachtungsgegenstand von allem unnötigen Ballast. Aus dem realen System wird ein Modell. Für die Fahrt nach München ist es unwichtig zu wissen, ob das Auto gelb ist, welches Fabrikat es ist und wie die Verkehrsverhältnisse in Brüssel sind. Verbräuche, Geschwindigkeiten und Geschwindigkeitsbegrenzungen hingegen sind sicher relevant und können nicht fortgelassen werden, auch wenn es zur Vereinfachung beitragen würde. Sachverhalte müssen soweit vereinfacht werden, dass Sinn und Zweck erhalten bleiben. Der Idealzustand ist dann erreicht, wenn durch das Fortlassen eines einzigen weiteren Elementes die Beschreibung nicht mehr ausreichend sein würde. Hier kann ein Satz aus der algorithmischen Informationstheorie übernommen werden: Eine Theorie, die denselben Umfang an Bits hat wie die Fakten, die sie erklären soll, ist völlig wertlos [Cha06]. Von zwei Beschreibungen, die beide dieselbe Tatsache erklären, ist die einfachere vorzuziehen. Was nicht benötigt wird, ist ein **Interpret**, der einen erstellten Plan deutet. Falls ein Plan nur durch den Einsatz eines Interpreten verstanden werden kann, ist dieser unbrauchbar. Wie schwierig es sein

kann, klare Beschreibungen oder Anweisungen zu formulieren, sollen zwei sehr einfache, aus dem täglichen Leben übernommene, Beispiele, verdeutlichen. Was passiert, wenn Sie in einen Bus einsteigen wollen und die *Aufforderung* aus Abbildung 2.1(a) neben der Tür erkennen? Folgen Sie der Aufforderung und zeigen Sie Ihren Fahrausweis, obwohl Sie ihn unaufgefordert vorzeigen sollten? Was machen Sie, wenn Sie einsteigen und der Fahrer Sie nochmals auffordert, ihn zu zeigen? Wie stellt sich die Situation auf einem Parkweg, an dessen Anfang ein Schild mit Text aus Abbildung 2.1(b) zu sehen ist, dar, wenn der Weg weder von Schnee noch von Glatteis bedeckt ist?

Das zweite wichtige erforderliche Werkzeug ist der **Modellierer**. Alles was in der Planung geschieht, läuft in der Phantasie der Planer, an einer Tafel, auf einem Blatt Papier oder einem Chip ab, nie im realen System. Es muss dennoch möglich sein, diese gedachten Abläufe bezüglich Machbarkeit, Sinnhaftigkeit und Effizienz zu überprüfen, und dieses möglichst vor der Umsetzung. Hierzu bedarf es eines Modells. In einem ersten Schritt muss geklärt werden, mit welchem Teil des unendlichen Universums sich ein Plan befassen soll. Hierzu wird dieses in verschiedene Teiluniversen oder Systeme aufgeteilt, solche

- die uns interessieren,
- die wir beeinflussen und die,
- die uns beeinflussen,
- die uns nicht interessieren.

Die letzte Gruppe ist die mit Abstand größte.

#### **Definition .15 Systeme und Elemente**

*Ein System ist eine Menge miteinander in Beziehung stehender Objekte, die interagieren, um einen bestimmten Zweck, den Systemzweck zu erfüllen und gegenüber der Umwelt abgegrenzt sind. Elemente und Beziehungen stellen die Systemstruktur dar. Ein Element ist ein innerhalb des Systems nicht unterteilbares Objekt.*

Für eine Planung müssen alle relevanten Objekte und Beziehungen gefunden und zu einem System zusammengefasst werden. Für die Fahrt nach München könnten als Objekte die Autobahn und die Autos, die sich auf der Autobahn befinden, betrachtet werden. Eine Beziehung ist, dass Autos, die auf ein und derselben Spur fahren, sich nicht gegenseitig überholen können. Für ein Überholen ist stets eine zweite Fahrspur notwendig. Das Ändern eines Systemparameters führt zu einem anderen Szenario, ändert aber nicht das System.

Reale Systeme sind oftmals zu komplex und es wird ein Abbild des Systems, ein Modell, benötigt, mit dem gearbeitet werden kann. So ist es für das Verständnis, wie Ebbe und Flut zustande kommen, vollkommen unerheblich, wie Atome aufgebaut sind. Für die Fahrt nach München können Straßen als Linien und Autos als Punkte dargestellt werden, ohne Einbußen in der Aussagefähigkeit hinnehmen zu müssen. Die **Komplexität** eines Systems hängt von der Anzahl der Elemente und der minimal erforderlichen Anzahl der Beziehungen dieser Elemente untereinander ab. Auch hier gilt es wieder eine möglichst einfache Darstellung zu finden. Wird eine solche minimale Darstellung verwendet, so verändert die Herausnahme oder das Hinzufügen einzelner Elemente oder Beziehungen aus dem System dessen Identität und verhindert möglicherweise die Realisierung des Systemzwecks. Das Weglassen von Auf- und Abfahrten ist nicht zulässig. Würden nur die Anschlussstellen am Start- und Zielort betrachtet, könnte im Falle eines Staus keine Umleitungsstrecke erreicht werden. Andererseits könnten in dem obigen Beispiel auch alle in Deutschland zugelassenen Autos und Tankstellen betrachtet werden. Das System würde unnötig

kompliziert. Wird die Komplexität durch die minimal erforderliche Anzahl von Elementen und Regeln gegeben, so bestimmen die tatsächlich verwendeten die **Kompliziertheit**.

Für die Erstellung eines Modells werden vier Personen bzw. Rollen benötigt: Wissensträger, Modellierer [**Richt04**], beide unterstützt vom Skelettierer und einem Beobachter. Der Wissensträger beschreibt das System, das der Modellierer mit bekannten Techniken in ein verständliches Modell überführt. Der Skelettierer sorgt dafür, dass es von unnötigem Ballast frei bleibt, Komplexität also nicht zu Kompliziertheit wird. Wissensträger und Modellierer müssen begründen, weshalb etwas notwendig ist. Alle Beteiligten haben darauf zu achten, ob andere Modelle oder Elemente aus anderen Modellen verwendet werden können. Eine unabhängige Person sollte als **Beobachter** die Erstellung verfolgen, um Ähnlichkeiten mit anderen Systemen und Modellen, die oftmals allein durch eine unterschiedliche Wortwahl hervorgerufen werden, identifizieren zu können. Unterscheidet sich die Logistik bei der Produktion von Ketchup von der des Bieres durch mehr als die Wörter? So spielt auch bei der Versorgung einer Handelskette mit Ketchup das Fahren eine entscheidende Rolle. Worin liegt der Unterschied dieser Fahrt zu derjenigen, die für die Essenseinladung durchgeführt wird, was ist gemeinsam? Unterschiedlich sind lediglich die Begriffe: Liefert der Ketchupproduzent Ware von Hamburg nach München, heißt dieser Vorgang Transport, nicht Fahrt. Würden Menschen mit einem Zug von München nach Hamburg fahren, hieße es Beförderung, bei der Benutzung eines Flugzeuges Flug.

Bei allen Vorgängen handelt es sich um ein und denselben Prozess: Ein Objekt wird mittels eines Hilfsmittels von einem Startort zum Zielort gefahren, transportiert, befördert oder geflogen. Dieser Vorgang bleibt immer ein Transport, auch wenn Synonyme verwendet werden. Mittels dieser oder ähnlicher Vereinfachungen können viele vorhandene Lösungen auf zu lösende Fragestellungen übertragen werden. Dieses zu erkennen ist die Aufgabe des Beobachters, egal ob interner oder externer.

**Weisheit 2.9** *Der Skelettierer muss ein komplexes System von seiner Kompliziertheit befreien, ohne dessen Identität zu ändern. Der Beobachter muss Gemeinsamkeiten und Unterschiede mit anderen Systemen erkennen und deren Übertragbarkeit analysieren.*

Eine wichtige Aufgabe aller ist es, Objekte und alle anderen Größen in sinnvolle **Klassen** einzuteilen. So kann es eine Klasse Fahrzeuge geben, schienen- und straßengebundene sind **Unterklassen** erster Stufe, Pkw und Lkw wiederum Unterklassen von den straßengebundenen. Die Eigenschaft Maximalgeschwindigkeit kann allen zugeordnet werden, Regeln für das Überholen sind individuell für jede Unterklasse der ersten Stufe zu beschreiben.

#### **Definition .16 Modell**

*Ein Modell ist eine vereinfachte und generalisierte materielle oder immaterielle Abbildung eines realen Systems. Das Modell muss alle für die gegebene Aufgabenstellung relevanten Elemente und Beziehungen des dargestellten Systems berücksichtigen.*

Ein Modell kann sowohl die plastische Darstellung eines künftig zu bauenden Autos sein, das Knochengrüst eines Dinosauriers, die Prinzipdarstellung eines *RFID*-Systems oder ein Schriftstück, das einen Vorgangstyp beschreibt. Wichtig ist, dass es eine generalisierte Abbildung ist, die für mehrere reale Systeme anwendbar ist: Nicht die Beschreibung eines Transportes von Hamburg nach München ist ein Modell, sondern eine Darstellung, die für viele solcher Fahrten gültig

ist. Bei einer noch weitergehenden Verallgemeinerung von Modellen werden diese zu **Referenzmodellen** oder auch **Metamodellen** [Mer97]. Jedes Modell muss **robust** sein gegen Änderungen in der Umwelt und darf nicht deshalb seine Gültigkeit verlieren, nur weil es plötzlich eine neue Autobahn gibt oder statt Ketchup Bier transportiert wird.

Ein Objekt, das in einem System oder Modell ein Element darstellt, kann in einer anderen Sichtweise durchaus selbst ein System sein. So ist das für die Fahrt nach München benutzte Fahrzeug in diesem System als Element zu sehen. Für die Person, die dieses Fahrzeug zuletzt repariert hat, stellt es selbst wieder ein System dar, mit dem Motor als einem Element. Objekte können beliebig vielen System angehören oder selbst Systeme darstellen. Objekte, die einem System angehören, können als anonyme oder identifizierbare Objekte betrachtet werden. So sind das Fahrzeug und das Begleitfahrzeug, mit dem die Fahrt nach München durchgeführt wird, nicht anonym oder beliebig austauschbar. Die Identität aller Fahrzeuge, die an einer Abfahrt die Autobahn verlassen, ist unwichtig, sie bleiben anonym.

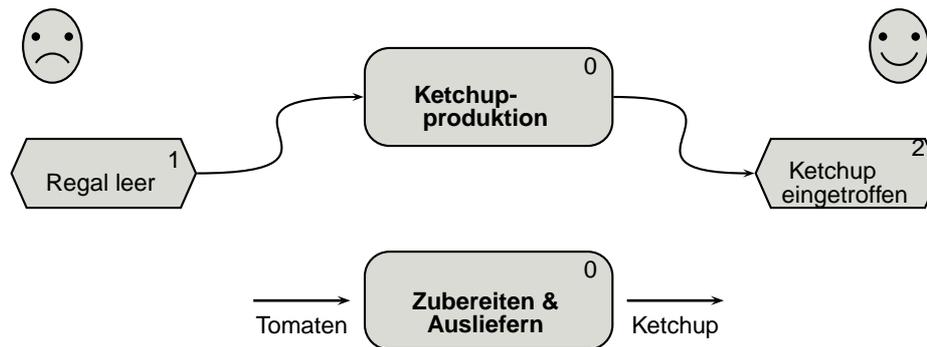
Dem System und jedem Element werden bestimmte Eigenschaften oder **Parameter** zugeordnet. Diese sind feste Werte, wie die Höchstgeschwindigkeit. Fest bedeutet in diesem Zusammenhang für eine Größe, dass diese innerhalb eines Szenarios nicht verändert werden kann. Wird einmal eine Höchstgeschwindigkeit von 180 km/h und ein anderes Mal eine von 220 km/h betrachtet, so handelt es sich um zwei verschiedene Szenarien. Andere Größen, die **Zustandsgrößen**, wie z. B. die aktuelle Geschwindigkeit oder die Abweichung vom Plan, sind veränderlich und dienen dazu, den Zustand des Systems zu beschreiben. Tabelle 2.1 zeigt einige Werte und deren Zuordnung zu Parametern, Zustands- und Sollgrößen.

Sowohl bei Parametern als auch bei Zustandsgrößen muss zwischen internen und externen unterschieden werden. Interne sind solche, die innerhalb des Modells veränderbar sind, externe solche, die von außen vorgegeben werden. So sind die Straßenverhältnisse externe Größen: Sie haben Auswirkungen auf das Systemverhalten, können aber selbst nicht beeinflusst werden.

Die zusätzlich zu den Größen für ein System erforderlichen Regeln können ausschließlich für ein Objekt unabhängig von anderen oder seiner Umwelt gelten, wie „Der Benzinverbrauch eines Fahrzeuges beträgt 10 l je 100 km.“ Andere stehen für eine Wechselwirkung mit der Umwelt, wie „Bei Glatteis muss die durchschnittlich fahrbare Geschwindigkeit um 10 % reduziert werden“, oder beschreiben Beziehungen zwischen den Elementen, wie z. B. „Ein Fahrzeug kann nie schneller fahren als das vor ihm fahrende Fahrzeug.“

### 2.3.1 Klassifikation von Systemen

Systeme können nach unterschiedlichen Eigenschaften klassifiziert werden. Zunächst kann zwischen **offenen** und **geschlossenen** unterschieden werden. Offene besitzen eine durchlässige Systemgrenze und verfügen über mindestens eine Interaktion mit der Systemumgebung. So stellt die Fahrt auf der Autobahn, wie oben beschrieben, ein offenes System dar, bei der jede Auf- oder Abfahrt eine Interaktionsmöglichkeit mit der Systemumgebung bietet. Ein mit einer Klimaanlage ausgestatteter Vortragsraum, in dem mehrere hundert Personen sitzen stellt solange ein geschlossenes System dar, wie alle Türen und Fenster geschlossen sind. Temperatur- und Feuchtigkeitsveränderungen ergeben sich aus internen Größen. Gleiches gilt für ein Lager mit tiefgekühlten Lebensmitteln. Das Öffnen einer Tür macht ein solches System zu einem offenen. Für die Beschreibung kann es dann sinnvoll sein, zwei verschiedene Systeme zu betrachten, zwischen denen ein Übergang oder eine **Schnittstelle** definiert wird, deren Zustand sich z. B. mit dem Schließen und Öffnen der Tür ändert.



**Abb. 2.2a:** Reduzierte Lieferkette für Tomaten in der Ketchupproduktion - Topsicht für Sogprinzip.

Das zeitliche Verhalten eines Systems stellt eine weitere wichtige Eigenschaft dar. Ein System heißt **dynamisch**, wenn sich die Zustandsgrößen mit der Zeit ändern, ansonsten **statisch**. Das Autobahnnetz ist ein statisches System, auch wenn es von einem außerirdischen Beobachter, der im Abstand von je zwölf Monaten auf die Erde blickt, als äußerst dynamisch bezeichnet werden könnte. Das Autobahnnetz mit den Fahrzeugen auf diesem ist ein dynamisches System. Bleiben die von außen beobachtbaren, die makroskopischen Zustandsgrößen, in einem Betrachtungszeitraum konstant, so befindet sich ein dynamisches System in einem **stationären** oder **Gleichgewichtszustand**. Die mittlere Verkehrsdichte ist eine solche makroskopische Zustandsgröße, auch wenn sich diese auf jedem Streckenabschnitt minütlich ändert.

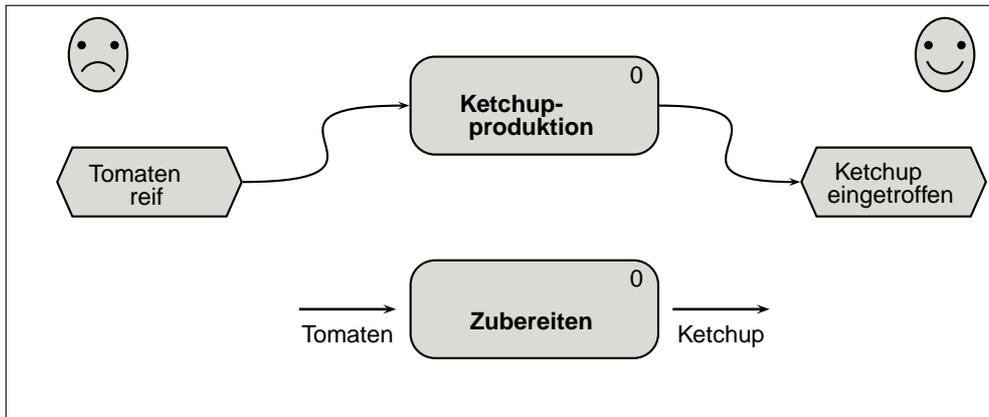
Dynamische Systeme wiederum können noch die Eigenschaften **deterministisch**, **stochastisch** oder **chaotisch** besitzen. Deterministisch heißen alle Systeme, bei denen gleiche Ursachen stets gleiche Wirkungen hervorrufen. Es mag der Eindruck vorherrschen, dass viele Naturphänomene deterministisch sind. Dieses ist so nicht richtig. Viele Probleme können so dargestellt werden, dass sie deterministische Eigenschaften zeigen. Das Zupfen an einer Gitarrensaiten sollte immer denselben Ton hervorrufen. Das gilt nur solange, wie nicht zu heftig gezupft wird. Auch ein Uhrenpendel pendelt nur solange in seine Gleichgewichtslage zurück, wie es pfleglich behandelt wird. Es ist für alle Beteiligten sinnvoll zu versuchen, ein System möglichst in einem Zustand zu belassen, in dem es deterministisch beschrieben werden kann.

Bei deterministischen Systemen wird auch von schwacher **Kausalität** gesprochen. Derartige Systeme können ohne weitere Eingriffe nach einer Planung betrieben werden. Oftmals gilt aber nur die sogenannte starke Kausalität: Ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkungen. Eine Veränderung der Straßenbeschaffenheit durch Regen oder Fremdkörper hat mit Verlangsamung oder Stau unterschiedliche aber ähnliche Wirkungen. Überall dort, wo dieses Prinzip gilt, ist es wichtig, regelnd einzugreifen, um die Ist-Werte durch einen Vergleich mit den Soll-Werten zu korrigieren.

Chaotische oder kybernetische Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass nicht einmal die starke Kausalität gilt. Selbst kleinste Veränderungen können große Auswirkungen haben. Das Wetter und Finanzmärkte sind Beispiele dafür. Ein besonderes Merkmal für solche Systeme sind **Rückkopplungen** [Sei87], deren Auswirkungen an einem einfachen Beispiel anhand der Fahrt von Hamburg nach München verdeutlicht werden sollen.

Symbol	Bedeutung
	Elementares Objekt – Jedes Objekt kann mit einer Nummer versehen werden.
	Zusammengesetztes Objekt – Diese werden durch einen Schatten oder ein +-Zeichen gekennzeichnet.
	Informatische Objekte werden schraffiert dargestellt.
	Aktivität mit bzw. ohne Teilaktivitäten
	Informatische Aktivität mit bzw. ohne Teilaktivitäten
	Ereignis
	Operator
	Aktion
	Organisationseinheit -Prozesseigner
	Organisationseinheit - Ausführer
	Organisationseinheit - Ausführer und Eigner
	Informatische Organisationseinheit
	Dieses ist ein anonymer Akteur mit unendlich erscheinenden Ressourcen.

Tab. 2.2a: Symbole für die Prozessdarstellung - Teil 1



**Abb. 2.2b:** Reduzierte Lieferkette der Ketchupproduktion für Druckprinzip. Hier werden die Tomaten als Rohstoff betrachtet.

### Beispiel .7 Rückkopplung auf der Autobahn

Ein Unfall führt zu einem Stau. Die Meldung, dass dieser Unfall geschehen und nur eine Fahrspur verfügbar ist, veranlasst die nachfolgenden Fahrzeuge, die Autobahn zu verlassen. Dieses sorgt im Extremfall dafür, dass sich der Stau trotz Behinderung auflöst. Die Meldung führt dazu, dass der Inhalt falsch wird. Eine nun folgende Meldung, dass sich der Stau aufgelöst hat, führt wiederum zum Stau, da alle Fahrzeuge auf der Autobahn bleiben.

Eine Voraussetzung für ein derartiges Verhalten ist, dass alle Fahrer, d. h. Elemente des Systems, mit der Systemumgebung kommunizieren, die Informationen erhalten und nach gleichen Regeln handeln. Da dieses im Falle vieler Menschen nicht zu erwarten ist, wird die obige Situation selten in diesen extremen Ausprägungen zu beobachten sein. Werden Entscheidungen aber von Maschinen, z. B. Fahrerassistenzsystemen getroffen, wird dieses Szenario sehr realistisch.

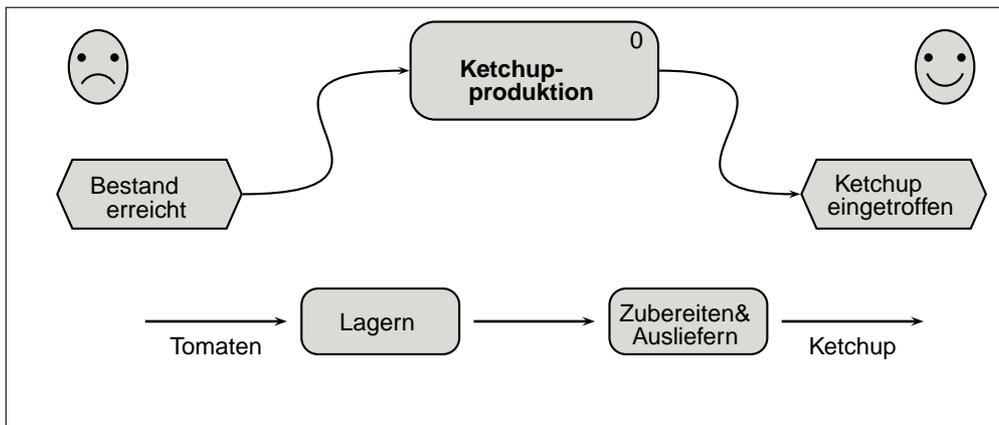
Voraussagen werden in Systemen mit Rückkopplung nahezu unmöglich, wenn Menschen nach unbekanntem Mustern reagieren. Bei Maschinen ist das Verhalten davon abhängig, ob die Regeln, nach denen diese arbeiten, bekannt sind. In stochastischen Systemen lässt sich das Eintreten mit bestimmbarer Wahrscheinlichkeit belegen. Die Unsicherheiten können oftmals mit geeigneten Analysetechniken reduziert werden. Glücklicherweise gibt es auch in chaotischen Systemen Bereiche, d. h. Werte von Zustandsgrößen, in denen sich die Systeme wenig launenhaft zeigen, die sogenannten Attraktoren. Es gilt, genau diese Bereiche zu finden und ein System nicht in einen Zustand laufen zu lassen, in dem es nur noch mit größtem Aufwand wieder zu stabilisieren ist.

Lässt sich Planung denn nun überhaupt durchführen? Die entscheidenden Voraussetzungen dafür sind eine klare und eindeutige Beschreibung und deren Darstellung.

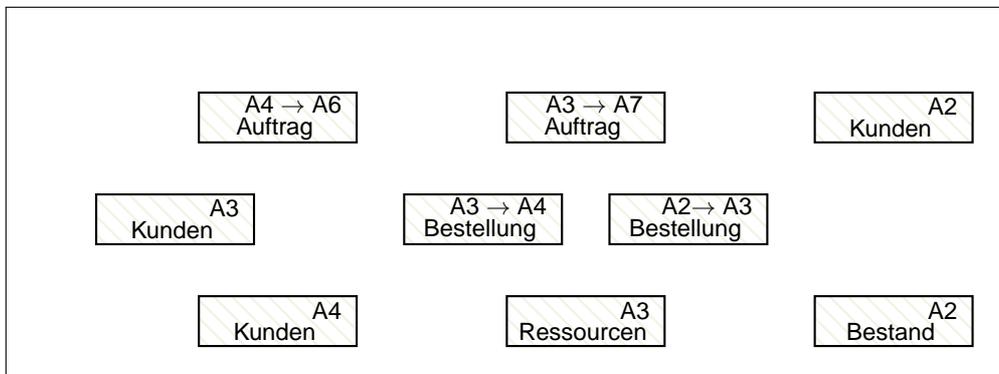
### 2.3.2 Prozesse und Transaktionen

In den letzten Jahren hat sich der Prozessgedanke für betriebswirtschaftliche und logistische Abläufe immer mehr durchgesetzt. In allen Anwendungsbereichen kann zwischen folgenden Arten von Prozessen unterschieden werden kann [Gad03]:





**Abb. 2.2c:** Prozessdarstellung Ketchup - Wie Abbildung 2.2b, jedoch Sogprinzip

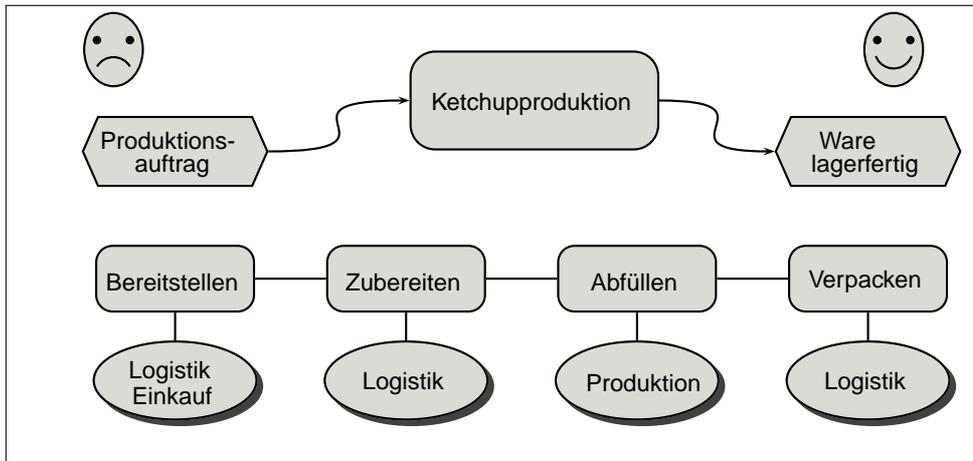


**Abb. 2.3:** Produktion Tomatenketchup - Daten

Bei einem Prozess ist es stets zwingend erforderlich, einen Vorgänger und einen Nachfolger zu finden, um *input* und *output* nicht mit dem Nichts verknüpfen zu müssen. Die Definition der Transaktion enthält zusätzlich die sehr starke und wichtige Forderung, dass ein System von einem konsistenten in einen anderen konsistenten Zustand überführt wird. Es kann also nicht von einer Transaktion gesprochen werden, wenn Anfangs- oder Endzustand nicht konsistent sind. Diese Forderung bedeutet auch, dass es überhaupt einen Zustand geben muss, d. h. dass das, was vorgefunden wird, beschreibbar ist. Aktivitäten und Operationen können synonym verwendet werden.

Dieses soll auch auf den Begriff Prozess übertragen werden. Ist der Anfangszustand nicht konsistent, kann es keinen Prozess geben. Für die Ketchupproduktion bedeutet dieses, dass eine Lieferung bestehend aus einer Mischung von Tomaten und Kartoffeln, nicht als Input eines Prozesses bezeichnet werden kann. Gleichzeitig muss der Anfangszustand widerspruchsfrei sein. Für die Ketchupproduktion bedeutet dieses:

**Beispiel .8** Widerspruchsfreier Anfangszustand für Ketchupproduktion



**Abb. 2.4:** Produktion Tomatenketchup - Funktionssicht

- *Es gibt eine Anforderung, Ketchup zu produzieren.*
- *Es gibt ein Rezept hierfür, bestehend aus einer Stückliste und einer Produktionsanleitung.*
- *Es stehen alle Zutaten zur Verfügung, die auf der Stückliste stehen und als input benötigt werden, also Tomaten und keine Kartoffeln, Flaschen und Gewürze.*

Weitere für Transaktionen geltenden Forderungen können auch auf Prozesse übertragen werden:

- *atomicity*  
Eine Transaktion wird entweder vollständig oder gar nicht ausgeführt. Mehrere Transaktionen oder Prozesse können miteinander verknüpft werden, solange jeder einzelne zu einem konsistenten Zustand führt.
- *consistency*  
Nach Abschluss der Transaktion befindet sich das System wieder in einem konsistenten Zustand.
- *isolation*  
Die Transaktion muss isoliert ablaufen. Andere, auch parallel ablaufende Transaktionen dürfen auf die durch eine Transaktion vorgenommenen Änderungen erst zugreifen, wenn diese abgeschlossen ist.
- *durability*  
Nach Abschluss der Transaktion müssen die von der Transaktion vorgenommen Änderungen dauerhaft sein. Insbesondere müssen sie Fehler, die nach Abschluss der Transaktion auftreten, überstehen. Wenn eine der Maschinen nach Produktionsabschluss ausfällt, darf dieses keine Auswirkungen auf die bereits fertiggestellten Produkte haben.

Wie lassen sich nun Transaktionen oder Prozesse beschreiben? Zum einen natürlich mit Worten. In dem bereits in Kapitel 1.5 angesprochenen Beispiel werden Tomaten zu Ketchup verarbeitet. Aus einer sehr groben Perspektive betrachtet, kann dieses dann folgende Gestalt annehmen:

**Regel 2.5 Produktion von Tomatenketchup**

*Beschaffe Tomatenmark, Flaschen und Gewürze, gib alles in einen großen Topf, koche und rühre, fülle die Masse in Flaschen ab, verpacke diese und bringe sie zum Kunden.*

Eine Alternative ist die Darstellung in Abb. 1.6a. Beide Darstellungsformen, die grafische und die geschriebene, haben Stärken und Schwächen. Als ein Beispiel für eine Darstellung in Textform soll das aus einem amerikanischen Kochbuch übernommene Rezept in Exkurs ?? dienen, an dem mehrere, häufig auftretende Probleme beobachtet werden können. Zur Arbeitserleichterung beim Schreiben dieses Buches wurde die Übernahme in diesen Text mittels eines Scanners und eines Texterkennungsprogramms vorgenommen. Hierbei schlichen sich ein paar kleine Fehler ein, die unterschiedliche Auswirkungen haben könnten. Das Original und der korrigierte Text sind in Exkurs ?? zu sehen.

- In der Überschrift kann das richtige Wort *ham* statt *harn* vielleicht noch erraten werden, *Y2 teaspoon* ist weniger eindeutig und *YIELO: 6 10 8 SERVING6S* bedarf wahrscheinlich schon genauere Kenntnis amerikanischer Rezepte und eines Interpretierers, der nicht eingesetzt werden darf. Nach dem Lesen der richtigen Texte ist natürlich alles klar.
- Dieses ist nur eine, wahrscheinlich die einfachere, Seite des Problems. Die andere ist schwerwiegender: Was bedeuten *cup* und *tablespoon*. Ein Leser des Rezeptes könnte irrtümlicherweise meinen, dass diese unpräzise Angaben sind und irgendeine Teetasse mit irgendeinem Teelöffel aus dem Küchenschrank genommen werden kann. Weit gefehlt, für Amerikaner sind das sehr genaue Maßangaben.
- Das nächste Problem wird sicher auftreten, wenn der Backofen auf die richtige Temperatur, 300° F, eingestellt werden soll.

**Exkurs 2.1 Amerikanisches Kochrezept, mittels eines Scanner und einer Texterkennungssoftware entnommen aus einem amerikanischen Kochbuch – Originaltext**

*Baked Harn and Pineapple Rings*

- *1 3-inch-thick center-cut smoked ham slice*
- *1 20-ounce can sliced pineapple in syrup, undrained 1 cup eider vinegar*
- *1 cup firmly packed light brown sugar*
- *1 tablespoon Worcestershire sauce*
- *Y2 teaspoon ground ginger*

*Trim fat from ham. Place ham in a baking dish just enough to hold it. Drain pineapple, reserving juice; add remaining ingredients to juice and mix well. Spoon over ham. Cover and refrigerate 3 to 4 hours or overnight. Uncover and bake at 300° F. for 2 hours, basting occasionally. Arrange pineapple slices over ham; baste with sauce and bake 1 additional hour, basting frequently. YIELO: 6 10 8 SERVING6S*

**Exkurs 2.3 Anforderung an eine Prozessdarstellung**

*Die Darstellung muss*

- *lückenlos,*

**Exkurs 2.2 Korrigierte Fassung des Rezepts aus Exkurs ??***Baked Ham and Pineapple Rings*

- 1 3-inch-thick center-cut smoked ham slice
- 1 20-ounce can sliced pineapple in syrup, undrained
- 1 cup cider vinegar
- 1 cup firmly packed light brown sugar
- 1 tablespoon Worcestershire sauce
- 1/2 teaspoon ground ginger

*Trim fat from ham. Place ham in a baking dish just enough to hold it. Drain pineapple, reserving juice; add remaining ingredients to juice and mix well. Spoon over ham. Cover and refrigerate 3 to 4 hours or overnight. Uncover and bake at 300° F. for 2 hours, basting occasionally. Arrange pineapple slices over ham; baste with sauce and bake 1 additional hour, basting frequently. YIELD : 6 to 8 SERVINGS*

- vollständig bezogen auf den jeweils erforderlichen Detaillierungsgrad,
- widerspruchsfrei,
- angepasst an den jeweiligen Adressaten,
- lesbar,
- eindeutig und
- eine Struktur erkennbar sein.
- Jede Einheit muss auf einem Blatt dargestellt werden.

*Hinzu kommen Anforderungen analog zu denen an Algorithmen. An jeder Stelle muss eindeutig beschrieben sein, was beim Eintreten eines beliebigen Ereignisses geschehen muss. Da es kaum möglich sein wird, alle Eventualitäten zu erfassen, kann eine Standardmaßnahme der Form „Rufe den Chef!“, definiert werden.*

Nach Korrektur der durch die Übertragung an den Schnittstellen Scanner und Texterkennung hervorgerufenen Fehler würde dieses Rezept auch bei guten Englischkenntnissen oder mit einem deutsch-englisch-Lexikon vermutlich in vielen deutschen Haushalten Probleme hervorrufen. Selbst präzise Formulierungen sind nicht in jeder Umgebung als Anleitung gleich gut geeignet. Bei einer grafischen Form sind höchstwahrscheinlich schon in einem einfachen Bild Probleme offensichtlich: Was bedeuten die verwendeten Symbole? Nehmen Sie die Symbole eines beliebigen Programmes auf Ihrem Rechner und versuchen Sie, für jedes Symbol dessen Bedeutung zu erklären.

Ist es hilfreich, zu einer mathematischen Schreibweise überzugehen, da diese doch als sehr exakt gilt? Hier könnte ein Prozess als ein Operator  $\mathbf{P}(\mathcal{I})$  aufgefasst werden, der auf einen *input*  $\mathcal{I}$  wirkt und einen *output*  $\mathcal{O}$  liefert. Wäre der Prozess aus mehreren Teilprozessen  $\mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_n$  zusammengesetzt, ergäbe sich die kompakte Schreibweise:

$$\mathcal{O} = \mathbf{P}(\mathcal{I}) = (\mathbf{P}_n \circ \dots \circ \mathbf{P}_1)(\mathcal{I}) \quad (2.1)$$

bei der die Definitionsbereiche von  $\mathbf{P}_i$ , d. h. der Eingang auf Stufe  $i$  gleich dem Wertebereich

auf Stufe  $(i - 1)$ , also dem Ausgang von  $P_{i-1}$  sein müssen. Jede Darstellungsform ist denkbar und die Wahl hängt von der konkreten Aufgabenstellung und der Zielgruppe ab. Notwendig ist, dass sie den in Exkurs 2.3 aufgelisteten Anforderungen genügen. Bei der Realisierung der Anforderungen gibt es bei der Forderung nach der Darstellbarkeit auf einem Blatt erfahrungsgemäß Diskussionsbedarf. Dieses ist eine banale und für viele Anwender scheinbar nur sehr schwer zu erfüllende und überflüssige Forderung. Weshalb sollen keine Tapeten oder ähnliches verwendet werden? Ein Ziel jeder Darstellung muss es sein, dass sie anderen zugänglich gemacht werden kann. Dieses bedeutet auch, dass jemand diese Darstellung in seiner Tasche mitnehmen und auf seinem Schreibtisch oder im Zug bearbeiten können muss. Hierzu ist es oftmals notwendig, eine Kopie zu erstellen. Selbst wenn es DIN A3-Kopiergeräte gibt, kann nicht vorausgesetzt werden, dass ein solches stets verfügbar ist, DIN A1 noch weniger. Tische und Sitzplätze im Zug sind für DIN-A1-Ausdrucke nicht geeignet, Präsentationsprogramme auf Rechnern, die auf Leinwände projizieren, ebenfalls nicht. Ein anderes Argument ist die mit viel verfügbarem Platz leicht entstehende Unübersichtlichkeit bzw. **Kompliziertheit**: Unzählige Symbole mit Verbindungen untereinander lassen Zusammenhänge kompliziert erscheinen und führen zwangsläufig zu Missverständnissen. Eine Beschränkung erzwingt die Konzentration auf die für die Zielerreichung wesentlichen Elemente. So ist für den Lagerleiter nicht jedes Produktionsdetail wichtig, für den Geschäftsführer nicht das genaue Vorgehen bei jedem einzelnen Kommissioniervorgang und für den Mitarbeiter in der Produktion nicht die Lagerhaltungsstrategie. Es muss für jeden Adressaten bzw. Teilprozess eine angemessene Detaillierungsstufe gefunden werden. Dieses führt zu verschiedenen anwender- und prozessbezogenen Darstellungen, die sämtlich miteinander konsistent sein müssen.

In der praktischen Anwendung erfordert dieses zusätzlich Darstellungen in mehreren Sprachen. Sind bei Sprachen verbindliche Standards zumindest verfügbar, so werden für grafische Darstellungen viele unterschiedliche Formen in der Literatur verwendet. In Tabelle 2.2a ist eine Liste der Symbole aufgeführt, wie sie in diesem Buch verwendet werden. Sie lehnt sich an die Vereinbarungen für eine ereignisgesteuerte Prozesskette und *entity-relationship*-Diagramme an und ist in einigen Punkten ergänzt und modifiziert, um Überschneidungen und Inkonsistenzen zu vermeiden. In dieser Darstellung sind viele Elemente des ARIS-Modells [Sch98] übernommen. Dieses für kaufmännische Fragestellungen entwickelte Modell ist aber nur bedingt für logistische Anwendungen einsetzbar. Die Bedeutung zeitlicher Aspekte weicht zwischen der logistischen und kaufmännischen Betrachtungssicht stark voneinander ab. Ist es für Rechnungszwecke möglicherweise ausreichend, dass Ware im Laufe eines Tages angekommen ist, so benötigt die Logistik auch den Zeitpunkt, zu dem die Ware physisch verfügbar war.

## 2.4 Repositorium

Ungeachtet der inhaltlichen Qualität einer Prozessbeschreibung ist diese nur dann brauchbar, wenn sie dokumentiert ist. Die Dokumente selbst können wiederum als Objekte logistischen Handelns betrachtet werden. Auch hier gilt es Verschwendung zu vermeiden und stets das *Richtige* zu tun. Verglichen mit konventionellen Produkten kommt bei der Erstellung von Dokumenten heutzutage oftmals hinzu, dass diese von mehreren Personen an verschiedenen Orten und gleichzeitig oder zu verschiedenen Zeiten bearbeitet und später auch gelesen werden. Versionsmanagement und Lagerung, hier Archivierung, sind unverzichtbare Aufgaben, sollen in diesem Buch aber nicht weiter betrachtet werden. Da diese Dokumentationen von Prozessen mehr enthalten als eine einfache Beschreibung eines Produktes, soll hier der Begriff Repositorium verwendet

werden.

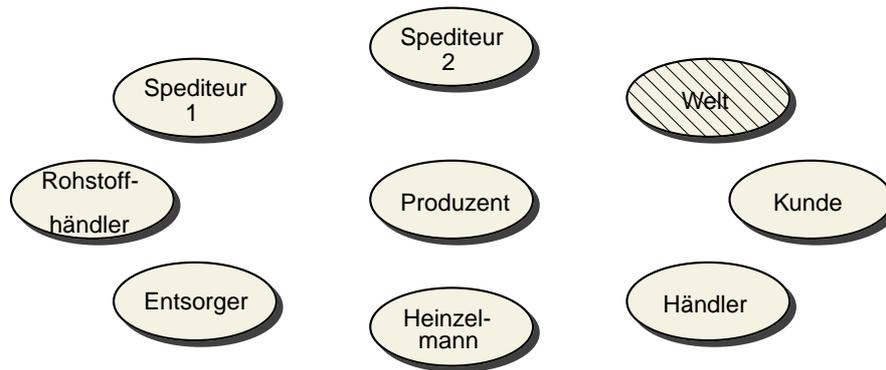
**Definition .19 Repositorium**

*Ein Repositorium oder repository stellt eine Beschreibung des Systems, aller Modellbausteine und deren Beziehungen untereinander dar [Gad03].*

Vergleichbar zu der Existenz eines Universallexikons und diverser Speziallexika kann es ein Universal- oder Metarepositorium und mehrere spezielle Repositorien geben. Die in Kapitel 1.1 definierten Begriffe und die hier vorgestellten Symbole sind Kandidaten für ein Universalrepositorium. Alle für eine Prozessbeschreibung und -realisierung relevanten Fakten müssen in genau einem der Repositorien hinterlegt sein. Im Einzelnen bestehen diese aus folgenden Komponenten:

- **Lexikon**  
Dieses ist das grundlegende Element, in dem Begriffe und Symbole für alle Dokumente verbindlich definiert werden.
- **Objekte**  
Hier ist die Beschreibung aller Akteure, Organisationen oder Organisationseinheiten und Ressourcen mit sämtlichen relevanten Parametern zu finden.
- **Datenmodell**  
In diesem erfolgt die Zusammenstellung und Beschreibung aller erforderlichen Daten und deren Abhängigkeiten voneinander. Rollen und Zugriffsrechte sind ein wesentlicher Bestandteil dieses Datenmodells.
- **Daten- und Informationsflüsse**  
In diesem Modul sind Bedarfe und alle erforderlichen Flüsse zwischen Akteuren mit Anforderungen und Rechten darzustellen.
- **Prozessbeschreibung**  
Ausgehend von Metaprozessen bzw. Referenzmodellen muss jeder einzelne Prozess beschrieben werden. Transport ist ein Metaprozess, ein Gefahrguttransport eine Ausprägung. Ein Transport von Apfelsinen sollte nicht als Gefahrguttransport geplant werden können, ein Fahrzeugauslieferung von Deutschland in die USA kann nicht ausschließlich mit einem Lkw erfolgen.
- **Prozessgenerator**  
Dieses ist eine Sammlung von Vorschriften und Regeln, mit denen aus Metaprozessen konkrete Ausprägungen abgeleitet und korrekte Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Prozessen sichergestellt werden können. So muss einer Produktion stets eine Distribution folgen. Der Prozessgenerator sollte so formuliert werden, dass eine automatisierte Erstellung von Prozessen möglich wird.
- **Regelwerke**  
In diesem Teil sind Entscheidungs-, Prioritätsregeln und ein Inferenzmechanismus zu definieren.
- **Modellbank**  
Diese enthält u. a. Beschreibungen aller Berechnungsvorschriften, die Kennzahlen, Plausibilitätstests und Beschreibungen für Prognosemodelle.

Eine wichtige Vorgehensweise zur Strukturierung sind unterschiedliche Prozesssichten, die im Rahmen von ARIS [Sch98] beschrieben und seitdem in vielen Veröffentlichungen [u. a. Gad03] aufgegriffen wurden:



**Abb. 2.6a:** Produktion Tomatenketchup - Akteure.

- Datensicht, und
- Funktionssicht,
- Organisationssicht • Ressourcensicht.

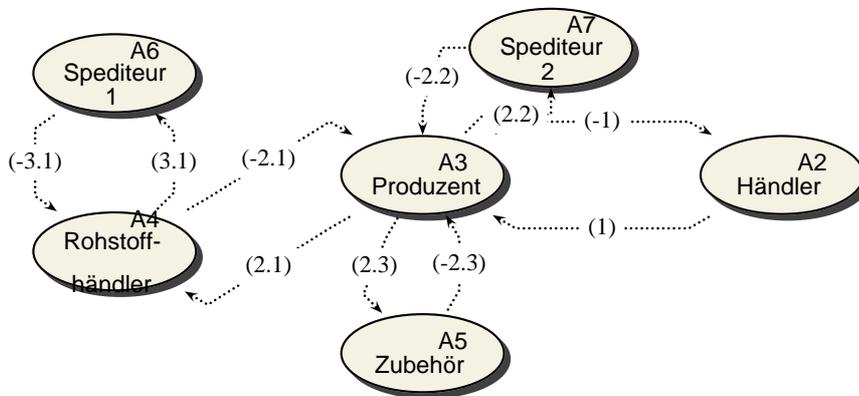
Diese Sichten werden im ARIS-Modell noch um die übergeordnete Steuerungssicht ergänzt, wobei Steuerung hier im Sinne von Lenkung aus Definition .14 verstanden werden soll. Für dynamische logistische Probleme ist es notwendig, diese Sichten um die folgenden zu ergänzen:

- Produktsicht, und
- Informationssicht • Wissenssicht

In der Organisationssicht werden sämtliche Akteure, deren Beziehungen zueinander und ihre Interessen beschrieben. Um Darstellungen nicht zu unübersichtlich werden zu lassen, ist es zweckmäßig, zwei besondere Akteure einzuführen: den **Heinzelmann** und die **Welt**. Der Heinzelmann ist jeweils einem Akteur zugeordnet und verfolgt ausschließlich dessen Interessen. Seine Aufgabe ist es, einen Prozess mit allen notwendigen Kleinigkeiten zu versorgen: Hierzu gehören Hilfsstoffe, Büromaterial, manchmal auch Verpackungen und Etiketten, Materialien, die zwingend notwendig sind, aber auf einer gegebenen Ebene nicht detailliert betrachtet werden sollen. Der Heinzelmann sorgt eigenständig dafür, dass die seiner Verantwortung unterstehenden Materialien stets ausreichend verfügbar sind. Ein derartiger Heinzelmann kann ein Unternehmen sein, das ein anderes mit Schrauben und anderen Verbindungselementen versorgt. Die Welt hingegen gehört allen und stellt ein Reservoir für bestimmte Güter dar. So kommen Strom und Wasser aus der Welt, die Kommunikationsinfrastruktur wird von dieser bereit gestellt, Paletten können ebenfalls aus der Welt bezogen werden, Leergut wird an die Welt zurückgegeben. Die Welt verfolgt keine individuellen Interessen. Sie entscheidet über die Verteilung der Ressourcen nach vorgegebenen Regeln, bei denen nicht alle Akteure zwingend gleich behandelt werden müssen. Heinzelmann und Welt können in unterschiedlichen Detaillierungsstufen durchaus unterschiedliche Eigenschaften haben.

**Weisheit 2.10** Die Beschreibung eines Prozesses ist genau dann gut, wenn die Personen oder Maschinen nach dieser arbeiten können und ohne weitere Hilfe-stellung das richtige Ergebnis erzielt wird.

Das Repository muss robust gegen äußere Änderungen sein. Seine Gültigkeit ist ständig zu verifizieren. Dieses bedeutet, dass Prozesse beobachtet und die Resultate für künftige Planungen berücksichtigt werden müssen. Aus Beobachtungen lassen sich unmittelbar nur Daten gewinnen, die damit unbestritten zu einem wertvollen Rohstoff und einem der wichtigsten Wirtschaftsgüter avancieren. Wie wird heutzutage mit Daten umgegangen? Die meisten wandern in einen elektronischen Papierkorb, egal ob auf einem Magnetband oder einer Festplatte. Die zunehmende Kapazität von Festplatten führt zu immer mehr gespeicherter Bits und Bytes und erschwert vielfach das Finden wichtiger Daten. Trotz der gewaltigen Menge an Daten sagen Menschen immer wieder, dass es schwierig ist, Entscheidungen zu treffen, weil die Grundlagen fehlen. Dieses trifft zu, wenn ein Vorgang erstmalig durchgeführt wird. Im realen Leben gibt es kaum Situationen, die absolut neuartig sind. Bei allen anderen kann auf Erfahrungen und Vergangenheitsdaten zurückgegriffen werden, wenn Daten aus laufenden Prozessen erfasst und einem **Datenkreislauf** zugeführt werden. Die Datenbasis wird kontinuierlich verbessert, die Gültigkeit von Aussagen, Regeln und Modellen lässt sich überprüfen: Das gesamte System lernt kontinuierlich dazu, das Wissen nimmt zu.

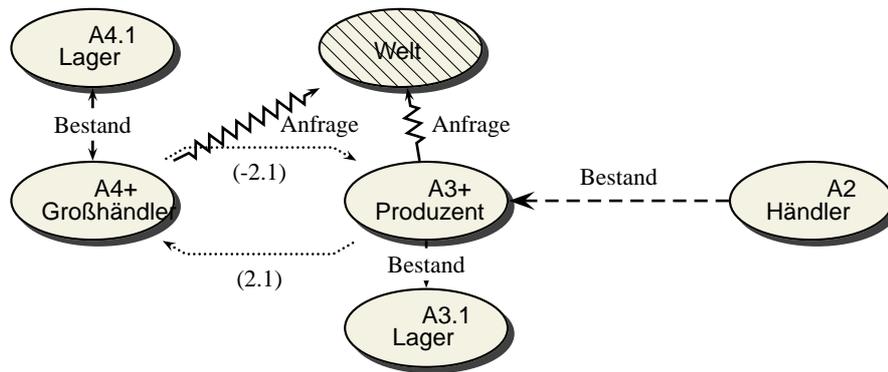


**Abb. 2.6b:** Produktion Tomatenketchup - Informationssicht für eine konsequente Realisierung des Sogprinzips ohne Bestände. Die erste Ziffer beschreibt jeweils, wann eine Nachricht übermittelt wird. (1) vor (2.1), und (2.1) gemeinsam mit (2.2) und (2.3). Das –-Zeichen symbolisiert jeweils eine Antwort. Da der Kunde nicht sichtbar wird, ist er auch in dieser Darstellung nicht dargestellt.

## Beispiel .9 Produktion von Tomatenketchup

### Organisationssicht

Das in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene Vorgehen soll nun am Beispiel der bereits mehrfach angesprochenen Versorgung eines Supermarktes mit Tomatenketchup illustriert werden. Die in den Abbildungen 1.6a bis 1.6c gezeigte Lieferkette soll mit den hier beschriebenen Sichten neu dargestellt werden. Bei praktischen Umsetzungen hat sich oftmals herausgestellt, dass es kaum möglich ist, eine Sicht vollständig ohne Kenntnis der anderen zu erstellen. So wird möglicherweise erst bei der Darstellung sämtlicher Funktionen klar, welche Akteure zu beachten sind. Die für die Datenverarbeitung zuständige Person überblickt möglicherweise die Datensicht



**Abb. 2.6c:** Produktion Tomatenketchup - Informationssicht. Wie Abbildung 2.6b, jedoch mit Beständen und Rahmenvereinbarungen

vollständig, kennt aber nicht alle in die Distribution eingebundenen Akteure. Die hier beginnend mit der Organisationssicht gewählten Reihenfolge ist nicht als Vorgabe zu verstehen.

Sämtliche Akteure der Organisationssicht sind in Abbildung 2.6a zusammengefasst. Mit Heinzmann ist hier derjenige gemeint, der den Produzenten mit Gewürzen, Flaschen, Etiketten und Verpackungsmaterial beliefert. Energie und Paletten werden aus der Welt bezogen.

#### Informationsflüsse

Ob die im vorherigen Abschnitt aufgeführten Akteure erforderlich sind oder noch weitere hinzukommen müssen, lässt sich in einem nächsten Schritt bei der Betrachtung der Informationsflüsse feststellen. Kann es hierfür eine einzige Darstellung geben? Zunächst kann zwischen unterschiedlichen zeitlichen Horizonten unterschieden werden. Hat die Beschaffungslogistik bereits alle erforderlichen Aufgaben erledigt? In der Betrachtung dieses Kapitels soll dieses der Fall sein, d. h. die Lieferanten sind ausgewählt, alle notwendigen Preise und Lieferkonditionen sind vereinbart. Die Beschaffung reduziert sich damit auf das Bestellen der Ware.

Für eine weitere Unterscheidung ist es notwendig festzulegen, wie die Versorgung zwischen den einzelnen Knoten der Lieferkette stattfinden soll: Entweder nach dem Sog- oder nach dem Druckprinzip. Im Falle des Druckprinzips ist die Informationssicht ganz einfach: Es steht in jedem Lager stets genügend Material zur Verfügung. Zusammen mit vorab getroffenen Vereinbarungen ist es ausreichend, jeweils eine Meldung an die nachgelagerten Stellen zu übermitteln, um die benötigten Waren zu erhalten. Bei Anwendung des Sogprinzips ohne jegliche Lagerung sind die benötigten Informationsflüsse umfangreicher, da eine nachgelagerte Stelle erst bei einer Anfrage reagiert. Um eine Antwort auf die Frage „Kann der Ketchup geliefert werden?“, geben zu können, muss sichergestellt sein, dass Lieferanten die benötigten Waren oder Dienstleistungen liefern können und es muss eine interne Planung angestoßen werden, mit der die Durchführbarkeit der Produktion geprüft und sichergestellt wird. Die Beantwortung der Frage nach der Lieferung benötigt mindestens den Austausch von zwei Informationen je Lieferant: einer Bestellung und der Auftragsbestätigung.

Jeder Informationseingang muss bei der empfangenden Stelle ein Ereignis auslösen, mit dem ein entsprechender Prozess zur Bearbeitung der Anfrage angestoßen wird.

Die Bestellungen an die nachgelagerten Lieferanten können entweder zeitgleich oder nacheinander mit bzw. ohne Warten auf Antworten der anderen Lieferanten erfolgen. Das Warten verzögert

den Vorgang, kann aber zu Kosteneinsparungen führen, wenn bei einer negativen Antwort einer nachfolgenden Stelle der Aufwand für die nicht erfolgten Aktivitäten vermieden werden kann. Ist der Rohstoffhändler nicht lieferfähig, hätten Heinzelmann und Spediteur nicht gefragt werden müssen.

Die Auftragsbestätigung an die anfordernde Stelle kann erst übermittelt werden, wenn alle Anfragen an nachgelagerte Stellen positiv beantwortet worden sind. Für den Produzenten bedeutet dies, dass die Bestätigung des Auftrages an den Händler erfolgen kann, wenn positive Antworten von

- Großhändler
- Heinzelmann
- und
- Spediteur

eingetroffen sind.

Der frühest mögliche Zeitpunkt für die Übermittlung der Auftragsbestätigung ist der Zeitpunkt des Eintreffens der letzten Bestätigung. Eine analoge Überlegung trifft auf den Großhändler zu. Soll der Produktionsprozess beim Produzenten just in time erfolgen, so müssen nicht nur die Mengen bestätigt werden, sondern auch noch alle Anliefertermine so aufeinander abgestimmt werden, dass die Flaschen genau dann eintreffen, wenn der Ketchup zum Abfüllen bereit ist. Für diese Koordination werden nicht nur Großhändler und Heinzelmann benötigt, sondern auch die für die Transporte verantwortlichen Akteure, sowohl für die innerbetrieblichen als auch für die zwischen den verschiedenen Standorten. Wird das Sogprinzip in der ursprünglichen Form, d. h. mit dem Ketchupproduzenten als dem Fertiger des Endproduktes mit einer lagerorientierten Fertigung, angewandt, bleiben die Informationsflüsse in der dargestellten Form bestehen, jedoch werden diese nicht mehr auf Anfrage gestartet, sondern innerhalb eines geschlossenen Regelkreises, der den Bestand oder noch besser die Bestandsentwicklung beim Händler als Ist-Größe benutzt.

Eine wiederum modifizierte Informationssicht, dargestellt in 2.6c ergibt sich, wenn

- Händler und Produzent Lieferabrufe vereinbart haben,
- an einzelnen Stufen Lager vorhanden sind
- und
- Dienstleistungen in ausreichendem Umfang verfügbar sind.

In diesem Fall genügt zum Auslösen ein einfacher Datenaustausch zwischen Händler und Produzent. Dieser kann entweder dadurch erfolgen, dass der Händler einen Abruf an den Produzenten übermittelt oder aber der Produzent auf ein System des Händlers zugreifen kann, aus dem er seine Aktionen ableiten kann. Da die Ware am Lager verfügbar ist, kann die Lieferung sofort erfolgen. Mit Eingang der Bestellung ergibt sich das weitere Vorgehen, d. h. ein Regelkreis beginnt zu arbeiten. Es gibt die beiden Alternativen, dass eine Produktion angestoßen wird oder nicht. Falls ja, kann eine Bestellung von dem Produzenten an den Großhändler erfolgen. Verfügungen sowohl Großhändler als auch Produzent über ein eigenes Lager, so können die Verfügbarkeiten von Tomaten und Verpackungen ohne Zeitverlust abgefragt werden. Die erforderlichen Transporte werden durch Meldungen an die Welt, z. B. eine Frachtenbörse, beauftragt. Der Aufwand und die benötigte Zeit für den Abstimmungsprozess reduzieren sich, die Lieferzeit an den Händler ist sehr kurz und es ist eine hohe Prozesssicherheit gegeben: Flaschen, Ketchup und Verpackung können rechtzeitig zusammengeführt werden. Voraussetzung ist ein funktionierender Regelkreis

mit dem erforderlichen Austausch von Daten und Informationen. Zu einer weiteren Verbesserung des Prozesses sollte der Informationsfluss auch von links nach rechts erfolgen. Es wäre aus Sicht des Produzenten wünschenswert, die Bestände des Großhändlers zu kennen, um hier gegebenenfalls eine zweite Bezugsquelle zu erschließen, d. h. ein double sourcing zu realisieren.

### **Prozesssicht**

Auch für die Darstellung der Prozesssicht wird es keine einheitliche Lösung geben. Die hier beschriebene Vorgehensweise ist jedoch auf sehr viele Produkte anwendbar. Wie in den Anforderungen an die Prozessbeschreibung formuliert, ist darauf zu achten, dass eine geeignete Struktur erkennbar ist, d. h. jeweils der richtige Detaillierungsgrad gefunden wird, vgl. S. 53. Ähnlich wie bei der Informationssicht können hier zwei Wege parallel beschritten werden: Eine top-down und eine bottom-up Vorgehensweise. Beginnend bei der obersten Ebene kann entschieden werden, in welchem Zweig eine tiefer gehende Darstellung notwendig ist. Aus Sicht des Produzenten des Ketchups ist die genaue Kenntnis sämtlicher Transportvorgänge nicht von Bedeutung. Für ihn muss gewährleistet sein, dass der Transportvorgang vorgegebenen Anforderungen genügt. Weder Produzent noch Spediteur müssen wissen, wie der Großhändler arbeitet, solange er vorgegebenen Anforderungen genügt.

Die beiden Abbildungen 2.2b und 2.2c zeigen zwei unterschiedliche Möglichkeiten, nach denen die Ketchupproduktion umgesetzt werden kann. Im ersten Bild erfolgt dieses nach dem Sogprinzip, im zweiten nach dem Druckprinzip. Der einzige Unterschied besteht in dem auslösenden Ereignis. Ohne tiefer gehende Details kann dieses anhand dieser stark vereinfachten Darstellung bereits unterschieden werden. Wie im Kapitel über die Informationssicht beschrieben, hängt von der aufgrund dieser Darstellung getroffenen Entscheidung ab, wie die Informationsflüsse umzusetzen sind. Aus dieser Darstellung kann eine weitere wichtige Information abgelesen werden: Der Prozess beginnt damit, dass Tomaten verfügbar sind. Weiter zurück liegende Schritte, wie die Produktion der Tomaten auf einem landwirtschaftlichen Betrieb und der Transport von dort zum Großhändler werden nicht betrachtet. Dieses definiert einen Teil der Systemgrenzen.

Nunmehr kann die nächste Verfeinerungsstufe in Abb. 2.2c betrachtet werden. Der gesamte Prozess wird in die Bereitstellung der Tomaten durch den Großhändler und den eigentlichen Produktionsprozess unterteilt und die Prozesssicht wird um die Organisationssicht ergänzt. Sowohl Prozesse als auch Akteure werden hier als zusammengesetzt betrachtet. Fehlende Detailschritte müssen dann in weiteren Detaillierungsstufen folgen. Hier soll nur der eigentliche Produktions- oder Zubereitungsschritt um eine Ebene verfeinert werden. Auf dieser in Abbildung 2.4 gezeigten Ebene kann erkannt werden, welche Teilschritte prozessspezifisch sind und welche aus anderen Prozessen übernommen werden können. Lagerung und Distribution der Fertigwaren sind wie in vielen anderen Produktionsprozessen zu sehen und werden durch die Darstellungen 1.11 und 1.12 beschrieben. Für die Beschaffung und Bereitstellung muss eine auf Frischwaren spezialisierte, aber sicher keine nur für Tomaten gültige, Form gewählt werden. Einzig die Produktion muss speziell für diesen Fall angepasst werden. In dieser Detaillierungstiefe ist nicht mehr zu erkennen, ob es sich bei dem Gesamtprozess um eine Realisierung des Druck- oder Sogprinzips handelt. Dieses stellt verglichen mit einer Darstellungsart, in der alle Schritte in einem einzigen Diagramm zu sehen sind, eine erhebliche Vereinfachung dar.

Die hier beschriebene Vorgehensweise macht deutlich, wie allgemein eine Prozessbeschreibung erfolgen kann. Zweifelsohne ist die Zubereitung konkret für die Produktion von Tomatenketchup darzustellen. Die sich daran anschließenden Schritte können von denen der Bierproduktion übernommen werden. Übernehmen bedeutet nicht, dass die Schritte exakt gleich sind, übernehmen

heißt, die Struktur zu übernehmen und Parameter anzupassen. Dieses bietet eine hervorragende Einsatzmöglichkeit für einen **Prozessgenerator**, der eine effiziente und sichere Erstellung effizienter und sicherer Prozesse ermöglicht.

*Ich weiß noch, wie ich nur dovun gedräump hann,  
wovunn ich nit woss, wie ich et sööke sollt,  
vüür lauter Söökerei et Finge jlatt versäump hann  
un övverhaup, wat ich wo finge wollt.  
Ne Kopp voll nix, nur die paar instinktive Tricks.  
Et duhrt lang, besste dich durchblicks.*

BAP – Verdamp lang her

# 3

## Informationslogistik

### 3.1 Daten, Informationen und Wissen

#### 3.1.1 Alles eins?

Einigkeit besteht darüber, dass mit diesen drei Begriffen etwas sehr wichtiges verbunden ist. Es gibt kaum ein größeres Unternehmen, dass sich nicht mit Informations- oder Wissensmanagement beschäftigt, Datenmanagement erscheint zu profan. Sind die Begriffe beliebig austauschbar oder gibt es Unterschiede? Betrachten wir folgendes Zwiegespräch, das sich im Anschluss an einen Vortrag über Transponder entwickelte. Der Vortragende hatte vorgeschlagen, Seecontainer mit Transpondern auszustatten, um sie dann verfolgen und darauf ein Berichtswesen aufbauen zu können. Als eine Meldung sollte „Der Container ist auf See“, versandt werden.

*Fragender : Handelt es sich bei dieser Meldung um ein Datum oder um eine Information?*

*Vortragender : Um eine Information.*

*Fragender : Wie häufig sollte diese an den Empfänger übermittelt werden? Wäre es wünschenswert, diese Information stündlich oder jede Minute zu erfassen und weiterzuleiten?*

*Vortragender : Ja.*

*Fragender : Würden Sie der Behauptung zustimmen, dass es sich bei einer Information um etwas wertvolles für den Empfänger handelt und er sich darüber freut?*

*Vortragender : Ja.*

*Fragender : Etwas anderes Wertvolles wäre z. B. ein 100 €-Schein?*

*Vortragender : Ja.*

*Fragender : Sie würden sich, wie viele andere Menschen, freuen, wenn sie jede Minute etwas wertvolles, wie einen 100 €-Schein, erhalten würden?*

*Vortragender : Sicher.*

*Fragender : Denken Sie, dass sich der Empfänger der obigen Meldung auch freuen würde, wenn er diese im Minutentakt übermittelt bekommen würde?*

*Vortragender : Ich denke schon.*

*Fragender : Glauben Sie nicht, dass das irgendwann störend werden würde?*

*Vortragender : Doch.*

*Fragender : Ist dann das, was er dann erhält, nicht mehr wertvoll?*

*Vortragender : Na ja.*

*Fragender : Aber es ist doch, so wie sie gesagt haben, eine Information und somit wertvoll. Sie würden doch auch noch den zwanzigsten Geldschein gern in Empfang nehmen, wieso nicht auch die zwanzigste Meldung?*

*Vortragender : Ja, aber die Meldung hat sich ja verändert.*

*Fragender : Die Meldung ist aber gleich geblieben, nur der Zeitpunkt hat sich geändert.*

Hier wurde das Gespräch abgebrochen. Handelt es sich bei der Meldung nun um eine Information? Was verändert sich von der ersten bis zur zwanzigsten Übermittlung, obwohl alle Wörter vollkommen unverändert bleiben?

Kommen wir zur Beantwortung dieser Frage nun zur Definition des Begriffes Information. Eine in der Literatur durchaus gebräuchliche Definition lautet:

**Definition .20 Information – Version I**

*Information ist zweckorientiertes Wissen [Alp+05].*

Beim Lesen dieser Definition drängt sich zwangsläufig die Frage „Was ist Wissen?“, auf. Wissen wiederum wird manchmal als Summe der Informationen verstanden. Da dieses Dilemma nicht zu lösen zu sein scheint, soll hier eine andere Definition verwendet werden, die auf [Sha48] zurückgeht.

**Definition .21 Information– Version II**

*Information ist alles, was unsere Unsicherheit reduziert.*

Für den Bereich der Nachrichtentechnik, aus dem diese Definition stammt, ist klar, was unter Unsicherheit verstanden wird. Um dieses auch für logistische Zwecke brauchbar zu machen, sollen beide Definitionen miteinander verbunden werden. Unsicherheit bzw. Sicherheit soll zweckorientiert verstanden werden. Der Zweck soll stets das Finden einer Lösung bzw. das Treffen einer Entscheidung sein. Eine Meldung über einen Aufenthaltsort eines Containers wird damit nur dann zu einer Information, wenn diese an eine Person oder Maschine übermittelt wird, die im Falle des Verschwindens agieren müsste.

### 3.1.2 Daten

Was ist diese Meldung in allen anderen Fällen? Die obige Meldung ist zunächst ein Datum. Der Ursprung des Wortes Datum steht für etwas Gegebenes. Die Art und Weise, wie dieses Gegebene dargestellt wird, kann sehr unterschiedlich sein. Mögliche Datentypen sind in Tabelle 3.1 zu sehen.

Zusätzlich zu einer Diskussion möglicher Datentypen ist die Art der Datenerfassung und -übertragung von entscheidender Bedeutung. Für die Erfassung einer Fahrzeit, wie der unseres Autos auf dem Weg von Hamburg nach München, gibt es mehrere Möglichkeiten.

Typ	Beispiel
Zahlen	3, 13.33, 13, 33, $13\frac{1}{3}$ , $13.\bar{3}$ , $e$ , $\pi$ , $\sqrt[3]{3}$ , <i>MMVI</i> , $\sqrt[4]{-4}$
Größen	120 km/h, 23 kg
Nummern	Postleitzahlen, Kontonummern, Telefonnummern. Um Nummern und Zahlen unterscheiden zu können, werden diese in diesem Text durch unterschiedliche Schriften dargestellt: <i>2692</i> steht für eine Nummer und 2692 für eine Zahl.
Datumsangaben	05-06-07, 14:46Uhr, 2:46 p. m., 14.76 Stunden nach Mitternacht, ungefähr $\frac{3}{4}$ drei
Zeitangaben	2h46', $2.\bar{36}$ h
Intervalle	[3, 13], zwischen 14:46Uhr und 16:01Uhr langsamer als 120 km/h, etwas langsamer als 120 km/h, sehr viel langsamer als 120 km/h, zwischen Hamburg und München, vor München
Fahrstrecken	Hamburg - Hannover - Kassel - München Hamburg - A7 - Hannover - A7 - Kassel - A9 - München
Mengen	Alle Kunden in dem Postleitzahlengebiet 33.
Aussagen	Das Auto ist pünktlich in München angekommen.

**Tab. 3.1:** Datentypen

- Abfahrts- und Ankunftszeit werden vom Auto selbst ermittelt, notiert und weitergeleitet. Die Qualität dieses Datums ist abhängig von der Qualität der Uhr im Auto.
- Die Abfahrtszeit wird von einer Person am Startort und die Ankunftszeit von einer am Zielort ermittelt. Die Qualität des Datums Fahrzeit ist abhängig von der Qualität beider Uhren und deren Synchronisation.
- Das Auto übermittelt je eine Nachricht bei Start und Ziel an eine Zentrale, in der dann die Zeit erfasst wird. Die Qualität des so ermittelten Datums hängt nun von der Kommunikation und der Uhr in der Zentrale ab.

Eines ist allen möglichen Datenerfassungen gemeinsam:

**Weisheit 3.1** *Operative Systeme liefern Daten, keine Informationen.*

Die Angabe eines Navigationssystems „Sie befinden sich an der Position 52°13'34" nördlicher Breite und 8°22'14" östlicher Länge“, ist nur für wenige Menschen eine Information. Für die Fahrt nach München müsste dieses zumindest in eine verständlichere Form, wie „Sie befinden sich in der Nähe von Göttingen“, umgewandelt werden. Auch dieses ist nicht immer hilfreich, d. h. reduziert keine Unsicherheit. Hier müsste gesagt werden „Sie sind aktuell zwei Minuten vor der geplanten Zeit.“

Für die Brauchbarkeit der Daten zur Informationsgewinnung ist die Bewertung der Daten unverzichtbar. Welches Datum in welcher Qualität benötigt wird, kann nur entsprechend einer

Anforderung beantwortet werden. Welche Qualität Daten tatsächlich aufweisen, muss aus der Anwendung heraus bestimmt werden. Daten können in folgende Gruppen eingeteilt werden.

**Definition .22 Stamm- und Bewegungsdaten**

*Stammdaten haben eine zeitlich unbestimmte Lebensdauer. Bewegungsdaten sind Daten mit einer zeitlich von vornherein begrenzten Lebensdauer.*

Systemparameter sind Stammdaten, Zustandsgrößen Bewegungsdaten. Zu den Bewegungsdaten zählen Aufträge, Bestellungen, Buchungen, zu den Stammdaten Artikel-, Kunden-, Lieferanten- und Mitarbeiterdaten.

Zeitliche unbestimmte Lebensdauer heißt nicht, dass die Daten ewig so bleiben wie sie sind sondern, dass sie nicht automatisch zerstört werden. Für Stammdaten ist gefordert, dass sie zeitlich unbefristet aber gleichzeitig auf einem aktuellen Stand gehalten werden sollen. Dieses heißt nicht, dass Daten geändert werden sollen, wie das heutzutage in vielen Programmen möglich ist, d. h. durch Löschen und neues Hinzufügen. Aktualisieren bedeutet, dass alte Werte für ungültig erklärt und neue hinzugefügt werden, wie in einem Grundbuch, in dem der alte Eintrag gestrichen und ein neuer angefügt wird.

**Weisheit 3.2** *Das Löschen von Daten sollte grundsätzlich unmöglich sein.*

Die Forderung, dass Daten nicht gelöscht werden, ist nur eine von vielen an Daten, die unter folgenden Kategorien zusammengefasst werden können.

- **Verfügbarkeit**  
Die Daten müssen aktuell sein, d. h. mit einer angemessenen Geschwindigkeit erfasst und zur Verfügung gestellt werden. Es muss möglich sein, auf diese zugreifen zu können, wenn es erforderlich ist. Sind Daten nur einen begrenzten Zeitraum gültig, müssen diese Zeiträume angegeben werden.
- **Quantität**  
Hierbei sind die gesamten Mengen, die Menge je Ereignis und die Anfallhäufigkeit zu betrachten. Eine Million Datensätze im Laufe einer Woche zu erfassen ist kein Problem, innerhalb einer Minute vermutlich doch. Auch das Auswerten von mehreren Millionen Kassensbons dauert länger als eine Minute.
- **Widerspruchsfreiheit**  
Werden in Datenbeständen Rechnungen durchgeführt und können Einträge, die das Ergebnis von Berechnungen darstellen, manuell geändert werden, so kann es leicht zu Widersprüchen kommen, die später nicht mehr aufgelöst werden können. Können Postleitzahlen, Stadt- und Straßennamen unabhängig voneinander und ohne Überprüfung eingegeben werden, sind Widersprüche und Fehler vorprogrammiert.
- **Qualität**  
Sowohl Umfang, Genauigkeit, Detaillierungsgrad und Unsicherheit sind zu spezifizieren. Was nützt die Angabe einer erfassten Ankunftszeit in München auf Millisekunden genau, oder eine Positionsangabe einer Palette auf zehn Nachkommastellen, wenn die Messunsicherheit 20 % beträgt.
- **Vollständigkeit**  
Werden beim Scannen eines Warenkorbs nur 98 % erkannt, ist dieser Vorgang wertlos, wenn er als Grundlage eines Kassensbons genutzt werden soll.

- Richtigkeit  
Dieses ist sicher eine grundlegende Forderung und wird dennoch sehr häufig ignoriert. Das Überprüfen auf Richtigkeit ist mit erheblichem Aufwand verbunden. Plausibilitätstests können zumindest behilflich sein, Fehler zu erkennen.

In modernen vernetzten Systemen nehmen Datensicherheit und -schutz einen besonderen Stellenwert ein und sollen deshalb besonders erwähnt werden.

**Definition .23 Datensicherheit und Datenschutz**

*Datensicherheit steht für die Bewahrung von Daten vor Vernichtung oder Verfälschung. Ziel des Datenschutzes ist der Schutz des Persönlichkeitsrechts des einzelnen vor einer Beeinträchtigung durch die Verwendung von ihm betreffenden Daten.*

Die Forderung nach Richtigkeit verlangt das Fehlen von Fehlern. Da eine Vielzahl von Fehlerquellen vorliegen können, sollen an einigen einfachen Beispielen die Konsequenzen von Fehlern deutlich gemacht werden. Hieraus kann abgeleitet werden, wo welcher Aufwand für Fehlerreduktion aufgebracht werden muss. Die häufigsten Fehler sind

- falsche Zeichen,                      • fehlende Zeichen und                      • Zeichendreher.

Kann ein Mensch beim Schreiben von Text diese gegebenenfalls erkennen und korrigieren, so benötigt ein Rechner hierfür geeignete Algorithmen. Oftmals sind unterschiedliche Schreibweisen nicht einmal fehlerhaft und für Menschen verständlich, doch nicht für Maschinen. So stehen

- Siegfried Jetzke                      • Dr. Siegfried Jetzke                      • Dr. Jetzke
- S. Jetzke                                • Siegfr. Jetzke                                • Hr. S. Jetzke

sicher für ein und dieselbe Person, auch wenn die verwendeten Zeichenketten nicht gleich sein. Ob nun  $\Sigma\epsilon\gamma\phi\rho\iota\epsilon\delta$  ein Fehler ist, wenn *Siegfried* geschrieben werden sollte, ist eine Definitionsfrage. Fehlerbehaftete Zeichenketten können Menschen oftmals noch eindeutig erkennen bzw. richtig zuordnen, wie z. B. bei:

- Meier, Albert-Schweitzer-Strasse 7                      • Am Morgen des 22. Aug. starb Julius.
- Meyer, Albert Schweizer Straße 7                      • Am morgen des 22. Aug. starb Julius.

Bei Zahlen ändert sich dieser Sachverhalt umgehend. In den folgenden Beispielen ist die Anzahl der Fehler ebenso groß wie bei obigen Zeichenketten.

- 05331 121249    • 3.96 €
- 05331 112249    • 39.96 €

Wie werden aus Daten Informationen? Daten sind nach Definition .21 dann Informationen, wenn sie Unsicherheit für eine Person reduzieren. Unsicherheit bei Entscheidungen entsteht dann, wenn zwischen verschiedenen Alternativen ausgewählt werden kann oder muss.

### 3.1.3 Information

Wie auch die Qualität von Daten unterschiedlich sein kann, gibt es auch für Informationen verschiedene Kategorien, in die diese eingeordnet werden können. Es wird zwischen

- sicher  
Das Auto ist um 14:02Uhr abgefahren.
- unsicher  
Die Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt  $120 \pm 12$  km/h.
- unscharf  
Auf dem Teilstück von Hamburg nach Kassel wurde langsam gefahren.
- asymmetrisch  
Der Einladende hat den Termin auf 21:00Uhr verschoben und den neuen Termin dem Eingeladenen nicht mitgeteilt.

unterschieden.

Die sicheren Informationen mögen uns vielfach als die besten erscheinen. Sicher ist, dass der 24. Dezember eines jeden Jahres Heiligabend ist. Wie oben gesagt, ist das für fast alle Menschen aber nicht einmal eine Information, da diese Aussage keine Unsicherheit vermindert. Sicher ist nicht einmal, dass der 31. Dezember eines Jahres der letzte Tag eines Jahres ist. Häufiger haben wir es mit unsicheren Informationen zu tun, bei denen zwischen zwei Fällen zu unterscheiden ist.

- Die zugrunde liegenden Daten sind konstant, jedoch treten bei der Erfassung Fehler auf.  
Aus einem Hubschrauber heraus wird die Anzahl der Autos auf einem Autobahnteilstück geschätzt.
- Die zugrunde liegenden Daten sind nicht konstant, die Erfassung ist exakt.  
Die Fahrzeit von Hamburg nach München kann exakt gemessen werden. Bei mehreren Fahrten wird es sicherlich mehrere verschiedene Ergebnisse geben, aus denen ein Mittelwert berechnet werden kann.

Für beide Situationen können unterschiedliche Strategien verfolgt werden, um die Qualität des Ergebnisses zu verbessern.

Nun soll auf die offen gebliebene Frage zu Anfang dieses Kapitels, ob die Meldung über den Status des Containers eine Information ist oder nicht, zurückgekommen werden. Bei der ersten Übermittlung wurde mitgeteilt, dass das Schiff abgelegt hat und sich auf See befindet. Hiermit wurde eine Unsicherheit, die über den aktuellen Status des Schiffes, beseitigt. Die zweite kann als Bestätigung der ersten verstanden werden und dient dazu, dass die Unsicherheit nun endgültig der Sicherheit gewichen ist. Alle folgenden Meldungen ändern nichts daran, was der Empfänger über den Container weiß, sie sind also keine Informationen mehr und somit verlieren sie an Wert, es sei denn, dass das Schiff eine Gegend passiert, für die ein Orkan vorausgesagt wurde.

Lässt sich der Begriff Unsicherheit bewerten? Ein Maß für die Unsicherheit stellt die **Informationsentropie**  $H$  dar, die in Analogie zu dem Entropiebegriff in der Physik eingeführt wurde [Sha48].

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2(p_i) \quad (3.1)$$

Hierbei ist  $N$  die Anzahl der insgesamt möglichen Entscheidungsalternativen  $A_1, \dots, A_N$  und  $p_i$  ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Alternative  $A_i$  eintrifft. Die Verwendung des 2-er

Logarithmus kommt daher, dass dieser Begriff im Zusammenhang mit Nachrichtenübertragung eingeführt wurde, in dem Nachrichten aus Bits zusammengesetzt sind, die jeweils nur zwei Zustände einnehmen können. Die Verwendung einer anderen Basis führt zu anderen Zahlen, ändert aber nichts an der Argumentation und der Bedeutung der Entropie.

Für den Fall, dass es nur eine Möglichkeit gibt, wie z. B. die Antwort auf die Frage „Ist die Erde eine Kugel?“, die dann zwangsläufig mit der Wahrscheinlichkeit  $p_1 = 1$  eintrifft, gilt

$$H^{(\text{Kugel oder nicht Kugel})} = -1 \cdot \log_2(1) = 0 \quad (3.2)$$

Bei dem Werfen einer Münze mit einer roten und einer blauen Seite gibt es zwei Alternativen mit  $p_1 = p_2 = \frac{1}{2}$ . Dieses eingesetzt in Gleichung (3.1) führt zu

$$H^{(\text{Münze})} = - \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \log_2 \left( \frac{1}{2} \right) = \sum_{i=1}^2 \frac{1}{2} \cdot 1 = 1 \quad (3.3)$$

Für einen Würfel mit den Zahlen von 1 bis 6 gibt es sechs Möglichkeiten mit den Wahrscheinlichkeiten  $p_1 = \dots = p_6 = \frac{1}{6}$ . Mit  $\log_2 \frac{1}{6} = -2.58$  ergibt sich für die Entropie

$$H^{(\text{Würfel})} = - \sum_{i=1}^6 \frac{1}{6} \log_2 \left( \frac{1}{6} \right) = 2.58 \quad (3.4)$$

Was bedeuten die hier berechneten Zahlen? Sie stehen für die mittlere Anzahl von geeigneten Fragen, die gestellt werden müssen, um absolute Sicherheit zu erhalten. Betrachten wir zunächst das *Erde*-Beispiel: Wie viele Fragen sind notwendig, um sicher zu wissen, dass sie eine Kugel ist? Keine bzw. 0. Im Fall des Münzwurf wird eine Frage benötigt: „Liegt die blaue Seite oben?“ Ist die Antwort „Ja!“, wissen wir, dass die blaue Seite oben liegt, falls „Nein!“, wissen wir, dass die rote oben liegt.

Am Beispiel des Würfels wird die Bedeutung des Wortes geeignet deutlich. Ein möglicher Satz von Fragen ist:

**Vorgehen 3.1 Fragensatz 1 zur Ermittlung der gewürfelten Zahl**

a. „Ist die gewürfelte Zahl eine 1?“

⋮

b. „Ist die gewürfelte Zahl eine 5?“

*Im Mittel werden 3 Fragen benötigt, um die richtige Zahl sagen zu können.*

Eine andere Möglichkeit zu fragen ist die folgende:

### Vorgehen 3.2 Fragensatz 2 zur Ermittlung der gewürfelten Zahl

- a. „Ist die gewürfelte Zahl kleiner als 4?“ Falls ja:
- b. „Ist die gewürfelte Zahl kleiner als 2?“  
Ist die Antwort ja, ist die gewürfelte Zahl 1 und es wurden zwei Fragen benötigt.  
Ist die Antwort nein, ist die gewürfelte Zahl 2 oder 3 und es muss eine weitere Frage gestellt werden.
- c. „Ist die gewürfelte Zahl eine zwei?“

Da 2 oder 3 zusammen doppelt so häufig gewürfelt werden wie die 1, müssen doppelt so häufig drei wie zwei Fragen gestellt werden und die mittlere Anzahl beträgt  $2\frac{2}{3}$ . Wird die erste Frage mit nein beantwortet, ergeben sich andere Fragen, die hier nicht aufgeführt sind.

An diesem Beispiel kann deutlich gemacht werden, dass die Anzahl der Fragen und somit die Entropie abhängig davon ist, ob eine **Struktur** vorhanden und erkennbar ist bzw. erkannt wird oder nicht. Wären sechs Zettel mit den Nummern von 1 bis 6 in sechs Kästen versteckt und der Kasten mit der 1 soll gefunden werden, gibt es keine andere Möglichkeit, als der Reihe nach zu probieren, d. h. es würden im Mittel wieder 3 Versuche benötigt. Diese Anzahl ist identisch mit der bei dem ersten Satz von Fragen, dem Probieren ohne Überlegen. Das Erkennen und Ausnutzen **struktureller Informationen** steigert die Lösungseffizienz erheblich. Durch die mit der Effizienzsteigerung verbundene Reduzierung der Lösungsschritte wird gleichzeitig die Qualität der Lösung verbessert [JB91]. Als ein einfaches, vielen aus der Schule bekanntes Beispiel hierfür, kann die Geschichte herangezogen werden, in der die Schulklasse mit Carl Friedrich Gauß Zahlen von 1 bis 100 addieren sollten. Die Fleißigen schrieben eifrig, Gauß kam zu der Formel:

$$\sum_{i=1}^N i = \frac{N(N+1)}{2} \quad (3.5)$$

**Weisheit 3.3** *Eifrige haben Vorteile bei nicht strukturierten Problemen, Intelligente immer dann, wenn es eine Struktur gibt.*

Das Finden der richtigen Lösung bei dem Würfelbeispiel wurde einfacher, weil der Informationsgehalt einer Antwort im zweiten Fall höher war: Bei dem Würfel kann mit einer Frage die Hälfte aller möglichen Alternativen ausgeschlossen werden, beim Suchen in den Kästen liefert jede Frage bzw. jeder Versuch nur eine Antwort. Der Preis, der für die Effizienzsteigerung zu zahlen ist, liegt darin, dass eine sehr schnelle Lösung, wie beim Fragensatz 1, dem planlosen Raten möglich, ausgeschlossen ist.

Wird Information als Reduktion der Unsicherheit mit dem Begriff der Entropie verknüpft, muss der 2. *Hauptsatz der Thermodynamik* [z. B. AF74] beachtet werden:

**Weisheit 3.4** *In einem geschlossenen System nimmt die Entropie nie ab.*

In einem geschlossenen System nehmen die Entropie und somit die Unsicherheit zu, im günstigsten Fall bleiben sie konstant. Um dieses zu verhindern, muss das System geöffnet und Energie

zugeführt werden, d. h. eine Entropieerniedrigung, die einem Informationsgewinn entspricht, ist stets mit Aufwand verbunden.

Was bedeutet dieses für das Beispiel der Fahrt von Hamburg nach München. Der Eingeladene sei das geschlossene System. Ohne jegliche Wechselwirkung mit der Umwelt würde das Auto irgendwann losfahren und keinerlei Kenntniss über den zu erwartenden Ankunftszeitpunkt haben. Der Fahrer, das bisher geschlossene System, öffnet sich, nimmt die Ergebnisse der Planung zur Kenntnis und verschließt sich dann wieder. Nun besteht zum Zeitpunkt des Abfahrens Sicherheit darüber, ob er im Plan liegt oder nicht. Mit zunehmender Fahrtdauer wird seine Unsicherheit darüber, ob er pünktlich ankommen wird oder nicht, größer. Auch hier muss er sich öffnen und Informationen aus der Umwelt, wie Entfernungsangaben auf der Autobahn oder seine aktuelle Position, aufnehmen und mit dem Plan vergleichen. Das System wird offen, der Vergleich ist mit Aufwand verbunden und ebenso die Selektion der Daten, die für ihn Informationen darstellen. Beim Hören der Verkehrsnachrichten ist eine Selektion unverzichtbar. Für fast alle Menschen sind Verkehrsnachrichten nahezu immer keine Informationen. Was interessiert kurz vor München der Stau auf der A14 auf dem Teilstück von Magdeburg nach Schönebeck. Ebenso sind auf den Autobahnwegweisern nur Namen der Städte zu beachten, die auf dem Weg nach München liegen. Auch hier kommt der strukturellen Information eine entscheidende Bedeutung zu. Eine Person, die über keinerlei Kenntnisse der Geographie Deutschlands verfügt, kann am Autobahnkreuz *Hannover-Ost* nicht wissen, ob sie in Richtung Berlin, Kassel oder Dortmund fahren muss, um auf dem günstigsten Weg nach München zu gelangen und folglich auch nicht, welche Staumeldung für sie interessant ist. Selbst mit einer Staumeldung für die Strecke zwischen Hildesheim und Salzgitter, einem für die Fahrt relevanten Abschnitt, könnte diese Person nichts anfangen.

#### 3.1.4 Wissen

Dieses macht deutlich, dass Daten allein nicht ausreichend sind, um Unsicherheit in dem benötigten Maße zu reduzieren. Für die Entscheidung am Kreuz *Hannover-Ost* wäre es hilfreich zu wissen, dass München südlich und Berlin östlich liegen. Somit könnte eine Richtung ausgeschlossen werden. Weitere Daten aus dem Geographieunterricht und Erinnerungen an Straßenkarten können beim Finden der richtigen Richtung ebenso helfen wie der Sonnenstand. Gleichzeitig muss bedacht werden, dass das Abbiegen nach rechts nicht zwangsläufig bedeutet, dass auch nach rechts gefahren wird, sondern in einem Autobahnkreuz durchaus eine Weiterfahrt nach links folgen kann. Zusätzlich zu den aktuell zur Verfügung gestellten Daten werden **Schulwissen** und Kenntnisse über Regeln benötigt, um Entscheidungen treffen zu können. Das Schulwissen umfasst nicht nur die geographischen Koordinaten, Daten, jeder einzelnen Stadt in Deutschland, sondern eine Kenntnis wie die Städte zueinander angeordnet sind, also wiederum strukturelle Informationen. Es ist sicher nicht ausreichend, die Stelle eines Atlases zu kennen, in der dieses zu finden ist.

Wie ist mit Meldungen, dass heute die *Cebit* eröffnet wird oder dass bei Hildesheim ein Gefahrgut-Lkw umgestürzt ist, umzugehen? Hier kann die Erinnerung helfen. In den letzten Jahren hat es anlässlich der *Cebit* immer Staus gegeben und ein umgestürzter Lkw kann zu einer Sperrung der Autobahn und folglich zu Verzögerungen führen. Die Übertragung von Erfahrungen auf aktuelle Situationen ist ebenfalls unverzichtbar für gute Entscheidungen. Vieles von dem, was benötigt wird, muss schnell verfügbar sein. Das Nachschlagen ist nur dann ein probates Hilfsmittel, wenn es unbedeutend ist, in welcher Zeit eine Entscheidung getroffen wird. In zeitabhängigen Prozessen, wie es logistische Probleme immer sind, spielt die zeitliche Verfügbarkeit aller benötigten

Komponenten eine wesentliche Rolle. Möglicherweise ist eine Entscheidung minderer Qualität, die rechtzeitig zur Verfügung steht, zu akzeptieren und einer besseren, die erst wesentlich später verfügbar ist, vorzuziehen. Diese Verbindung von Schulwissen, Kenntnis von Regeln, Erfahrung, der Fähigkeit, Erkenntnisse früherer Situationen übertragen und hieraus zusammen mit den aktuellen Daten Schlussfolgerungen ziehen zu können, machen einen großen Teil des Wissens aus [Leh06].

In logistischen Systemen kann dieses Wissen kontinuierlich durch Beobachten laufender Systeme verbessert werden. Die Aufgabe von Wissensmanagement muss es sein, diesen Prozess des Lernens zu organisieren und dafür zu sorgen, dass Wichtiges erhalten bleibt und nicht von Unwichtigem überdeckt wird.

In allen natürlichen Systemen gibt es Gesetzmäßigkeiten, die zu Strukturen führen. Eine Schneeflocke weiß nicht, wie sie auszusehen hat, einfache Regeln für die Bildung legen die Form fest. Das Erkennen und Kennen der Strukturen und Gesetzmäßigkeiten ist Teil der Wissensfindung, das Zerstören dieser Strukturen erschwert dieses. Logistische Systeme sind zu einem großen Teil natürliche Systeme, in denen Waren oder Daten durch Menschen oder Maschinen bewegt werden und die natürlichen Gesetzen unterliegen.

**Weisheit 3.5** *Das ständige Umgestalten von Abläufen erschwert es, Strukturen erkennen zu können. Es verhindert, Strukturen zu kennen.*

## 3.2 Kennzahlen

### 3.2.1 Definitionen

Auch wenn die Diskussion über Wissen und Information sehr spannend ist, dürfen die grundlegenden Aufgaben nicht vernachlässigt werden. Was macht der Vorstandsvorsitzende eines großen Unternehmens oder der Institutsleiter einer Hochschule, wenn die Mitarbeiter falsche Daten liefern? Was nützt es, ausgefallene Strategien und Entscheidungsregeln zu formulieren, wenn es keine Daten gibt, anhand derer deren Brauchbarkeit und Gültigkeit überprüft werden kann? Eine sehr wichtige Art von Daten, die zunächst innerhalb des Controllings eingeführt wurden, sind **Kennzahlen**. Diese sind Zustandsvariablen, die aus dem Betrieb heraus während oder nach Abschluss eines Prozesses bestimmt werden. Die während des Betriebs ermittelten Kennzahlen sollen die Lenkung eines Prozesses unterstützen, die nachträglich ermittelten dienen der Analyse. Da sich Kennzahlen stets aus Prozessdaten ergeben, sind sie vergangenheitsorientiert. Kennzahlen sind zunächst Daten, auf die die obige Diskussion zu Daten und Informationen angewandt werden muss. Eine einfache Möglichkeit, diese entscheidungsrelevant zu nutzen, besteht darin, Intervalle vorzugeben und eine **Ampelfunktion** hiermit zu verbinden. So kann ein Wert von 60% als untere und ein Wert von 90% als obere Grenze festgelegt werden.

**Vorgehen 3.3 Ampelfunktion**

*Liegt der gemessene Wert*

- *zwischen 65 und 85 ist alles in Ordnung, die Ampel zeigt grün.*
- *zwischen 60 und 65 oder zwischen 85 und 90 ist Vorsicht geboten, die Ampel zeigt gelb.*
- *unter 60 oder über 90 besteht akuter Handlungsbedarf, die Ampel zeigt rot.*

Zu klären bleibt, was die Ampel anzeigen soll, wenn kein Wert vorliegt oder wie reagiert werden soll, wenn die Ampel nichts anzeigt.

Feste Parameter oder Zielgrößen werden von außen vorgegeben und dürfen nicht mit Kennzahlen verwechselt werden, die nach definierten Regeln aus dem System heraus ermittelt werden.

Eine Voraussetzung für die Nutzung von Kennzahlen ist das Vorliegen von **Systemparametern**, wie z. B. Kapazitäten. Dieses sind **Stammdaten**, also Größen, die für ein gegebenes System fest vorgegeben sind. Beispiele hierfür sind die Größe eines Lagers oder die Anzahl von Gabelstaplern. Da diese die Grundlage für alle weiteren Betrachtungen darstellen, ist bei ihrer Definition besondere Sorgfalt anzuwenden:

**Beispiel .10 Lagerauslastung**

*Nehmen wir ein Hochregallager mit 1000 Fächern, die jeweils eine Grundfläche von  $125 \times 85 \text{ cm}^2$  besitzen. Dieses ergibt insgesamt eine Stellfläche von  $1062.5 \text{ m}^2$ . Sollen nun Europaletten mit einer Größe von  $120 \times 80 \text{ cm}^2$  eingelagert werden, ergibt die Division von Gesamtfläche und Palettengröße eine Platzanzahl von 1106. Dieses ist offensichtlich falsch, mehr als 1000 Europaletten kann das Regal nicht aufnehmen. Was wird aus der zur Verfügung stehenden Fläche, wenn neben Europaletten auch Düsseldorfer Paletten mit einer Größe von  $60 \times 80 \text{ cm}^2$  eingelagert werden? Fasst das Lager dann 2000 Paletten? Wie ist zu verfahren, wenn Paletten auch noch gestapelt werden können? Wie sieht es aus, wenn Anbruchpaletten gelagert werden müssen?*

Die Anzahl der Fächer und die Anzahl der eingelagerten Paletten gehören zu der einfachsten Art von Kennzahlen, den **Zählzahlen**. Hierunter sollen alle Zahlen verstanden werden, die unmittelbar, d. h. ohne Anwendung irgendwelcher Rechenoperationen, bestimmt werden können. Auch die Anzahl der Pakete auf einer Palette kann zu diesen gehören, abhängig davon, wie diese bestimmt wird. Selbst beim einfachen Abzählen kann keine absolute Fehlerfreiheit garantiert werden. Die Ergebnisse dürften jedoch im Mittel die richtige Anzahl liefern. Wird die Anzahl der Pakete dadurch bestimmt, dass diese mit Transpondern ausgestattet sind und die Transponder gelesen werden, trifft das nicht mehr zu. Da beim Auftreten eines Fehlers weniger aber nie mehr gelesen werden, ist die ermittelte Zahl kleiner als oder gleich der tatsächlichen und somit auch ein berechneter Mittelwert stets kleiner als die tatsächliche mittlere Anzahl.

Beim Zählen muss auch unterschieden werden, ob die Objekte physisch oder administrativ gezählt werden, d. h. werden die Paletten gezählt, die in das Lager gebracht wurden oder die, deren Einlagerung gebucht wurde. So ist die in einer Datenbank gefundene *out-of-stock*-Quote eines Supermarktes in der Regel falsch, da diese nicht die gestohlenen, verlegten oder aufgerissenen Kartons berücksichtigt. Die aus den Prozessen gewonnenen Kennzahlen sind in der Regel ehrlicher, da hier keine buchungstechnischen Spielereien die Ergebnisse verändern.

Die nächste Klasse von Kennzahlen umfasst die, die durch den Einsatz einfacher Geräte bestimmt werden können, den **Messzahlen**. Hierzu gehören die mit einer Waage messbaren Gewichte der Paletten ebenso wie die auf einem Tachometer angezeigte Fahrgeschwindigkeit eines Autos. Wurden die Daten zuverlässig abgelesen? Was wird beim Wiegen einer Palette bestimmt? Das Gewicht von Ware und Palette. Bei der Anzeige der Geschwindigkeit wird die die Anzahl der Achsumdrehungen angezeigt, multipliziert mit einem Wert, der vom Radumfang abhängt, der wiederum von der Art des Rades und der Beladung des Fahrzeuges beeinflusst wird. Beim Wiegen von Wäsche wird das Gewicht der Textilien und der in ihnen enthaltenen Restfeuchte ermittelt. Messzahlen können mit Fehlern behaftet sein, die vom Messgerät oder von dem zu messenden Objekt selbst hervorgerufen werden.

Häufig interessieren Zahlen, die sich aus zwei Zähl- oder Messzahlen ergeben, wie z. B. *Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde* oder *Auslastungsgrad eines Lagers*. Sind Systemparameter festgelegt und werden Zähl- oder Messzahlen erfasst, können solche **abgeleiteten Kennzahlen** ermittelt werden. Hierunter sollen alle Zahlen verstanden werden, die sich aus der Verknüpfung von mindestens zwei Zahlen ergeben. Beispiele hierfür sind:

$$\text{Durchschnittsgeschwindigkeit} = \frac{\text{Ankunftszeit} - \text{Abfahrtszeit}}{\text{Strecke}} \quad (3.6a)$$

$$\text{Verfügbare Bestand} = \text{Vorhandener Bestand} - \text{Reservierter Bestand} \quad (3.6b)$$

$$\text{Lieferzeit} = \text{Zeitpunkt Auslieferung} - \text{Zeitpunkt Auftragseingang} \quad (3.6c)$$

$$\text{Liefertreue} = \frac{\text{Anzahl pünktlich ausgelieferter Sendungen}}{\text{Gesamtanzahl der Sendungen}} \quad (3.6d)$$

$$\text{Auslastungsgrad} = \frac{\text{Tatsächliche Auslastung}}{\text{Maximale Auslastung}} \quad (3.6e)$$

$$\text{Transportkosten je Einheit} = \frac{\text{Kosten}}{\text{Anzahl Einheiten}} \quad (3.6f)$$

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Anzahl produzierter Teile}}{\text{Zeit}} \quad (3.6g)$$

Auch wenn diese Definitionen schon verwendbar aussehen mögen, so sind sie es noch lange nicht. Die Berechnungsgrundlagen müssen weiter präzisiert werden. Betrachten wir zunächst die Durchschnittsgeschwindigkeit. Statt Gleichung (3.6a) könnte auch

$$\text{Durchschnittsgeschwindigkeit} = \frac{\text{Fahrzeit}}{\text{Strecke}} \quad (3.6a')$$

verwendet werden. Im Gegensatz zu (3.6a) gehen in (3.6a') keine Pausenzeiten ein. Eine analoge Betrachtung kann für die Lieferzeit in (3.6d) durchgeführt werden. Sollen Wochenenden berücksichtigt werden oder nicht? Geht ein Auftrag an einem Freitagabend per Fax oder *e-mail* ein, so beginnt die Bearbeitung am Montag, die Uhr für die Lieferzeit läuft möglicherweise bereits ab Freitag, ein Unterschied von mehr als zwei Tagen. Nicht das Berechnen stellt hier ein Problem dar, sondern die Definition.

Als ein weiteres Beispiel soll etwas ausführlicher auf die Definition von Produktivitätskennzahlen eingegangen werden. Dazu wird Gleichung (3.6g) etwas anders geschrieben

$$P_t = \frac{Q}{t} \quad (3.6g')$$

und dieses für einen Monat betrachtet werden. Die Anzahl  $Q$  der produzierten Teile ist eine Zählzahl und soll als exakt angesehen werden. Was ist die *Zeit*? Die Anzahl der

- Kalendertage eines Monats,
- Arbeitstage eines Monats,
- Schichten eines Monats,
- sich aus den Arbeitszeiten abgeleiteten Arbeitsstunden oder die
- tatsächlich geleisteten Arbeitsstunden.

Nur im ersten Fall kann die *Zeit* als ein Stammdatum angesehen werden, sonst handelt es sich jeweils um Bewegungsdaten. Welche Fragestellungen ergeben sich daraus, dass die *Zeit*  $t$  mehrere Bedeutungen haben kann?

Zur Vereinfachung der Diskussion nehmen wir eine Maschine, die von einem Mitarbeiter in einem Einschichtbetrieb bedient wird. Diese Maschine produziere, wenn sie läuft, 100 Teile je Stunde und kann im Jahr 2006 bei angenommenen 248 Arbeitstagen insgesamt 198400 Stück produzieren, bei 365 Tagen sind dieses durchschnittlich

$$\bar{P} = \frac{198400 \text{ Stück}}{365 \text{ Tage}} = 544 \text{ Stück je Tag, hier je Kalendertag.} \quad (3.7)$$

Es sollen nun die Monate Februar bis April 2006 mit 20, 23 und 19 Arbeitstagen betrachtet werden. Die Tabelle 3.2 zeigt die in den jeweiligen Monaten möglichen Stückzahlen und die hieraus

Monat	Kalender- tage	Arbeits- tage	Stückzahl	P <sup>(Kalender)</sup> [Stück/Schicht]		
				absolut	relativ	Abweichung
Februar	28	20	16000	571	105%	+27
März	31	23	18400	593	109%	+39
April	30	19	15200	506	93%	-38

**Tab. 3.2:** Produktivität bei konstanter Produktion von 800 Stück je Tag und Verwendung der Kalendertage eines Monats als Zeitbasis, d. h. die tatsächliche Stückzahl wurde durch die Anzahl der Kalendertage dividiert. 100 % entsprechen dem Jahresdurchschnitt von 544 Stück aus Gleichung (3.7).

resultierenden Produktivitäten, wenn die Kalendertage der jeweiligen Monate als Zeitbasis verwendet werden. Die Produktivität würde schwanken, obwohl Mensch und Maschine zu 100 % ihrer Zeit ohne Störung oder Pause arbeiten. Werden statt der Kalendertage Arbeitstage genommen, ergibt sich, wie zu erwarten, eine konstante Produktivität bei variierenden Stückzahlen je Monat, der April erscheint unproduktiver als März und Februar. Diese Zahl verliert dann ihre Aussagekraft, wenn nicht jeden Tag acht Stunden gearbeitet wird. Betrachten wir ein Unternehmen mit Zweischichtbetrieb von Montag bis Freitag und einer Schicht sonnabends.

Monat	Arbeitstage	Schichten	Stückzahl		P [Stück/Schicht]	
			ohne	mit Ausfall	absolut	relativ
Februar	20+4	44	35200	33600	763.6	95.5%
März	23+4	50	40000	38400	768.0	96.0%
April	19+5	43	34400	32800	762.7	95.3%

**Tab. 3.3:** Wie Tabelle 3.2, jedoch wird jetzt montags bis freitags im Zweischichtbetrieb mit einer weiteren Schicht am Sonnabend gearbeitet. Jeden Monat fallen zwei Schichten aufgrund von Störungen aus. Die relativen Angaben beziehen sich jetzt auf die maximale Stückzahl je Schicht.

Werden die in Tabelle 3.3 bestimmten Stückzahlen durch die Anzahl der Schichten bzw. der der Schichtanzahl zugeordneten Anzahl Arbeitsstunden dividiert, ergeben sich richtige und vergleichbare Zahlen.

$$\text{Produktivität} = 800 \frac{\text{Stück}}{\text{Schicht}} = 100 \frac{\text{Stück}}{\text{Stunde}} \quad (3.8)$$

Bisher wurde ein Szenario betrachtet, in dem Mensch und Maschine in der zur Verfügung stehenden Zeit fehlerfrei produzieren, ein Szenario, für das Produktivitätsbetrachtungen überflüssig sind. Kommen Ausfallzeiten hinzu, müssen sich Werte ergeben, die kleiner als 100 % oder 100 Stück je Stunde sind. In Tabelle 3.3 sind Zahlen dargestellt, die sich ergeben, wenn jeweils zwei komplette Schichten je Monat ausfallen. Es ändert sich die für die Leistungserbringung zur Verfügung stehende Zeit. Da ein Ausfall in einem Monat mit wenigen Tagen einen relativ höheren Anteil hat als in einem Monat mit viel Tagen, ändern sich auch die relativen Zahlen.

Offen ist die Frage, ob für die Berechnung die Nominalanzahl der Schichten oder die reale Anzahl verwendet wird. Hat der Mitarbeiter den Ausfall nicht zu verantworten, so sollte seine Produktivität durch den Ausfall nicht beeinflusst werden, d. h. hier wäre die reale Anzahl zu verwenden. Wieder liegt die Schwierigkeit in der klaren Definition, hier die der Verantwortung.

Bei dem hier beschriebenen Vorgehen würde die Produktivität in „Stück pro Schicht“ angegeben werden. Für Vergleichszwecke kann es aber sinnvoll sein, dieses bei Monatsbetrachtungen in „Stück pro Monat“ umzurechnen. Um nicht wieder die Probleme mit der unterschiedlichen Anzahl von Kalendertagen oder Schichten erscheinen zu lassen, kann ein **Normmonat** mit z. B.  $N^{(T)} = 21$  Tagen oder  $N^{(S)} = 46$  Schichten je Monat verwendet werden. Sind  $q^{(T)}$  und  $q^{(S)}$  die Stückzahlen je Tag bzw. Schicht ergibt sich folgende normierte Produktivität  $P^*$ .

$$P^* = q^{(T)} \times N^{(T)} \text{ bzw. } P^* = q^{(S)} \times N^{(S)} \quad (3.9)$$

Als weiteres Beispiel soll die Auslastung eines Fahrzeuges, vgl. Gleichung (3.6e), betrachtet werden:

#### **Beispiel .11 Fahrzeugauslastung**

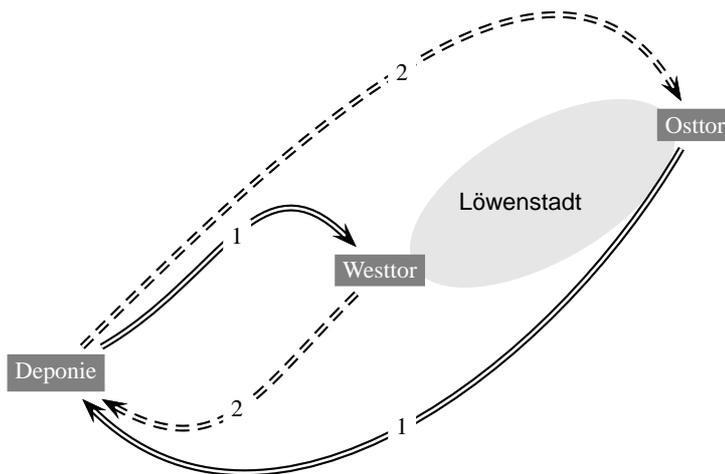
Ein Fahrzeug, das eine maximale Zuladung von 14 Lademetern hat, muss für ein Unternehmen in Hamburg von zwei Lieferanten Ware abholen und diese um 13:00Uhr in Hamburg ausliefern. Der eine Lieferant hat seinen Sitz in Kassel, der andere in Hannover. Die Entfernungen von dem Lieferanten in Kassel zu dem in Hannover und von diesem nach Hamburg betragen jeweils 160 km. Bei dem ersten lädt der Lkw 7 m, bei dem zweiten wiederum 7 m. Er erscheint voll beladen am Tor des Empfängers um 13:02Uhr.

- Ist das Fahrzeug pünktlich?
- Wie hoch ist die Auslastung  $P^{(F)}$  dieses Fahrzeuges?

Ist  $C^{(F)}$  die maximale Zuladung des Fahrzeuges,  $N_s$  die Anzahl der Teilstrecken,  $L_i$  die Zuladung auf der  $i$ -ten Teilstrecke,  $\ell_i$  deren Länge,  $\ell$  die Länge der Gesamtstrecke und

$$p_i^{(F)} = \frac{L_i}{C^{(F)}} \quad (3.10a)$$

die Auslastung auf der  $i$ -ten Teilstrecke, d. h.



**Abb. 3.1:** Mögliche Alternativen für die Müllentsorgung von Löwenstadt. Bei Variante 1 fährt das Fahrzeug leer zum Westtor, entsorgt dann das zu entsorgende Gebiet und fährt über das Osttor voll zurück zur Deponie. Bei Variante 2 wird die Strecke zum Osttor mit dem leeren Fahrzeug zurück gelegt.

$$p_1^{(F)} = \frac{7}{14} = \frac{1}{2} \text{ und } p_2^{(F)} = \frac{14}{14} = 1, \quad (3.10b)$$

so kann die Auslastung mit einer der beiden Möglichkeiten berechnet werden:

Möglichkeit 1:

$$P^{(F)} = \max_i p_i^{(F)} = 100\% \quad (3.10c)$$

Möglichkeit 2:

$$P^{(F)} = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} L_i \cdot \ell_i}{\ell \cdot C^{(F)}} \stackrel{(3.10a)}{=} \frac{\sum_{i=1}^{N_s} p_i^{(F)} \cdot \ell_i}{\ell} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 160 + 1 \cdot 160}{320} = 0.75 = 75\% \quad (3.10d)$$

Was ist nun die Auslastung, 75 % oder 100 %? Soll sich der Wert ändern, wenn das Fahrzeug eine Rückfracht laden kann? Soll der Preis, den der Kunde zu zahlen hat, abhängig von der Auslastung sein? Wenn ja, von welcher? Handelt es sich bei diesem Beispiel um eine **Teil-** oder um eine **Komplettladung**? Ist dieses aus Sicht des Lieferanten, des Spediteurs oder des Kunden zu sehen? Auch wenn diese Fragen in der Praxis oftmals nicht gestellt werden, sind sie offen und lassen Spielräume entstehen, die zu Missverständnissen führen.

Ist die so definierte Kennzahl eine brauchbare Zielvorgabe für die Ermittlung optimaler Fahrtrouten, d. h. soll eine Route mit einer höheren Produktivität als besser eingeschätzt werden als eine mit einer niedrigeren?

### **Beispiel .12 Produktivitätskennzahl in der Müllentsorgung**

*Betrachten Sie hierzu die Skizze in Abbildung 3.1. Für Löwenstadt soll eine Route für die Fahrzeuge der Müllentsorgung bestimmt werden. Es gibt zwei Möglichkeiten, in die Stadt zu fahren bzw. diese zu verlassen, entweder durch das Westtor oder durch das Osttor. Es stehen die beiden Varianten 1 und 2 zur Auswahl. In Variante 1 fährt das Fahrzeug leer zum Westtor, lädt den Müll und fährt dann durch das Osttor voll beladen zur Deponie. Bei Variante 2 wird mit der Leerfahrt zum Osttor begonnen, dann beladen und die Rückfahrt erfolgt voll beladen über das Westtor zur Deponie. Welches ist die zu bevorzugende Variante? Es soll vorausgesetzt werden, dass die Fahrzeiten und -strecken beider Alternativen gleich sind.*

Die Auslastung nach Gleichung (3.10d) ist bei Variante 1 größer, da der längere Teil der zurückgelegten Strecke mit der höheren Zuladung gefahren wird. Da das Fahrzeug voll beladen mehr Treibstoff verbraucht als leer, ist dieses gleichzeitig auch die teurere Alternative. Bei der zweiten Fahrstrecke sind die Produktivität und gleichzeitig auch die Kosten niedriger. Bei Verwendung von Gleichung (3.10c) sind die Produktivitäten beider Möglichkeiten gleich und somit keine Entscheidungshilfe.

**Weisheit 3.6** Eine Alternative mit höherer Produktivität ist nicht zwangsläufig die kostengünstigere.

Viele Fragen lassen sich nicht klar und präzise beantworten, es werden **weiche Kennzahlen** benötigt. 13:02Uhr ist natürlich später als 13:00Uhr, also ist das Fahrzeug nicht exakt zur vereinbarten Zeit eingetroffen, aber nur etwas später. Was aber, wenn das Fahrzeug bereits um 12:50Uhr auf dem Parkplatz stand und ein Mitarbeiter des Werkschutzes den Fahrer nach seiner Einfahrerlaubnis fragte und diesen 12 Minuten aufhielt? Hier bedarf es vor dem eigentlichen Zählen noch vorausgehender Definitionen, wenn z. B. Liefertreue oder Kundenzufriedenheit mit Pünktlichkeit verknüpft werden:

- Was ist pünktlich?
- Wird dieses Fahrzeug zu den pünktlichen gezählt, wenn die Verzögerung durch einen Mitarbeiter des Werkschutzes bedingt wurde?
- Wann wird eine Sendung als ausgeliefert betrachtet? Nur dann, wenn sie fehlerfrei ausgeliefert wird?

Beschränken wir uns hier auf die erste Frage „Was ist pünktlich?“. Pünktlich könnte bedeuten

genau zur	(3.11a)	kurz nach	(3.11c)
vor der	(3.11b)	ungefähr zur	(3.11d)

vereinbarten Zeit. Keine der Definitionen ist brauchbar. Die erste deshalb nicht, weil es zwar möglich ist, einen exakten Zeitpunkt zu vereinbaren, aber dieser kann weder eingehalten noch überprüft werden. Selbst wenn sich der Fahrer größte Mühe gibt, exakt um 13:00Uhr zu erscheinen, wird er immer einige Sekunden zu früh oder zu spät sein. Sicherlich wird niemand daran Anstoß nehmen, wenn sich diese Abweichung im Bereich von wenigen Sekunden bewegt. Der zweite Vorschlag sagt nur, dass Fahrzeuge irgendwann zwischen jetzt und 13:00Uhr kommen können. Bei den letzten beiden ist unklar, was kurz nach und ungefähr bedeuten. Für den einen vielleicht eine Abweichung von zwei Sekunden, für einen anderen vielleicht zwei Minuten oder gar zwei Stunden.

Wie lässt sich pünktlich mathematisch formulieren? Es seien  $T_p$  die geplante und  $T_a$  die tatsächliche Ankunftszeit. Die oben aufgeführten Definitionen können hiermit in eine mathematische Form gebracht werden:

$$T_a = T_p \quad (3.11a') \quad T_a < T_p + \epsilon \quad \text{mit } \epsilon \ll 1 \quad (3.11c')$$

$$T_a < T_p \quad (3.11b') \quad T_a \approx T_p \quad (3.11d')$$

Die ersten drei lassen sich leicht in jeder beliebigen Programmiersprache realisieren. Die Anwendung der ersten wird ohne weitere Annahmen bzw. Näherungen fast immer dazu führen, dass alle Fahrzeuge unpünktlich sind. Die beiden folgenden (3.11b') und (3.11c') machen, wie oben bereits ausgeführt, nur wenig Sinn.

Wie sieht es mit der letzten aus? Mit ungefähr gleich wird oftmals gemeint, dass es sowohl etwas später als auch etwas früher sein kann. Für die Definition einer Kennzahl muss nur noch das *etwas* konkretisiert werden. Wird dieses vergessen, kann diese Bedingung weder in eine Programmiersprache noch in eine Datenbankabfrage überführt werden. Es können ein Intervall oder zwei Schranken  $\Delta t_u$  und  $\Delta t_o$  vereinbart werden, mit denen folgende Definition möglich wird:

**Definition .24 Pünktlich**

Eine für einen Zeitpunkt  $T_p$  vereinbarte Ankunft heißt pünktlich, wenn zwei Intervalle  $\Delta t_u$  und  $\Delta t_o$  definiert werden und für die Ankunftszeit  $T_a$

$$T_p - \Delta t_u \leq T_a \leq T_p + \Delta t_o \quad (3.12)$$

gilt, d. h. wenn die Ankunft im Intervall bzw. **Zeitfenster**  $[T_p - \Delta t_u, T_p + \Delta t_o]$  erfolgt.

Diese Definition ist eindeutig und kann in jeder beliebigen Programmiersprache problemlos und widerspruchsfrei umgesetzt werden.

Ob bei der Verwendung von Kennzahlen absolute oder relative Angaben bevorzugt werden sollten, hängt von der konkreten Fragestellung, aber auch von der Zielsetzung ab. So hört sich eine Reduktion einer *out-of-stock*-Quote von 1 % unbedeutend an. Wenn hiermit aber 1 % eines Umsatzes von 50 Milliarden Euro also 500 Millionen Euro gemeint sind, hat die selbe Zahl eine gänzlich andere Aussagekraft. Relative Zahlen sind oftmals für einen Anwender leichter verständlich, jedoch weisen absolute Zahlen die höhere Aussagekraft auf. Für Liquiditätsbetrachtungen sind absolute Werte unverzichtbar. Ein Einzelhändler muss jeden Monat eine gleich bleibende Miete zahlen. In Monaten mit wenigen Tagen, in denen der Umsatz je Tag möglicherweise überdurchschnittlich hoch ist, kann es sein, dass er nicht genügend Geld in seiner Kasse hat, weil der Gesamtumsatz in dem Monat zu niedrig war. Der Laden lief, relativ betrachtet, hervorragend und ist pleite.

Kennzahlen wie die oben diskutierte Auslastung können wichtige Informationen für die Lenkung von Prozessen liefern. Interessant ist aber die Frage nach dem Warum. Gibt es Gründe dafür, dass die Auslastung schlechter ist als vorgestern oder schlechter als bei anderen. Eine Ursache kann die Berechnungsvorschrift sein, wie am Beispiel der Produktivitätsberechnung deutlich wurde. Solche Ursachen müssen erkannt und richtig berücksichtigt werden. Von größerer Bedeutung sind die Ursachen, die mit internen oder externen Einflüssen verbunden werden können. Hier muss versucht werden, Strukturen bzw. Gesetzmäßigkeiten zu erkennen. Stehen Liefertreue und Auslastung miteinander in Verbindung? Um Sachverhalte aufzudecken, die unbekannt sind, kann nicht nur nach Antworten auf bekannte Fragen gesucht werden. Hier muss unvoreingenommen mit unterschiedlichen Analysemethoden nach Strukturen und Abhängigkeiten bzw. **Korrelationen** gesucht werden.

### 3.2.2 Einführung eines Kennzahlensystems

Zahlen und Berechnungsvorschriften sind theoretische Konstrukte, die in die Praxis eingeführt und dort dann auch gelebt werden müssen. Auch hierbei sollten bestimmte, im folgenden erläuterte Vorgehensweisen beachtet werden.

**Weisheit 3.7** *Kennzahlen müssen ermittelt werden können. Das Ergebnis muss unabhängig vom Wissen der ermittelnden Person sein. Damit Kennzahlen unterstützend werden, müssen sie Informationen darstellen.*

Häufig ist zu hören, dass Datenspeicherung und -verwaltung heutzutage praktisch kostenlos zu bekommen ist. Der Preis von Festplatten je Gigabyte sinkt stetig. Dieses ist der geringste Teil der Kosten von Daten, der größere kommt beispielsweise durch Suchen oder unnötige Diskussionen über fehlerhafte oder überflüssige Daten. Deshalb sollte das Einführen von Kennzahlen nach bestimmten Regeln erfolgen, die in Regel 3.1 aufgeführt sind. Übergeordnet ist stets die Frage zu stellen „Was kann aus der ermittelten Kennzahl gelernt werden?“. Anders ausgedrückt sollte stets zu einer Frage eine Antwort gesucht werden. Diese Antwort kann nur dann nutzbringend sein, wenn sie in geeigneter Form präsentiert wird.

**Regel 3.1 Einführung eines Kennzahlensystems [nach Sch95]**

## 3.3 Kommunikation

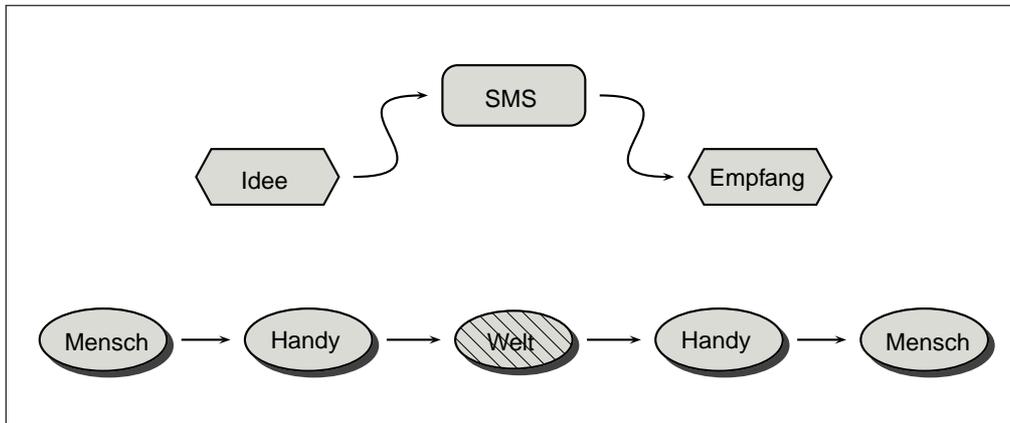
### 3.3.1 Was ist Kommunikation?

Daten sind Rohprodukte, die, nach festen Regeln verarbeitet, zu Fertigprodukten, den Informationen werden. Sie werden dann vom Produzenten zum Kunden, vom **Sender** zum **Empfänger** oder von einer Quelle zu einer Senke *befördert* bzw. gesendet oder übermittelt: Transport bzw. Distribution wird zur Kommunikation, Logistik zur Informationslogistik, Ware in Definition .1 kann durch Daten wie z. B. Kennzahlen ersetzt werden. Auch bei der Übermittlung von Daten ist es wichtig, diese mit der richtigen Information zu versehen. Was nützt eine sehr informative SMS ohne die Information, dass diese so wichtig ist, dass der Empfänger sie auch sofort zur Kenntnis nehmen sollte? Soll diese Information als SMS übermittelt werden? Wird beim Transport in der Regel nur der unidirektionale Warenstrom von der Quelle zur Senke explizit betrachtet, so sind bidirektionale Flüsse für die Kommunikation von entscheidender Bedeutung. Welchen Sinn macht Kommunikation, die nur von einem Sender in die Richtung eines Empfängers stattfindet, d. h. der Empfänger keinerlei Möglichkeit des Antwortens besitzt? Aber auch ein Transport besteht immer aus mindestens zwei Flüssen: Einem in Richtung des Lieferanten, in dem der Transportwunsch übermittelt wird und dann dem eigentlichen Transport. Deshalb soll dieser Vorgang als ein Austausch bezeichnet werden, auch wenn es manchmal tatsächlich nur eine Übertragung von einer Stelle hin zu einer anderen ist.

#### **Definition .25 Kommunikation**

*Kommunikation ist der Austausch von Daten zwischen einem Sender und einem Empfänger.*

In Analogie zur Distribution, vgl. 1.12, kann Kommunikation auch über mehrere Stufen, wie in Abb. 3.2 gezeigt, realisiert werden. Kommunikation als eines der zentralen Themen in nahezu



**Abb. 3.2:** Versenden einer SMS als mehrstufiger Kommunikations- bzw. Distributionsprozess

allen Bereichen des menschlichen Daseins und Gegenstand vieler eigenständiger Publikationen soll hier nur soweit betrachtet werden, wie es für Anwendungen in der Logistik bzw. für Anwendungen zur Steuerung oder Regelung von Prozessen erforderlich ist. Doch bereits hier sind unterschiedliche Sichtweisen ganzheitlich zu beschreiben und miteinander in Einklang zu bringen.

- inhaltlich  
Hier muss beschrieben werden, was ausgetauscht werden soll.
- logisch  
Wie soll der Austausch erfolgen. Hierbei müssen sowohl die Wege als auch die Medien festgelegt werden.
- technisch  
Welche technischen Anforderungen sind zu stellen, welche sind verfügbar und welche sollten für die Realisierung genutzt werden?

Kommunikation zwischen Menschen ist ohne Sprache nicht denkbar, auch wenn deren unbedachter Gebrauch die Verständigung durchaus erschweren kann. Der Exkurs 3.1 über Sprachen soll dieses anhand einiger willkürlich ausgewählter Beispiele verdeutlichen. Mit der Einführung des in Kapitel 2.1 beschriebenen **Repositoriums** lassen sich diese Quellen für inhaltliche Missverständnisse ausräumen. Zur logischen Spezifikation müssen die zu nutzenden Kommunikationsarten festgelegt werden. Eine erste Unterscheidung kann in synchron und asynchron erfolgen.

#### **Definition .26 Synchron und asynchrone Kommunikation**

*Bei synchroner Kommunikation wartet der Sender auf die Antwort des Empfängers, bevor er die Aktivität fortsetzt. Bei der asynchronen Kommunikation ist das weitere Verhalten des Senders unabhängig vom Verhalten des Empfängers.*

Synchron kann in unterschiedlichen Ausprägungen vorgefunden werden.

- *request/reply*  
Der Sender blockiert, bis er eine Antwort vom Empfänger erhält.
- *one-way*  
Der Sender wartet auf eine technische Empfangsbestätigung.

### Exkurs 3.1 Sprachen

*In einer Arbeit war in einem Abschnitt über Kommissionieren folgender Satz zu finden: „... die Pakete wurden gehandelt...“, ein Satz der gelesen überhaupt keinen Sinn machte. Sowohl der Kontext als auch Ausdrücke wie „... Handling der Pakete...“ ließen ahnen, was gemeint war, ahnen, mehr nicht. Bei einem erstmaligen Lesen und ohne Kenntnis des Kontextes wäre dem Lesenden mit Sicherheit ein falscher Inhalt vermittelt worden. Ein weiteres oftmals beobachtetes Problem ist die Bezeichnung für das Gerät, mit dem wir einen Zeiger auf der Oberfläche eines Bildschirmes bewegen: Ist es eine mouse, eine Mouse oder eine Maus? Wie heißt es dann, wenn zwei von diesen Teilen auf einem Tisch liegen? Zwei möuse, Mäuse, Mäuse, mice oder gar zwei Mice. Beim Schreiben sollte bedacht werden, dass auch Menschen mit englisch als Muttersprache den Text lesen können sollten. So mag Handy englisch klingen, es ist aber nicht Bestandteil des englischen Wortschatzes.*

*Nicht nur Anglizismen können Schwierigkeiten bereiten, auch Sätze mit ausschließlich deutschen Wörtern: Der bereits erwähnte Satz „Julias Starp am 27.6.2003“, wird von den meisten Menschen verstanden werden, solange er vorgelesen wird, „Der Dieb der gestern gestorben ist, hat Häute gestohlen“, eher dann, wenn er gelesen wird.*

- *polling*

Der Sender arbeitet sofort nach dem Versenden weiter, fragt aber in regelmäßigen Abständen beim Empfänger nach, ob die Anfrage verarbeitet wurde und gegebenenfalls auch nach dem Ergebnis.

Für den Empfang kann zwischen *mailbox* und Nicht-*mailbox*-Systemen unterschieden werden. Bei dem ersten Fall wird eine Nachricht lediglich wie in einem vertrauten Briefkasten abgelegt und nicht überprüft, ob der Empfänger diese auch tatsächlich erhält. Wird dieser Briefkasten über einen längeren Zeitraum nicht geleert, bleibt die Nachricht vor dem Erreichen des eigentlichen Ziels liegen. Neben der klassischen Variante des Briefkastens zählen sowohl Faxgeräte, Kurznachrichten und *e-mails* zu dieser Kategorie. Ein konventionelles Gespräch, eine Radiosendung oder auch ein Telefonat zählen zu der Gruppe, in der der Empfänger eine Nachricht unmittelbar erhält und in der auch eine sofortige Antwort möglich ist.

Beschreiben diese Unterteilungen die Wege, so gibt es eine weitere Klassifikation in der Art, wie Empfänger ausgewählt werden.

- *message passing*

Empfänger sendet Nachricht an einen bestimmten Empfänger.

- *publish/subscribe*

Empfänger werden dadurch bestimmt, dass sie zuvor ihr Interesse angemeldet haben.

- *broadcasting*

Hier werden Nachrichten an die *Welt* gesendet und jeder, der die Gelegenheit besitzt, kann diese empfangen.

Bei der Weitergabe von Kennzahlen und in der Logistik können alle Möglichkeiten zum Einsatz kommen können. Inhalt, technische Realisierung und Art müssen aufeinander abgestimmt sein.

### 3.3.2 Berichtswesen

Eine besondere Art der Kommunikation ist das Berichtswesen, bei dem Berichte über definierte Sachverhalte erstellt und an festgelegte Personen verschickt werden. Das Berichtswesen ist von

seiner Natur her asynchron: Es gibt ein auslösendes Ereignis und dann wird der Bericht ohne Warten auf eine Reaktion versandt. Für das Auslösen gibt es folgende Möglichkeiten:

- (→) periodisch,
- (←) auf Anforderung,
- (→) bei Erreichen bestimmter Werte
- oder
- (←) bei Bedarf,

die sich in *push*, (→) und *pull*, (←), getriebener Vorgehensweise unterscheiden. Wie unterscheiden sich diese vier Strategien? Ein Vorteil bei der periodischen Berichterstellung liegt in der Verlässlichkeit. Es kann nicht vorkommen, dass Berichte ausbleiben und damit wichtige Informationen nicht weiter geleitet werden. Ein Nachteil ist sicher darin zu sehen, dass sich eine gewisse Gewohnheit einstellen kann, die dazu führt, dass Berichte, weil über einen langen Zeitraum nichts Interessantes enthalten war, unbeachtet zur Seite gelegt werden. Dieses wird sicher vermieden, wenn sie nur auf Anforderung erstellt werden. Hier besteht aber die große Gefahr, dass wichtige Ereignisse einfach übersehen werden. Ein Manko liegt auch darin, dass zwei Personen selten auf gleiche Berichte zurückgreifen, weil sie diese zu verschiedenen Zeitpunkten anfordern. Dieses wird wiederum vermieden, wenn sie automatisch beim Eintreten bestimmter Ereignisse zur Verfügung gestellt werden. Hier kann es aber sehr schnell dazu kommen, dass diese dann erstellt werden, wenn sie nicht beachtet werden können. Besteht ein Bedarf, kann davon ausgegangen werden, dass sie nicht ignoriert werden. Schwierig hierbei kann sein, dass wichtige Ereignisse nicht sichtbar werden, weil Daten für einen Zeitraum aufbereitet werden, in denen wesentliche Phänomene nicht sichtbar werden. So können saisonale Schwankungen beispielsweise unbemerkt bleiben, weil für die entscheidenden Zeiträume keine Auswertungen erstellt wurden. Um derartige Strukturen, d. h. **strukturelle Informationen**, sichtbar machen zu können, ist eine regelmäßige Erstellung erforderlich. Dieses bedeutet nicht, dass dieses in regelmäßigen Abständen erfolgen muss, sondern nur nach festen Regeln, die auch im **Repository** festgelegt werden. Nicht die Anzahl der Daten ist entscheidend, sondern die Sicherheit, wesentliche Strukturen erkennen zu können. Gibt es bekannte Zusammenhänge zwischen zwei Kennzahlen, muss nicht jede der beiden immer wieder ermittelt werden. Hier reicht die Darstellung einer der beiden und ein Verweis auf den Zusammenhang. Dieses festzuschreiben ist eine der Aufgaben der **Informationslogistik**. Eine weitere ist es festzulegen, wie die Berichte erstellt werden müssen. Hierzu gehört, wie bei der Definition von Kennzahlen, auch eine klare Definition der Zeiträume und möglicher Berechnungsvorschriften. Analog zu Prozessbeschreibung können für Berichte folgende Forderungen formuliert werden:

### Exkurs 3.2 Anforderungen an Berichte

- *Integrität*
- *Datenschutz*
- *Richtigkeit*
- *Vollständigkeit*
- *Aussagefähigkeit*
- *Eindeutigkeit*
- *Konsistenz auf allen Detaillierungsstufen*
- *Empfänger muss ihn zur Kenntnis nehmen*
- *eine Seite für einen Sachverhalt*
- *strukturiert*
- *unabhängig von Ausgabemedium*
- *Bericht muss verfügbar sein*
- *Anfang und Ende müssen erkennbar sein*

Selbstverständlich sollte es sein, dass Berichte lesbar sind.

blasser Farben, dunkler Hintergründe, usw. Akü's, be-  
kannter Symbole an beliebigen Stellen, wie

+1



*Eine gute Theorie ist das Praktischste, was Sie lernen können.*

Robert James Waller, Die Liebenden von Cedar Bend

# 4

## Vom Umgang mit Zahlen

### 4.1 Zahlen und Rechnen

#### 4.1.1 Lösbar oder nicht lösbar?

Auch wenn nach Information und Wissen gestrebt wird, bleiben Daten die Grundlage für ein erfolgreiches Vorgehen. Eine im letzten Kapitel diskutierte Möglichkeit, Daten zu beschaffen, war das Zählen von Objekten. Das Messen mit geeigneten Geräten, wie Waagen, ist sicher eine weitere Alternative. Die Notwendigkeit, die so ermittelten Daten weiter zu verarbeiten oder zu veredeln, wurde nur kurz angedeutet und soll nun ausführlicher behandelt werden. Hierbei wird elementares Rechnen mit Zahlen im Vordergrund stehen.

Natürlich muss nicht jeder Praktiker alle Verfahren und Methoden kennen, aber es ist hilfreich zu wissen, ob denn nun wirklich eine neue Maschine gekauft oder ein Beratungsauftrag vergeben werden muss oder ein kurzes Schürfen im Langzeitgedächtnis, ein Blick in die Schublade oder in ein Schulbuch ausreichen. Berater und Ingenieure leben durchaus gut von der Unwissenheit anderer, für die selbst lange bekannte Fragestellungen vollkommen neuartig erscheinen. Nicht für alles sind bereits fertige Lösungen verfügbar, aber für vieles. Ingenieure, Naturwissenschaftler, Mathematiker und Informatiker haben in den letzten Jahrhunderten für viele Probleme Lösungen gefunden, die einer Übertragung auf die Praxis harren. Die möglichen Anwendungsgebiete haben sie vielleicht beschrieben, als sie Neues entwickelten, die Dokumente aber nicht jährlich neu angepasst. Es ist die Aufgabe planender Logistiker zu suchen, was verfügbar ist und was mit welchem Aufwand angepasst werden kann. Es ist die Verantwortung eines Geschäftsführers oder eines Einkäufers zu wissen, dass eine *ABC*-Analyse mit drei *SQL*-Anweisungen erstellt werden kann. Wenn er dieses nicht weiß und einem Beratungsunternehmen hierfür einen Auftrag über mehrere Manntage erteilt, ist das nur für eine der beteiligten Parteien sehr lukrativ. Eine Aufgabe des Geschäftsführers muss es sein, Ziele formulieren und eine grobe Abschätzung des Aufwandes für die Umsetzbarkeit durchführen oder zumindest beurteilen zu können.

Die Frage „Was ist optimal?“, kann berechtigter Weise zu ausgiebigen Diskussionen führen. Bei der Beschreibung von Algorithmen in diesem Teil des Buches wird davon ausgegangen, dass im Vorfeld bereits geklärt wurde, was unter einer optimalen Lösung verstanden werden soll. Bei der Darstellung der Algorithmen zur Bestimmung optimaler Routen ist es dann belanglos, ob die Qualität in Kilometern, Stunden oder Euro gemessen wird. Dieses muss vor dem Anwenden eines Algorithmus festgelegt werden.

Für viele Praktiker scheint es unmöglich, bei der Lösung ihrer Probleme Standardverfahren einsetzen zu können. Das entspricht einer Vorgehensweise, bei dem für jeden neuen Fahrzeugtyp ein neuer Motor mitsamt dem für den Einbau erforderlichen Schraubenschlüssel entwickelt wird. Sowohl bei Theoretikern als auch bei Praktikern spielen Ängste eine große Rolle. Angst bei dem Disponenten davor, dass die von ihm geplanten Routen nicht die besten sind, Angst bei dem Theoretiker, dass sein Verfahren versagt. Gründe des Nicht-Zusammenkommens von Theorie und Praxis gibt es sicher noch reichlich. Die Aussage, dass das eigene Problem anders ist als die der anderen muss häufig als Argument dafür her halten, dass die eigene Lösung nicht so gut ist wie der anderen.

Hier ist nun ein Punkt erreicht, der für ein Miteinander notwendig ist: Wie immer muss eine gemeinsame Sprache gefunden werden. Für den Theoretiker ist unendlich nicht gleich unendlich, dafür versteht ein Praktiker möglicherweise nicht den Unterschied zwischen abzählbar und überabzählbar. Wenn solche Begriffe nicht gleich verstanden werden, ist es für den Praktiker schwierig, die Beschreibung von Verfahren zu verstehen. Ebenso ist es für den Theoretiker schwierig zu verstehen, was der Praktiker will, wenn Begriffe unpräzise oder falsch verwendet werden. Als Antwort auf die Forderung, dass ein System eine Verfügbarkeit von 100 % haben soll, gibt es nur ein einfaches „Nein!“ Die Anwendbarkeit bekannter Methoden hat sich damit erledigt. Wären statt 100 % nur 99.95 % gefordert worden, wäre die Antwort anders ausgefallen.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin zu sagen, wann ein Problem lösbar bzw. was die Lösung eines Problems ist. Laut Duden ist eine Lösung *Das Ergebnis des Denkens darüber, wie etwas Schwieriges zu bewältigen ist* [Mül85]. Damit hängt eine Lösung davon ab, wie jemand denkt. Die Ergebnisse meines Denkens über die Konstruktion eines Autos unterscheiden sich sicherlich von denen eines Konstrukteurs. Soll auch das Ergebnis meines Denkens in diesem Fall als Lösung angesehen werden können? Besser nicht.

In der theoretischen Betrachtung wird selten die Lösung eines Problems untersucht, stattdessen die Lösbarkeit von Problemklassen, deren Beschreibung allgemeiner sein muss als die eines konkreten Problems. Ein Vorgehen, bei dem für jedes kleine Problem eine neue Theorie entwickelt werden würde, wäre sehr ineffizient.

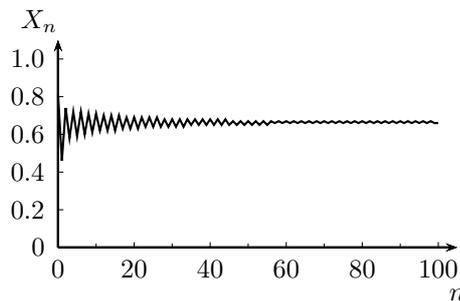
In der Mathematik ist es oftmals ausreichend zu beweisen, dass ein Problem lösbar ist, der zum Finden einer Lösung erforderliche Aufwand ist ebenso zweitrangig wie die Qualität einer möglichen Lösung. So ist in vielen Formelsammlungen die Gleichung

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{i=0}^{\infty} x^i \quad \text{für } |x| < 1 \quad (4.1)$$

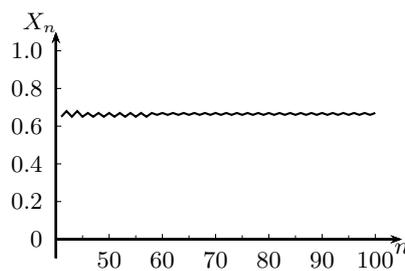
zu finden. Dieses ist richtig und somit sind Funktionswerte berechenbar, allerdings nur einige wenige. In konkreten Berechnungen ist Gleichung (4.1) durch

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{i=0}^{N_{\max}} x^i \quad (4.1')$$

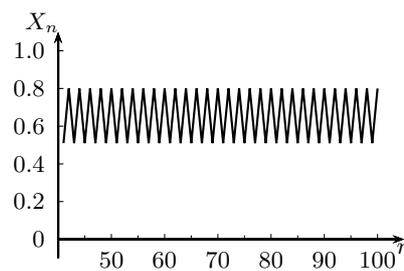
zu ersetzen, wobei  $N_{\max}$  so zu bestimmen ist, dass eine gewünschte oder benötigte Genauigkeit erreicht wird. Dieses kann durch eine Restgliedabschätzung bewältigt werden. Allerdings ist diese ebenso aufwendig wie die Berechnung selbst. Ein Vorgehen, bei dem abgebrochen wird, wenn ein einzelner Summand einen vorgegebenen Wert unterschreitet, stellt einen einfachen Ausweg dar, der oftmals zu falschen Ergebnissen führen kann. Die Festlegung, wann die Summation abgebrochen werden soll und die Bedingung  $|x| < 1$  schränken die Einsatzmöglichkeit dieser Gleichung erheblich ein. Für  $0.99 < x < 1.0$  nimmt die Anzahl der benötigten Schritte schnell zu, Rundungsfehler gewinnen an Bedeutung und die Qualität der Ergebnisse sinkt, wenn die Rechnungen auf einem Rechner durchgeführt werden. Ohne Rechner geht es allerdings gar nicht. Auch hier können wieder **strukturelle Informationen** ausgenutzt werden. Die Anwendung des  $\delta^2$ -Algorithmus, d. h. eine alternative Darstellung [JB91; Pre+92], ermöglicht eine schnelle und genaue Berechnung für beliebige  $x$ -Werte mit drei Summanden aus Gleichung (4.1).



**Abb. 4.1a:** Eine mögliche Folge als Ergebnis von Gleichung 4.2 mit  $\lambda = 0.742$  und  $X_0 = 0.8$



**Abb. 4.1b:** Wie Abbildung 4.1a, jedoch  $\lambda = 0.74$

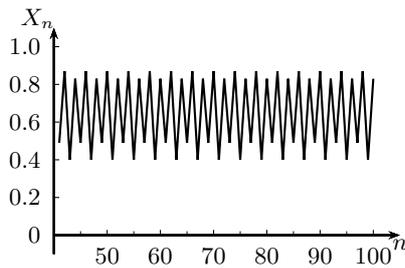


**Abb. 4.1c:** Wie Abbildung 4.1a, jedoch  $\lambda = 0.80$

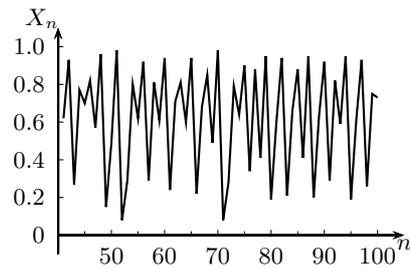
**Weisheit 4.1** Der Aufwand zum Finden der Lösung eines Problems ist abhängig von dessen Darstellung. Die Beantwortung der Frage, ob ein Problem lösbar ist oder nicht, kann durch eine ungenügende Darstellung unnötig erschwert werden.

So wie eine geeignete Darstellung das Finden einer Lösung erleichtern kann, gibt es bei gleicher **Komplexität** unterschiedlich **komplizierte** Verfahren bzw. auch Darstellungen, die eine Lösbarkeit ausschließen. Es soll nicht der Eindruck entstehen, dass alles lösbar ist. Selbst sehr einfach erscheinende Probleme können sich als schwer oder gar unlösbar herausstellen. Nehmen wir die Gleichung

$$X_n = 4\lambda X_{n-1}(1 - X_{n-1}) \text{ mit } \lambda \text{ und } X_0 \text{ vorgegeben} \quad (4.2)$$



**Abb. 4.1d:** Wie Abbildung 4.1a,  
jedoch  $\lambda = 0.87$



**Abb. 4.1e:** Wie Abbildung 4.1a,  
jedoch  $\lambda = 0.98$

Diese Gleichung zeigt ein sehr merkwürdiges Verhalten, wie in den Abbildungen 4.1 zu sehen ist. Die Programmierung von Gleichung (4.2) ist trivial und jedes Programm liefert Ergebnisse. Möglicherweise führen zwei Realisierungen auf einem oder ein und die selbe Realisierung auf zwei verschiedenen Rechnern zu unterschiedlichen Resultaten, auch wenn sich kein Programmierfehler eingeschlichen hat. Was ist mit den berechneten Zahlen anzufangen, insbesondere wenn bedacht wird, dass die Eingangsgrößen  $\lambda$  und  $X_0$  nicht nur die Ergebnisse sondern auch die Art der Ergebnisse entscheidend beeinflussen. An den Abbildungen wird deutlich, dass das Verhalten der Lösung von sehr gutartig, wie in Abbildung 4.1a, hin zu vollkommen wirt bzw. zufällig, wie in 4.1e zu sehen, sein kann. Viele Systeme in Natur und Wirtschaft werden durch solche oder ähnliche Gleichungen, d. h. solchen mit gleichem Verhalten, beschrieben. Alle Systeme, in denen Rückkopplungen auftreten, haben genau diese hier skizzierten Eigenschaften. Auch unser Autobahnbeispiel, vgl. Beispiel .7, wird im Falle einer Staumeldung zu einem solchen System. Für praktische Anwendungen ist es wichtig zu wissen, für welche Parameter ein System seine gutartigen Eigenschaften zeigt und wann es chaotisch und folglich absolut unkontrollierbar wird.

Dann gibt es noch all jene Probleme, die nun wirklich überhaupt nicht gelöst werden können. Und wie bereits von Gödel 1938 [z. B. Pen89] nachgewiesen wurde, gibt es selbst in der Mathematik davon viel mehr als von den lösbaren.

Ist dieses Anlass zu Depressionen oder Anlass zu der Aussage „Dann lösen wir es durch Probieren oder eben pragmatisch?“? Nein! Auch Probieren und Pragmatismus schaffen es nicht, unlösbare Probleme zu lösen. Probieren führt bei solchen Problemklassen möglicherweise zu Zahlen, weil Randbedingungen passend gemacht wurden, aber nicht zu Lösungen. Werden Überschreitungen der maximalen Zuladung oder Lenkzeit in der Praxis gestattet, bieten sich natürlich ganz andere Lösungen an, verglichen mit denen, die entstehen können, wenn gesetzliche Vorgaben eingehalten werden. Alle Aufgaben, die ohne Mogeln durch Probieren bewältigt werden können, sind auch mit geeigneten Algorithmen zu bewältigen. Die Herausforderung besteht darin, diese zu finden. Viele Simulationen machen nichts anderes als zu Probieren. Analog zu der Diskussion von Prozessen bzw. Transaktionen überführen solche Algorithmen einen Anfangszustand nach festen Regeln in einen Endzustand. Vorausgesetzt werden muss wiederum, dass der Anfangszustand konsistent ist: Tomatenmark und Kartoffeln, in einer Waschmaschine gemischt, ergeben keinen Ketchup. Gleiches gilt für Daten. Dass Birnen nicht mit Äpfeln verglichen werden dürfen ist hinlänglich bekannt, doch wird es oft gemacht, häufig aus Unkenntnis von Unterschieden.

• natürliche Zahlen	$\mathbb{N}$
• ganze Zahlen	$\mathbb{Z}$
• rationale Zahlen	$\mathbb{Q}$
• reelle Zahlen	$\mathbb{R}$

Tab. 4.1: Zahlentypen

	Excel	Oracle-SQL
a1-b1	26.12.1900	391.976042 d = 33 866 730 s
a1/b1	1,01	–
a1+b1	12.01.2111	–
a1*b1	1485260480	–

Tab. 4.2: Ergebnisse von Rechenoperationen mit zwei Datumsangaben :

$a_1 = 03.02.2006\ 11:48:54$  und

$b_1 = 07.01.2005\ 12:23:24$ .

## 4.1.2 Zahlen, Größen und Nummern

Ein häufig zu beobachtendes Beispiel für diese Unkenntnis und mögliche Konsequenzen ist der Umgang mit Datumsangaben, wie in Tabelle 4.2 gezeigt. Ausgangspunkt sind die in der Legende angegebenen Datumsangaben. Diese, in Zellen einer EXCEL-Tabelle eingetragen, ermöglichen alle bekannten Rechenoperationen, selbst beim Berechnen des Quotienten erscheint nicht einmal eine Warnung und als Ergebnis für den Quotienten wird 1,01 ausgegeben. Für welchen Quotienten überhaupt? Die Division zweier Datumsangaben ist absolut unsinnig. Vor der Anwendung irgendwelcher Rechenoperationen ist also zu prüfen, ob diese überhaupt anwendbar sind. Um dieses entscheiden zu können, muss festgelegt werden, mit welchen Datentypen umgegangen werden soll. Eine Unterscheidung der verschiedenen Datentypen ist bereits in Tabelle 3.1 vorgenommen worden. Hier soll nun das Augenmerk zunächst auf Zahlen und von diesen abgeleitete Größen gerichtet werden. Sind

- Postleitzahlen,
- Telefonnummern,
- Uhrzeiten der Form 12:20:30 Uhr,
- Zeitfenster wie zwischen 12:00Uhr und 14:00Uhr,
- Geschwindigkeitsangaben,
- Hausnummern,
- Währungsangaben  
oder
- Entfernungen

Zahlen? Was unterscheidet Zahlen von Größen und Nummern? Einerseits die Bedeutung: So ist die Zahl 36 etwas anderes als die Größe 36 Stück oder die Hausnummer 36. Andererseits unterscheiden sich auch die Operationen und Regeln, die für den Umgang mit den einzelnen Datentypen zulässig sind. Da Daten oftmals nur in verarbeiteter bzw. veredelter Form zu Informationen werden, muss festgelegt werden, welche Operationen notwendig und erlaubt sind.

- Verknüpfung  
arithmetische, d. h. Addition, Subtraktion, Multiplikation, Division und logische wie *und* und *oder*.
- Vergleich  
Es soll entschieden werden können, ob zwei Daten gleich sind, wie z. B.  $1/3$  und  $0.33333$ , oder ob eines kleiner oder größer als ein anderes ist: Liegt die aktuelle Sollzeit vor der Planzeit?
- Relation  
Ist ein Datum in einem anderen enthalten. Ist das Teilstück auf der A7 von Hannover nach Göttingen Teil der geplanten Streckenführung von Hamburg nach München?

- Sortieren

Mehrere Daten sollen in eine *richtige* Reihenfolge gebracht werden. Die Postleitzahlen sämtlicher Kunden sollen so sortiert werden, dass Mitarbeiter hieraus eine optimale Route ermitteln können.

Beginnen wir mit den Zahlen aus Tabelle 4.1, für die jeder Schüler im Laufe seiner Schulzeit Eigenschaften und Rechenregeln kennen lernt. Addition, Multiplikation und Vergleiche bereiten keine Probleme. Bei Subtraktion und Division kann es passieren, dass ein Zahlbereich verlassen wird. Für Nummern, wie Postleitzahlen, Telefon- oder Hausnummern machen selbst die einfachen Operationen wie Addition und Multiplikation keinen Sinn, selbst ein Vergleich ist schwierig. Was bedeutet  $33649 > 06568$  bei Postleitzahlen oder  $44 > 42$  bei Hausnummern? Mit Zusatzinformationen kann eine Ordnung hergestellt werden. So kann bei Straßen, bei denen auf einer Seite nur gerade und auf der anderen nur ungerade Nummern anzutreffen sind, gesagt werden, dass, ausgehend von der Nummer 2 die Nummer 44 hinter 42 zu finden ist. Statt  $2, \dots, 44$  kann dann  $2 - 44$  geschrieben werden. Mit der zusätzlichen Information über die Struktur lassen sich Darstellungen vereinfachen. Multiplikation und Addition bleiben sinnlos.

Bei Größen ändert sich dieses. Größen bestehen jeweils aus einem Wert und einer Einheit, wie z. B.  $3 \text{ €}$  oder  $13 \text{ m}$ . Additionen und Subtraktionen sind sinnvoll und möglich, aber wie sieht es mit der Multiplikation aus?  $3 \text{ €} \times 3 \text{ €} = 9 \text{ €}^2$  ergibt keinen Sinn,  $13 \text{ m} \times 13 \text{ m} = 169 \text{ m}^2$  hingegen schon. Der Typ des Ergebnisses hat sich allerdings gegenüber dem der Ausgangstypen verändert. Nochmalige Multiplikation des Ergebnisses mit sich selbst ergibt mit  $28561 \text{ m}^4$  wiederum eine sinnlose Zeichenfolge. Die Multiplikation von Größen ist bis auf wenige Ausnahmen nicht sinnvoll, in jedem Fall ändert sich bei der Multiplikation der Typ.

### Beispiel.13 Multiplikation von Größen – Transportleistung

Eine oftmals verwendete Größe ist die Transportleistung ausgedrückt in tkm oder Tonnenkilometern. Ein Fahrzeug, das 1 km fährt und dabei eine Ladung von 10 t transportiert, erbringt eine Transportleistung von 10 tkm. Zehn Fahrzeuge, die jeweils die selbe Strecke von 1 km fahren und dabei jeweils 1 t transportieren, erbringen die gleiche Leistung.

Was sagt eine Angabe der Form 10 tkm aus?

#### Exkurs 4.1 Rechengenauigkeit und Einheiten

Mit welchen Zahlen arbeitet ein Rechner und welche Konsequenzen sind daraus zu ziehen?

Einem normalen aktuellen Bürorechner stehen 32 Bit oder 64 Bit für die Darstellung einer Zahl zur Verfügung. Hiermit kann dieser eine endliche Anzahl verschiedener Zahlen darstellen und zwar genau  $2^{32} = 4, 294, 967, 296$ , oder  $2^{64} = 18, 446, 744, 073, 709, 551, 616 \approx 1.8 \times 10^{19}$ .

Der Anwender kann nun wählen, welche Zahlen dieses sein sollen. Falls nur positive benötigt werden, sind alle Zahlen von 0 bis  $2^{32} - 1$  darstellbar, falls auch negative gewünscht werden, alle im Bereich  $-2^{31} \dots 0 \dots 2^{31} - 1$ , ebenfalls  $2^{32}$ . Zahlen mit Komma lassen sich stets in die Form  $\pm 0.i_1 \dots i_n \times 10^m$  bringen und hier gibt es neben dem Vorzeichen noch die Freiheit,  $n$  und  $m$  zu variieren. Je kleiner  $n$  gewählt wird, desto weniger genau kann gerechnet werden, dafür lassen sich aber größere Exponenten realisieren. Für die Standardeinstellungen eines 32-Bit Rechners mit Windows XP beträgt die Rechengenauigkeit ungefähr 13 Stellen, d. h.

$$(1+x) - 1 = 0 \text{ für } 0 < x < 10^{-13} \text{ und } (1+x) - 1 \neq (1-1) + x \quad (4.3)$$

Kann dieses zu Schwierigkeiten führen und wie können diese vermieden werden? Hierzu sollen folgende Anwendungsbereiche verglichen werden.

Eingabewerte	Ergebnisse berechnet mit			
	<i>MSWord</i>	<i>OOWriter</i>	MS Excel	<i>OOCalc</i>
2,38 + 3,46	43,46	5,84	#Wert	5,84
2,038 + 3,46	5,46	13915,46	#Wert	3,46
2.38 + 3.46	97	30774	30774	02.04.84

**Tab. 4.3:** Nachzurechnen mit Microsoft Word 2003, Microsoft Excel 2003 und OpenOffice 2.0.3

- *Rechnen mit Zahlen*

Betrachten wir zwei Beispiele. Das Bruttoinlandsprodukt der Bundesrepublik Deutschland beträgt ungefähr 2.5 Billionen € =  $2.5 \times 10^{12}$  €. Ein kleinster Wert von  $10^{-13}$  entspricht  $10^{-13} \times 2.5 \times 10^{12}$  € = 0.25 €, ein Betrag, der sicher als peanuts bezeichnet werden kann. Leider treten Rundungsfehler früher, d. h. bereits bei größeren Werten auf. Dieses kann vermieden werden, wenn alle Angaben als ganze Zahlen erfolgen und in Cent gerechnet werden würde. Bei 32 Bit wäre dann die größtmögliche Angabe 4,294,967,296 Cent = 42,949,672.96 €, ein Betrag, der für die meisten Anwendungen ausreichend sein sollte. Wird mit größeren Beträgen gerechnet, können alle Größen in Einheiten 10 € oder 100 € angegeben werden. Auch bei der Angabe des Umfangs der Erde wird nicht Millimeter verwendet.

Als zweites Beispiel sollen Abstände zwischen zwei beliebigen Orten der BRD betrachtet werden. Diese betragen maximal 1000 km. Eine Genauigkeit von  $10^{-13}$  führt zu  $10^{-10}$  km = 100 nm, ein winziger Bruchteil der Dicke eines Haars, eine Genauigkeit, die weder ein Routenplaner noch ein Steuerprüfer benötigen. Würden alle Entfernungen in Zentimetern angegeben, ist die größtmögliche Entfernung bei 32 Bit 4,294,967,296 cm = 42,949.67296 km, ausreichend für den Umfang der Erde.

- *Vergleich von Zahlen*

So wie sich die Ungenauigkeiten für praktische Anwendungen als unproblematisch darstellen, so sieht es beim Vergleich von zwei Zahlen vollkommen anders aus.

So ist  $(9.90 + 16\%) / 1.16$  nicht unbedingt gleich 9.90. Ein Programm, das zwei Zahlen auf Gleichheit überprüft, erkennt nur dann zwei Zahlen als gleich, wenn alle Bits der einen mit allen Bits der anderen übereinstimmen. Auch wenn das letzte Bit, der tausendstel Cent, für den Anwender unsichtbar bleibt, sind es für ein Programm zwei ungleiche Zahlen.

Für einen Rechner ist eine Zahl nichts anderes als eine Folge von Bits. Im realen Leben haben Zahlen sehr unterschiedliche Bedeutung. Sie können für die Anzahl der Elemente in einer Menge stehen, **Kardinalzahlen**, oder die Position innerhalb einer Ordnung beschreiben, **Ordinalzahlen**.

Die Aussage, es stehen 36 Paletten hinter der Halle ist etwas anderes als die 36. Palette hinter der Halle. Im Falle der Ordinalzahlen werden Objekte angeordnet oder nummeriert. Dieses muss nicht unbedingt mit Zahlen erfolgen, das ist auch mit beliebigen Zeichen möglich, die in eine Ordnung gebracht werden können, natürlich auch mit Buchstaben unseres Alphabets. Nummern stehen für ein Ordnungsmerkmal. Zahlen sind eine der möglichen Darstellungsformen.

Unsortiert	111	203	34	12	5	1	11
Variante 1	1	5	11	12	34	111	203
Variante 2	1	11	111	12	203	34	5

**Tab. 4.4:** Sortieren von Zeichen- und Zahlenfolgen.

*In Variante 1 werden die Zahlen der Größe nach, in Variante 2 so wie in einem Lexikon sortiert.*

### 4.1.3 Zahlen und Zeichenketten

Wenn Zahlen oder Größen erfasst werden, müssen diese in einen Rechner eingegeben werden. Hier stellt sich das nächste Mal die Frage, was eine Zahl ist. Einige Programme entscheiden mittlerweile anhand der eingegebenen Zeichen, ob das, was eingegeben wurde, eine Zahl ist oder nicht. Dieses führt zu Ergebnissen wie den in Tabelle 4.3 gezeigten. Woher kommen diese teilweise offensichtlich nicht richtigen Ergebnisse? Hat sich der Rechner verrechnet? Nein, alle obigen Ergebnisse sind richtig berechnet – unter Beachtung der in dem Rechner hinterlegten und möglicherweise nur unzureichend dokumentierten Regeln – und beruhen darauf, dass die Interpretation der eingegebenen Zeichen von dem abweicht, was hätte gedacht sein können. 2, 38 oder besser 2, \_38 in der ersten Zeile enthält eine Leerzeichen nach dem Komma. WORD macht dann aus diesem Eintrag zwei Zahlen, 2 und 38, addiert diese getrennt zu 3, 46 und erhält mit  $2 + 38 + 3,46 = 43,46$  das dann richtige Ergebnis. OpenOffice ignoriert das Leerzeichen, korrigiert also eigenmächtig die Eingabe des Anwenders, und erhält 5, 84. In der zweiten Zeile steht in 2,038 hinter dem Komma keine Null sondern der Buchstabe O. Nun ignoriert WORD alles, was hinter dem Komma steht und OpenOffice die gesamte Zahl. Nur EXCEL macht durch die Ausgabe von #Wert deutlich, dass in den beiden oder einem der beiden Operanden etwas enthalten ist, was nicht addiert werden kann.

Wird das Komma durch den durchaus üblichen Punkt ersetzt, wird von allen Anwendungen gerechnet. WORD hält den Eintrag wiederum für zwei Zahlen, die übrigen Programme machen aus 2. 38 ein Datum, den 1. Februar 1938 und rechnen damit. Das beliebte *cut and paste* von Tabellenbestandteilen aus einer Tabelle, die mit einem englischsprachigen EXCEL erstellt wurde, in eine deutsche Version führt zwangsläufig zu merkwürdigen Ergebnissen. Interessant, wenn das Spielen mit solchen Programmen das Ziel ist, nicht, wenn brauchbare Ergebnisse erwartet werden.

Ist es nicht besser, alle Eingaben als Zeichenketten zu interpretieren, um diese Probleme zu vermeiden? Eine Unterscheidung zwischen Zahlen und Zeichenketten ist zwingend erforderlich. Für das Sortieren von Objekten ist es notwendig, eine Beziehung der Art <, > oder eine Ordnungsrelation zu definieren. Sollen Namen in ein Telefonverzeichnis eingetragen werden, muss für zwei Namen entschieden werden können, welcher vor dem anderen stehen muss, d. h. welcher von den beiden der vorhergehende ist.

Zwei verschiedene Personen nutzen zwei verschiedenen Programme und erhalten die in den beiden unteren Zeilen der Tabelle 4.4 gezeigten Ergebnisse. Was ist richtig? Beides. Die obere Sortierung ist die für Zahlen vertraute, die untere die für Zeichenketten, wie sie in jedem Lexikon oder dem Index dieses Buches realisiert ist. Zusammen mit dem oben für das Rechnen Gesagte kann dieses unerwünschte Auswirkungen haben. Sobald ein Tabellenkalkulationsprogramm bei einem Eintrag zu dem Ergebnis kommt, dass es sich um eine Zeichenkette handelt, weil z. B. die 0 in 2, 038 als O geschrieben wurde, wird die gesamte Liste als eine Liste von Wörtern angesehen und entsprechend sortiert. Das Maximum der in Tabelle 4.4 gegebenen Folge wird 5, nur weil

ein Tippfehler aufgetreten ist.

Sollen nun für Postleitzahlen Zahlen oder Zeichenketten verwendet werden? Bei der Darstellung als Zahl gibt es Probleme mit führenden Nullen. So wird 06567 als 6567 ausgegeben. Deshalb wird oftmals auf eine Darstellung als Zeichenkette ausgewichen. Sollen aber Sendungen nach Zustellbezirken sortiert werden, kann dieses bei Verwendung einer Zahldarstellung sehr einfach realisiert werden, in dem die Postleitzahlen ganzzahlig durch 1000 geteilt und die Ergebnisse verglichen werden. Bei der Verwendung von Zeichenketten sind jeweils Teilketten bestehend aus den ersten beiden Zeichen miteinander zu vergleichen, was zu einem erheblich höheren Aufwand führt.

## 4.2 Rechnen mit ...

### 4.2.1 ... ganzen Zahlen

Für praktische Anwendungen stellen die natürlichen und ganzen Zahlen den entscheidenden Datentyp dar. Physische Lagerbestände oder die Anzahl von Lagerplätzen müssen immer positiv und ganzzahlig sein, Einnahmen können positiv oder negativ sein, negative sind dann Ausgaben. Auch Ausgaben können positiv oder negativ sein, negative sind dann Einnahmen. Oder es wird nur von Geldflüssen gesprochen, wobei positive Flüsse Einnahmen und negative Ausgaben sind, oder umgekehrt. Werden sämtliche Beträge in Cent angegeben, kann ausschließlich mit ganzen Zahlen gerechnet werden. Mag das Buchen von Einnahmen und Ausgaben noch in Bruchteilen von Eurobeträgen durchführbar sein, so müssen spätestens dann ganze Zahlen verwendet werden, wenn es zu Ein- oder Auszahlungen kommt. Im Abschnitt 4.1.2 sind die auf einem Rechner verfügbaren Zahlentypen beschrieben worden. Die Nicht-Verfügbarkeit reeller oder rationaler Zahlen ist keine nennenswerte Einschränkung, sondern hilft, Probleme zu vermeiden.

#### **Beispiel .14 Anzahl von Behältern auf einem Megatrailer**

Ein Megatrailer hat die Abmessungen von  $13.60 \times 2.50 \times 3.0 \text{ m}^3 = 102 \text{ m}^3$ . Auf diesen sollen Gitterboxen mit einer Grundfläche von  $120 \times 80 \text{ cm}^2$  und einer Höhe von 456 mm verladen werden. Wie viele Fahrzeuge  $N_F$  werden für 1800 Gitterboxen benötigt?

Jede Gitterbox hat ein Volumen von  $0.438 \text{ m}^3$  und somit können  $N_B^{(naiv)} = 102/0.438 = 223.00$  Boxen je Fahrzeug geladen werden und es sind  $N_F^{(naiv)} = 1800/223.00 = 7.725$  Fahrzeuge ausreichend.

Offensichtlich kann mit diesem Ergebnis nichts angefangen werden. Das erste zu behebbende Problem ist, dass nur ganze Fahrzeuge eingesetzt und ganze Gitterboxen geladen werden können. Ist das Ergebnis zu runden? Das ergäbe 223 Boxen je Fahrzeug und acht Fahrzeuge. Mit dem oben eingeschlagenen Rechenweg ist das verträglich, aber offensichtlich nicht richtig. Die zweite, etwas schwerer zu lösende Aufgabe ist, dass die Boxen geladen werden müssen. Bei einer Breite von 2.50 m passen, abhängig davon, ob sie quer oder längs geladen werden, 2 oder 3 nebeneinander und 17 oder 11 hintereinander, das macht insgesamt  $2 \times 17 = 34$  bzw.  $3 \times 11 = 33$  Behälter je Ebene, wenn sie ohne Zwischenraum geladen werden könnten. In der Höhe lassen sich 6 stapeln. Insgesamt finden also 204 bzw. 198 Behälter auf dem Fahrzeug Platz, viel weniger als 223.

Diese Aufgabenstellung kann mittels einfacher Gleichungen gelöst werden. Hierzu werden folgende Funktionen benötigt:

**Definition .27** ceiling und floor

$$\lfloor x \rfloor \quad \text{floor}(x) \quad \text{ist die größte ganze Zahl kleiner oder gleich } x \quad (4.4a)$$

$$\lceil x \rceil \quad \text{ceiling}(x) \quad \text{ist die kleinste ganze Zahl größer oder gleich } x \quad (4.4b)$$

[knut73]

**Beispiel .15** ceiling und floor

$$\begin{aligned} \lfloor 2.3 \rfloor &= 2 & \lfloor -2.3 \rfloor &= -3 \\ \lceil 2.3 \rceil &= 3 & \lceil -2.3 \rceil &= -2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Werden ausschließlich ganze Zahlen verwendet, so kann in vielen Anwendungen auf die explizite Nutzung dieser Funktionen verzichtet werden. So gilt für die durch  $\div$  dargestellte ganzzahlige Division von 7 und 3

$$7 \div 3 = 2 = \left\lfloor \frac{7.0}{3.0} \right\rfloor. \quad (4.6)$$

Die Anwendbarkeit dieser Funktionen soll an dem Beispiel .14 verdeutlicht werden.

**Beispiel .14 Anzahl von Behältern auf einem Megatrailer – Fortsetzung von Seite 93**

Zunächst wird die Anzahl der Container berechnet, die auf ein Fahrzeug passen. Hierbei werden die beiden Möglichkeiten betrachtet, bei denen die Gitterboxen längs und quer verladen werden.

$$\begin{aligned} N_B^{(quer)} &= \left\lfloor \frac{2.5}{1.2} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \frac{13.6}{0.8} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \frac{3.00}{0.456} \right\rfloor \\ &= \lfloor 2.1 \rfloor \cdot \lfloor 17.0 \rfloor \cdot \lfloor 6.58 \rfloor = 2 \cdot 17 \cdot 6 = 204 \end{aligned} \quad (4.7a)$$

$$\begin{aligned} N_B^{(längs)} &= \left\lfloor \frac{2.5}{0.8} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \frac{13.6}{1.2} \right\rfloor \cdot \left\lfloor \frac{3.00}{0.456} \right\rfloor \\ &= \lfloor 3.125 \rfloor \cdot \lfloor 11.33 \rfloor \cdot \lfloor 6.58 \rfloor = 3 \cdot 11 \cdot 6 = 198 \end{aligned} \quad (4.7b)$$

Die Anzahl der Fahrzeuge lässt sich einfach berechnen zu

$$N_F^{(quer)} = \left\lceil \frac{1800}{204} \right\rceil = \lceil 8.824 \rceil = 9 \quad (4.8a)$$

$$N_F^{(längs)} = \left\lceil \frac{1800}{198} \right\rceil = \lceil 9.091 \rceil = 10 \quad (4.8b)$$

Abhängig davon, ob nun quer oder längs verladen wird, werden nach dieser Berechnung neun oder zehn Fahrzeuge benötigt.

Drei Rechnungen, drei verschiedene Ergebnisse. Auch hier mag es einen Einwand geben, dass die Annahmen noch zu idealisiert sind. Es kann möglicherweise nicht die gesamte Höhe ausgenutzt werden und auch ein Packen ohne Zwischenräume ist unrealistisch. Sollte die Schlussfolgerung sein, dass es nichts bringt zu rechnen und der Disponent wie eh und je plant? Oder darf

die Folgerung auch heißen, dass genau beschrieben wird, wie gerechnet werden soll? Ähnlich wie beim Suchen nach einem nicht vorhandenen Gegenstand führt auch hier nur das ungünstigste Ergebnis, die Angabe, dass zehn Fahrzeuge benötigt werden, nie zu Schwierigkeiten. Werden die Berechnungen von einem hervorragenden Disponenten durchgeführt und die Verladung von einem mittelmäßigen Staplerfahrer vorgenommen, sind Störungen vorprogrammiert. Nicht immer kann das Verladen mit einem leeren Lkw begonnen werden und nicht immer werden nur Behälter einer Größe verladen. Das hier beschriebene Vorgehen ist ohne Schwierigkeiten auf jedem Rechner realisierbar und liefert Ergebnisse auch für anspruchsvollere Aufgabenstellungen in Bruchteilen von Sekunden.

Für Taschenrechner und Tabellenkalkulationsprogramme gibt es eine Vielzahl weiterer Funktionen, die denen aus Definition .27 ähnlich sind und hiermit überflüssig werden. Ein Beispiel ist das **Runden**, wobei oftmals noch ein Runden auf eine bestimmte Anzahl von Nachkommastellen verlangt wird. Für das Runden auf  $n$  Stellen kann die *floor*-Funktion verwendet werden.

$$\tilde{x} = \left\lfloor x \cdot 10^n + \frac{1}{2} \right\rfloor / 10^n \quad (4.9)$$

### Beispiel .16 Runden

Die Zahlen 2.3567 und 2.3542 sollen auf zwei Nachkommastellen gerundet werden.

$$\begin{aligned} \widetilde{2.3567} &= \left\lfloor 2.3567 \cdot 10^2 + \frac{1}{2} \right\rfloor / 10^2 & (4.10a) \\ &= \lfloor 235.67 + \frac{1}{2} \rfloor / 10^2 = \lfloor 236.17 \rfloor / 10^2 = 2.36 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \widetilde{2.3542} &= \left\lfloor 2.3542 \cdot 10^2 + \frac{1}{2} \right\rfloor / 10^2 & (4.10b) \\ &= \lfloor 235.42 + \frac{1}{2} \rfloor / 10^2 = \lfloor 235.92 \rfloor / 10^2 = 2.35 \end{aligned}$$

Zwei weitere häufig verwendete Funktionen sind  $\text{int}(x)$  und  $\text{trunc}(x)$ . Die erste bestimmt den ganzzahligen Anteil einer Zahl, die zweite schneidet die Nachkommastellen ab. Für positive Werte von  $x$  sind  $\text{int}(x)$  und  $\lfloor x \rfloor$  identisch, für negative kann  $\text{int}(x)$  auf verschiedenen Rechnern unterschiedlich implementiert sein. So kann  $\text{int}(-2.3)$  auf einem Rechner  $-2$  und auf einem anderen  $-3$  ergeben. Eine analoge Problematik ist für  $\text{trunc}(x)$  zu beobachten. Bei Verwendung von  $\text{int}(x)$  und  $\text{trunc}(x)$  ist somit für jedes Programm zu testen, welche Definition gilt und ein aufwendiges Testen von Anwendungen ist unvermeidbar. Die deutschen Übersetzungen wie *Ganzzahl* oder *Abrunden* reduzieren die Unklarheit nicht. Sämtliche Missverständnisse werden bei Verwendung von *ceiling* und *floor* vermieden.

### Exkurs 4.2 Rechnen mit Datumsangaben in Oracle

Differenz zwischen den Tagen aus Tabelle 4.2

```
select (
  to_date('03-feb-06 11:48:54', 'dd-mon-YY hh24:mi:ss')
- to_date('07-jan-05 12:23:24', 'dd-mon-YY hh24:mi:ss')
) from dual;
```

12.5 Tage nach dem ersten Datum aus Tabelle 4.2

```
select to_char(
  to_date('03-feb-06 11:48:54', 'dd-mon-YY hh24:mi:ss')
+ 12.5, 'dd-mon-YY hh24:mi:ss')
from dual;
```

## 4.2.2 ... Datumsangaben

Wie kann mit Datumsangaben gerechnet werden? Fragen der Art, wie groß ist die Zeitdifferenz zwischen 12:30Uhr und 12:10Uhr sind aus dem praktischen Leben kaum wegzudenken und leicht zu beantworten. Die Differenzen zwischen 16:10Uhr und 15:50Uhr oder zwischen 0:10Uhr und 23:50Uhr bereiten schon größere Probleme. Im letzten Beispiel wird deutlich, dass eine Berechnung nur möglich ist, wenn auch ein Tag angegeben ist. In den beiden ersten zu berechnenden Differenzen scheint es, als ob jeweils ein Unterschied von zwanzig Minuten gemeint ist. Aber im letzten? Ist eine Differenz von zwanzig Minuten oder eine von 23 Stunden und 40 Minuten gesucht? Egal welche gemeint ist, bereitet das Berechnen der Differenzen bei der hier gegebenen Form vermutlich Schwierigkeiten. Die letzte Zeile aus Tabelle 4.2 zeigt bereits, wie mit Datumsangaben gerechnet wird: Jedes Datum wird als ganze Zahl geschrieben, als Anzahl von Stunden, Sekunden oder Millisekunden ab einem festgelegten Stichtag. Dieses erklärt, weshalb sämtliche Rechenoperationen auch zu Ergebnisse führen. Das Rechnen mit Datumsangaben kann damit auf folgende vier Aufgaben reduziert werden:

- Erkennen, ob ein Eintrag ein Datum ist,
- Umwandeln des Datums in eine natürliche Zahl,
- Addition, Subtraktion oder Vergleich von zwei natürlichen Zahlen,
- Umwandeln des Ergebnisses, einer ganzen Zahl, in ein Datum.

Das folgende Beispiel zeigt eine Umwandlung einer Angabe in Sekunden in Jahre und Tage.

### Beispiel .17 Rechnen mit Datumsangaben

Das von Oracle gelieferte Ergebnis für die Differenz der beiden Datumsangaben in Tabelle 4.2 ist  $391.976042 d = 33\,866\,730 s$ , eine zumindest für den tagtäglichen Gebrauch ungewöhnliche Darstellung. Dieses soll nun schrittweise in eine gebräuchliche Angabe umgewandelt werden.

Mit  $1 d = 86400 s$  folgt:

$$33\,866\,730 s \div 86400 = \underbrace{391}_{\text{Tage}} \text{ Rest } 84330 \quad (4.11a)$$

Also 391 Tage und 84330 s. Mit  $1 h = 3600 s$  folgt:

$$84330 \div 3600 = \underbrace{23}_{\text{Stunden}} \text{ Rest } 1530 \quad (4.11b)$$

Also 23 Stunden und 1530 s. Mit 1 min = 60 s folgt:

$$1530 \div 60 = \underbrace{25}_{\text{Minuten}} \text{ Rest } 30 \quad (4.11c)$$

Werden nun noch 391 Tage in Jahren ausgedrückt, ergibt sich für die Differenz 1 Jahr, 26 Tage, 23 Stunden, 25 Minuten und 30 Sekunden.

Das Erkennen, ob ein Eintrag ein Datum ist oder nicht, kann bei der Vielzahl gebräuchlicher Formate kaum automatisiert werden. Selbst das automatische Erkennen des Datums, wenn klar ist, ob es sich um ein Datum handelt oder nicht, kann zu falschen Ergebnissen führen. So ist bei der Angabe 02-03-06 nicht klar, ob es sich um den 2. Februar 2006 oder den 3. März 2006 handelt. Die Vorgabe eines Formates, wie in den Anweisungen im Exkurs 4.2, ist zwingend notwendig, voreingestellte Formate können leicht zu gravierenden Fehlern führen.

Das Umwandeln der Zahl in ein richtiges Datum ist etwas aufwendiger, da hier die Anzahl der Tage der einzelnen Monate zu berücksichtigen ist. In dem Exkurs 4.2 übernimmt dieses die Funktion `to_char(...)`. Für praktische Anwendungen sollte hier stets auf getestete Funktionen zurückgegriffen werden.

### 4.2.3 ... Winkelangaben und Koordinaten

Auch der Umgang mit Winkeln und Koordinaten birgt manche Tücke. Die erste Schwierigkeit ist in der Verwendung unterschiedlicher Koordinatensysteme begründet. Auf der Erdoberfläche werden Positionen bzw. Punkte üblicherweise in Längen- und Breitengraden, d. h. in Winkeln in einem erdfesten Koordinatensystem angegeben. Für Satelliten im Weltraum, die für Ortungszwecke eingesetzt werden, ist dieses Koordinatensystem ungeeignet, da es sich mitsamt der Erde bewegt. Sie verwenden eines, das im Raum fest verankert ist. Bei konkreten Rechnungen auf der Erde hätten wir gerne ein kartesisches System mit  $x$ ,  $y$  und  $z$ -Koordinaten, da dann bekannte Regeln der Geometrie angewendet werden können. Ein und derselbe Punkt hat somit bereits drei verschiedene Darstellungen, die mittels geeigneter, durchaus anspruchsvoller, Transformationen ineinander überführt werden können und müssen [z.B. Voß06]. Hinzu kommt, dass Winkel sowohl in Grad, mit Minuten und Sekunden, oder dezimal auch als Bogenmaß oder Gon angegeben werden.

Wie bei den Datumsangaben sollten hier getestete Funktionen, wie z. B. den in der *Spatial*-Erweiterung von *Oracle* enthaltenen, verwendet oder Experten angesprochen werden.

### 4.2.4 ... Fahrplänen

Gänzlich andere Anforderungen und Rechenmethoden sind bei einer Bestimmung von Fahrzeiten in fahrplangesteuerten Systemen zu betrachten. Wie lange dauert beispielsweise der Umlauf einer Palette oder eines Behälters, der für den Warentransport zwischen Lieferant und Empfänger genutzt und möglicherweise in der Halle eines Dienstleisters zwischengelagert wird? Dieses ist nicht zwingend die Summe der Fahrzeiten. Der Behälter, der kurz nach Abfahrt eines Lkw befüllt wird, muss bis zur nächsten Verladung warten. Eine Palette, die kurz vor Ende der letzten Schicht einer Woche den Wareneingang erreicht, wird länger warten als eine, die während des laufenden Betriebes ankommt. Da die Umlaufzeiten in solchen System noch durch externe Faktoren, wie Produktionszyklen oder Fahrzeugkapazitäten beeinflusst werden können, soll die Problemstellung an einem einfacheren Beispiel verdeutlicht werden.

(a) Fahrplanausschnitt				(b) Verbindungen				
Ab <i>Löwenstadt</i>	15:43	15:58	...	Ab <i>Ls</i>	An <i>Gd</i>	Ab <i>Gd</i>	An <i>Wa</i>	Fahrzeit
	↓	↓		15:43	16:06	16:23	16:32	0:49
An <i>Gründorf</i>	16:06	16:21	...	15:58	16:21	16:23	16:32	0:34
Ab <i>Gründorf</i>	15:23	16:23	17:23	15:58	16:21	17:23	17:32	1:34
	↓	↓	↓					
An <i>Wachalda</i>	15:32	16:32	17:32					

**Tab. 4.5:** Fahrplan und Verbindungen für eine Fahrt von Löwenstadt nach Wachalda über Gründorf. Die erste Teilstrecke wird von einem Bus bedient, die zweite von einem Zug.

### Beispiel .18 Fahrt von Löwenstadt nach Wachalda

Betrachten wir eine Verbindung von Löwenstadt (*Ls*) über Gründorf (*Gd*) nach Wachalda (*Wa*), bei der in Gründorf umgestiegen werden muss. Gesucht ist die beste Verbindung von Löwenstadt nach Wachalda. Ein Ausschnitt aus dem Fahrplan ist in Tabelle 4.5(a) gezeigt.

Die Addition der Fahrzeiten aus Tabelle 4.5(a) für die Einzelstrecken ergibt 32'. Die kürzeste Fahrzeit der in der Tabelle 4.5(b) gezeigten Verbindungen beträgt 34'. Bedingt durch die Aufenthaltszeit in *Gründorf* ist dieses um zwei Minuten länger als die Summe der Fahrzeiten. Da etwas mehr als eine Minute benötigt wird, um von der einen zur anderen Haltestelle zu wechseln, könnten vorsichtige Menschen die frühere Abfahrtszeit um 15:43Uhr bevorzugen, was zu einer Fahrzeit von 49' führt.

Was passiert nun, wenn sich die Fahrzeit auf einem Teilstück um 3' verlängert? Betrachten wir zunächst den Fall, dass dieses auf dem Teilstück von *Gründorf* nach *Wachalda* geschieht. Die Ankunft des Zuges ist drei Minuten später als geplant und die Fahrzeit verlängert sich um genau die drei Minuten, die der Zug aufgehalten wurde. Bei dem ersten Teilstück stellt sich die Situation völlig anders dar. Bei der ersten Verbindung in Tabelle 4.5(b) würde der Bus statt um 16:06Uhr um 16:09Uhr in *Gründorf* ankommen, vollkommen ausreichend um den Anschlusszug zu erreichen. Die Fahrzeit bliebe konstant. Bei der zweiten Verbindung käme der Bus um 16:24Uhr an, zu spät für den Anschluss um 16:23Uhr und es müsste bis um 17:23Uhr gewartet werden. Die Fahrzeit würde sich um eine Stunde auf 1h34' verlängern, obwohl auch hier nur 3' addiert werden mussten. Was ist nun die beste Verbindung? Die kürzeste oder möglicherweise eine etwas längere, die dafür mehr Sicherheit bietet. Die Berechnung von Zeiten für Systeme, in denen Fahrpläne zu beachten sind, sind mittels Rechenregeln der **Fahrplanarithmetik** [Bra93; Sch96] durchzuführen. Nach diesen Regeln ergibt  $2 + 2$  nur manchmal 4 und  $(2 + 3) + 5$  ist nicht immer gleich  $2 + (3 + 5)$ .

## 4.3 Suchen und Sortieren

### 4.3.1 Suchen eines kleinsten Elementes

Wer kennt es nicht, das Suchen nach irgendetwas. Sei es die Notiz der letzten Besprechung, eine Visitenkarte, der Kunde mit der größten Reklamationshäufigkeit oder die angebrochene Palette mit dem Tomatenmark, und zwar genau die eine, nicht irgendeine. Bereits die in Anlehnung an

viele Bücher gewählte Überschrift macht ein Problem deutlich: Das Thema ist oftmals das Suchen, nicht das Finden. Gehen wir davon aus, dass das Suchen nicht vermeidbar ist, so sollte der Aufwand für das Finden minimiert werden. Überflüssiges Suchen ist zweifellos Verschwendung, die vermieden werden sollte, aber wie? Hierzu ist es hilfreich, verschiedene Szenarien und deren Eigenarten darzustellen. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die Diskussion, die bereits im Zusammenhang mit Daten und Informationen in Kapitel 3.1.3 bezüglich struktureller Informationen geführt wurde. Für logistische Eigenschaften ist zunächst zu unterscheiden, ob der Ort eines Objektes oder ein Objekt mit einer bestimmten Eigenschaft gefunden werden soll. So wird bei einer Lagerhaltungsstrategie nach dem *first-in-first-out* oder *fifo*-Prinzip der Artikel mit der Eigenschaft *Längste Lagerzeit* gesucht. Diese Eigenschaft ist nicht fest mit einem Artikel verbunden, sondern ändert sich mit jedem Such- bzw. Auslagerungsvorgang. Ob in einer geordneten oder einer ungeordneten Menge gesucht werden soll, ist eine weitere zu beantwortende Frage. Unter einer ungeordneten Menge soll eine Menge verstanden werden, deren Ordnung der Suchende versteht, d. h. er kann diese Ordnung als **Information** nutzen. Diese Ordnung kann noch um eine Struktur ergänzt werden. So stellt die Aussage „Die Hausnummern sind aufsteigend“, eine Ordnung, die zusätzliche Angabe, dass gerade Hausnummern auf einer und die ungeraden auf der anderen Straßenseite liegen, eine zusätzliche **strukturelle Information** dar. Ein Suchender, der eine vorhandene Ordnung nicht erkennt, sieht ein Problem so, als ob keine Ordnung vorhanden wäre. Was passiert aber, wenn eine Ordnung falsch erkannt oder angenommen wird?

#### **Beispiel .19 Suchen einer Adresse in einer fremden Stadt**

*Sie stammen aus einer Stadt, in der gerade und ungerade Hausnummern nie auf einer Straßenseite zu finden waren. Sie wollen in einer fremden Stadt in einer Straße zu dem Haus mit der Nummer 36. Sie biegen in die richtige Straße ein und sehen auf der rechten Seite ein Haus mit der Nummer 2 und etwas später, kurz vor einer Kreuzung, die Nummer 18. Sie folgern, dass die gesuchte Hausnummer gleich kommen muss. Sie fahren über die Kreuzung und stellen fest, dass sich der Straßename geändert hat. Beim Zurückfahren sehen Sie kurz vor Nummer 18 auf der selben Seite wie das Haus mit der Nummer 18 ein Haus mit der Nummer 19. Genervt finden Sie das Haus mit der Nummer 36 genau gegenüber dem mit der Nummer 2.*

Eine falsch interpretierte Struktur hat das Finden erheblich erschwert. Ob nun Hausnummern oder Regalgassen, Probleme ähneln sich. Noch schlimmer ist, wenn eine vorgegebene Ordnung gestört wird. In dem Straßenbeispiel ist es einfach, die alternative Möglichkeit zu erkennen, falls diese Option bekannt ist. Was passiert aber, wenn in einem Lager die Artikel vorne beginnend nach Einlagerdatum einsortiert werden und ein Artikel ohne Wissen eines Suchenden an irgendeine Stelle gelegt wird? Nun gibt es auch hier noch zwei Möglichkeiten: Weiß der Suchende, dass dieser Artikel vorhanden ist? Falls ja, wird er ihn, mit großem Aufwand, suchen– falls nein, wird er, nach längerem Suchen, möglicherweise zu einem anderen greifen. Die Auswirkungen eines solchen Verlegens sind, so erstaunlich es auch erscheinen mag, weniger schmerzhaft, wenn keine Ordnung vorhanden ist. Sicher kann hieraus nicht abgeleitet werden, dass die beste Lösung darin zu sehen ist, keine Ordnung einzuführen. Was aber, wenn es mehrere mögliche Ordnungskriterien gibt. So kann es für einen Vertriebsmitarbeiter sinnvoll sein, Kunden nach deren Umsätzen zu sortieren, für den Disponenten nach Postleitzahlen, für einen Mitarbeiter der Debitorenbuchhaltung nach Kunden- oder Auftragsnummern. Gleiches gilt in einem Lager. Artikel sollen sowohl nach Einlagerungsdatum, Zugriffshäufigkeit, Produktgruppen, Umsatz und natürlich Eignung für einen bestimmten Lagerbereich sortiert werden. Nicht nur unterschiedliche Kriterien sind notwendig, auch noch solche, die sich ändern. Sowohl Umsatz als auch Zugriffshäufigkeiten sind keine statischen Größen. Könnte für Kunden die, ohne jede Diskussion zu verwerfende, Idee

aufkommen, durch Kopieren mehrere Karteien oder Dateien mit unterschiedlichen Ordnungsmerkmalen anzulegen, ist dieses in einem Lager mit physischen Objekten ausgeschlossen. Aber auch in solchen Fällen soll das Finden mit möglichst geringem Aufwand möglich sein. Hier hilft nichts außer einer guten Buchhaltung in Form eines **Indexes**, so wie er am Ende dieses Buches gefunden werden kann. Dieser benötigt Platz, kann das Finden aber erheblich erleichtern.

**Weisheit 4.2** *Ein Index benötigt Platz. Das Erstellen und Pflegen verursacht Kosten. Ein Index senkt die Kosten beim Suchen.*

Die Pflege eines solchen Indexes ist ohne Aufwand nicht zu bewerkstelligen. Ein Umlagern an dieser Buchhaltung vorbei führt zu den selben Problemen wie das Umlagern in einem geordneten System. Haben wir es mit Daten zu tun, die elektronisch gespeichert werden können, ist der für Menschen erkennbare Aufwand verschwindend gering. Gibt es eine Tabelle `Kunde`, in der sämtliche Kunden mit ihren Adressen und Umsätzen hinterlegt sind, so können durch die `SQL`-Befehle

```
create index PLZ on Kunde(PLZ)
create index umsatz on Kunde(umsatz)
```

Indexe angelegt werden. Das Suchen nach einer Postleitzahl oder dem Umsatz ist jetzt genauso einfach und insbesondere schnell möglich, wie das Nachschlagen in dem Index eines Buches. Ein Vorteil eines solchen Indexes ist, dass durch Einfügungen bedingte Änderungen mit relativ wenig Aufwand übernommen werden können. Nur für das neue, vollständige Anlegen eines Indexes muss eine komplette Sortierung vorgenommen werden. Ein Nachteil ist einzig in dem zusätzlichen Platzbedarf zu sehen. Auch wenn Speicherkapazitäten immer mächtiger werden, können sich große Dateien bei Datensicherungsmaßnahmen als störend erweisen, weil sie die benötigte Zeit verlängern. Hier muss überlegt werden, ob solche Indexdateien überhaupt gesichert werden müssen. Im Falle eines Datenverlustes lassen sich die Indexe problemlos neu erstellen. Der Aufwand ist genauso groß wie beim neuen Anlegen.

Zur Abschätzung des für das Suchen benötigten Aufwandes soll folgendes Beispiel dienen.

#### **Beispiel .20 Suchen von Visitenkarten**

*Sie haben bei einem Messebesuch 100 Visitenkarten erhalten und suchen nun eine bestimmte. Durch häufiges Hin- und Herräumen hat die Reihenfolge der Karten keinerlei Bezug zu der Reihenfolge, in der Sie diese erhalten haben, d. h. es ist keinerlei, für sie erkennbare, Ordnung vorhanden.*

Bevor verschiedene Möglichkeiten beschrieben werden, muss der Begriff Aufwand etwas präzisiert werden. Bei der informatischen Beschreibung von Suchalgorithmen wird unter Aufwand die Anzahl der Operationen verstanden, die notwendig sind, um das gesuchte Objekt zu finden. Hierbei wird nicht berücksichtigt, wie hoch der Aufwand ist, eine Operation durchzuführen. Im Fall der Visitenkarten wäre bei dieser Betrachtung der hier ermittelte Aufwand unabhängig davon, ob auf diese direkt zugegriffen werden kann oder für jede einzelne erst in ein anderes Büro gegangen werden muss. In einem solchen Fall, wie er sich beispielsweise beim Sortieren von Waren in einem Lager zeigt, muss der hier ermittelte Aufwand noch mit dem für jede einzelne Operation verknüpft werden. Für die Diskussion von Algorithmen in diesem Kapitel wird nur der einfache Fall betrachtet, bei dem der Aufwand gleich der Anzahl der benötigten Schritte ist.

**Algorithmus 4.1 Suchen in einem unsortierten Stapel**

- Betrachte den gesamten Stapel als aktiven Stapel.
- Wiederhole folgende Schritte bis die gesuchte Karte gefunden.
  - Nimm eine beliebige Karte aus dem aktiven Stapel.
  - Lege diese Karte neben den Stapel.

Natürlich könnte in Algorithmus 4.1 auch jeweils eine bestimmte, die oberste oder die unterste genommen werden. Dieses mag seriöser erscheinen, ändert aber nichts an dem benötigten Aufwand, der Anzahl  $N_{\text{st}}$  der im Mittel benötigten Schritte für  $N^{(K)}$  Karten:

$$N_{\text{st}} = \mathcal{O} \left[ \frac{N^{(K)}}{2} \right] \stackrel{N^{(K)} \equiv 100}{\approx} 50 \quad (4.12)$$

An dieser Angabe ist zu erkennen, dass der Aufwand linear mit der Anzahl der Karten zunimmt. Interessant ist der Fall, wenn die Karte gar nicht vorhanden ist. Hierfür werden immer  $N^{(K)}$  Schritte benötigt.

**Weisheit 4.3** *Das Suchen eines nicht vorhandenen Artikels ist immer mit maximalem Aufwand verbunden.*

Dieses Dilemma kann auch durch den folgenden Algorithmus nicht behoben werden. Der Stapel sei wiederum sortiert.

**Algorithmus 4.2 Suchen in einem sortierten Stapel**

- Betrachte den gesamten Stapel als aktiven Stapel.
- Wiederhole folgende Schritte bis die gesuchte Karte gefunden.
  - Nimm eine Karte aus der Mitte des aktiven Stapels.
  - Bestimme, ob die gesuchte Karte vor oder hinter der aktuellen Karte liegt.
  - Nimm den Stapel als aktiven, in dem die gesuchte Karte liegt.

Um den Aufwand hierfür abzuschätzen, kann betrachtet werden, wann der aktive Stapel nur noch aus einer Karte besteht. In jedem Schritt wird die Anzahl halbiert. Die Stapelgröße  $N^{(\text{Stapel})}$  nach  $n$  Schritten beträgt

$$N^{(\text{Stapel})}(n) = \frac{N^{(K)}}{2^n} \quad (4.13a)$$

Für die Anzahl maximal benötigter Schritte  $N_{\text{st}}$  folgt:

$$N_{\text{st}} = \mathcal{O} [\log_2(N^{(K)})] = \mathcal{O} \left[ \frac{\log_{10}(N^{(K)})}{\log_{10}(2)} \right] \stackrel{N^{(K)} \equiv 100}{\approx} \frac{2}{0.3010} = 6.6 \approx 7 \ll 50 \quad (4.13b)$$

Soll mehrmals gesucht werden, kann es sinnvoll sein, eine unvollständige Ordnung herzustellen, um eine möglichst optimale Gesamtlösung zu finden. Die Karten könnten nach dem ersten Buchstaben des Nachnamens sortiert werden, wobei sich 26 Stapel ergeben, in denen dann die einzelnen Karten unsortiert vorliegen. Für das Anlegen dieser Stapel werden 100 Schritte benötigt. Zum Suchen muss zunächst der richtige Stapel und dann die Karte in diesem gefunden werden. Die Aufwände lassen sich mit den oben angegebenen Formeln berechnen.

Welches die günstigste Lösung ist, hängt von der Häufigkeit des Suchens, des Sortierens und von Änderungen in der Menge ab, in der gesucht werden soll. Änderungen können sich daraus ergeben, dass einzelne Elemente eingefügt werden oder eine vollständig neue Menge zu betrachten ist, die dann wieder sortiert werden muss.

### 4.3.2 Sortieren

Für die Abschätzung des Aufwandes zum Finden muss der Aufwand für das Sortieren berücksichtigt werden. Betrachten wir hierzu einige gängige Sortieralgorithmen, wie sie in den Algorithmen 4.3 und 4.4 beschrieben werden.

#### **Algorithmus 4.3 insert sort**

- *Lege alle Karten unsortiert auf einen Stapel.*
- *Nimm die erste Karte vom Stapel unsortierter Karten und beginne mit diesem einen Stapel sortierter Karten.*
- *Wiederhole folgende Schritte, bis alle Karten einsortiert*
  - *Nimm die nächste Karte vom Stapel unsortierter Karten.*
  - *Füge diese an die richtige Stelle in dem bereits sortierten Stapel ein.*

Bei diesem Vorgehen ist für eine Aufwandsabschätzung zu beachten, dass jedes Einfügen ein Suchen der richtigen Stelle verlangt. Eine andere Möglichkeit stellt Algorithmus 4.4 dar.

#### **Algorithmus 4.4 bubble sort**

*Unter dem nächsten Paar wird das Paar verstanden, das die letzte Karte des vorherigen Paares als erste Karte enthält.*

- *Lege alle Karten unsortiert auf einen Stapel.*
  - *Wiederhole folgende Schritte bis alle Karten sortiert.*
    - *Das aktuelle Paar sei das erste Paar.*
    - *Wiederhole folgende Schritte bis das letzte zu betrachtende Paar ausgewählt ist.*
      - \* *Bringe das aktuelle Paar in die richtige Reihenfolge.*
      - \* *Betrachte das nächste Paar des Stapels als aktuelles Paar.*
- Die zuletzt betrachtete Karte ist jetzt an der richtigen Stelle. Das letzte zu betrachtende Paar ist das letzte Paar, das diese Karte nicht enthält.*

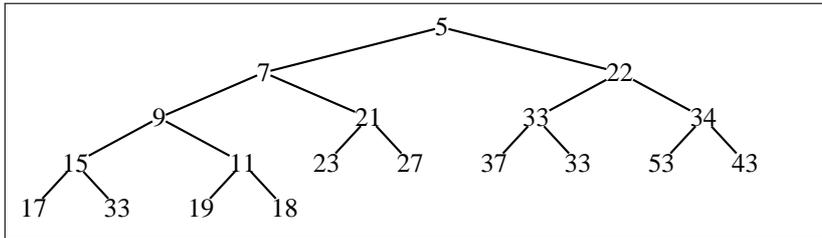


Abb. 4.2: Beispiel für einen heap

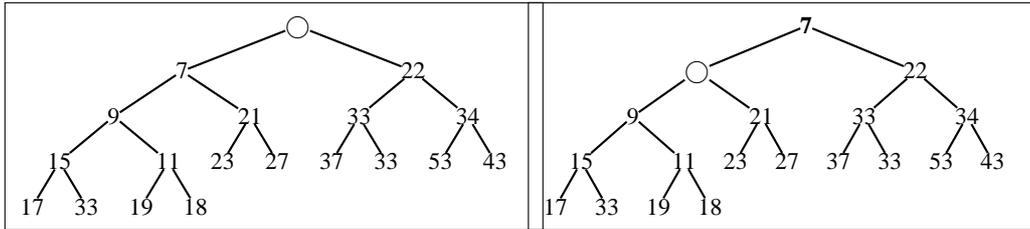


Abb. 4.3a: Entnehmen erster Schritt

Abb. 4.3b: Entnehmen zweiter Schritt

Der Aufwand beider Verfahren für  $N^{(K)}$  Karten beträgt

$$N_{st} = \mathcal{O} \left[ (N^{(K)})^2 \right]. \tag{4.14}$$

Was unterscheidet die beiden hier vorgestellten Verfahren und wie hoch ist der Aufwand, wenn das Sortieren nicht mit leicht handhabbaren Spielkarten sondern mit Paletten in einem Lager durchgeführt wird? Bei Spielkarten erfolgt das Einfügen beim *insert sort* durch eine einzige Aktion, das Hineinstecken der Karte an die richtige Stelle, alle anderen Karten verschieben sich von alleine. In einem Lager muss der Platz, an dem eingefügt werden soll, erst frei gemacht werden. Im ungünstigsten Fall müssen hierfür alle nachfolgenden Objekte um einen Platz verschoben werden. Beim *bubble sort* müssen zwei Objekte vertauscht werden. Hierzu ist es ausreichend, einen freien Platz zur Verfügung zu stellen, an dem ein Objekt zwischengelagert werden kann. In beiden Fällen kann der tatsächlich aufzubringende Aufwand maßgeblich dadurch beeinflusst werden, dass Lücken gelassen werden: Das System kann atmen. *Bubble sort* benötigt eine einzige sich bewegende Lücke, *insertion sort* mehrere verteilte. Diese Überlegungen werden uns bei

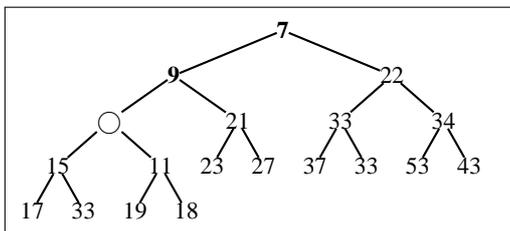


Abb. 4.3c: Entnehmen dritter Schritt

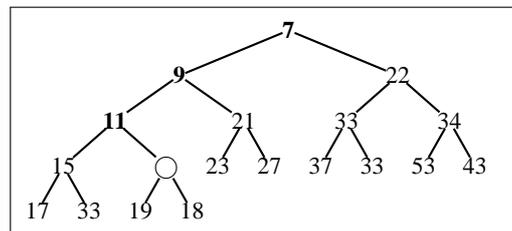


Abb. 4.3d: Entnehmen vierter Schritt

der Realisierung der **Doppelspielstrategie** zur Materialbereitstellung an eine Produktionslinie wieder begegnen.

Ein Beispiel von Karten mag verständlich sein, jedoch erschwert es die Sicht auf tatsächliche Probleme. Für Mengen mit einigen hundert Daten sind alle Verfahren auf modernen handelsüblichen Rechnern nur Bruchteile von Sekunden mit Sortieren und Suchen beschäftigt. Bei der Lösung konkreter Aufgaben, wie z. B. der Routenplanung, ist jedoch ein solches Problem möglicherweise mehrere Millionen Mal mit mehreren Tausend oder Millionen von Objekten durchzuführen und dieses möglichst innerhalb weniger Sekunden.

Werden nicht irgendwelche Elemente gesucht, sondern kleinste oder größte, bietet sich der *heap sort*-Algorithmus an. Im Folgenden soll stets davon ausgegangen werden, dass ein kleinstes Element gesucht wird. Die Überlegungen können unmittelbar auf das Suchen eines größten Elementes übertragen werden. Ein *heap* ist ein balancierter Binärbaum wie in Abbildung 4.2 gezeigt. Von der oben liegenden Wurzel des Baumes, hier der Zahl 5, gehen Verzweigungen ab. Die oberen Elemente werden jeweils als Eltern der direkt darunter liegenden, den Kindern, bezeichnet. Jedes Elter hat maximal zwei Kinder, deshalb binär, und es gibt maximal eine Ebene, die nicht vollständig aufgefüllt ist, deshalb balanciert. Die Anzahl der Ebenen heißt Tiefe des Baumes. Wichtig ist, dass jedes Kind, der Wert jedes Kindes, größer ist als der seines Elters. Das kleinste Element steht somit oben. Wird nun das kleinste Element benötigt, kann dieses einfach aus dem *heap* entnommen werden. Die hierbei entstehende Lücke wird, wie in den Abbildungen 4.3a bis 4.3d, gezeigt, aufgefüllt. Eine Lücke wird jeweils durch das kleinere der beiden Kinder aufgefüllt, wodurch wieder eine Lücke entstehen kann, mit der ebenso verfahren wird. Entscheidend hierbei ist, dass nur ein Ast und nicht die vollständige Menge betrachtet werden muss. Die Anzahl der zu betrachtenden Elemente wird, wie in dem Suchalgorithmus 4.2, in jedem Schritt halbiert.

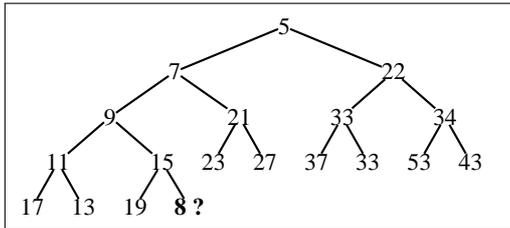


Abb. 4.4a: Einfügen erster Schritt

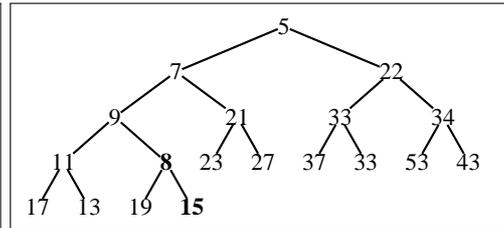


Abb. 4.4b: Einfügen zweiter Schritt

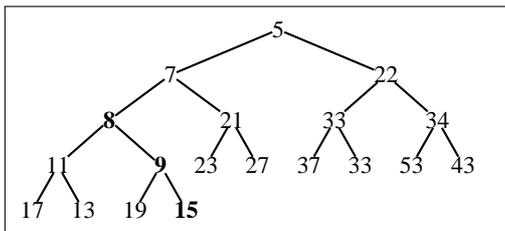


Abb. 4.4c: Einfügen dritter Schritt

Die Zahl 8 wird in den *heap* aus Abbildung 4.3d eingefügt. Die einzufügende Zahl wandert von unten nach oben, bis ein Elter kleiner ist als die einzufügende Zahl. Die Anzahl der Vertauschungsoperationen ist gleich der Tiefe des Baumes.

Auch das Einfügen eines neuen Elementes geht ebenso schnell und ist in den Abbildungen 4.4a bis 4.4c gezeigt. Das einzufügende Element, hier 8 wird hinter die letzte belegte Position geschrieben. Dieses neue Kind wird mit seinem Elter verglichen. Da es kleiner ist, vertauscht es

mit diesem seine Position. Da es kleiner ist als sein Elter, ist es auch kleiner als das andere Kind des selben Elters und somit wiederum ein Elter. In diesem Beispiel ist es auch noch kleiner als sein jetziges Elter und wandert eine weitere Ebene nach oben und erreicht die in Abbildung 4.4c gezeigte Endposition [Pre+92]. Hiermit ergibt sich für den Aufwand des Findens einschließlich des Sortierens bei  $N$  Elementen:

$$N_{\text{st}} = \mathcal{O}[N \log_2(N)] \quad (4.15)$$

Zusätzlich zu der sehr hohen Effizienz ist auch seine hervorragende Eignung für die praktische Implementierung hervorzuheben. Werden die einzelnen Knoten bei 1 beginnend durchnummeriert, und ist  $i_e$  die Nummer eines Elter, so sind  $2i_e$  und  $2i_e + 1$  die Indexe der Kinder. Ist  $i_c$  die Nummer eines Kindes, so ist  $i_c \div 2$  der Index des dazugehörenden Elters.

## 4.4 Zufallszahlen

### 4.4.1 Eigenschaften und Anforderungen

Bereits in Algorithmus 4.2 konnte eine beliebige Karte gewählt werden. Was heißt beliebig? In diesem Zusammenhang soll damit irgendeine, zufällig ausgewählte Karte gemeint sein. Wie im vorigen Kapitel ausgeführt, entstehen die größten Probleme dann, wenn eine dem Anwender nicht erkennbare Ordnung vorliegt, eine gedachte Ordnung gestört wird oder für die Lösung eines Problems eine Ordnung angenommen wird, die nicht der tatsächlichen entspricht. Eine zufällige Auswahl gehorcht keiner Ordnung und ist somit zumindest keine schlechte Auswahl. Was ist Zufall? Entscheidend für das zufällige Eintreten eines Ereignisses ist, dass es unabhängig von früheren Ereignissen ist. So sind die Lottozahlen des kommenden Wochenendes unabhängig von allen Lottozahlen der letzten Jahre. Dieses muss um weitere wichtige Forderungen ergänzt werden. Werden die Ziehungen über einen langen Zeitraum betrachtet,

- müssen alle Zahlen gleichhäufig erscheinen,
- darf es keine Zahlenkombinationen geben, die häufiger zu beobachten sind als andere. So darf es nicht sein, dass 2, 3, 4 und 5 gleich häufig sind, aber 2 immer zusammen mit 3 und 4 immer zusammen mit 5 erscheint.
- Zahlenkombinationen, gleichgültig ob alle sechs Zahlen oder Teilmengen davon, dürfen sich nicht in erkennbaren Abständen wiederholen.

Anschaulich lässt sich die Forderung nach Gleichhäufigkeit schön und schnell beantworten. Wird die Häufigkeit der gezogenen Zahlen als Balkendiagramm dargestellt, müssen alle Balken gleich hoch werden. Die Forderung, dass Kombinationen nicht bevorzugt auftreten dürfen, kann für Paare auch noch grafisch dargestellt werden. Werden statt der sechs Zahlen jeweils Paare  $(x_i^{(1)}, x_i^{(2)})$  gezogen und diese in ein kartesisches Koordinatensystem eingezeichnet, darf es keine Lücken oder Löcher geben, die Fläche muss gleichmäßig mit Punkten überdeckt werden. Für 6-Tupel, also 6-dimensionale Punkte, ist das Zeichnen nicht mehr möglich. Deshalb wurde der Begriff **lokale Diskrepanz** eingeführt. Hierzu wird im 2-dimensionalen Fall für jedes Paar bzw. jeden Punkt  $\underline{x}_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)})$  der größtmögliche Kreis mit diesem Paar als Mittelpunkt gezeichnet, der kein anderes Paar enthält. Im 3-dimensionalen Fall wird der Kreis zu der uns vertrauten Kugel, und für  $n$ -Dimensionen zu einer  $n$ -dimensionalen Kugel. Der Durchmesser

dieses Kreises bzw. dieser Kugeln ist die lokale Diskrepanz  $d_i$  für das Tupel oder den Punkt  $\underline{x}_i = (x_i^{(1)}, \dots, x_i^{(n)})$ .

**Definition .28 Lokale und globale Diskrepanz**

Gegeben ist eine Folge  $\mathbf{I} = \{\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_N\}$   $n$ -dimensionaler Tupel  $\underline{x}_i = (x_i^{(1)}, \dots, x_i^{(n)})$ . Der Radius  $d_i$  der größtmöglichen  $n$ -dimensionalen Kugel mit  $\underline{x}_i$  als Mittelpunkt, die keinen Punkt außer  $\underline{x}_i$  enthält, heißt lokale Diskrepanz.

$$D(\mathbf{I}) = \max_{1 \leq i \leq N} d_i \quad (4.16)$$

heißt globale Diskrepanz.

Je kleiner diese globale Diskrepanz ist, desto besser ist die Folge gleichverteilt und eine *low discrepancy sequence* erreicht. Im eindimensionalen Fall werden die Kugeln zu Intervallen und die Durchmesser zur Breite der Intervalle.

Bei vielen Methoden, wie der Monte-Carlo-Integration sind nicht Zufallszahlen gefordert, sondern allgemein *low discrepancy sequences*, d. h. Folgen mit möglichst kleiner globaler Diskrepanz. Für zufällige Zahlenfolgen nimmt die globale Diskrepanz mit folgender Gesetzmäßigkeit ab:

$$D(N) \propto \sqrt{\frac{1}{N}} \quad (4.17)$$

Es gibt effizientere Möglichkeiten, die Diskrepanz zu reduzieren [Nie92]. Ein einfaches Beispiel in einer Dimension hierfür ist die Folge

$$\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{8}, \frac{3}{8}, \frac{5}{8}, \frac{7}{8}, \frac{1}{16}, \frac{3}{16}, \dots \quad (4.18)$$

Wie leicht zu sehen ist, werden neue Zahlen jeweils dort platziert, wo die lokale Diskrepanz am größten ist, genau in die Mitte eines Intervalls mit maximaler Breite. Zufällig ist hieran absolut nichts mehr, ein Element einer solchen Folge heißt Quasizufallszahl.

**Weisheit 4.4** Das Suchen gleichverteilter Zahlenfolgen ist gleichbedeutend mit dem Suchen von Folgen mit geringer globaler Diskrepanz oder dem Suchen nach *low discrepancy sequences*.

Zufällige Folgen stellen nur eine, nicht einmal sehr gute Möglichkeit, dar. Kann überhaupt etwas zufälliges auf einem Rechner, der vorgegebene und programmierte Algorithmen abarbeitet, realisiert werden? Wirklicher Zufall kann kaum umgesetzt werden und ist auch nicht gewünscht. Das, was benötigt wird, ist etwas, das zufällig erscheint, pseudozufällig. Um die Diskussion zu vereinfachen, sollen alle Zufallsentscheidungen als Zahlenfolgen beschrieben werden können. So kann beim Suchen einer Karte die Reihenfolge jeweils durch eine Folge von Nummern der zu wählenden Karten geschrieben werden. Jedes Element dieser Folge ist eine zufällig gewählte Zahl, eine **Zufallszahl** bzw. Pseudozufallszahl. Die Forderung nach Zufälligkeit beinhaltet, dass die Folge keine Strukturen, insbesondere keine **Periodizität**, zeigen darf, d. h. falls sie periodisch ist, muss die Länge einer Periode so groß sein, dass sie nicht beobachtbar ist. Wie mehrfach gesagt, erleichtern Strukturen bzw. **strukturelle Information** das Auffinden von Lösungen. Gerade dieses

soll verhindert werden, wenn Zufälligkeit gefordert ist. Neben der Forderung nach Zufälligkeit sollen die für praktische Anwendungen eingesetzten Zahlenfolgen auch noch die Eigenschaft besitzen, dass sie **reproduzierbar** sind. Dieses widerspricht natürlich auch der Zufälligkeit, ermöglicht aber, Algorithmen zu testen. Mit einer wirklich zufälligen Folge könnten Ergebnisse stets unterschiedlich sein und es wäre nicht zu klären, ob die Ursache einer Abweichung in der Zahlenfolge oder in der Implementierung eines Algorithmus liegt.

#### 4.4.2 Erzeugung von Zufallszahlen

Im Folgenden sollen jeweils nur Zahlen betrachtet werden, die in einem Intervall  $[0, m - 1)$  gleichverteilt sind. Hieraus lassen sich Zahlen in beliebigen Intervallen und für beliebige andere Verteilungen erzeugen. Die Diskussion der Erzeugung von Zufallszahlen hat eine neue Dimension erhalten, seitdem Rechner immer leistungsfähiger und mittels Simulationen Probleme gelöst werden, in denen nicht mehr nur einige Tausend Zufallszahlen benötigt werden, sondern mehrere Millionen. Dennoch werden heutzutage immer noch Verfahren eingesetzt und mit kommerziellen Softwarepaketen ausgeliefert, die aus grauer Vorzeit stammen und entsprechend ungeeignet sind. Eines der am weitestens verbreiteten Verfahren ist die **lineare Kongruenzmethode**, die eine Folge von Pseudozufallszahlen  $I_i$  nach folgender Vorschrift erzeugt:

$$I_i = (a \cdot I_{i-1} + b) \bmod m \quad \text{für } i \geq 1 \quad (4.19)$$

$a, b, m$  sind Konstanten und  $I_0$  ein vom Benutzer vorzugebender Startwert, der *seed value*.

Im Intervall  $[0, 1)$  gleichverteilte Zufallszahlen  $x_i$  lassen sich hieraus mit

$$x_i = \frac{I_i}{m} \quad (4.19a)$$

generieren. Dieses Verfahren hat einige entscheidende Schwächen:

- Es unterteilt die Menge  $\{0, \dots, m - 1\}$  der natürlichen Zahlen in  $j$  disjunkte Äquivalenzklassen  $I_j$ .
- Die Länge der maximalen Periode ist kleiner oder gleich  $m$ .
- Die Folge zeigt den Marsaglia-Effekt.

##### **Beispiel .21 Äquivalenzklassen**

Aus Gleichung (4.19) werden mit  $a = 7, b = 0, m = 15$  für verschiedene Startwerte Folgen von Zufallszahlen erzeugt.

$$I_n = 7 \cdot I_{n-1} \pmod{15} \quad (4.19')$$

In Tabelle 4.6 sind die Äquivalenzklassen  $I_j$  mit unterschiedlicher Anzahl von Elementen zu erkennen, in die die Menge möglicher Zahlen  $I_i \in \{0, \dots, m-1\}$  unterteilt wird.

$j$	$I_0$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$n_p$
1	1	7	4	13	1	4
2	2	14	8	11	2	4
3	3	6	12	9	3	4
4	5	5				1
5	10	10				1

**Tab. 4.6:** Äquivalenzklassen  $I_j$  und Periodenlänge  $n_p$  für verschiedene Startwerte  $I_0$  für den Zufallszahlengenerator aus Gleichung (4.19).

Nun könnte der Eindruck entstehen, dass die Folgen deshalb so schlecht sind, weil die Konstanten sehr klein und ungeschickt gewählt wurden. Dieses ist sicher ein Grund, aber auch große Werte garantieren keine hohe Qualität, wie folgendes Beispiel zeigt, das für viele Jahre mit Rechnern ausgeliefert wurde.

**Beispiel 22 Pseudozufallszahlen**

Aus Gleichung (4.19) wird eine Folge mit  $a = 4095, b = 12794, m = 2^{32}$  erzeugt. Es sei  $I_0 = 253$ , dann folgt:  $I_1 = 1048829, I_2 = 253 = I_0$

Diese Äquivalenzklasse ist so klein, dass sie leicht übersehen werden kann, aber im Falle des Auftretens zu nennenswerten Fehlern führt. Lassen sich Äquivalenzklassen und Periodizität noch relativ leicht überprüfen, ist die dritte Eigenschaft nur schwer zu erkennen. Der *Marsaglia*-Effekt bedeutet, dass  $n$ -Tupel auf  $(n-1)$  dimensionalen Hyperebenen liegen und nicht den vollständigen Raum ausfüllen. Für 2-Tupel bzw. Paare sind diese  $(2-1)$ -dimensionalen Hyperebenen Geraden, bei Tripeln die uns vertrauten Ebenen im 3-dimensionalen Raum. Bei Geraden und  $b = 0$  kann dieses sehr leicht verdeutlicht werden. Der Ausdruck  $I_i = a \cdot I_{i-1}$  aus Gleichung (4.19) beschreibt einen linearen Zusammenhang, d. h. ist eine Gleichung für eine Gerade. Durch die Modulooperation werden die Werte daran gehindert, eine vorgegebene Größe zu überschreiten, die Folge beginnt wieder mit einem neuen kleinen Wert, von dem aus die folgenden wieder auf einer Geraden mit der Steigung  $a$  liegen, die nicht mit der ersten identisch sein muss. Die maximale Anzahl  $N^{(\text{Mar})}$  von Ebenen beträgt für  $n$ -Tupel:

$$N^{(\text{Mar})}(n) = \sqrt[n]{m} \quad (4.20a)$$

n	2	3	4	6	10
$N^{(\text{Mar})}(n)$	65536	1625	256	40	9

und die globale Diskrepanz

$$D = \frac{1}{\sqrt[n]{m}} \quad (4.20b)$$

**Tab. 4.7:** Anzahl der Hyperebenen aus Gleichung (4.20a) für  $n$ -Tupel und  $m = 2^{32}$ .

Weit bessere Generatoren sind *lagged Fibonacci generators*, dargestellt als  $F(p, q, +)$ , die Zufallszahlen nach folgender Vorschrift erzeugen:

$$I_i = (I_{i-p} + I_{i-q}) \pmod{m} \quad \text{mit } p, q \in \mathbb{N} \quad (4.21)$$

Bekannte Beispiele sind  $F(17, 5, +)$ ,  $F(55, 28, +)$  bei denen die Periodenlängen bis zu  $10^{150}$  betragen können [knut73]. Die ersten 18 bzw. 56 Elemente dieser Folgen sind vom Anwender

vorzugeben. Zumindest eine dieser Zahlen muss ungeradzahlig sein. Das in den letzten Jahren entwickelte **Mersenne-Twister**-Verfahren hat eine Periodenlänge von  $2^{19937} - 1 \approx 10^{6001}$  und liefert auch für mehr als 600-Dimensionen hervorragende Ergebnisse.

Es gibt eine Vielzahl guter, leistungsfähiger und gleichzeitig einfacher Generatoren, die Pseudo-Zufallszahlen erzeugen und beispielsweise für Simulationen genutzt werden können. Für die Verwendung schlechter gibt es keine Notwendigkeit.

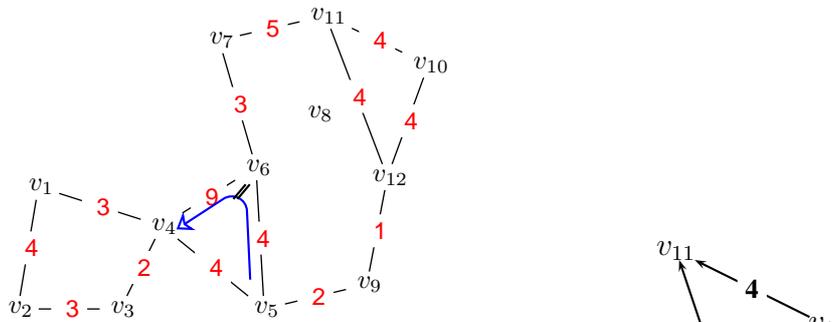


Abb. 4.5a: Beispielgraph Wachalda

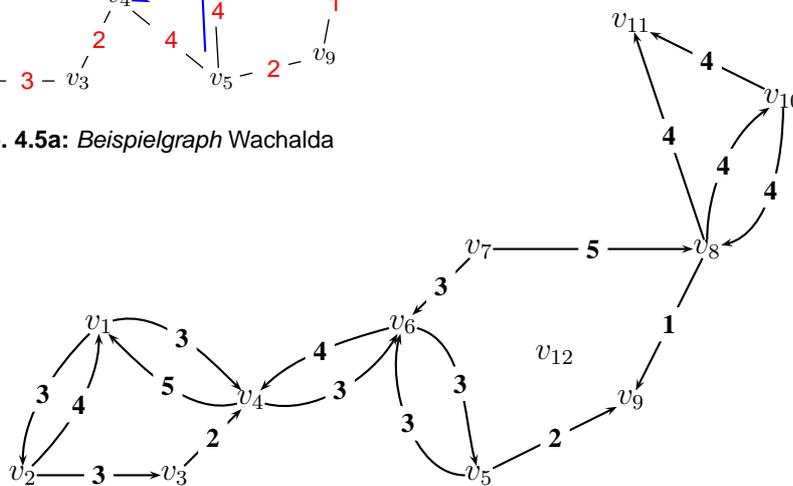


Abb. 4.5b: Wie Abbildung 4.5a, jedoch gerichtet.

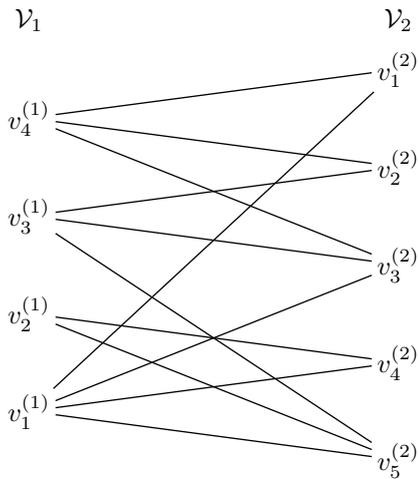
## 4.5 Graphen

### 4.5.1 Definitionen

#### Definition .29 Graph – bewertet, endlich

Ein **Graph** ist eine Menge  $G(\mathcal{V}, \mathcal{E})$  von Knoten  $\mathcal{V}$  bzw. nodes oder vertices und Kanten  $\mathcal{E}$  bzw. edges oder arcs.

Jede Kante  $e_i \in \mathcal{E}$  sei eindeutig durch ein Knotenpaar  $(v_i, v_j)$  mit  $v_i \in \mathcal{V}$  und  $v_j \in \mathcal{V}$  definiert. Ist  $e_i$  eine Kante zwischen den Knoten  $v_i$  und  $v_j$ , so heißen die beiden Knoten  $v_i$  und  $v_j$  **adjazent**



**Abb. 4.6a:** Beispiel für einen bipartiten Graphen

oder benachbart und  $e_l$  **inzident** zu  $v_i$  und  $v_j$ .

Wird jeder Kante  $e_l = (v_i, v_j)$  eine Gewichtung oder Bewertung  $k_l = k_{i,j}$  zugeordnet, so heißt der Graph bewertet.

Ein Graph mit einer endlichen Anzahl von Knoten heißt endlich.

**Definition .30 Graph – bipartit, r-partit**

Lässt sich die Knotenmenge  $\mathcal{V}$  so in zwei Teilmengen  $\mathcal{V}_1$  und  $\mathcal{V}_2$  zerlegen, dass

$$\mathcal{V}_1 \cup \mathcal{V}_2 = \mathcal{V} \quad \text{und} \quad \mathcal{V}_1 \cap \mathcal{V}_2 = \emptyset \quad (4.22)$$

und für jede Kante  $e_l \in \mathcal{E}$   $e_l = (v_i^{(1)}, v_j^{(2)})$  mit  $v_i^{(1)} \in \mathcal{V}_1$  und  $v_j^{(2)} \in \mathcal{V}_2$  gilt, so heißt der Graph bipartit. Abbildung 4.6a zeigt ein Beispiel.

Die für logistische Anwendungen, z. B. bei der Betrachtung von Distributionssystemen, hilfreiche Erweiterung auf drei und noch mehr Teilmengen  $\mathcal{V}_1, \dots, \mathcal{V}_r$ , den r-partiten Graphen, soll nur anhand der Abbildung 4.6b dargestellt werden.

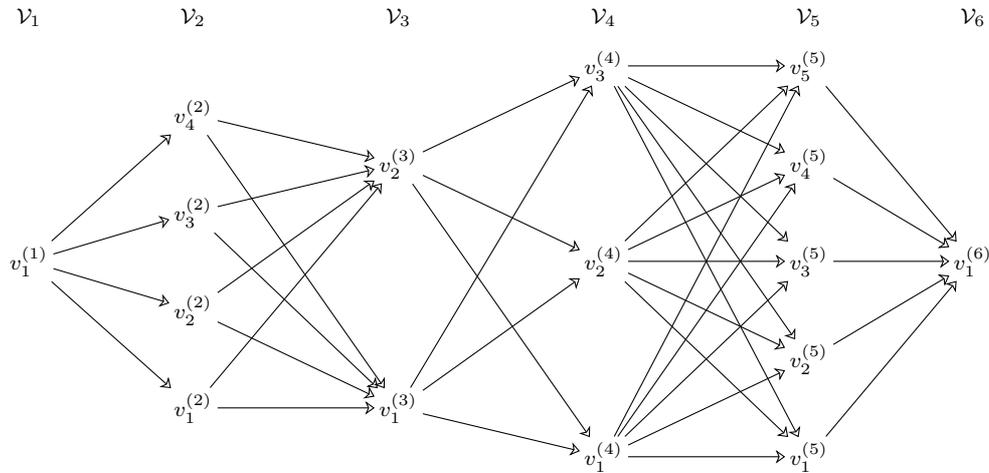
**Definition .31 Gerichtete und ungerichtete Graphen**

Gilt für alle Paare  $(v_i, v_j)$ , dass  $k_{i,j} = k_{j,i}$ , so heißt der Graph **ungerichtet**. Gilt für mindestens ein Paar  $(v_i, v_j)$   $k_{i,j} \neq k_{j,i}$  heißt der Graph **gerichtet** oder **Digraph** und die Kanten heißen **Pfeile**. Für den Pfeil  $e_l = v_i \rightarrow v_j$  heißt  $v_i$  **Vorgänger** von  $v_j$  oder  $\text{tail}(e_l)$ ,  $v_j$  **Nachfolger** von  $v_i$  oder  $\text{head}(e_l)$  und  $e_l$  **positiv inzident** mit dem Vorgänger  $v_i$  und **negativ inzident** mit dem Nachfolger  $v_j$  [NM93; GJ99].

**Definition .32 Grad von Knoten**

In einem ungerichteten Graphen ist der Grad  $g_i$  eines Knotens  $v_i$  gleich der Anzahl seiner Nachbarn.

In einem gerichteten Graphen wird zwischen positivem und negativem Grad unterschieden. Der



**Abb. 4.6b:** Beispiel für 6-partiten Graphen

positive Grad  $g_i^{(+)}$  eines Knotens  $v_i$  ist gleich der Anzahl seiner Vorgänger bzw. der positiv inzidenten Kanten.

Der negative Grad  $g_i^{(-)}$  eines Knotens  $v_i$  ist gleich der Anzahl seiner Nachfolger bzw. der negativ inzidenten Kanten [NM93].

Unter Verwendung dieser Definition lässt sich für Material-, Informations- oder Geldflussprobleme die Frage nach dem Vorzeichen einfach und eindeutig festlegen. Für Ein- und Ausgaben muss nur noch vereinbart werden, ob die Bewegungen des Geldes oder des fehlenden Geldes betrachtet werden soll.

**Definition .33 Quellen und Senken**

Ein Knoten  $v_i$  heißt

$$\text{Quelle, falls } g_i^{(+)} = 0 \text{ und } g_i^{(-)} \neq 0 \quad (4.23a)$$

$$\text{Senke, falls } g_i^{(-)} = 0 \text{ und } g_i^{(+)} \neq 0 \quad (4.23b)$$

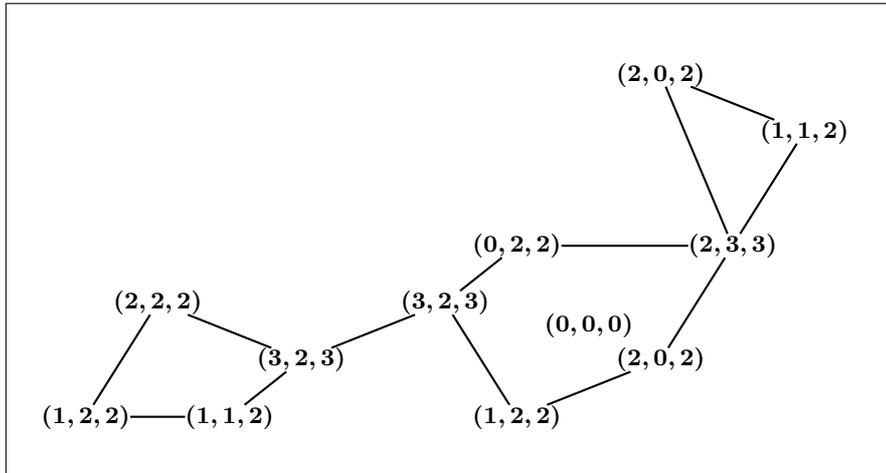
$$\text{isolierter Punkt, falls } g_i^{(+)} = g_i^{(-)} = 0. \quad (4.23c)$$

In einem ungerichteten Graphen kann es weder Quellen noch Senken, aber isolierte Punkte geben.

**Definition .34 Adjazenzmatrix**

Die Adjazenzmatrix  $\mathbf{K}$  sei definiert durch

$$K_{i,j} = \begin{cases} k_{i,j} & \text{falls } (v_i, v_j) \in \mathcal{E} \\ 0 & \text{falls } i = j \\ \infty & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.24)$$



**Abb. 4.7:** Die Grade jedes Knotens für die Graphen aus Abbildung 4.5a und 4.5b. Die Werte sind in der Form  $(g_i^{(+)}, g_i^{(-)}, g_i)$  angegeben.

[BG93]

	(a) vollständig											(b) nur Nutzdaten										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	4	∞	3	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞		4		3							
2	4	0	3	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	4		3								
3	∞	3	0	2	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	3	3	2								
4	3	∞	2	0	∞	9	∞	∞	∞	∞	∞	4	3	2		9						
5	∞	∞	∞	∞	0	4	∞	∞	2	∞	∞	5				4		2				
6	∞	∞	∞	9	4	0	3	∞	∞	∞	∞	6			9	4		3				
7	∞	∞	∞	∞	∞	3	0	5	∞	∞	∞	7					3		5			
8	∞	∞	∞	∞	∞	∞	5	0	1	4	4	8						5		1	4	4
9	∞	∞	∞	∞	2	∞	∞	1	0	∞	∞	9				2				1		
10	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	4	∞	0	4	10								4		4
11	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	4	∞	4	0	11								4		4

**Tab. 4.8:** Adjazenzmatrix zu dem in Abbildung 4.5a dargestellten Graphen.

**Definition .35 Kantenzug, Weg, Kreis**

Eine Folge  $v_1, e_1, v_2, \dots, e_{n-1}, v_n$  von Knoten und Kanten heißt *Kantenzug*. Hierbei muss die Kante  $e_i$  zu den Knoten  $v_i$  und  $v_{i+1}$  inzident sein. Ist  $v_1 = v_n$ , so heißt der Kantenzug *geschlossen*. Tritt keine Kante mehrfach auf, so heißt der Kantenzug *einfach*. Sind  $(v_i, v_j)$  paarweise verschieden, wird von einem *Weg* gesprochen. Ein geschlossener Weg, d. h.  $v_1 = v_n$ , heißt *Kreis*. Ein *Kreis* heißt *eulersch*, wenn jede Kante des Graphen in dem Kreis vorkommt. Ein Weg, der jede Kante von  $\mathcal{G}$  enthält, heißt *offene eulersche Linie*.

**Definition .36 Graph – zusammenhängend, Baum**

Anzahl Knoten $n$	Anwendung	$n^2$	Speicherbedarf		$4n$	Speicherbedarf	
6000	Stadt	$36 \times 10^6$	144 MB	17g	24000	96 kB	17g
8.000.000	BRD	$64 \times 10^{12}$	256 $\times 10^6$ GB	4352 t	$32 \times 10^6$	144 MB	17 g

**Tab. 4.9:** Speicherbedarf für Graphen unterschiedlicher Größe

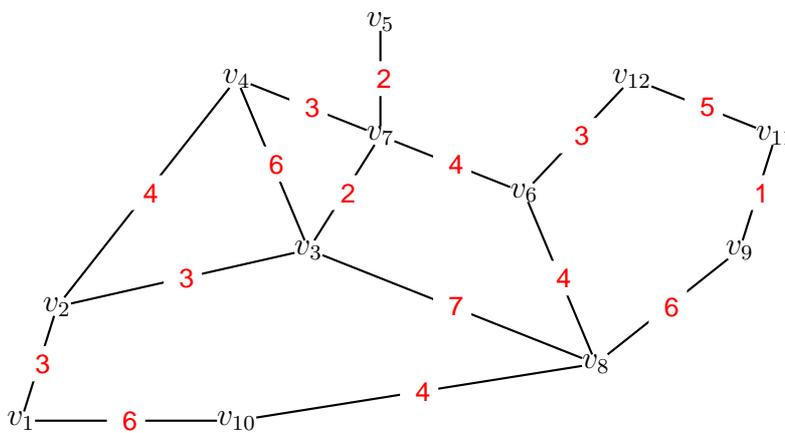
Die Gewichtsangaben geben das Gesamtgewicht benötigter DVDs an. Eine DVD wiegt 17 g und kann 4.7 GB Daten speichern.

Ein Graph heißt zusammenhängend, wenn zwischen je zwei Knoten mindestens ein Kantenzug existiert. Ein zusammenhängender Graph, der keinen Kreis enthält, heißt Baum.

Der in Abschnitt 4.3.2 gezeichnete *heap* ist ein Beispiel für einen solchen Baum, um genau zu sein, ein Beispiel für einen balancierten Binärbaum.

## 4.5.2 Speicherung von Graphen

Um mit Graphen arbeiten zu können, müssen sie dauerhaft dargestellt und gespeichert werden können. Eine Möglichkeit hierzu ist in den Abbildungen 4.4.2 bis 4.8 zu sehen, eine grafische, in der alle Kanten eingezeichnet und die Bewertungen an bzw. in die Kanten geschrieben werden. Selbst diese einfachen Beispiele zeigen, wie schnell die Grenze zur Unübersichtlichkeit überschritten wird.



**Abb. 4.8:** Beispielgraph Löwenstadt

Auch wenn eine grafische Darstellung für viele Anwendungen sehr nützlich ist, müssen die hierfür benötigten Informationen anderweitig hinterlegt werden. Hierzu eignet sich auch die **Adjazenzmatrix** aus Gleichung (4.24), wie sie exemplarisch in Tabelle 4.8(a) für den Graphen aus Abbildung 4.5a gezeigt ist. Die in dieser Tabelle dargestellte Adjazenzmatrix enthält fast keine

Informationen: Von den insgesamt  $11 \times 11 = 121$  verfügbaren Elementen sind nur 24, also ungefähr 20 %, mit Informationen belegt. 80 % des zur Verfügung stehenden Speichers enthalten nicht benötigte Daten. In einem Graphen, der einen realen Stadtplan darstellt, hat jeder Knoten kaum mehr als vier Nachbarn. Der zentrale Knoten einer Kreuzung, wie  $v_8$  in Abbildung 4.5a, hat genau vier Nachbarn. Jede Zeile der Adjazenzmatrix enthält folglich maximal vier Nutzeinträge, für  $n$  Knoten ist somit die maximale Anzahl der benötigten Daten  $4n$ , die Anzahl der reservierten Felder jedoch  $n^2$  und somit der genutzte Anteil lediglich  $\frac{4}{n}$ . Um die Konsequenzen etwas deutlicher zu machen, werden diese Zahlen in Tabelle 4.9 in die tatsächlich benötigte Menge an Speicherplatz umgerechnet. Hierbei wird vorausgesetzt, dass für die Speicherung eines Elementes 4 Byte benötigt werden. Um die Angabe von 256 Exabyte für die Bundesrepublik Deutschland etwas greifbarer zu machen, wird diese in das Gewicht der für eine Speicherung benötigten DVD's angegeben. Bei weit mehr als 4000 t wird deutlich, dass ein Navigationssystem, das Daten auf diese Art speichern würde, nicht für gewöhnliche Fahrzeuge geeignet ist.

Wie aus der Diskussion in Kapitel 3 deutlich wurde, werden nur Informationen benötigt. Wie können für die Darstellung eines Graphen Daten von Informationen getrennt werden? Sollen die nicht benötigten Daten nicht gespeichert werden, muss festgehalten werden, welche Elemente nicht benötigt werden. Alternativ können nur die Elemente gespeichert werden, die Informationen enthalten. Die Aufgabe liegt nun darin, diese zu finden. Eine einfache Realisierung hierfür ist die *forward star*-Speicherung.

#### Regel 4.1 forward star Speicherung

Zur Speicherung eines Graphen werden mindestens zwei Felder benötigt: Ein Indexfeld  $I$  und ein Adjazenzfeld  $K$ . Sollen weitere Eigenschaften von Kanten, wie Bewertungen oder Eigenschaften berücksichtigt werden, können weitere Felder - Qualitätsfelder  $Q$  - eingefügt werden.

$I_i$  ist Position des Indexes des ersten Eintrags zu Knoten  $v_i$  in den übrigen Feldern wie  $K$  und  $Q$ , d.h.  $K_{I_j}$  ist der erste Nachbar des Knotens  $v_j$ .

In dem Adjazenzfeld stehen alle Knotennummern, die als Endknoten von Kanten auftreten. Die Anzahl der Einträge ist somit gleich der Anzahl der Kanten.

Knotenindex	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13														
Indexfeld	1	3	5	7	10	12	15	17	21	23	25	27	27														
Listenindex	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7
Adjazenzliste	2	4	1	3	2	4	1	3	6	6	9	4	5	7	6	8	7	9	10	11	5	8	8	11	10	8	-1
Bewertung	4	3	4	3	3	2	3	2	9	4	2	9	4	3	3	5	5	1	4	4	2	1	4	4	4	4	-1

**Tab. 4.10:** Beispiel der forward star-Speicherung für den in Abbildung 4.5a dargestellten Graphen. Der zusätzliche Knoten  $v_{13}$  wurde eingefügt, um mögliche Schwierigkeiten am Ende der Liste zu umgehen.  
Die Anzahl der Nachbarn  $g_i$  für Knoten  $v_5$  ist gleich  $I_6 - I_5 = 12 - 10 = 2$  und die für  $v_{12}$  gleich  $I_{13} - I_{12} = 27 - 27 = 0$ .

In der Tabelle 4.10 ist für den in Abbildung 4.5a dargestellten Graphen die Adjazenzmatrix in der *forward star*-Form geschrieben. Hier ist ein zusätzlicher Knoten  $v_{13}$  eingefügt worden, der für praktische Zwecke hilfreich ist. So ergibt sich die Anzahl der Nachbarn  $g_i$  bzw. Nachfolger

$g_i^{(+)}$  zu einem Knoten  $v_i$  aus

$$g \text{ bzw. } g_i^{(+)} = I_{i+1} - I_i \tag{4.25}$$

Mit dem zusätzlichen Knoten  $v_{13}$  muss keine gesonderte Betrachtung des letzten tatsächlich vorhandenen Knotens erfolgen.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	0	3	-	-	-	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-	-	-	-
2	3	0	3	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	3	0	6	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-
4	-	4	6	0	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	0	-	2	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	0	4	4	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	2	3	2	4	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	4	0	6	4	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-
9	-	-	-	-	-	6	0	-	1	-	-	-	-	4	-	-	9	-
10	6	-	-	-	-	-	4	-	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	1	-	0	5	-	4	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	3	-	-	-	-	5	0	4	-	-	-	-	-	-
13	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	4	0	4	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	4	0	-	-	4	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	0	-	4	-	-
16	-	-	4	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	0	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	3	-	0	-	-
18	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0

**Tab. 4.11a:** Adjazenzmatrix des Graphen für Löwenstadt aus Abbildung 4.8. Grau unterlegt ist der Bereich, der von den Abbiegeregeln aus Beispiel .23 betroffen ist.

	3	4	5	6	7	7'
3	0	6	-	-	2	-
4	6	0	-	-	-	3
5	-	-	0	-	2	-
6	-	-	-	0	4	4
7	2	3	2	4	0	-
7'	2	-	-	-	-	0

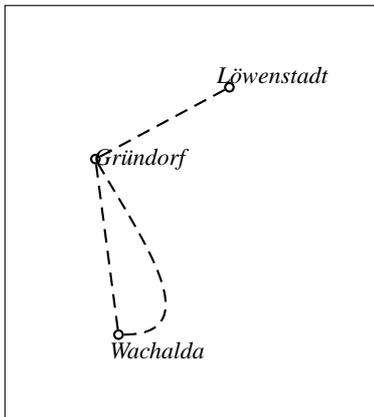
**Tab. 4.11b:** Adjazenzmatrix mit Abbiegegebot

	3	4	5	6	7	7'
3	0	6	-	-	2	-
4	6	0	-	-	-	3
5	-	-	0	-	2	-
6	-	-	-	0	4	4
7	2	3	2	4	0	-
7'	-	-	2	4	-	0

**Tab. 4.11c:** Adjazenzmatrix mit Abbiegeverbot

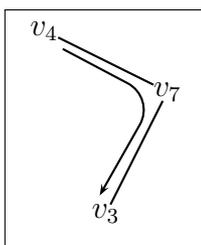
Stellen wir uns die Kanten als Straßenstücke einer Straßenkarte vor, so muss auch festgelegt und vermerkt werden, welche der vorhandenen Straßenstücke bei einer bestimmten Darstellung, wie z. B. einer gewählten Auflösung in einem Navigationssystem oder einem Atlas gezeigt werden sollen. Hierzu können die Kanten oder Straßenstücke mit einer Kategorie versehen werden. Bei Verwendung der *forward star*-Speicherung wird hierfür ein weiterer Vektor benötigt, bei einer Speicherung als Matrix eine vollständige Matrix und somit eine Verschwendung von Speicher oder 4352 t DVD's.

Bei Nutzung der *forward star*-Speicherung wird oftmals eingewendet, dass diese viel unübersichtlicher sei als die Adjazenzmatrix. Dieses stimmt für die Beispiele, die in Einführungen wie diesem Buch verwendet werden. Stellen wir uns nun eine Matrix für einen Graphen mit 6000 Knoten vor, so benötigte die Adjazenzmatrix ungefähr  $333 \times 333/2 = 55555$  DIN A5-Seiten oder  $1736 \text{ m}^2$  und würde ausgedruckt auf normalem Schreibpapier mit einem Gewicht von  $80\text{g/m}^2$  ungefähr 138 kg wiegen. Ein Graph mit 6000 Knoten beschreibt eine Stadt mit ungefähr 200000 Einwohnern, ist also einer von der kleineren Sorte. Für Rechner ist eine solche Adjazenzmatrix vollkommen ungeeignet, wie die Beispiele für den Speicherbedarf aus Tabelle 4.9 zeigen.

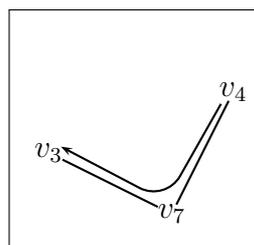


**Abb. 4.9:** Stark vereinfachter Ausschnitt einer Straßenkarte.

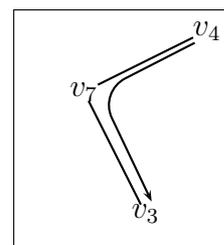
Wie kann entschieden werden, ob ein Ort innerhalb oder außerhalb des gezeigten Gebietes liegt? Wie kann bestimmt werden, ob die Verbindung zwischen zwei Punkten ganz oder teilweise innerhalb verläuft?



(a) Variante I



(b) Variante II

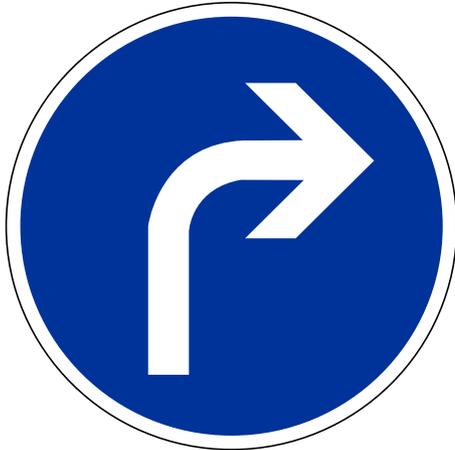


(c) Variante III

**Abb. 4.10:** Ausschnitt aus Löwenstadt – Rechts- oder Linkskurven?

## 4.6 Graphen und Landkarten

### 4.6.1 Was sind Karten?



**Definition .37 Abbiegevorschriften**  
Diese werden in folgender Form angegeben:

- **Abbiegegebot**  
Von einem Knoten  $v_s$  kommend, muss bei  $v_z$  nach  $v_t$  gefahren werden.
- **Abbiegeverbot**  
Von einem Knoten  $v_s$  kommend, darf bei  $v_z$  nicht nach  $v_t$  gefahren werden.

**Abb. 4.11:** Abbiegegebot

Auch wenn Graphen, wie bisher beschrieben, bereits eine Vielzahl von Eigenschaften aufweisen, reichen diese für logistische Anwendungen, bei denen wir reale Umgebungen, wie Straßennetze, Werkgelände oder Hallen nicht nur beschreiben, sondern uns auch in diesen bewegen wollen, nicht aus. Aus der Adjazenzmatrix kann abgeleitet werden, ob zwei Punkte über einen Kantenzug miteinander verbunden sind. Ist nachgewiesen worden, dass ein Graph zusammenhängend ist, so kann die Frage nach der Erreichbarkeit eines Punktes von einem anderen sofort mit ja beantwortet werden. Sind die Bewertungen als Längen oder Zeiten gegeben, kann die Länge eines Weges zwischen zwei Punkten bestimmt werden, nicht aber, in welche Himmelsrichtung die Verbindungslinie zeigt. Ein massstabsgerechtes Zeichnen ist unmöglich. Sind Kantenbewertungen Fahrzeiten und nicht Längen, müssten die Kanten für Straßen, die mit hoher Geschwindigkeit befahren werden können, wesentlich kürzer werden als die, auf denen nur geringe Geschwindigkeiten zugelassen sind. Für eine Stadt, wie z. B. Köln, die von einem Autobahnring umgeben ist, ergibt dieses einen sehr kleinen Ring und eine riesige Fußgängerzone, eine für Menschen ungewohnte und kaum verstehbare Ansicht.

Ebenso muss entschieden werden können, ob sich ein Punkt oder Fahrzeug innerhalb oder außerhalb eines Gebietes befindet oder ob eine Verbindungslinie zwischen zwei Punkten vollständig in einem Gebiet liegt oder ein anderes berührt. Hierfür sind Gebietsgrenzen, Stadt-, Werk- oder Hallengrenzen, wie in Abbildung 4.9 anhand einer stark vereinfachten Deutschlandkarte gezeigt, notwendig. Die Angabe von Koordinaten, sei es in der Form  $x, y, z$  oder  $\vartheta, \phi, h$  ist ebenso unverzichtbar wie Polygonzüge zum Beschreiben von Gebieten. Die Beantwortung von Fragen, wie „Liegt ein Kantenzug in einem gegebenen Gebiet?“, soll hier nicht besprochen werden. Allein die Beantwortung der Frage, ob ein Punkt, wie in Abbildung 4.9 angedeutet, innerhalb eines Gebietes liegt, ist nicht trivial. Mag es für einfache geometrische Figuren, wie Rechtecke oder Kreise, mit wenigen Gleichungen oder Regeln machbar sein, verlangen reale, beliebige krummlinig begrenzte Gebiete aufwendige mathematische Verfahren. Werden andererseits derartige Fragestellungen jedoch außer Acht, kann es möglich sein, dass eine Route geplant wird, die

Variante	$\vec{r}_3$	$\vec{r}_4$	$\vec{r}_7$	$\vec{r}_{4,7}$	$\vec{r}_{7,3}$	$\vec{r}_{4,7} \times \vec{r}_{7,3}$	Kurve
I	(1, 0, 0)	(0, 3, 0)	(2, 2, 0)	(2, -1, 0)	(-1, -2, 0)	(0, 0, -6)	rechts
II	(3, 0, 0)	(4, 3, 0)	(2, 2, 0)	(-2, -1, 0)	(1, -2, 0)	(0, 0, 6)	links
III	(0, -1, 0)	(3, 0, 0)	(2, -2, 0)	(-1, -2, 0)	(-2, 1, 0)	(0, 0, -6)	rechts

**Tab. 4.12:** Untersuchung, ob es sich bei den Anordnungen in den Abbildungen 4.10 um Rechts- oder Linkskurven handelt.

viel zu lang ist, weil Straßen, die für die kürzeste erforderlich wären, nicht zu dem verfügbaren Kartenausschnitt gehören, weil dieser nach Landesgrenzen oder Postleitzahlengebieten definiert bzw. gekauft wurde.

Stattdessen soll auf Funktionalitäten verwiesen werden, die z. B. mit `ORACLE spatial` zur Verfügung gestellt werden.

Ein weiteres Defizit bei dem bisher Besprochenen ist darin zu sehen, dass den Knoten keine Bewertungen zugeordnet werden. Stellen wir uns vor, dass ein Knoten für einen Kunden steht, so kann mit diesem Knoten eine Warte- und Bedienzeit verbunden sein. Dieses lässt sich lösen, indem eine weitere Kante eingefügt wird. Für Optimierungsprobleme ist es auch möglich, den Knoten die erforderlichen Bewertungen direkt zuzuordnen. Hierdurch kann vermieden werden, dass die Graphen noch größer werden und bei Ändern von Knoteneigenschaften ist es nicht notwendig, die Nachbarschaftseigenschaften zu modifizieren.

## 4.6.2 Abbiegevorschriften

Ebenso wurden bisher Verkehrsregeln, wie das durch Abbildung 4.11 dargestellte Abbiegegebot, keinerlei Rechnung getragen. Auch kann nicht entschieden werden, ob eine Kurve eine Rechts- oder eine Linkskurve ist. Durch das Einfügen zusätzlicher Knoten lassen sich Abbiegegebote oder -verbote darstellen, für die Angabe, ob es sich um Rechts- oder Linkskurven handelt, werden Koordinaten benötigt. Betrachten wir zunächst Abbiegeregeln und hierzu den Stadtplan von Löwenstadt aus Abbildung 4.8. Der Graph ist ungerichtet, d. h. alle Straßen sind in beide Richtungen befahrbar.

Die jetzt benötigten Regeln beziehen sich auf Kantenpaare bzw. Knotentripel, alles bisher Gesagte hingegen auf Kanten bzw. Knotenpaare. Wie durch das Einfügen eines zusätzlichen Knotens die geforderten Regeln dargestellt werden können, ohne die Konzepte des letzten Abschnittes erweitern zu müssen, wird an dem folgenden Beispiel erläutert.

### Beispiel .23 Abbiegeregeln für den Graph von Löwenstadt, vgl. Abbildung 4.8

- **Abbiegegebot**  
Von dem Knoten  $v_4$  kommend, muss bei  $v_7$  nach  $v_3$  gefahren werden.
- **Abbiegeverbot**  
Von dem Knoten  $v_4$  kommend, darf bei  $v_7$  nicht nach  $v_3$  gefahren werden.

Wie in den Regeln 4.2 und 4.3 beschrieben, wird ein neuer Knoten  $v_7'$  eingefügt und die Adjazenzmatrix modifiziert. In Tabelle 4.11a ist der Bereich grau unterlegt, der hiervon betroffen ist und in den Tabellen 4.11b und 4.11c sind die modifizierten Ausschnitte der Adjazenzmatrix zu

sehen. Im Falle des Abbiegegebots wird die Verbindung  $v_4 \rightarrow v_7$  gestrichen und  $v_4 \rightarrow v'_7$  und  $v'_7 \rightarrow v_3$  ergänzt. Durch die nun fehlende Verbindung von  $v_4$  nach  $v_7$  kann von  $v_4$  aus kommend kein Knoten erreicht werden, der zu  $v_7$  benachbart ist,  $v_3$  wird über  $v'_7$  erreicht, das gewünschte Ergebnis. Das Abbiegeverbot ist in 4.11c durch zwei Abbiegegebote nach  $v_5$  und  $v_6$  erreicht worden. Sollten für den Knoten  $v_7$  weitere Vorschriften gegeben sein, so wären weitere Knoten einzufügen.

**Regel 4.2 Abbiegebot  $v_s \rightarrow v_z \rightarrow v_t$**

- Füge Knoten  $v'_z$  ein
- Streiche die Verbindung  $v_s \rightarrow v_z$
- Ergänze Verbindungen  $v_s \rightarrow v'_z$  und  $v'_z \rightarrow v_t$

**Regel 4.3 Abbiegeverbot  $v_s \rightarrow v_z \rightarrow v_t$**   
 Füge Abbiegegebote für alle Vorgänger von  $v_z$  außer für  $v_s$  zu allen Nachfolgern von  $v_z$  ein.

Auf einem Verkehrsschild wie in Abbildung 4.11 ist das Gebot nicht in der oben genannten Art gezeigt, sondern durch einen Pfeil, der, wie in diesem Fall, vorschreibt, dass nach rechts abgelenkt werden muss. Es ist somit noch festzustellen, ob es sich bei einem Tripel  $v_s \rightarrow v_z \rightarrow v_t$ , hier  $v_4 \rightarrow v_7 \rightarrow v_3$  um eine Rechts- oder Linkskurve handelt. Hierfür werden die Koordinaten der Punkte benötigt, Nachbarschaftsbeziehungen sagen hierüber nichts aus. Seien die Knoten  $v_i$  durch die Punkte  $P_i$  mit den Ortsvektoren  $\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$  beschrieben, können die Richtungsvektoren  $\vec{r}_{s,z} = \vec{r}_z - \vec{r}_s$  und  $\vec{r}_{z,t} = \vec{r}_t - \vec{r}_z$  zwischen den Punkten  $P_s, P_z$  und  $P_t$  berechnet werden. Anhand des Kreuzproduktes  $\vec{R}$

$$\vec{R} = \vec{r}_{s,z} \times \vec{r}_{z,t} \quad (4.26)$$

kann die Frage nach Rechts- oder Linkskurve, wie in Tabelle 4.12 gezeigt, entschieden werden. Bei positiver z-Komponente  $R_z$  handelt es sich um eine Links-, ansonsten um eine Rechtskurve. Werden die Richtungsvektoren normiert, lässt sich aus dem Betrag der z-Komponente auch noch ablesen, wie scharf eine Kurve ist.

Durch die Verbindung gewöhnlicher Graphen mit Koordinaten und zusätzlichen Attributen, wie Art der Straße und Verkehrsregeln, stehen alle erforderlichen Werkzeuge zur Verfügung, um Straßenkarten elektronisch speichern und alle erforderlichen Operationen, wie Abstandsberechnungen, grafische Darstellungen oder Navigation, durchführen zu können.



#### Common Excuses for Not Implementing Lean

- Our customer requirements are too complicated to utilize the Toyota Production System - that works only for automotive.
- We have too many unique requirements throughout our processes to use lean.
- None of our products are the same.
- We have over 6,000 variations in our product line.

Dan Tapping et al., Value stream management

# 5

## Abstand und Ähnlichkeit von Objekten

### 5.1 Gleichheit von Objekten

#### 5.1.1 Was heißt gleich?

Bisher wurde fast ausschließlich über Eigenschaften einzelner Objekte gesprochen, Probleme der Logistik weisen aber eine Verknüpfung vieler Teilprobleme auf, deren Lösungen, wie in Definition .1 gefordert, zu richtigen Ergebnissen führen müssen. Ohne einen Vergleich mehrerer Alternativen ist eine Frage nach besser oder gar richtig sinnlos.

Im Zusammenhang mit Produktionsverbesserungen wird oftmals verlangt, den Gleichteileanteil zu erhöhen. Was bedeutet dieses für die Logistik? Der Glauben an die Einzigartigkeit oder Andersartigkeit der eigenen Probleme dient oftmals als Rechtfertigung vieler Neuentwicklungen. Was ist aber ein *unique requirement* und was nicht?

- Wann ist die von einem Disponenten geplante Route gleich der vom Fahrer gefahrenen? Wenn jedes einzelne vorgegebene Straßenstück angefahren wurde oder wenn die Ankunftszeiten bei jedem einzelnen Kunden eingehalten wurden? In ersten Fall müssen zwei Routen miteinander verglichen, in dem anderen *nur* zwei Zeitangaben.
- *Nur* zwei Zeitangaben? Wann ist die Ankunftszeit gleich der geplanten? Wenn München um 20:00Uhr erreicht werden soll, ist dann 19:59Uhr richtig oder muss es exakt 20:00Uhr sein?
- Wann sind zwei Namen gleich? *Siegfried Jetzke* und *Siegfrid Jetzke* sind sicher nicht gleich, aber auch nur etwas ungleich und wahrscheinlich stehen sie für ein und dieselbe Person.
- Sind zwei Verbindungen zwischen zwei Punkten, mit exakt gleicher Länge, gleich? Sind zwei Verbindungen zwischen zwei Punkten, für die unterschiedliche Längen ermittelt wurden, zwangsläufig ungleich?

- Wann sind zwei Prozesse gleich? Dann, wenn alle Prozessschritte identisch sind und identische Meldungen generiert werden? Oder reicht die Identität der Ergebnisse?
- Wann sind Anforderungen gleich?

Viele dieser Fragen wurden in der Vergangenheit aus dem Bauch heraus entschieden, aus verschiedenen Bäumen heraus. Die Konsequenzen waren Unstimmigkeiten und der Bedarf für viele klärende Gespräche. Oftmals wurden sie auch nicht entschieden. Die Folge waren ständig einzigartige Anforderungen und die Notwendigkeit für immer wieder neue – *einzigartige* – Lösungen. Das Problem der Gleichheit von Zahlen auf einem Rechner wurden schon im Zusammenhang mit der Zahldarstellung aufgegriffen, Probleme, die aus unklaren Definitionen hervorgehen, sind viel häufiger zu beobachten. Um die Diskussion anwendbarer werden zu lassen soll die Frage nach Gleichheit zweier Objekte mit denen nach Ähnlichkeit und dem **Abstand** zweier Objekte verbunden werden.

### 5.1.2 Gleichheit in verschiedenen Anwendungsgebieten

Eine im täglichen Leben und in der Logistik oftmals zu beantwortende Frage ist die nach Pünktlichkeit, d. h. Gleichheit von vereinbartem und tatsächlichem Zeitpunkt und ist bereits im Zusammenhang mit Kennzahlen auf S. 77 diskutiert worden. Auch der Vergleich von Geldbeträgen ist nicht frei von Problemen und bei der Betrachtung von Rechenungenauigkeiten in Exkurs 4.1 bereits besprochen worden. Dieses soll anhand des folgenden Beispiels konkretisiert werden.

#### **Beispiel .24 Fehlende Geldbeträge**

*Nehmen Sie eine Lieferung mit zwei Positionen beliebiger Produkte, von denen jedes 120.46 € zuzüglich 19% Mehrwertsteuer kostet. Zusammen macht dieses 240.92 € zuzüglich einer Mehrwertsteuer von 45.7748 € und somit gerundet insgesamt 286.69 €. Aus irgendwelchen Gründen werden beide Positionen getrennt geliefert und auch getrennt in Rechnung gestellt. Es sind also zweimal 120.46 € zuzüglich Mehrwertsteuer zu zahlen. Dieses macht zweimal, wieder gerundet, 120.46 € zuzüglich 19% oder 22.8874 €, also zusammen zweimal 143.35 € und insgesamt 286.70 €. Es entsteht eine Differenz von 1 Cent verglichen mit der ersten Rechnung.*

Hier mag sich einer freuen, dafür wird sich der andere ärgern. Wie soll nun aber ein Buchhaltungsprogramm reagieren, das einen Zahlungseingang von 286.69 € erwartet und 286.70 € erhält? Schickt es eine Mahnung, weil nicht der exakt erwartete Betrag eingegangen ist, d. h. erwarteter und tatsächlicher Betrag nicht gleich sind? Oder schickt es nur eine Mahnung, wenn Zahlungseingänge niedriger als erwartete sind? Wie reagiert dann dieses Programm, wenn die Situation verdreht wird? Es werden zwei Lieferungen mit zwei Rechnungen versandt und die Zahlungen werden zu einer zusammengefasst. Wieder kommt es zu der Differenz von 1 Cent.

Dieses Problem lässt sich durch die Vorgabe von Rechenregeln vermeiden. Anders geartet ist das Problem beim Vergleich von Lieferungen eines Textilserviceunternehmens, wie ebenfalls im Zusammenhang mit der Diskussion von Kennzahlen auf Seite 72 bereits angesprochen. Dieses holt schmutzige Wäsche aus Krankenhäusern, Hotels und Restaurants und bringt sie sauber zurück.

#### **Beispiel .25 Gewicht von Wäsche**

*Da das Zählen von Einzelstücken zu aufwendig und fehleranfällig ist, wird der Preis für die gewaschene Wäsche nach Gewicht berechnet. Nun lässt sich nach dem Waschen und Trocknen nicht vermeiden, dass eine gewisse Restfeuchte in den Textilien verbleibt. Diese ist zum Zeitpunkt des Auslieferens im Betrieb anders als beim Eintreffen beim Kunden. Kann das auf der Rechnung*

angegebene Gewicht mit einem vom Kunden ermittelten verglichen werden? Können unterschiedliche Wiegeergebnisse auf ein falsches Wiegen schließen lassen? Da schlechtes Trocknen für den waschenden Betrieb einen doppelten Vorteil bringt, er spart beim Trocknen und gewinnt beim Wiegen, ist eine Kontrolle sinnvoll aber gleichzeitig schwierig.

Sind beim Wiegen von Objekten zumindest die Größen bekannt, die miteinander verglichen werden können, so ist die Frage nach der Gleichheit von Zeichenketten qualitativ völlig anders. Wir wollen uns hier auf Zeichenketten beschränken, die einen Namen für ein reales Objekt, wie z. B. Namen, Adressen oder Identifikationsnummern, darstellen. Stehen

- Carl-von-Ossietzky-Straße 3, 06567 Wachalda
- Karl-von-Ossietzki-Str. 3, 6567 Wachalda
- Karl v. Ossietzki Str. 3, 06567 Wachalda
- Karl v. Ossietzki Strasse 3, 06567 Wachalda

für vier gleiche Adressen? Mag bei *Carl-von-Ossietzky* noch vielen Menschen klar sein, dass es beim Schreiben Schwierigkeiten geben könnte und deshalb eine gewisse Vorsicht an den Tag gelegt wird, gibt es andere absolut unproblematisch erscheinende Fälle, wie eine *Gebrüder-Grimm-Straße*, die in manchen Orten auch *Brüder-Grimm-Straße* heißt. Bei Navigationssystemen, die nach dem Eingeben des ersten Buchstabens die Straßennamen auswählen, die mit diesem beginnen, werden in der *falschen* Stadt *richtige* Straßennamen nicht eingeblendet. Es mag eingewendet werden, dass diese Beispiele praxisfern sind, da diese Straßennamen selten oder auch besonders schwierig sind. Aber auch bei der Frage, wie der Kanzler der Bundesrepublik Deutschland Anfang der siebziger Jahre hieß, zeigten Befragungen von Studierenden unterschiedliche Schreibweisen:

- |                 |                |               |
|-----------------|----------------|---------------|
| • Willi Brandt, | • Willy Brand, | • Wili Brant. |
| • Willy Brandt, | • Willy Brannt |               |
| • Willi Brand,  | und            |               |

Konsequenzen werden deutlich beim Betrachten möglicher Datenbankabfragen, mit denen die zuerst genannten Straßennamen gesucht werden können, wie sie in Tabelle 5.1 nachzulesen sind. Natürlich ist das Verwenden von *wild cards* möglich, aber selbst die letzte Abfrage führt noch nicht zu dem richtigen Ergebnis.

```
select StrName from Strasse where StrName='Karl-von%';
select StrName from Strasse where StrName='Carl v. Ossi%';
select StrName from Strasse where StrName='Karl%';
```

**Tab. 5.1:** Datenbankabfragen zum Suchen eines Straßennamens in der Tabelle *Strasse*

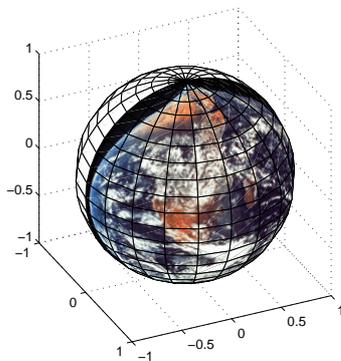
Eine weitere Reduzierung der eingegebenen Buchstaben erhöht die Anzahl der gefundenen Namen, aus denen dann wiederum ausgewählt werden muss und senkt somit die Qualität des Ergebnisses.

Nun gibt es mittlerweile neben den hier verwendeten *SQL*-Abfragen auch Möglichkeiten eines phonetischen Vergleichs. Bei diesen würde es keine Rolle spielen, ob *Carl* oder *Karl* geschrieben worden wäre. Folgend sind mehrere phonetisch gleich klingende Formen des Namens des Autors angegeben, deren Schreibweisen aber nur geringe Ähnlichkeiten aufweisen und bei einer Datenbankabfrage keine Übereinstimmungen liefern würden.

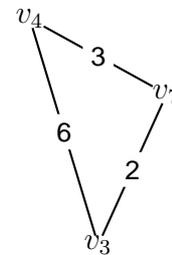


über die A7? Wie verhält es sich, wenn einmal direkt gefahren und das andere Mal eine Tankstelle an der Autobahn angefahren wird oder aber ein Autohof unmittelbar neben der Autobahn? Sind Streckenführungen dann gleich, wenn die zugehörigen Kantenzüge gleich sind? Wenn ein Fahrzeug überwacht werden soll, bei dem die Gefahr eines Diebstahls besteht, muss genau diese Frage beantwortet werden: Befindet sich das Fahrzeug auf der vorgegebenen Strecke oder auf Abwegen?

Mögen die bisherigen Beispiele manchem eher unwichtig erscheinen, so ist die Frage nach Gleichheit von oder in Prozessen eine, die in der Logistik eine große Rolle spielen sollte, dieses aber vielleicht noch nicht immer der Fall ist, wie dem Zitat zu Beginn dieses Kapitels entnommen werden kann. Eine Beantwortung hier kann nach ähnlichen Prinzipien erfolgen, wie im Beispiel der Streckenführungen, eine entsprechende Darstellung der Prozesse vorausgesetzt. Es müssen nicht alle Elemente des Repositoriums aus Kapitel 2.1 realisiert werden, aber ein Vorgehen ohne Verständigung auf eine gemeinsame Sprache ist zum Scheitern verurteilt. Transport und Beförderung sind Synonyme für ein- und den selben Prozess, manchmal wird es auch Sendung oder Lieferung genannt.



**Abb. 5.1:** Unsere Erde [Mat05]



**Abb. 5.2:** Verletzung der Dreiecksungleichung in dem Straßennetz aus Abbildung 5.2

Als ein Beispiel sollen noch einmal die Fragensätze aus Abschnitt 3.1.3, mit denen herausgefunden werden soll, welche Zahl gewürfelt wurde, betrachtet werden. Beide liefern als Ergebnis die richtige Zahl, sie sind aber sicher nicht gleich. Sind zwei mögliche Fragensätze gleich, die vollkommen unterschiedlich erscheinen? So ist die Möglichkeit, bei der als erstes gefragt wird, ob die Zahl gerade ist, gleichzusetzen mit der, ob die Zahl kleiner als vier ist. Auch wenn der Wortlaut unterschiedlich ist, wird in beiden Fällen das Gleiche gemacht: Die Anzahl der Möglichkeiten wird halbiert. Auch die sich nachfolgend ergebenden Fragen liefern das selbe Ergebnis in der selben Anzahl von Schritten, dennoch sind sie sicher nicht gleich. Eine Erweiterung der Betrachtung von gleich auf isomorph könnte für die Logistik noch weitere Potenziale erschließen. Übertragen auf Prozesse bedeutet dies, dass es durchaus vergleichbare Prozesse gleicher Qualität geben kann, die aber in der konkreten Ausprägung unterschiedlich sind. Ohne Verständigung auf eine Sprache und ein Vorgehen führen gleiche Anforderungen zu grundverschiedenen Prozessen, verbunden mit zusätzlichem Planungsaufwand und unterschiedlichen Steuerungskon-

zepten. Eine Wiederverwendbarkeit von Prozessschritten ist unmöglich, einen Gleichteileanteil gibt es nicht. Eine Änderung dieser Situation würde viele Arbeitsplätze vernichten, unzählige Besprechungen überflüssig machen, *powerpoint*-Präsentation entbehrlich und Dienstreisen zu reinen Vergnügungstreisen werden lassen. Ist das Suchen von Gleichteilen wirklich gewünscht, oder werden Unterschiede hervorgehoben, um ständig etwas Neues machen zu können? Gleichheit von Prozessen oder Prozessschritten würde auch eine Vergleichbarkeit ermöglichen, Unterschiede könnten deutlich gemacht und erkannt werden. Eine Auswirkung, die in letzter Konsequenz nicht immer gewünscht ist. Da die Beurteilung laufender Prozesse sehr schwierig ist, muss bei der Planung von Prozessen darauf geachtet werden, dass ein hoher Gleichteileanteil entsteht. Gibt es feste Regeln, nach denen Prozesse gestaltet werden, dann liegen die Ergebnisse fest. Die Verwendung eines **Prozessgenerators** sorgt dafür, dass bekannte und damit vergleichbare Elemente und Teilprozesse mitsamt definierter Verknüpfungen vorkommen. Da bisher keine systematische Methodik für die Bestimmung der Ähnlichkeit von Prozessen verfügbar ist, mag diese Lösung unbefriedigend erscheinen. Sie hat aber neben der Eigenschaft, dass sie vergleichbare Prozesse erzeugt den entscheidenden Vorteil, dass sie sehr effizient ist.

## 5.2 Abstände von Objekten

### 5.2.1 Was sind Abstände?

Nachdem deutlich wurde, wie schwierig es sein kann, die Gleichheit von Objekten zu definieren und dann die von existierenden auch noch zu finden, sollen Abstände von Objekten betrachtet werden. Ist der Abstand zwischen zwei Objekten Null, sind diese sicherlich als gleich anzusehen. Da dieses selten eintritt, ist es für praktische Anwendungen hilfreich, von **Ähnlichkeiten** zwischen zwei Objekten zu sprechen. Für das Bestimmen von Abständen, Gleichheit und Ähnlichkeit müssen Verfahren eingesetzt werden, die quantitativ fassbare Ergebnisse liefern: Es wird ein Maß  $d(x_1, x_2)$  benötigt, das den Abstand zwischen zwei Objekten  $x_1$  und  $x_2$  beschreibt, und mit dessen Hilfe gesagt werden kann, ob ein Objekt  $x_1$  ähnlicher zu einem Objekt  $x_2$  ist als ein anderes, nennen wir es  $x_3$ . Dieses Maß ist abhängig von den Objekten und nicht von Ergebnissen, die ein Objekt erzielen kann. Da der mathematische Abstandsbegriff Eigenschaften des Raumes benötigt, in denen sich diese Objekte befinden, soll hier eine phänomenologische Definition benutzt werden.

#### **Definition .38 Abstand**

*Der Abstand  $d(x_1, x_2)$  zwischen zwei Punkten bzw. Objekten  $x_1$  und  $x_2$  ist ein Maß für den minimalen Aufwand, der erbracht werden muss, um von dem einen Objekt zu dem anderen zu gelangen.*

Für diesen Abstand sollen die in den Gleichungen (5.1a) bis (5.1d) gegebenen Eigenschaften gelten:

$$d(x_1, x_1) = 0 \quad (5.1a) \quad d(x_1, x_2) = d(x_2, x_1) \quad (5.1c)$$

$$d(x_1, x_2) \geq 0 \quad (5.1b) \quad d(x_1, x_2) \leq d(x_1, x_3) + d(x_3, x_2) \quad (5.1d)$$

Die auch unter dem Namen Dreiecksungleichung bekannte Forderung (5.1d) soll für unsere Zwecke nicht gelten müssen, wie an dem Beispiel in Abbildung 5.2 deutlich wird. In dem Ausschnitt

des bereits bekannten Stadtplans von Löwenstadt seien die angegebenen Bewertungen jetzt Fahrzeiten für die Verbindungen zwischen den Knoten. Die Verbindung  $v_3 \rightarrow v_4$  sei eine Straße in einem Wohngebiet, auf der mit geringerer Geschwindigkeit als auf  $v_3 \rightarrow v_7$  und  $v_7 \rightarrow v_4$  gefahren werden kann, und es gilt

$$d(v_3, v_4) = 6 > 5 = d(v_3, v_7) + d(v_7, v_4) \quad (5.2)$$

und somit eine Verletzung der Ungleichung (5.1d). Auch die Bedingung (5.1c) gilt nicht, wenn ein Problem betrachtet wird, das durch einen gerichteten Graphen beschrieben wird. Diese Einschränkungen müssen nicht zu nennenswerten Schwierigkeiten führen, wenn sie bekannt sind. Ähnlich wie bei der Fahrplanarithmetik in Kapitel 4.2.4 müssen wir uns nur von dem vertrauten Gedanken lösen, dass die Reihenfolge bei vielen Rechenoperationen keine Rolle spielt.

## 5.2.2 Abstandsmessungen

### Messen mit Lineal oder Zollstock

Wenn schon das Berechnen von Abständen Schwierigkeiten bereiten kann, ist dann wenigstens das Messen einfach? Stellen wir uns einen ganz gewöhnlichen einfachen Schwamm vor, wie er zum Reinigen von Tafeln oder Autos benutzt werden kann. Nun versuchen wir herauszufinden, wie groß dessen Volumen ist. Der Einfachheit halber sei angenommen, dass die Kanten dieses Schwammes rechtwinklig sind. Nun könnten wir mit einem Lineal die Seitenlängen messen und dann die drei Ergebnisse multiplizieren. Ergibt dieses das Volumen? Sicher nicht! Wir könnten versuchen mit den Messergebnissen die Oberfläche zu bestimmen. Auch das scheitert. Bei all den vielen kleinen und großen Löchern, die wir bereits mit bloßem Auge erkennen, ist die tatsächliche Oberfläche sicher größer als die berechnete, das wahre Volumen hingegen mit Sicherheit kleiner als das durch Messen mit einem Lineal bestimmte. Abgesehen von dem Problem des Messens wird hier ein anderes Phänomen sichtbar: Es wird ein Volumen bestimmt, das größer ist als das tatsächliche. Gleichzeitig liefert das gleiche Verfahren und die gleiche Messung eine Oberfläche, die kleiner ist als die tatsächliche. Ist hier das Verfahren falsch oder unsere Annahme über den Zusammenhang zwischen Oberfläche und Volumen, der als Grundlage für die Berechnung von Flächen und Volumina aus gemessenen Werten herangezogen wird. Die üblichen Annahmen der Geometrie besagen, dass bei gleicher Form eine Vergrößerung der Oberfläche auch zu einer Zunahme des Volumens führt. Sind  $a, b, c$  die gemessenen Kantenlängen, so gilt für das Volumen  $V_{\text{Schwamm}}$  des Schwammes:

$$V_{\text{Schwamm}} \neq a \times b \times c \quad (5.3)$$

Kann das Ergebnis durch Nutzung eines anderen Lineals, eines, mit dem auch die Hohlräume erfasst werden können, verbessert werden? Die Längen der Seiten würden größer, gleichzeitig das Volumen kleiner. Dieser merkwürdig erscheinende Effekt ist eine charakteristische Eigenschaft von Gegenständen, die mittels fraktaler Geometrie beschrieben werden können [z. B. GS89].

Auch wenn viele der Eigenschaften, wie Selbstähnlichkeit auf logistische Fragen übertragbar sind, soll hier nur folgendes deutlich gemacht werden:

**Weisheit 5.1** *Das Ergebnis einer Messung hängt von dem Instrument ab, mit dem gemessen wird.*

Natürlich gibt es immer noch eine Vielzahl von Anwendungen, in denen Lineale, Maßbänder, Mikrometerschrauben durchaus brauchbare Resultate liefern. Da diese aber nur für kleine Räume nutzbar sind und hinlänglich bekannt sein sollten, wird hier nicht weiter auf sie eingegangen.

### Laufzeitmessungen

Eine der wichtigsten alternativen Methoden, um Abstände zu bestimmen, sind Laufzeitmessungen. So können Schiffe mittels Echolot feststellen, wie viel Wasser sich unter ihrem Kiel befindet. Heutzutage werden Laufzeitmessungen auch bei der Positionsbestimmung mittels des *global positioning system (GPS)* angewandt. Ist  $\Delta t$  die gemessene Laufzeit eines Signals, das sich mit der Geschwindigkeit  $v$  zwischen zwei Punkten  $P_1$  und  $P_2$  ausbreitet, so gilt für den Abstand  $d_{1,2}$ :

$$d_{1,2} = v \cdot \Delta t \quad (5.4)$$

Für *GPS* ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  gleich der Lichtgeschwindigkeit  $c$ , d. h.  $v = c \approx 300000$  km/s. Bei Abständen der Satelliten von der Erde von ungefähr 20000 km ergeben sich Laufzeiten  $\Delta t$  von ungefähr 0.07 s. Wird die Laufzeit um 1/10 s falsch bestimmt, ist der berechnete Abstand um 30000 km falsch. Um eine Genauigkeit von 30 m zu erzielen, muss  $\Delta t$  auf  $10^{-7}$  s genau bestimmt werden können. Dieses lässt sich nicht mit einer Uhr realisieren, die im Navigationsgerät eines Autos eingebaut ist. Sollen Abstände in Werkhallen mit Signalen bestimmt werden, so betragen bei Abständen von beispielsweise 300 m die Laufzeiten  $10^{-6}$  s. Wird statt elektromagnetischer Strahlung Schall bzw. Ultraschall, wie beim Echolot, mit  $v \approx 300$  m/s eingesetzt, sind die Laufzeiten wesentlich länger und die geforderten Genauigkeiten an die Zeitmessung wesentlich geringer. Sollen solche Laufzeitmessungen zur Positionsbestimmung, z. B. mittels **Trilateration**, von Objekten genutzt werden, müssen die Anforderungen genau definiert werden, um ein geeignetes System auswählen zu können.

Gelangen Signale nicht auf dem direkten Weg zum Empfänger, weil sie reflektiert werden oder ihre Ausbreitung nicht geradlinig ist, muss die Formel (5.4) korrigiert werden. Für *GPS* ist das immer der Fall, da sich das Licht aufgrund relativistischer Effekte und wegen der Beugung an der Erdatmosphäre nicht geradlinig ausbreitet. Hinzu kommt, dass die Uhren in den Satelliten wegen der geringeren Gravitationskraft, die in dem Abstand herrscht, langsamer laufen als auf der Erde. Diese Probleme stören glücklicherweise nicht die Lösungen, wie sie als *real time location systems* oder **indoor positioning system (IPS)** für die Ortung in Werkhallen eingesetzt werden sollen. Aber auch hier gibt es noch eine Vielzahl konkreter Schwierigkeiten, die bisher noch nicht alle hinreichend gut gelöst sind.

### Feldstärkemessungen

Hier senden Geräte, wie z. B. Mobiltelefone Signale aus, die von Empfängern aufgenommen werden. Im einfachsten Fall nimmt die von dem Gerät abgestrahlte Feldstärke  $F_s$  proportional zum Quadrat des Abstandes  $d_{s,e}$  zwischen Sender und Empfänger ab und der Empfänger registriert die Feldstärke

$$F_e = \frac{F_s}{d_{s,e}^2} \quad (5.5)$$

Ist  $F_s$  bekannt, kann der Abstand bestimmt werden. Wird das Signal von mehreren Empfängern aufgenommen, lässt sich wiederum die Position des Senders bestimmen.

### Odometrie

Eine sehr einfache Möglichkeit besteht darin, sich in ein Auto zu setzen, den Tageskilometerzähler auf 0 zu stellen und die zu messende Strecke abzufahren. Hierbei werden die Umdrehungen der Achse gezählt und aus der Anzahl der Umdrehungen und dem Umfang der Räder der Abstand ermittelt. Wie gut ist das Ergebnis? Nehmen wir einen Lkw, so hängt das Ergebnis davon ab, welchen Luftdruck die Reifen haben, da die Anzahl der Umdrehungen mit kleiner werdendem Umfang der Reifen zunimmt. Der gemessene Wert ist also abhängig vom Luftdruck bzw. der Beladung des Fahrzeuges. Wird dieses Verfahren bei Gabelstaplern eingesetzt, so beeinflussen Schlupf beim Anfahren und Rutschen beim Bremsen die Ergebnisse. Ein großes Rad wird stets einen anderen Wert ermitteln als ein kleineres, das, wie bei dem Schwamm, mehr Unebenheiten der Fahrbahn ausfährt. Auch die traditionelle Odometrie ist nicht frei von gerätebedingten Messschwierigkeiten und die Ergebnisse derartiger Messungen sollten also mit Vorsicht verwendet werden.

### 5.2.3 Berechnungen

#### Luftlinie

Die einfachste Methode ist die Berechnung der Länge der Luftlinie zwischen zwei Punkten  $P_1$  und  $P_2$  mit den Koordinaten  $(x_1, y_1, z_1)$  und  $(x_2, y_2, z_2)$ .

$$d_{1,2}^{(\text{los})} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (5.6)$$

Diese Gleichung bestimmt den Abstand zwischen meinem Wohnort und Sidney in Australien zu ungefähr 6000 km. Lässt sich der hiermit berechnete Abstand überhaupt anwenden? Nicht nur dann, wenn die *direkte* Verbindung zwischen zwei Punkten nicht möglich ist, bereitet diese Formel Schwierigkeiten. Ergebnisse sind immer dann mit Vorsicht zu betrachten, wenn wichtige Voraussetzungen nicht erfüllt sind. Mit dem aus der Schule bekannten Wissen, dass die Summe der Winkel in einem Dreieck immer  $180^\circ$  beträgt, ist eine der Voraussetzungen gegeben. Leider ist dieses fast immer falsch. Für uns auf der Erde lebenden Menschen haben wir mit Dreiecken auf der Erdoberfläche zu tun. Stellen Sie sich ein Dreieck auf der in Abbildung 5.1 gezeigten Erde vor, dessen einer Eckpunkt auf einem der Pole und die beiden anderen auf dem Äquator liegen. Jede der beiden Linien vom Pol zu dem Äquator schließt mit dem Äquator einen Winkel von  $90^\circ$  ein. Dieses macht zusammen bereits  $180^\circ$ . Die Summe der Winkel in diesem Dreieck beträgt folglich  $180^\circ$  plus dem Winkel am Pol, also mehr als  $180^\circ$ . Wäre die Erde eine Kugel, gäbe es andere Sätze und Regeln zur Entfernungsberechnung, aber die Erde ist leider nicht einmal eine Kugel. Wie lassen sich dann Abstände bestimmen? Hier gibt es verschiedene Möglichkeiten, diese zu berechnen, auf die im folgenden eingegangen werden soll.

Zunächst aber noch einmal zurück zu der Luftlinie aus Gleichung (5.6). Was beschreibt die Luftlinie? Sie steht für die Länge einer Geraden, die die beiden Punkte  $P_1$  und  $P_2$  miteinander verbindet. Für viele praktische Anwendungen bietet Gleichung (5.6) eine ausreichend gute Grundlage für Näherungen. So lässt sich der Abstand zwischen zwei Punkten als Produkt aus

Luftlinienabstand und einem empirisch zu ermittelnden **Umwegfaktor** bestimmen, der sowohl die Erdkrümmung als auch Umwege durch die Nutzung von Straßen berücksichtigen kann.

### Fahrpläne

Auf Schwierigkeiten beim Rechnen mit Fahrplänen wurde bereits auf S.98 eingegangen. In dem Beispielplan in Tabelle 4.5(b) ist es jedoch sehr einfach, die kürzest mögliche Verbindung zwischen Löwenstadt und Wachalda abzulesen. Auch in anderen, sehr viel einfacheren Situationen, kann es zu falschen Angaben kommen:

#### Beispiel .26 Flugdauer Hamburg - Helsinki

Für eine Reise nach Finnland wurden in einem Reisebüro mögliche Flugverbindungen von Hamburg nach Helsinki nachgefragt. Der Start des Hinfluges sollte um 11:20Uhr erfolgen und die Landung um 14:20Uhr. Für die Rückreise war ein Abflug um 10:10Uhr und eine Ankunft um 11:10Uhr vorgesehen.

Auf Nachfrage bestätigte der Mitarbeiter des Reisebüros die Richtigkeit seiner Angaben und, nach kurzem Überlegen, auch, dass die Flugdauer für den Flug von Hamburg nach Helsinki drei Stunden und für den von Helsinki nach Hamburg eine Stunde betrage. Als Grund für den Unterschied war die Erdrotation schnell gefunden. Nach kurzem Zweifel an dem bestehenden Weltbild war nicht eine erhöhte Erdrotation der Grund sondern fehlende Standardisierung und Unkenntnis der Regeln, die zu den Angaben in einem Flugplan führen: Die Zeiten sind jeweils in lokalen Zeiten der entsprechenden Flughäfen angegeben, der Zeitunterschied zwischen Hamburg und Helsinki beträgt eine Stunde, die Flugdauer jeweils zwei Stunden und die Zeitdifferenzen zwischen Abflug und Ankunft dann eine bzw. drei Stunden. Zur Bestimmung zeitlicher Abstände in einem globalen logistischen Netzwerk ist es nicht ausreichend, Uhren abzulesen. Zeitzonen müssen bekannt sein und die Tage, an denen die Uhrzeit möglicherweise von Sommer- auf Winterzeit umgestellt wird.

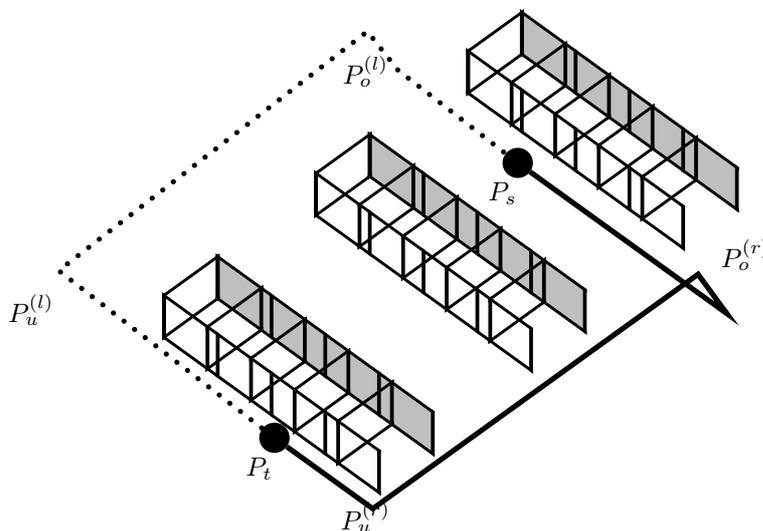


Abb. 5.3a: Blocklager und zwei mögliche Verbindungen zwischen den Punkten  $P_s$  und  $P_t$

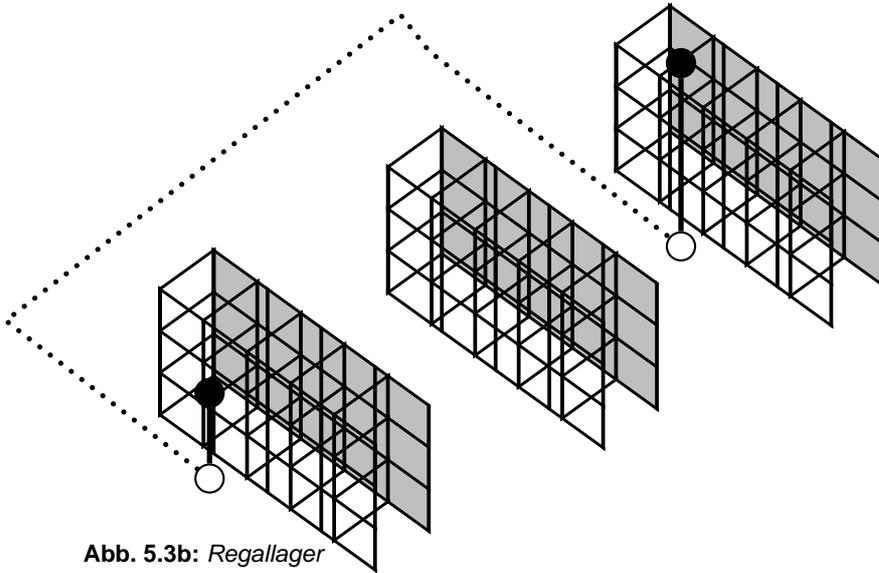


Abb. 5.3b: Regallager

### Abstände in Regallagern

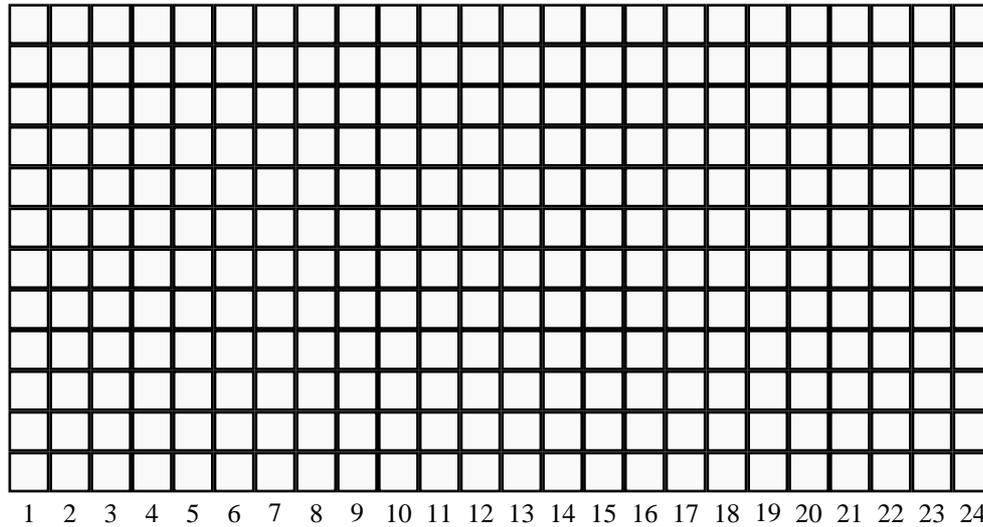
Eines ist der Luftlinie mit und ohne Umwegefaktor und der Dauer für einen Direktflug gemeinsam: Es gibt genau einen Weg, für den die Länge zu bestimmen ist. Auch dieses ist eine im wirklichen Leben kaum zu findende Ausnahme. Betrachten wir hierzu ein Blocklager, wie es in Abbildung 5.3a schematisch dargestellt ist und suchen die Länge der Verbindung zwischen  $P_s$  und  $P_t$ . Abgesehen von offensichtlich sehr vielen längeren Wegen ist zwischen den beiden eingezeichneten zu entscheiden, welcher von diesen der kürzere ist. Es ist also nicht nur die Länge eines Weges sondern auch noch der richtige Weg zu bestimmen. Bei einer solch einfachen Anordnung, in der nur zwei Wege sinnvoll sind, lässt sich die Berechnung leicht durch Vergleich durchführen. Sind  $P_o^{(l)}$  und  $P_o^{(r)}$  die oberen Endpunkte der Gassen und  $P_u^{(l)}$  und  $P_u^{(r)}$  die unteren, so haben die beiden Wege, der linke und rechte, bei geschickter Wahl des Koordinatensystems die Längen

$$d_{s,t}^{(l,r)} = |x_s - x_o^{(l,r)}| + |y_o^{(l,r)} - y_u^{(l,r)}| + |x_u^{(l,r)} - x_t| \quad (5.7)$$

Ist die Anordnung komplexer, d. h. gibt es mehrere Felder solcher Lager, wie z. B. Flächen, auf denen Leergut für die Mineralwasserproduktion gelagert wird, bietet sich die Beschreibung des Lagers als Graph an, bei dem jeder Platz als ein Knoten und jeder Streckenabschnitt zwischen zwei Plätzen als Kante dargestellt wird. Weitere Knoten und Kanten sind für die Endpunkte der einzelnen Gassen und deren Verbindungen einzurichten – ein erstes **Standortproblem**. Ist der Graph einmal angelegt, können alle graphentheoretischen Methoden zur Abstandsbestimmung genutzt werden. Da hier die Bewegung in einer Ebene erfolgt, kann aus dem berechneten Abstand mit der Geschwindigkeit eines Staplers unmittelbar die benötigte Fahrzeit bestimmt werden. Sind die unterschiedlichen Geschwindigkeiten in den Kurven, möglicherweise auch noch für Leerfahrten und solchen mit Last bekannt, kann das Ergebnis noch verfeinert werden.

Für die Abstände zwischen zwei Punkten in einem Hochregallager ist dieses zu modifizieren:

Hier sind zwei Bewegungen, eine horizontale und eine vertikale, miteinander zu verknüpfen. In Abbildung 5.4 sind zwei Geraden eingezeichnet, auf denen sich zwei Bediengeräte, bei denen horizontale und vertikale Bewegung gleichzeitig aber mit unterschiedlicher Geschwindigkeit  $v_x$  und  $v_y$  ausgeführt werden, bewegen würden. Sind  $d_x$  und  $d_y$  die Breiten bzw. Höhen der Fächer, so können die Zeiten für gleichzeitige  $t_{x,y}^{(s)}$  und getrennte  $t_{x,y}^{(d)}$  Bewegung berechnet werden, die notwendig sind, um  $n_x$  Fächer in horizontaler und  $n_y$  in vertikaler Richtung zu überbrücken:



**Abb. 5.4:** Belegung der Fächer eines Hochregals. Die Linien zeigen die Fahrwege für zwei Bediengeräte mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Für die durchgezogene Linie gilt  $v_x = 2v_y$ , für die gestrichelte  $v_x \approx 3v_y$ . Die schraffierten Flächen zeigen die Fächer, die innerhalb der Zeit  $t_1$  erreicht werden können.

$$t_{x,y}^{(s)} = \max\left(\frac{n_x d_x}{v_x}, \frac{n_y d_y}{v_y}\right) \quad (5.8a) \quad t_{x,y}^{(d)} = \frac{n_x d_x}{v_x} + \frac{n_y d_y}{v_y} \quad (5.8b)$$

Abbildung 5.4 macht deutlich, dass das Verhältnis der Geschwindigkeiten für die horizontale bzw. vertikale Bewegung und die Maße des Regals eng zusammenhängen müssen, wenn ein optimaler Betrieb bezogen auf zeitrelevante Ziele erreicht werden soll. Sollen Zugriffe möglichst schnell erfolgen, müssen Waren in den Fächern gelagert werden, die schnell erreicht werden können. Die eingezeichneten Linien geben einen Hinweis. In einem Hochregal, wie es Abbildung 5.3b schematisch zeigt, sind nun alle Bewegungen miteinander zu verknüpfen, um richtige Zeiten für das Bewegen eines Artikels von einem Regalfach in ein anderes zu ermitteln.

## 5.2.4 Abstandsberechnungen in Graphen

War die Berechnung des kürzesten Weges bei einer Blockregallagerung noch übersichtlich, so nimmt diese Übersichtlichkeit mit der Anzahl der möglichen Wege bei zunehmender Größe eines Lagers ab. In Straßenkarten ist es kaum möglich, den kürzesten Weg zwischen zwei Knoten

**Algorithmus 5.1 Dijkstra-Algorithmus [nach BG93]****Variablenvereinbarung**

$\mathcal{V}$  : Menge markierter Knoten

$d_l^*$  : Länge der aktuell kürzesten Verbindung vom Startknoten zum Knoten  $v_l$

$d_l$  : Länge der kürzesten Verbindung vom Startknoten zum Knoten  $v_l$

$p_l^*$  : Letzter Knoten vor  $v_l$  auf der aktuell kürzesten Verbindung zum Knoten  $v_l$

$p_l$  : Letzter Knoten vor  $v_l$  auf der kürzesten Verbindung zum Knoten  $v_l$

**Initialisierung**

Setze

$$\mathcal{V} = \{v_s\}$$

$d_l = \infty$  für alle Knoten  $v_l$  des Graphen.

$$d_s^* = 0$$

**Bestimmung der Länge des kürzesten Weges**

- Wiederhole folgende Schritte, bis  $\mathcal{V} = \emptyset$  oder  $d_l = d_t$ .

- Bestimme Knoten  $v_l$  mit  $d_l = \min_{k \in \mathcal{V}} (d_k^*)$

- Bestimme für alle Nachbarn  $v_m$  von  $v_l$

$$x = d_l + c_{l,m}$$

ist  $x < d_m^*$ , setze  $d_m^* = x$  und  $p_m^* = v_l$

- Falls  $v_m$  nicht in  $\mathcal{V}$  enthalten war, füge  $v_m$  in  $\mathcal{V}$  ein.

- Entferne  $v_l$  aus  $\mathcal{V}$

**Bestimmung des kürzesten Weges  $\mathcal{R}$** 

- $i = 1, R_i = v_t$

- Wiederhole folgende Schritte bis  $R_{i+1} = v_s$  erreicht

- $R_{i+1} = p_{R_i}$

- $i = i + 1$

Der Weg, d. h. der Kantenzug liegt nun in umgekehrter Reihenfolge vor.

**Algorithmus 5.2 A\*-Algorithmus**

Wie Algorithmus 5.1 – jedoch :

- ...

- Bestimme Knoten  $v_l$  mit  $d_l = \min_{k \in \mathcal{V}} (d_k^* + f(v_k, v_t))$  – vgl. Gleichung (5.9)

- ...

durch bloßes Hinschauen zu finden. Hier müssen Methoden angewandt werden, die auf der Darstellung mittels eines bewerteten Graphen, vgl. hierzu Definition .29, basieren. In diesem wird dann die Länge der kürzesten Verbindung zwischen einem Startknoten  $v_s$ , einem Zielknoten  $v_t$  und gegebenenfalls auch die hierzu gehörende Streckenführung gesucht. Die Verfahren sind unabhängig von der Zielfunktion. Ob nun die kürzesten Wege, Zeiten oder die geringsten Kosten gesucht werden, ist ausschließlich abhängig von der Kantenbewertung. Die einzige Einschränkung ist, dass keine der Bewertungen negativ sein soll. Werden negative Kantenbewertungen zugelassen, dann darf es keinen **Kreis** geben, für den die Summe der Kantenbewertungen kleiner oder gleich 0 ist. In praktischen Anwendungen würde dieses bedeuten, dass das Befahren einer Kante oder des Kreises mit negativen Kosten, also mit Einnahmen, verbunden ist. Werden Kanten mit negativer Bewertung zugelassen, kann auch dem zunehmenden Einsatz von Hybridmotoren Rechnung getragen werden, da diese auf Gefällstrecken möglicherweise keine Energie verbrauchen, sondern gewinnen.

Bereits vor mehr als fünfzig Jahren ist eines der am weitesten verbreiteten Verfahren, der **Dijkstra - Algorithmus**, entwickelt worden. Dieser liefert ein exaktes Ergebnis für die Länge der kürzesten Verbindung zwischen zwei Knoten, dem Startknoten  $v_s$  und dem Zielknoten  $v_t$  eines Graphen, und die dazu gehörende Streckenführung. Gibt es mehrere kürzeste Wege mit gleicher Länge, so bestimmt dieser Algorithmus irgendeinen von diesen. Eine Beschreibung erfolgt in Algorithmus 5.1. Dieser gehört zu den so genannten *label setting*-Verfahren, bei denen einzelne Knoten markiert werden. Hier wird ein Knoten  $v_l$  dann markiert, wenn bereits ein Weg vom Startknoten  $v_s$  zum Knoten  $v_l$  gefunden wurde. Dieser Weg muss nicht der kürzest mögliche zu dem Knoten  $v_l$  sein. Die zugehörige Weglänge ist  $d_l^*$ . Wenn dieser Weg befahren wird, ist  $p_l^*$  die Nummer des letzten Knotens auf diesem Weg bevor  $v_l$  erreicht wird. Zur Verdeutlichung des Vorgehens und der Bedeutung der einzelnen Variablen soll es an dem Beispiel der Suche der kürzesten Verbindung zwischen  $v_s = v_3$  und  $v_t = v_{11}$  der in 4.8 dargestellten Straßenkarte von *Löwenstadt* beschrieben werden. Die einzelnen Schritte sind Tabelle 5.2 nachzuverfolgen. Die unterste Zeile jedes einzelnen Blockes enthält die aktuelle Liste der markierten Knoten  $\mathcal{V}$ , die Nummer des Knotens, der zu dem gefundenen Minimum gehört und die Liste sämtlicher noch zu betrachtender Nachbarn dieses Knotens. Alle Knoten, für die bereits ein kürzester Weg gefunden wurde, erscheinen in dieser Liste der Nachbarn nicht mehr. In der Beschreibung des Algorithmus werden diese nicht ausgeschlossen. Das Ergebnis ist unabhängig davon, ob diese betrachtet werden oder nicht, da jedes für einen solchen Nachbarn berechnete  $x$  stets größer als der bereits gefundene kürzeste Abstand ist. Hier ist abzuwägen, ob die überflüssige Abfrage oder das Verwalten dieser Nachbarn und zusätzliche Durchsuchen einer weiteren Liste aufwendiger sind. Für das in Tabelle 5.2 gezeigte manuelle Vorgehen ist das Nicht-Berücksichtigen sicher einfacher.

In dem ersten Block mit der Nummer 0 sind die Werte der einzelnen Variablen nach der Initialisierung zu sehen. Hier gibt es nur für den Startknoten selbst eine bisher gefundene kürzeste Verbindung und folglich auch nur für den Startknoten einen letzten Knoten auf dieser kürzesten Verbindung, sich selbst. Dunkel unterlegt und mit weißer Schrift markiert sind jeweils die Knoten, für die bereits die kürzeste Verbindung gefunden wurde, hell hinterlegt sind die, bei denen im aktuellen Iterationsschritt die bisherigen Werte verändert wurden.

Betrachten wir den Block mit der Nummer 7 und die zu dem Knoten  $v_8$  gehörende Spalte. Dort ist  $d_8^* = 13$  und  $p_8^* = 16$  zu finden. Dies heißt, dass es einen Weg von  $v_3$  nach  $v_8$  mit der Länge 13 gibt. Der letzte Knoten auf diesem Weg ist  $v_{16}$ . Nun können wir bei Knoten  $v_{16}$  nachschauen und sehen, dass es einen Weg nach  $v_{16}$  mit der Länge 4 gibt und der letzte Knoten auf dem Weg nach  $v_{16}$  ist  $v_3$ , der Startknoten. Somit gibt es eine direkte Verbindung von  $v_3$  nach  $v_{16}$  und von

$v_{16}$  geht es nach  $v_8$ . Bei der bisher gefundenen Länge  $d_8^* = 13$  muss es sich noch nicht um die kürzeste Verbindung handeln. In Iteration 8 ergibt sich ein neuer Weg mit der Länge  $d_8^* = 10$ , der in Schritt 10 dann auch zum kürzesten wird. Der zu diesem Weg gehörende letzte Knoten ist  $v_6$ , der über einen Weg der Länge  $d_6 = 6$  erreicht wird, dessen letzter Knoten  $v_7$  mit dem Startknoten benachbart ist.

Für den Zielknoten  $v_{11}$  wird zum ersten Mal in Iteration 10 ein Weg gefunden und in Schritt 13 wird dieser zum kürzesten. Wie lässt sich hieraus nun die Streckenführung bestimmen? Dieses kann in dem letzten Block aus der Tabelle abgelesen werden:

Spalte  $v_{11}$  : Der letzte Knoten auf dem kürzesten Weg nach  $v_{11}$  ist  $v_{12}$ .

Spalte  $v_{12}$  : Der letzte Knoten auf dem kürzesten Weg nach  $v_{12}$  ist  $v_6$ .

Spalte  $v_6$  : Der letzte Knoten auf dem kürzesten Weg nach  $v_6$  ist  $v_7$ .

Spalte  $v_7$  : Der letzte Knoten auf dem kürzesten Weg nach  $v_7$  ist  $v_3$ , der Startknoten.

Diese Liste von unten nach oben gelesen ergibt für den kürzesten Weg:

$v_3 \rightarrow v_7 \rightarrow v_6 \rightarrow v_{12} \rightarrow v_{11}$

Bei genauer Betrachtung folgt, dass dieses Verfahren nicht nur einen kürzesten Weg, sondern in jedem Iterationsschritt einen kürzesten Weg zu einem Knoten bestimmt. Bei dem hier gezeigten Vorgehen werden diese Ergebnisse verworfen. Ist aber nicht nur eine kürzeste Verbindung gesucht, sondern, wie bei Optimierungsaufgaben durchaus möglich, sehr viele, können und sollten diese Ergebnisse genutzt werden. Dass Teilwege kürzester Wege ebenfalls kürzeste Wege sind und somit verwendet werden können, wird durch das Bellmannsches Optimalitätsprinzip [NM93] sicher gestellt.

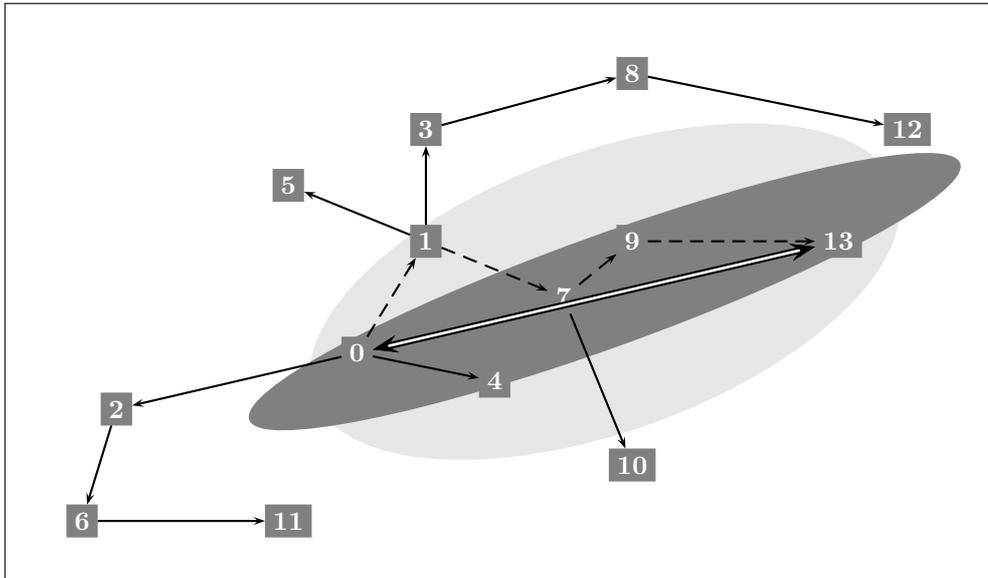
Wird eine Routenplanung für 1000 Kunden durchgeführt, sind  $1000 \times 1000$  kürzeste Wege zu berechnen, eine Anzahl, bei der sich Gedanken über Einsparungen, oder das Vermeiden von Verschwendung lohnen. Beträgt die Rechenzeit pro Knotenpaar eine Millisekunde, so ergibt sich für die in diesem Fall benötigten eine Million Punkte eine Rechenzeit von insgesamt 1000 Sekunden, mehr als 16 Minuten.

Wie lässt sich das Verfahren weiter verbessern? Um dieses zu beantworten, kann untersucht werden, wo dieser Algorithmus an Zeit verliert. Werden die bei einem Durchlauf des Algorithmus berechneten Teilwege eines kürzesten Weges berücksichtigt, muss notiert werden, welche Wege bereits bestimmt wurden. Wie effizient dieses realisiert wird, hängt entscheidend davon ab, in welcher Reihenfolge die Abstandsberechnungen durchgeführt werden. Würden bei dem hier beschriebenen Beispiel vor der Berechnung des Weges von  $v_3 \rightarrow v_{11}$  zunächst  $v_3 \rightarrow v_6$  berechnet, brächte die Verwendung von Teilwegen keinen Vorteil. Wird in Algorithmus 5.1 die Bedingung oder  $d_l = d_t$  gestrichen, führt dieser zur Berechnung aller kürzesten Wege, die beim Zielknoten beginnen.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Definition eines Gebietes, das Straßen umfasst, die berücksichtigt werden sollen oder ausblendet, die außerhalb eines gewissen Korridors liegen. Dieses ist durch die beiden grau gezeichneten Figuren in Abbildung 5.5 angedeutet. Dies beschleunigt das Rechnen, führt aber auch zu Problemen. Das Ausblenden nicht interessierender Straßen bedeutet, dass ein anderer, ein neuer Graph betrachtet wird, für den alle wichtigen Informationen, wie Adjazenzliste und Abbiegevorschriften, aufbereitet oder zumindest überprüft werden müssen. Gleichzeitig kann ein ursprünglich zusammenhängender Graph durch das Entfernen von Kanten zu einem nicht zusammenhängenden werden. In diesem Fall würde die obige Formulierung des Dijkstra-Algorithmus nicht funktionieren, da es dann möglich wäre, dass kein Weg gefunden wird. Natürlich könnte dieses wieder abgefangen werden, aber zu Lasten der Geschwindigkeit. Für die praktische Nutzung bedeutet ein Nicht-Zusammenhängen, dass es keine

Nr	$v_s \rightarrow$																		$d_l^*$
	$v_1$	$v_2$	$v_3$	$v_4$	$v_5$	$v_6$	$v_7$	$v_8$	$v_9$	$v_{10}$	$v_{11}$	$v_{12}$	$v_{13}$	$v_{14}$	$v_{15}$	$v_{16}$	$v_{17}$	$v_{18}$	
0	$\infty$	$\infty$	0	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_3\}$			$v_l = v_3$								Nachbarn : $v_2, v_4, v_7, v_{16}$							
1	$\infty$	3	0	6	$\infty$	$\infty$	2	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	4	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
	0	3	3	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_2, v_4, v_7, v_{16}\}$			$v_l = v_7$								Nachbarn : $v_4, v_5, v_6$							
2	$\infty$	3	0	5	4	6	2	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	4	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
	0	3	3	7	7	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_2, v_4, v_5, v_6, v_{16}\}$			$v_l = v_2$								Nachbarn : $v_1, v_4$							
3	6	3	0	5	4	6	2	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	4	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
	2	3	3	7	7	7	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_1, v_4, v_5, v_6, v_{16}\}$			$v_l = v_5$								Nachbarn : $v_7, v_{13}$							
4	6	3	0	5	4	6	2	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	8	$\infty$	$\infty$	4	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
	2	3	3	7	7	7	3	0	0	0	0	0	5	0	0	3	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_1, v_4, v_6, v_{13}, v_{16}\}$			$v_l = v_{16}$								Nachbarn : $v_3, v_8$							
5	6	3	0	5	4	6	2	13	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	8	$\infty$	$\infty$	4	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
-6	2	3	3	7	7	7	3	16	0	0	0	0	5	0	0	3	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_1, v_4, v_6, v_8, v_{13}\}$			$v_l = v_4$								Nachbarn : -							
	$\mathcal{V} = \{v_1, v_6, v_8, v_{13}\}$			$v_l = v_1$								Nachbarn : $v_{10}$							
7	6	3	0	5	4	6	2	13	$\infty$	12	$\infty$	$\infty$	8	$\infty$	$\infty$	4	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
	2	3	3	7	7	7	3	16	0	1	0	0	5	0	0	3	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_6, v_8, v_{10}, v_{13}\}$			$v_l = v_6$								Nachbarn : $v_8, v_{12}$							
8	6	3	0	5	4	6	2	10	$\infty$	12	$\infty$	9	8	$\infty$	$\infty$	4	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
	2	3	3	7	7	7	3	6	0	1	0	6	5	0	0	3	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_8, v_{10}, v_{12}, v_{13}\}$			$v_l = v_{13}$								Nachbarn : $v_{12}, v_{14}$							
9	6	3	0	5	4	6	2	10	$\infty$	12	$\infty$	9	8	12	$\infty$	4	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
	2	3	3	7	7	7	3	6	0	1	0	6	5	13	0	3	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_8, v_{10}, v_{12}, v_{14}\}$			$v_l = v_{12}$								Nachbarn : $v_{11}$							
10	6	3	0	5	4	6	2	10	$\infty$	12	14	9	8	12	$\infty$	4	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
	2	3	3	7	7	7	3	6	0	1	12	6	5	13	0	3	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_8, v_{10}, v_{11}, v_{14}\}$			$v_l = v_8$								Nachbarn : $v_9, v_{10}$							
11	6	3	0	5	4	6	2	10	16	12	14	9	8	12	$\infty$	4	$\infty$	$\infty$	$d_l^*$
-12	2	3	3	7	7	7	3	6	8	1	12	6	5	13	0	3	0	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_9, v_{10}, v_{11}, v_{14}\}$			$v_l = v_{10}$								Nachbarn : -							
	$\mathcal{V} = \{v_9, v_{11}, v_{14}\}$			$v_l = v_{14}$								Nachbarn : $v_{11}, v_{17}$							
13	6	3	0	5	4	6	2	10	16	12	14	9	8	12	$\infty$	4	16	$\infty$	$d_l^*$
	2	3	3	7	7	7	3	6	8	1	12	6	5	13	0	3	14	0	$p_l^*$
	$\mathcal{V} = \{v_9, v_{10}, v_{11}, v_{17}\}$			$v_l = v_{11}$								Nachbarn : -							

**Tab. 5.2:** Beispiel Dijkstra-Algorithmus für die Verbindung von  $v_3 \rightarrow v_{11}$  in Löwenstadt. Die Nummer in der ersten Spalte gibt die Iterationsschritte an. Dunkel unterlegt sind jeweils die Knoten, für die bereits eine kürzeste Verbindung gefunden wurde. Die Knoten, für die im aktuellen Schritt Werte verändert wurden, sind hell unterlegt.



**Abb. 5.5:** Dijkstra-Algorithmus in Löwenstadt.

Grau unterlegt sind mögliche Bereiche, auf die für eine Berechnung die Knotenmenge eingeschränkt werden könnte. Die Nummern an den Knoten stehen für die Nummer des Iterationsschrittes aus Tabelle 5.2, in dem eine kürzeste Verbindung für diesen Knoten gefunden wird.

Verbindung von Hamburg nach München gäbe. Schlimmer wäre der Fall, dass der Graph zusammenhängend bleibt, aber Verbindungen so entfernt werden, dass die kürzeste Verbindung nicht mehr möglich ist. Es könnte eine Verbindungsstrecke, wie z. B. ein Autobahnzubringer, der in die falsche Himmelsrichtung weist, gestrichen werden, die für den kürzesten Weg zwingend erforderlich ist.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Karte in mehrere Karten unterschiedlicher Hierarchien zu unterteilen: Die oberste Ebene enthält nur Autobahnen und die darunter liegenden die restlichen Straßen. Besonders für große Entfernungen ist dieses sehr effizient, allerdings sind dann jeweils die geeigneten Verknüpfungsknoten zwischen den Ebenen zu suchen. Im Folgenden soll auf Möglichkeiten eingegangen werden, den Algorithmus selbst zu beschleunigen.

- Der erste Punkt, der viel Rechenzeit verbraucht, ist das Suchen der kleinsten Elemente. Da dieses bei jedem Iterationsschritt erfolgt, muss hier eine schnelles Suchverfahren, wie z. B. die *heap* - Suche, vgl. 4.3.2, eingesetzt werden.
- Der Dijkstra - Algorithmus sucht vollkommen ziellos, wie in Abbildung 5.5 deutlich wird. Statt der Knotennummern sind in dieser Abbildung jeweils die Nummern der Iterationsschritte angegeben, bei denen jeder einzelne Knoten erreicht wird.

Die Ineffizienz wird nur deshalb deutlich, weil zu sehen ist, wohin gefahren werden soll. Wären die Kantenbewertungen Fahrzeiten oder Kosten, könnte der optische Eindruck schnell täuschen.

Da in der Logistik kürzeste Verbindungen in Straßenkarten und nicht in allgemeinen Graphen gesucht werden, können zusätzlich geographische oder geometrische Informationen genutzt wer-

den. Der **A\* - Algorithmus** nutzt genau dieses aus. Ist die kürzeste Entfernung gesucht, so geben die Luftlinienabstände zwischen je zwei Knoten und dem Zielknoten in Abschätzung dafür, welcher von beiden sich näher in Richtung des Zielknotens befindet. Die Abschätzung durch die Luftlinie, d. h.

$$f(v_k, v_t) = d^{(\text{los})}(v_k, v_t) \quad (5.9)$$

ist gleichzeitig eine untere Schranke für den tatsächlichen Abstand. Die im Dijkstra-Algorithmus 5.1 durchgeführte Suche des Minimums wird wie in Algorithmus 5.2 zu sehen, ersetzt. Hier könnte jede andere Schätzfunktion verwendet werden, solange sie eine **untere Schranke** für den tatsächlichen Abstand zwischen den Knoten  $v_k$  und  $v_t$  darstellt. Diese Erweiterung kann damit auch bei der Berechnung kürzester Zeiten und geringster Kosten vorgenommen werden, solange  $f(v_k, v_t) \leq d(v_k, v_t)$ , wobei  $d(v_k, v_t)$  der tatsächlich kürzeste, zeit- oder kostenmäßig, Abstand zwischen dem Knoten  $v_k$  und  $v_t$  ist. Ist  $v^{(\text{max})}$  die größte auf den betrachteten Straßen fahrbare Geschwindigkeit, ist  $\frac{d^{(\text{los})}}{v^{(\text{max})}}$  eine solche Schätzfunktion.

Für die Ermittlung aller kürzesten Verbindungen innerhalb eines Graphen kann auch der **Floyd - Algorithmus** angewendet werden. Da dieser aber keine Vorteile gegenüber dem mehrmaligen Anwenden des Dijkstra - Algorithmus bietet, soll auf diesen hier nicht näher eingegangen werden.

Gänzlich andere Algorithmen können eingesetzt werden, wenn die Graphen vor dem Berechnen der Abstände geeignet präpariert werden. In dem von [Lau06] beschriebenen Verfahren wird eine Geschwindigkeitssteigerung gegenüber dem Dijkstra-Algorithmus um einen Faktor von ungefähr 60 erreicht. Auch bei diesen Verfahren ist sicher gestellt, dass stets der beste Weg gefunden wird.

## 5.2.5 Abstände von Zeichenketten

Ein ganz andere Art von Fragestellungen, die zur Berechnung von Abständen führen, können in der Biologie oder beim Suchen von Adressen beobachtet werden. So wird in der Biologie die Antwort auf die Frage gesucht, wie ähnlich sind Affe und Mensch. In einem Mordfall kann die an einem Tatort gefundene DNA auf Ähnlichkeit mit der eines Verdächtigen untersucht werden. In der Logistik interessiert beispielsweise die Ähnlichkeit zweier Adressen oder Nummern, wie auf S. 123 bereits ausgeführt. Auch wenn diese Fragen inhaltlich unterschiedlich erscheinen mögen, ist das Problem gleich.

### **Beispiel .27 Ähnlichkeit von Zeichenketten**

*In der Biologie wird die Ähnlichkeit von Folgen der Art*

- AAT CTA TTG TGA GCA

*und*

- ATT CTA TTG GGA GCA

*untersucht.*

*in der Logistik die von*

- Carl-von-Ossietzky-Straße

*und*

- Karl-von-Osietzki-Straße

**Weisheit 5.2** Eine entscheidende Voraussetzung für den Vergleich von zwei Zeichenketten ist eine Liste mit zulässigen Zeichen, ein **Alphabet**, und eine Vorschrift, die besagt, ob zwei Zeichen gleich oder nicht gleich oder wie ähnlich sie sind. Die Bedeutung der einzelnen Zeichen ist unwichtig.

Es muss eine Funktion  $d(x_1, x_2)$  definiert werden, die für zwei zu vergleichende Objekte  $x_1$  und  $x_2$  einen Abstand bestimmt.

$$d(x_1, x_2) = \begin{cases} 0 & \text{falls } x_1 = x_2 \\ z^*(x_1, x_2) & \text{falls } x_1 \neq x_2, \text{ mit } 0 < z^*(x_1, x_2) \leq 1 \end{cases} \quad (5.10)$$

Sollen Zeichen nur auf Gleichheit untersucht werden, ist  $z^*(x_1, x_2) = 1$  zu setzen. Eine andere Wahl ermöglicht, sprachspezifische Eigenschaften zu berücksichtigen. So könnten  $z^*(e, ä) = 0.5$  und  $z^*(g, k) = 0.8$  gewählt werden. Dieses ist nur dann sinnvoll, wenn die zu vergleichenden Zeichenketten gesprochen wurden, bei einer schriftlichen Übertragung ist eine Vertauschung von  $e$  und  $ä$  genauso wahrscheinlich wie die von  $e$  und  $z$ . War in dem einfachen Beispiel mit dem Schwamm das Volumen nicht eine unabänderliche Eigenschaften des Objektes, so kann der Abstand zweier Zeichen und dann auch der der Zeichenketten abhängig vom Kontext sein. Bei dem zweiten Buchstabenpaar kommt eine weitere Problematik zum Vorschein. Die Ähnlichkeit hängt von der Region ab, in der Buchstaben gesprochen werden und von der Position der Buchstaben innerhalb eines Wortes. So sind die Unterschiede bei *Logistig* und *Logistik* sicher anders zu bewerten als bei *Lokistik* und *Logistik*. Das Erkennen gesprochener Worte bereitet noch einige Schwierigkeiten, auf die hier nicht weiter eingegangen werden kann. Die folgende Beschreibung soll auf geschriebene Texte beschränkt bleiben. Kommen zusätzliche uns unbekannt Buchstaben hinzu, kann diese Diskussion einen recht breiten Raum einnehmen. Bei Verwendung des englischen Alphabets gibt es nicht einmal *Äpfel*. Die Anzahl der in der deutschen und englischen Sprache gemeinsam genutzten Buchstaben reduziert sich auf 26 verglichen mit denen des deutschen Alphabets, kommen türkische hinzu, wird diese Anzahl abermals kleiner. Für folgende Überlegungen beschränken wir uns auf die kleinen Buchstaben des deutschen Alphabets und nennen die beiden zu vergleichenden Zeichenketten  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$  mit den Längen  $l(\vec{A}) \equiv |\vec{A}|$  und  $l(\vec{B}) \equiv |\vec{B}|$ .

Kann der Abstand  $d_{(\vec{A}, \vec{B})}$  zwischen den beiden Zeichenketten bestimmt werden, lässt sich auch die normierte Ähnlichkeit  $S_{(\vec{A}, \vec{B})}$  berechnen:

**Definition .39 Ähnlichkeit**

Die Ähnlichkeit  $S_{(\vec{A}, \vec{B})}$  von zwei Zeichenketten  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$  ist durch

$$S_{(\vec{A}, \vec{B})} = 1 - \frac{d_{(\vec{A}, \vec{B})}}{\max(|\vec{A}|, |\vec{B}|)} \quad \text{mit: } 0 \leq S_{(\vec{A}, \vec{B})} \leq 1 \quad (5.11)$$

gegeben [BK06].  $d_{(\vec{A}, \vec{B})}$  ist der Abstand zwischen den Zeichenketten  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$ .

Die Ähnlichkeit wird 0, wenn der Wert des Bruches 1 wird, d. h. wenn der Abstand gleich der Länge der längeren Kette ist. Die Ähnlichkeit wird 1, d. h. erreicht ihr Maximum, wenn der

Abstand 0 ist. Wie bei der Bestimmung des Schwammvolumens ist der Wert nicht nur abhängig von den betrachteten Objekten  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$ , sondern auch von der Art der Bestimmung. Eine Möglichkeit wird durch folgende Definition beschrieben.

**Definition .40 Hamming-Abstand**

Der Hamming-Abstand zweier Zeichenketten  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$  ist durch

$$d_{(\vec{A}, \vec{B})}^{(H)} = \sum_{i=1}^{\min(|\vec{A}|, |\vec{B}|)} d(a_i, b_i) + \left| |\vec{A}| - |\vec{B}| \right| \quad (5.12)$$

gegeben.  $d(a_i, b_i)$  ist wie in Gleichung (5.10) definiert.

**Beispiel .28 Hamming-Abstand**

Es soll die Ähnlichkeit der Wörter Siegfried und Sigfrihd bestimmt werden, d. h.

$\vec{A} = (s, i, e, g, f, r, i, e, d)$  und

$\vec{B} = (s, i, g, f, r, i, h, d)$

$\vec{A}$	s	i	e	g	f	r	i	e	d
$\vec{B}$	s	i	g	f	r	i	h	d	-
$d(a_i, b_i)$	0	0	1	1	1	1	1	1	1

**Tab. 5.3:** Beispiel für Hamming-Abstand

Mit  $\min(|\vec{A}|, |\vec{B}|) = 8$ ,  $\max(|\vec{A}|, |\vec{B}|) = 9$  und  $\left| |\vec{A}| - |\vec{B}| \right| = 1$  ergibt sich, wie aus Tabelle 5.3 abzulesen ist:

$$d_{(\text{siegfried}, \text{sigfrihd})}^{(H)} = \sum_{i=1}^8 d(a_i, b_i) + \left| |\vec{A}| - |\vec{B}| \right| = 6 + 1 = 7 \quad (5.13a)$$

und damit für die Ähnlichkeit

$$\Rightarrow S_{(\text{siegfried}, \text{sigfrihd})}^{(H)} = 1 - \frac{7}{8} = 0.125 \quad (5.13b)$$

Dieses ist ein Wert, der in Anbetracht der offensichtlichen, subjektiven Ähnlichkeit sehr niedrig erscheint. Das Hamming-Maß liefert hohe Ähnlichkeitswerte für Zeichenketten, bei denen Teile positionsgleich korrespondieren. Ist in einer der beiden Zeichenkette weit vorne ein Zeichen eingefügt, bricht die Korrespondenz hart ab, und ungeachtet aller nachfolgenden möglichen Übereinstimmungen führt dieses zu einem hohen Wert für den Abstand bzw. einem niedrigen für die Ähnlichkeit.

Dieses Maß ist wenig tolerant und entspricht kaum dem menschlichen Ähnlichkeitsempfinden. Sind die beiden Vektoren keine Zeichenketten, sondern Prozessschritte, kann unser subjektives Empfinden schnell trügen. Steht jeder *Buchstabe* für einen Schritt eines Prozesses, und ein Vektor für eine Realisierung in der Produktion, der andere für eine in der Logistik, kann der Wegfall eines vorderen Elementes zu großen Komplikationen führen, was eine geringe Ähnlichkeit in einem solchen Fall rechtfertigt. Dieses Maß hat keinen Bezug zu dem in Definition .38 eingeführten Begriff des Abstandes. Zwei Zeichenketten, die mit geringem Aufwand, wie dem Einfügen eines Zeichens, ineinander überführt werden könnten, weisen möglicherweise einen großen Abstand auf. Um berücksichtigen zu können, wie hoch der Aufwand ist, muss dieser bestimmt werden können. Hierzu bieten sich elementare Operationen an.

**Algorithmus 5.3 Levenshtein-Algorithmus, [nach NW70]**

**Variablen**  $d_{i,j}^{(L)}$  : Abstand zwischen den ersten  $i$ -Zeichen von  $\vec{A}$  und den ersten  $j$ -Zeichen von  $\vec{B}$

**Initialisierung:**

$$d_{0,0}^{(L)} = 0 \quad (5.14a)$$

$$d_{i,0}^{(L)} = i \quad (5.14b)$$

$$d_{0,j}^{(L)} = j \quad (5.14c)$$

**Berechnung** Diese erfolgt zeilenweise.

$$d_{i,j}^{(L)} = \min \begin{cases} d_{i-1,j}^{(L)} + 1 \\ d_{i-1,j-1}^{(L)} + d(a_j, b_i) \\ d_{i,j-1}^{(L)} + 1 \end{cases} \quad (5.15)$$

Der Abstand ist das Element  $d_{|\vec{A}|,|\vec{B}|}^{(L)}$ .

		s	i	g	f	r	i	h	d
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
s	1	0	1	2	3	4	5	6	7
i	2	1	0	1	2	3	4	5	6
e	3	2	1	1	2	3	4	5	6
g	4	3	2	1	2	3	4	5	6
f	5	4	3	2	1	2	3	4	5
r	6	5	4	3	2	1	2	3	4
i	7	6	5	4	3	2	1	2	3
e	8	7	6	5	4	3	2	2	3
d	9	8	7	6	5	4	3	3	2

(a) *sihgfrid* und *siegfried*

		l	i	e	d	e	r
	0	1	2	3	4	5	6
l	1	0	1	2	3	4	5
e	2	1	1	1	2	3	4
i	3	2	1	2	3	4	5
d	4	3	2	2	2	3	4
e	5	4	3	2	3	2	3
r	6	5	3	3	3	3	2

(b) *lieder* und *leider*

**Tab. 5.4:** Beispiele für die Berechnung evolutionärer Distanzen

**Definition .41 Elementare Operationen**

Elementare Operationen beim Ändern von Zeichenketten sind Weglassen, Hinzufügen und Ändern eines Zeichens.

Diese entsprechen den am häufigsten beobachteten Fehlern beim Schreiben von Texten. Zeichen- oder Zeichendreher als ein weiterer häufig auftretender Fehler gehören nicht zu den elementaren Operationen. Diese können als zwei Operationen dargestellt werden. So kann *leider* durch Weglassen des Buchstaben *i* und erneutes Einfügen vor dem *e* in *lieder* geändert werden. Auch das Ändern von *e* in *i* und *i* in *e* erzeugt mit zwei Operationen aus *leider* das Wort *lieder*. Auf der Grundlage elementarer Operationen kann ein alternatives Abstandsmaß, der **Levenshtein-Abstand**, auch **evolutionäre Distanz** oder **Editierdistanz** genannt, definiert werden.

**Definition .42 Evolutionäre Distanz oder Levenshtein-Abstand**

Die evolutionäre Distanz zwischen zwei Zeichenketten  $\vec{A}$  und  $\vec{B}$  ist gleich der minimalen Anzahl elementarer Operationen, die notwendig sind, um die Zeichenkette  $\vec{A}$  in  $\vec{B}$  zu überführen.

Die Berechnung kann mit Algorithmus 5.3 durchgeführt werden. Zwei Beispiele sind in den Tabellen 5.4(a) und (b) zu sehen.

$$d_{(\text{siegfried}, \text{sigfrihd})}^{(L)} = d_{9,8}^{(L)} = 2 \quad \Rightarrow \quad S_{(\text{siegfried}, \text{sigfrihd})}^{(L)} = 1 - \frac{2}{8} = 0.75 \quad (5.16a)$$

$$d_{(\text{leider}, \text{lieder})}^{(L)} = d_{6,6}^{(L)} = 2 \quad \Rightarrow \quad S_{(\text{leider}, \text{lieder})}^{(L)} = 1 - \frac{2}{6} \approx 0.67 \quad (5.16b)$$

Verglichen mit dem *Hamming*-Abstand ergibt sich für die Ähnlichkeit der beiden Namen ein Wert von 0.75, der dem subjektiven Empfinden einer großen Ähnlichkeit entspricht. In beiden Beispielen aus Tabelle 5.4 sind die Abstände gleich, jedoch die Ähnlichkeiten unterschiedlich. Ein Ergebnis, das so auch erwartet werden konnte, da eine gleiche Anzahl von Fehlern bei kürzeren Wörtern eine größere Auswirkung haben sollte. Auch zu erkennen ist, dass ein Zahlendreher zu dem selben Abstand führt wie ein fehlendes und ein zusätzliches Zeichen.

Ein weitere Möglichkeit zum Vergleich von Zeichenketten stellen **N-Gramme** dar, bei denen jeweils alle möglichen Teilketten der Länge  $N$  betrachtet werden und bestimmt wird, wie viele gleiche Teilketten vorhanden sind. Diese liefern wiederum ein recht gutes Maß bei Zeichenketten, die Menschen als sehr ähnlich empfinden. Bei bestimmten Störungen, wie etwa Buchstabendrehern, reagieren N-Gramme aber stärker als es nach menschlichem Empfinden angemessen erscheint. N-Gramme reagieren auch auf Störungen im Innern von Zeichenketten empfindlicher als auf Störungen an den Rändern. Das gilt umso mehr, je größere Werte für  $N$  verwendet werden.

### 5.2.6 Abstände zwischen Routen und Prozessen

Die hier vorgestellten Konzepte für Zeichenketten können auch auf Prozesse, Routen und Streckenführungen übertragen werden. Das Einfügen eines Stopps an einer Tankstelle entspricht dem Einfügen eines Buchstaben und würde den Abstand von zwei Streckenführungen um eine Einheit erhöhen, d. h. bei der Fahrt von Hamburg nach München die Ähnlichkeit nur minimal ändern. Das Einfügen kurz hinter Hamburg würde bei Verwendung des Hamming-Maßes zu einem vollkommen anderen Ergebnis führen wie die gleiche Operation kurz vor dem Zielort. Der Levenshtein-Abstand würde in beiden Fällen um den Wert 1 geändert. Für den Vergleich von Streckenführungen ist somit der Levenshtein-Abstand vorzuziehen. Bei dem Vergleich von Streckenführungen kann jedes einzelne Straßenstück eindeutig durch eine Nummer benannt werden, d. h. dass die in Weisheit 5.2 formulierte Forderung nach einem Lexikon erfüllt ist.

Die Übertragung auf Prozesse kann nur gelingen, wenn das auf Seite 54 beschriebene **Repositorium** vorliegt. Ohne eine brauchbare Beschreibung und eine klare Namensgebung, d. h. das Anlegen eines Lexikons, einzelner, elementarer Prozessschritte ist ein Vergleich von Prozessen nicht möglich. Das Anlegen eines solchen Repositoriums schafft nicht nur eine Verbesserung der Prozessqualität sondern auch die Möglichkeit, die Ähnlichkeit oder den Gleichteilanteil zwischen zwei Prozessen zu erkennen. Ähnlich wie das automatisierte Suchen und Vergleichen von Zeichenketten enorme Potenziale schafft, ist dieses auch bei Prozessen zu erwarten. Zeigt ein Vergleich kleine Abweichungen, könnten Fehler schnell erkannt und frühzeitig behoben werden. Fehlerhafte Planungen könnten vermieden werden – fehlerhafte Realisierungen auch. Eine Analyse des Tableaus, das bei der Berechnung des Levenshtein-Abstandes angelegt wird, macht Teilprozesse ebenso sichtbar wie N-Gramme. Ebenso können Prozesse mit sich selbst verglichen werden. Analog zu Autokorrelationen in Zeitreihen lassen sich hierbei sich wiederholende Teilprozesse erkennen. Da ein Prozessgenerator nicht sofort fehlerfrei zur Verfügung stehen kann,

---

bieten diese Ähnlichkeitsbetrachtungen in Verbindung mit der Einführung eines solchen Generators eine schnell einsetzbare und effiziente Vorgehensweise an.



Wiederhole nie ein Experiment, es könnten sich Widersprüche zeigen.

anonym

# 6

## Datenanalyse

### 6.1 Daten – leblos und uninteressant

In Kapitel 3.1.2 wurde ausgeführt, dass Menschen an Informationen und nicht an Daten interessiert sind. Sie wollen Fertigprodukte und nicht die Rohware. So wie die Qualität von Endprodukten von den Rohstoffen und der Art der Verarbeitung abhängt, ist es auch mit Informationen und Daten. Die wichtigste Voraussetzung ist zu wissen, dass Daten richtig sind bzw. welche Qualität sie aufweisen. Gründe dafür, dass Daten falsch sind gibt es viele: Zufällige oder systematische Fehler bei der Erfassung, der Übertragung oder Analyse. Auch absichtlich vorgenommene Änderungen können nicht ausgeschlossen werden. Löschen und Hinzufügen sollen auch als Änderungen verstanden werden. Ist die Qualität der Daten bekannt, können weitere Analysen durchgeführt werden.

Einerseits können Daten Kennzahlen eines Prozesses sein, der vorher geplant wurde. In diesem Fall sollte es für alle beteiligten Akteure interessant sein zu erfahren, wie die realisierten Werte wirklich mit den geplanten zusammenhängen. Andererseits können Daten auch Ergebnisse von Prozessen oder zeitlichen Abläufen sein, die aus der Beobachtung eines externen Vorganges stammen. Im folgenden sollen Nutzungs- und Verwendungsmöglichkeiten von Daten, hier beschränkt auf Zahlen, unterschiedlichen Ursprungs, **Stichproben**, **Zeitreihen** oder **Kaufmatrizen**, diskutiert werden.

### 6.2 Fehler und Unsicherheiten

Der eingangs zitierte Satz darf natürlich nicht ernst genommen werden, denn:

**Weisheit 6.1** *Ein einziger Wert hat keinerlei Aussagekraft. Jede Momentaufnahme eines Systems liefert stets nur einen einzigen – bedeutungslosen – Wert.*

Wie aussagekräftig sind zwei Werte für ein und denselben Sachverhalt? Auch wenn Zahlen mit vielen Ziffern angegeben werden, sagen diese nichts darüber aus, wie genau sie sind. Die Angabe der Durchschnittsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  eines Autos von

$$\bar{v} = \frac{686.6 \text{ km}}{5.25 \text{ h}} = 130.78095 \text{ km/h} \quad (6.1)$$

macht wenig Sinn, wenn ein Ablesefehler von 100 m bereits zu  $\bar{v} = 130.76 \text{ km/h}$  bzw.  $\bar{v} = 130.80 \text{ km/h}$  führen würde. Ist nicht definiert, ob Pausenzeiten enthalten sind, wird die Angabe für einen Vergleich noch weiter eingeschränkt. Die Verknüpfung von zwei Größen, hier der gefahrenen Strecke  $s$  und der dafür benötigten Zeit  $t$ , die jeweils nicht exakt ermittelt werden können, ergibt einen Fehler in dem Ergebnis, den es zu bestimmen gilt. Eine Möglichkeit hierzu bietet das **Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz**. Auch eine Berechnung von **Kennzahlen** ohne Betrachtung der Fehler ist möglich, aber wenig aussagekräftig, da die Qualität der Ergebnisse unbekannt bleibt.

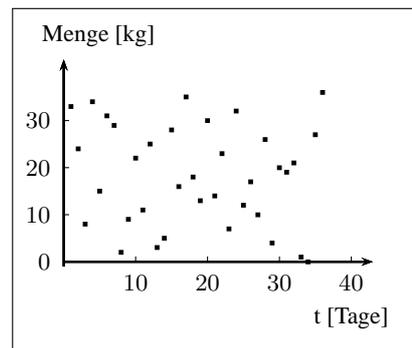
Es gibt stets eine zu bestimmende oder gesuchte Größe, die  $F$  heißen soll, wie z. B. die Durchschnittsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  eines Fahrzeuges. Der wahre Wert  $F$  einer Größe ist unbekannt. Messungen ergeben einen Schätzwert  $\hat{F}$  für diese Größe. Für den unbekanntem *wahren* Wert  $F$  gilt

$$F = \hat{F} + \Delta F \quad (6.2)$$

mit einem Fehler oder einer **Unsicherheit**  $\Delta F$ . Im folgenden Text werden die beiden Begriffe Fehler und Unsicherheit synonym verwendet.

33	24	8	34	15	31
29	2	9	22	11	25
3	5	28	16	35	18
13	30	14	23	7	32
12	17	10	26	4	20
19	21	1	0	27	36

**Tab. 6.1:** Ein Datensatz bzw. eine Stichprobe  
Jede Zahl stehe für eine Menge in kg. Die  
Einträge werden links oben beginnend  
fortlaufend nummeriert und in das rechte  
Diagramm eingetragen.



**Abb. 6.1:** Die Zahlen aus Tabelle 6.1

Ist  $F$  abhängig von anderen, gemessenen oder berechneten, Werten  $x_1, \dots, x_N$ , die ebenfalls nicht exakt, sondern nur mit Unsicherheiten  $\Delta x_1, \dots, \Delta x_N$  bestimmt werden können, so pflanzen sich diese Fehler bei durchzuführenden Rechenoperationen fort. Für den Fehler  $\Delta F$  von  $F = F(x_1, \dots, x_N)$  gilt:

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \cdot \Delta x_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_N} \cdot \Delta x_N\right)^2} \quad (6.3)$$

**Exkurs 6.1 Fehlerfortpflanzung für einfache Operationen**

$$F(x, y) = x + y \qquad \Delta F = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \qquad (6.4a)$$

Die absoluten Fehler addieren sich.

$$F(x, y) = x \cdot y \qquad \frac{\Delta F}{F} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \qquad (6.4b)$$

Die relativen Fehler addieren sich.

$$F(x) = \frac{1}{x} \qquad \frac{\Delta F}{F} = \frac{\Delta x}{x} \qquad (6.4c)$$

Der relative Fehler bleibt gleich.

$$F(x) = x^n \qquad \frac{\Delta F}{F} = n \frac{\Delta x}{x} \qquad (6.4d)$$

Der relative Fehler wird um den Faktor  $n$  verstärkt.

Was bedeutet dies für die anfangs angesprochene Durchschnittsgeschwindigkeit? Zunächst ist der dort angegebene Wert ein Schätzwert  $\bar{v}$  für den unbekanntem wahren Wert der Durchschnittsgeschwindigkeit  $\bar{v}$ .

**Beispiel .29 Fehler der Durchschnittsgeschwindigkeit**

Für  $\bar{v}$  aus Gleichung (6.1) folgt mit (6.3):

$$\Delta \bar{v} = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial s} \Delta s\right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} \Delta t\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{t} \Delta s\right)^2 + \left(\frac{s}{t^2} \Delta t\right)^2} \qquad (6.5a)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{v}{s} \Delta s\right)^2 + \left(\frac{v}{t} \Delta t\right)^2} = v \sqrt{\left(\frac{\Delta s}{s}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2} \qquad (6.5b)$$

Ist  $\Delta s = 5 \text{ km}$  und  $\Delta t = 0.1 \text{ h}$  folgt:

$$\Delta \bar{v} = \sqrt{\left(\frac{1}{5.25} \cdot 5\right)^2 + \left(\frac{686.6}{5.25^2} \cdot 0.1\right)^2} = \sqrt{0.907 + 6.21} = 2.67 \qquad (6.5c)$$

$$\bar{v} = (130.8 \pm 2.7) \frac{\text{km}}{\text{h}} \qquad (6.5d)$$

Dieses entspricht einem relativen Fehler von ungefähr 2%.

Wie an dieser Diskussion und dem letzten Beispiel gesehen werden kann, sind die Auswirkungen von Fehlern davon abhängig, wie die Eingangsgrößen in die zu bestimmende Größe eingehen. Eine Analyse der Abhängigkeiten kann Aufschlüsse darüber liefern, welche Größen mit welcher Genauigkeit bestimmt werden müssen, um eine vorgegebene Fehlergrenze bei dem interessierenden Ergebnis nicht zu überschreiten. Es spart Kosten, dort besser zu werden, wo signifikante

Einflüsse entspringen. Eine Forderung nach Verbesserung in allen Bereichen führt nur zu überflüssigen Aufwendungen.

## 6.3 Analysen

Die Fehlerbetrachtung ist nur der erste Schritt, die Pflichtübung. Hieran anschließend kann die eigentliche Datenauswertung beginnen. Verschiedene Möglichkeiten sollen an einigen Beispielen deutlich gemacht werden. Als erstes Beispiel soll eine einfache Stichprobe  $\mathbf{X} = \{x_1, \dots, x_N\}$  mit  $N$  Elementen, wie in Tabelle 6.1 zu sehen, betrachtet werden. Für diese lassen sich verschiedene Kenngrößen berechnen, die eine erste Aussage ermöglichen. Zunächst soll zwischen dem arithmetischen  $\bar{x}$  und dem Medianwert  $\tilde{x}$  unterschieden werden.

**Definition .43 Mittelwerte für eine Stichprobe  $\mathbf{X} = \{x_1, \dots, x_N\}$  mit  $N$  Elementen**  
 Arithmetischer Mittelwert                      Medianwert

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (6.6a) \qquad \tilde{x} = \begin{cases} x_{\frac{N}{2}} & \text{für } N \text{ ungerade} \\ \frac{x_{\frac{N}{2}} + x_{\frac{N}{2}+1}}{2} & \text{für } N \text{ gerade} \end{cases} \quad (6.6b)$$

Der Medianwert ist, verglichen mit dem arithmetischen Mittelwert, unempfindlich gegen einzelne Ausreißer, d. h. einzelnen wenigen Werten, die sehr weit von den anderen abweichen.

**Definition .44 Varianz und Standardabweichung,**

Empirische Varianz

Empirische Standardabweichung

$$s_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)^2 \quad (6.7a) \qquad s_x = +\sqrt{s_x^2} \quad (6.7b)$$

Größe	Matlab	SQL
$\bar{x}$	mean(X)	AVG( )
$s_x$	std(X)	STDDEV( )

**Tab. 6.2:** Anweisungen zur Berechnung statistischer Größen

Kenngrößen können, wie in Tabelle 6.2 zu sehen, in verschiedenen Programmen durch einfache Abfragen oder Funktionsaufrufe berechnet werden.

Die Abbildung 6.2 zeigt noch einmal die Daten aus Abbildung 6.1 im Original, umsortiert und manipuliert. Mittelwerte und Standardabweichungen sind unabhängig von der Reihenfolge. Nur die andersartige Anordnung in Abbildung 6.2 sorgt für einen vollkommen unterschiedlichen Eindruck und eine Suggestion: Die Unordnung der ersten Darstellung geht über in ein positiv erscheinendes Wachstum. Auch wenn Stichproben als Mengen geschrieben, für die die Reihenfolge der Elemente keine Rolle spielt, darf diese nicht ignoriert werden.

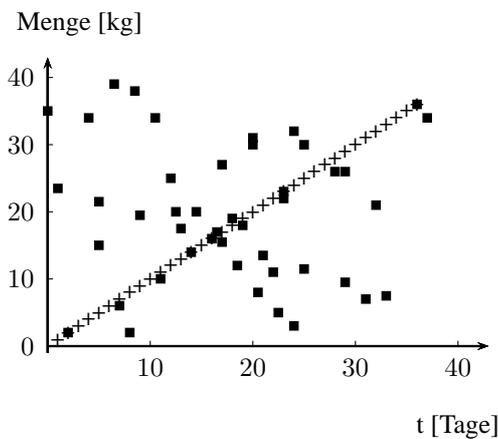
Auch Abbildung 6.3a zeigt eine **Zeitreihe** mit überwiegend ansteigendem Verlauf, erkennbar, jedoch nicht so deutlich wie eben und auch nicht für alle Zeiten. Hier zeigt sich die beobachtete Kurve  $\mathbf{X}(t)$  als eine Überlagerung mehrerer einzelner Komponenten, einem

Die Standardabweichung  $s_x$  sagt aus, dass 66 % aller Werte einer Stichprobe  $\mathbf{X}$  im Intervall  $[\bar{x} - s_x, \bar{x} + s_x]$  liegen. Umfasst die Stichprobe nur ein einziges Element, ist also das Experiment tatsächlich nicht wiederholt worden, wird  $s_x$  und damit dieses Intervall unendlich breit. Die hier beschriebenen statistischen

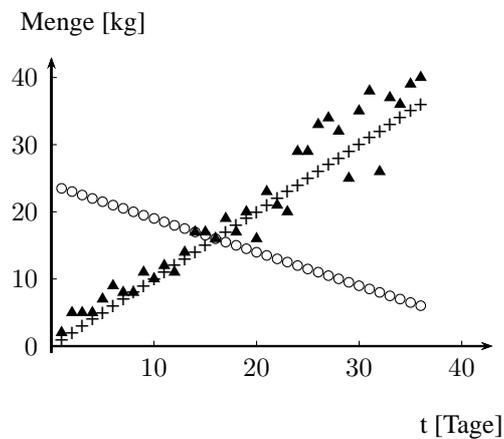
**Exkurs 6.2 online Berechnung der Varianz**

Da für die Berechnung mit Gleichung (6.7a) der Mittelwert benötigt wird, kann diese nur benutzt werden, wenn bereits alle Werte vorliegen. Die Berechnung hat in zwei Stufen zu erfolgen. Die folgende Umformung gestattet eine mitlaufende Berechnung, d. h. eine neue Berechnung immer dann, wenn ein neuer Wert hinzu kommt, ohne dabei immer wieder neu beginnen zu müssen. Nicht einmal die bisher verwendeten Werte müssen gespeichert werden.

$$\begin{aligned}
 (N-1)s_x^2 &= \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N (x_i^2 - 2x_i\bar{x} + \bar{x}^2) = \sum_{i=1}^N x_i^2 - 2\bar{x} \sum_{i=1}^N x_i + \sum_{i=1}^N \bar{x}^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N x_i^2 - 2N\bar{x}^2 + N\bar{x}^2 = \sum_{i=1}^N x_i^2 - N\bar{x}^2 \\
 \Rightarrow s_x^2 &= \frac{1}{N-1} \left( \sum_{i=1}^N x_i^2 - N\bar{x}^2 \right) \quad (6.7a')
 \end{aligned}$$



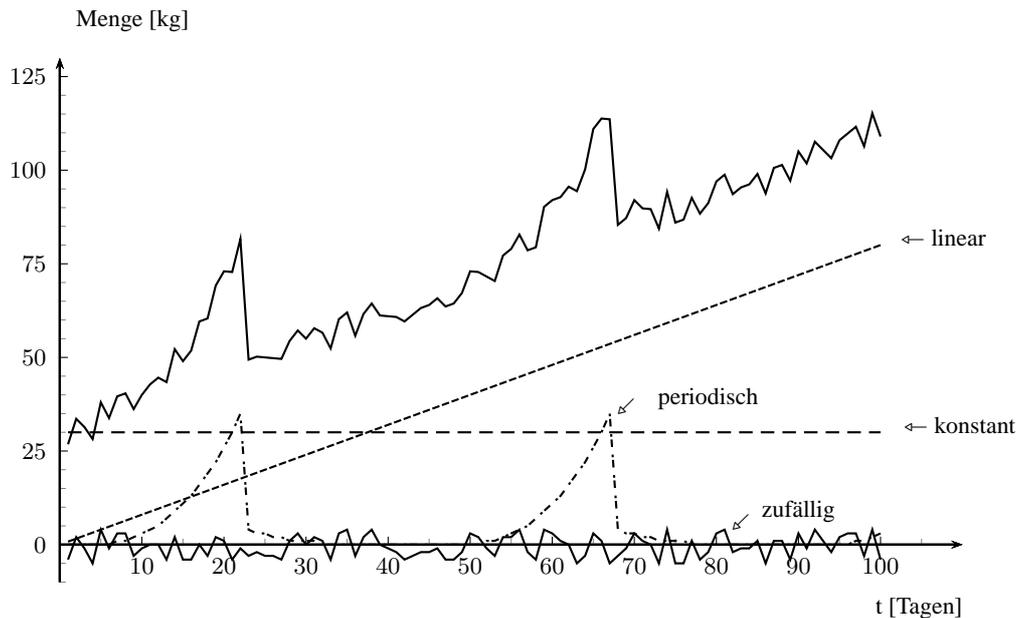
(a) Die Werte aus Abbildung 6.1 anders sortiert ...



(b) ... und manipuliert

**Abb. 6.2:** Beispieldaten für Korrelations- und Zeitreihenanalyse

+ : Kurve 1, o : Kurve 2, ■ : Kurve 3, ▲ : Kurve 4



**Abb. 6.3a:** Verkaufszahlen eines beliebigen Produktes.

- konstanten Anteil  $\mathbf{X}^{(k)}(t)$ ,
- linearen Anstieg  $\mathbf{X}^{(l)}(t)$ ,
- sich periodisch wiederholenden Anstieg und Abfall  $\mathbf{X}^{(p)}(t)$ ,
- und
- zufälligen Beitrag  $\mathbf{X}^{(r)}(t)$ .

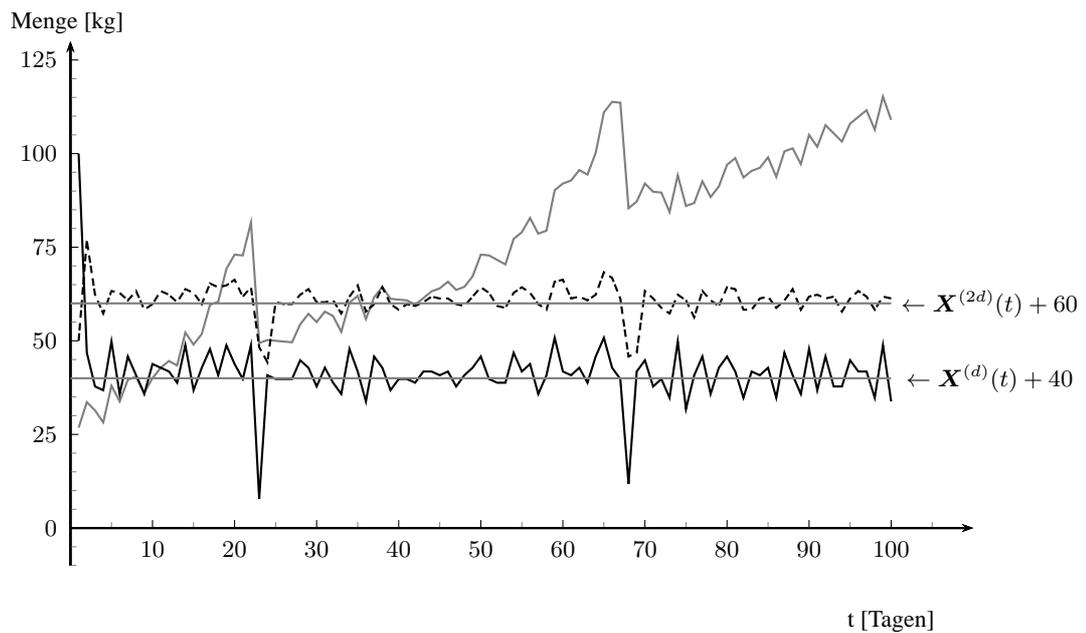
$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}^{(k)}(t) + \mathbf{X}^{(l)}(t) + \mathbf{X}^{(p)}(t) + \mathbf{X}^{(r)}(t) \quad (6.8)$$

Lässt sich an der Überlagerung nur schwer eine Systematik erkennen, sind die einzelnen ebenfalls in Abbildung 6.3a dargestellten Summanden gut zu analysieren und zu beschreiben. Allerdings sind diese Komponenten in konkreten Anwendungen nicht bekannt und es muss versucht werden, aus den beobachteten Daten, d. h. aus  $\mathbf{X}(t)$ , die erforderlichen strukturellen Informationen zu gewinnen. Einen ersten Ansatz stellen die Differenzen  $\mathbf{X}^{(d)}(t)$  und zweiten Differenzen  $\mathbf{X}^{(2d)}(t)$  aufeinander folgender Werte dar. Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass die Werte in festen zeitlichen Abständen  $\Delta t = 1$  d ermittelt wurden, gilt:

$$\mathbf{X}^{(d)}(t) = \mathbf{X}(t) - \mathbf{X}(t - \Delta t) \quad (6.9a)$$

$$\mathbf{X}^{(2d)}(t) = \mathbf{X}^{(d)}(t) - \mathbf{X}^{(d)}(t - \Delta t) \quad (6.9b)$$

Diese Differenzen sind in Abbildung 6.3b zu sehen. Da die Werte sämtlich sehr dicht an der Zeitachse liegen, sind diese um 40 bzw. 60 Einheiten verschoben. Bereits aus diesen Werten lassen sich zwei sehr wichtige Eigenschaften ableiten:



**Abb. 6.3b:** Differenzen aufeinander folgender Werte aus Abbildung 6.3a. Die graue Kurve stellen die Verkaufszahlen aus Abbildung 6.3a dar. Die durchgezogene Linie ist die Differenz gemäß Gleichung 6.9a, die gestrichelte die geglättete Differenz. Um die Kurven besser unterscheiden zu können, ist die Differenz um 40, die geglättete um 60 Einheiten nach oben verschoben. Die Verschiebungen sind durch die geraden Linien angedeutet.

(a) Mittelwerte und Standardabweichungen

Kurve		$\bar{x}$	$s_x$
1	+	18.50	10.54
2	o	14.75	5.27
3	■	20.17	11.46
4	▲	18.50	10.54

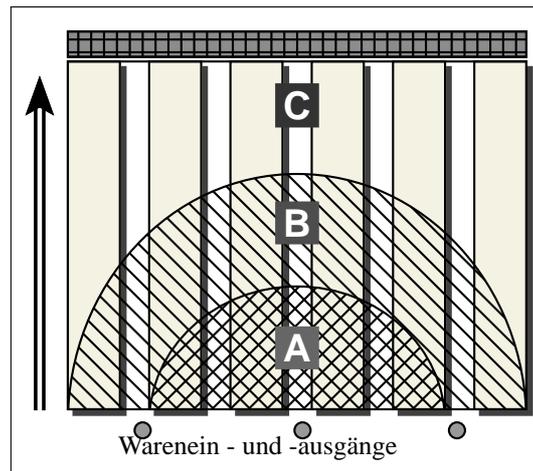
(b) Kovarianzen

	1	2	3	4
1	1.00	-1.00	-0.13	0.97
2	-1.00	1.00	0.13	-0.97
3	-0.13	0.13	1.00	-0.10
4	0.97	-0.97	-0.10	1.00

**Tab. 6.3:** Kenngrößen und Kovarianzen der Kurven aus Abbildung 6.2

- Gleichung (6.9a) ist nichts anderes als ein Differenzenquotient. Die Werte beschreiben somit eine Näherung für die Ableitung der Funktion  $X(t)$ . Der Mittelwert der gezeigten Punkte beträgt 0.830 und liegt sehr dicht an der Steigung des linearen Anteils, die 0.8 beträgt. Mit dem aus den Differenzen gefundenen Wert wird der Trend bereits recht genau bestimmt.
- Auch die Lage der periodischen Schwankungen lässt sich sehr gut aus den Differenzen ableiten. Da hier die Funktionswerte schnell variieren, zeigen auch die Differenzen starke, deutlich erkennbare Schwankungen, anhand derer sich die Positionen der Abweichungen sehr genau bestimmen lassen. In Abhängigkeit von der Qualität und der Menge der vorhandenen Daten sind möglicherweise auch noch die Form und die Höhe ableitbar.

Nr	Name	$N_i$
10	Hocker	16
11	Korpus	26
12	Tür - offen	9
13	Tür - Metall	5
14	Tür - Knauf	12
15	Fachboden	12
16	Rost	23
17	Bett-klein	14
18	Bett-gross	9
19	Liege	9

**Tab. 6.5:** Artikelliste und Bestellhäufigkeiten für die Einkäufe aus Tabelle 6.4**Abb. 6.4:** Lageraufteilung bei Einteilung nach ABC-Teilen.

Die periodischen Einflüsse lassen sich in der Regel mit bekannten Ereignissen in Verbindung bringen: Wochenenden oder Schichtwechsel können ebenso Auslöser sein wie Weihnachten oder Silvester. Feiertage, wie Ostern, oder Schulferien beeinflussen Zeitreihen ebenfalls. Da diese aber nicht in festen Abständen auftreten, wird hier von zyklisch gesprochen.

Bisher gab es stets eine Stichprobe oder eine Zeitreihe, die betrachtet wurde. In Abbildung 6.2(b) sind Daten eingezeichnet, die den Ausgangsdaten aus Abbildung 6.1 mehr oder minder ähnlich sehen. Was heißt hier ähnlich? Auch hier gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, dieses zu de-

Transaktions- nummer	Artikelnummer →										Anzahl Zonen
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	2	2	2	-	-	1	2	2	-	-	3
2	-	3	3	-	-	-	2	2	-	1	3
3	3	2	-	-	2	2	2	2	-	2	3
4	-	-	-	-	-	-	2	-	2	-	2
5	1	2	-	-	2	-	-	-	-	-	2
6	1	1	-	-	1	-	-	-	-	-	2
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
8	1	2	-	-	2	1	1	1	-	-	3
9	1	-	-	-	-	1	1	-	1	-	3
10	1	2	-	-	2	1	1	-	1	1	3
11	1	2	-	-	2	2	2	-	2	1	3
12	-	-	-	-	-	2	2	-	2	1	3
13	-	-	-	-	-	-	1	1	-	1	2
14	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-	2
15	-	3	-	3	-	2	2	2	-	-	3
16	-	2	-	2	-	-	-	-	-	1	3
17	1	1	-	-	1	1	1	-	1	-	2
18	2	-	-	-	-	-	1	1	-	-	2
19	-	2	2	-	-	1	2	2	-	1	3
20	2	1	1	-	-	1	1	1	-	-	3
Häufigkeit	11	14	5	2	7	11	15	9	6	8	

**Tab. 6.4:** Kaufmatrix, d. h. beobachtete Einkäufe bzw. **Transaktionen** oder **Warenkörbe** und die aus der ABC-Analyse, vgl. Tabelle 6.6, für jeden Einkauf anzufahrende Anzahl von Lagerzonen

finieren. Ist es bei Lottozahlen ausreichend, dass unabhängig von der Reihenfolge genau die Zahlen gezogen werden, die auf einem Tippschein stehen, so hat das für viele Anwendungen keinerlei Bedeutung.

**Ähnlichkeit** zwischen zwei Datensätzen  $X = \{x_1, \dots, x_N\}$  und  $Y = \{y_1, \dots, y_N\}$  kann als ein erkennbarer Zusammenhang zwischen diesen beiden verstanden werden. So könnten zwei Datensätze dann als ähnlich bezeichnet werden, wenn sie beide das selbe Verhalten aufweisen. Zwei Datensätze wären dann ähnlich, wenn sie beide linear ansteigend wären, unabhängig von den konkreten Werten. Ein Maß hierfür stellen die folgenden Größen dar:

**Definition .45 Kovarianz und Korrelationskoeffizient**

Für zwei Stichproben  $X$  und  $Y$  können folgende Größen definiert werden:

Kovarianz

$$s_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\bar{x} - x_i)(\bar{y} - y_i) \quad (6.10a)$$

Korrelationskoeffizient

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x \cdot s_y} \quad (6.10b)$$

Klasse	$N_r$	Name	$N_i^o$	$N_i^*$	Anteil
<b>A</b>	11	Korpus	26	135	100.00
	16	Rost	23	109	80.74
<b>B</b>	10	Hocker	16	86	63.70
	17	Bett-klein	14	70	51.85
	15	Fachboden	12	56	41.48
	14	Tür - Knauf	12	44	32.59
	19	Liege	9	32	23.70
<b>C</b>	18	Bett-gross	9	23	17.04
	12	Tür - offen	9	14	10.37
	13	Tür - Metall	5	5	3.70

**Tab. 6.6:** ABC-Analyse für die Einkäufe aus Tabelle 6.4

Für  $|r| = 1$  gibt es einen linearen Zusammenhang zwischen  $X$  und  $Y$ , für  $r = +1$  steigen die Werte von  $X$  genau so wie die von  $Y$  und für  $r = -1$  fallen sie, wenn die von  $Y$  steigen, und umgekehrt. Ist  $r = 0$  gibt es keinerlei Korrelation und Werte zwischen 0 und 1 signalisieren mehr oder minder starke Abhängigkeiten bzw. Ähnlichkeiten. Für Kurven 1 und 2 in Abbildung 6.2(b) ist  $r = -1$ , d. h. hier wachsen die Werte des einen Datensatzes so, während die des anderen fallen. Für die Kurven 1 und 4 ist  $r = 0.97$ . Der Trend ist bei beiden steigend, allerdings nicht ganz so eindeutig. Die Werte streuen im zweiten Fall deutlich sichtbar. Für die zufällig verteilten Punkte ergibt sich mit  $|r| = 0.13$  jeweils ein Wert des Korrelationskoeffizienten nahe 0, d. h. wie erwartet, kein signifikanter Zusammenhang.

Nun können nicht nur verschiedene Datensätze miteinander verglichen werden, sondern auch Datensätze mit sich selbst, z. B. um zu erkennen, ob periodische Effekte beitragen. Hier können folgende Größen eingesetzt werden:

**Definition .46 Autokovarianz und Autokorrelationsfunktion und**

Für eine Stichprobe  $X$  können folgende Größen definiert werden:

Autokovarianz

Autokorrelationsfunktion

$$s_k = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x}) \cdot (x_{i+k} - \bar{x}) \quad (6.11a) \qquad r_k = \frac{s_k}{s_0} \quad (6.11b)$$

Dass ein einziger Datensatz Quelle sehr hilfreicher Informationen sein, zeigte bereits Abbildung 6.3a. Weitere Möglichkeiten sollen anhand der in Tabelle 6.4 gezeigten, frei erfundenen, Liste von Einkäufen in einem Möbelhaus beschrieben werden. War es früher oftmals nur mit nicht vertretbarem Aufwand und hoher Fehlerquote möglich, sämtliche Kassensbons eines Tages oder gar Monats zu analysieren, so lassen sich heutzutage Ergebnisse nahezu ohne Aufwand erzielen. Werden von Vertrieb und Marketing schon lange Fragen der Art „Kaufen Kunden Bier, weil sie Chips kaufen oder kaufen sie Chips, weil sie Bier kaufen?“, gestellt und beantwortet, ist dieses in der Logistik doch eher selten der Fall. Von ABC-Analysen ist häufig die Rede, aber was bewirken diese? Was nützen diese für die Lagerplatzvergabe, wenn sie auf der Grundlage des Umsatzes erstellt werden? Statt Bier und Chips sollen Korpusse, Türen und andere Möbelteile betrachtet und die Frage gestellt werden „Kaufen Kunden einen Korpus weil sie eine Tür kaufen,

oder eine Tür, weil sie einen Korpus kaufen?“ Wie helfen Antworten auf diese Fragen oder eine ABC-Analyse zur Optimierung logistischer Prozesse, z. B. in einem Lager?

**Definition .47 Warenkorb**

*Unter einem Warenkorb werden alle zu einem Einkaufsvorgang oder einer **Transaktion** gehörenden Artikel zusammengefasst. Ein **Kassenbon** berücksichtigt zusätzlich zu den Mengen noch die Preise der Artikel.*

In den folgenden Ausführungen werden die drei Begriffe synonym verwendet. Eine Warenkorbanalyse kann sowohl auf der Grundlage von Kassenbons als auch mit Lieferscheinen oder tatsächlich mit Warenkörben durchgeführt werden. Was kann aus Tabelle 6.4, in der von Transaktionen gesprochen wird, gelernt werden? Zunächst kann durch einfaches Zählen festgestellt werden, wie häufig ein bestimmter Artikel in einem Warenkorb zu finden bzw. in wie viel Transaktionen er enthalten ist. Diese Zahlen sind in der untersten Zeile von Tabelle 6.4 angegeben. Sie geben an, wie viele der Kunden mindestens einen Artikel der zugehörigen Artikelnummer gekauft haben. Dieses ist sicher interessant für die Attraktivität eines Artikels. Für das Bereitstellen in einem Lager ist es wichtiger zu wissen, wie häufig diese auszulagern sind. Dieses kann mit einer ABC-Analyse festgestellt werden. Dieses üblicherweise nach Preis bzw. Umsatz eingesetzte Verfahren kann auch mit Bezug zu Zugriffshäufigkeiten, wie in Algorithmus 6.1 beschrieben, durchgeführt werden. Hierzu muss zunächst bestimmt werden, wie häufig ein Artikel benötigt wird, d. h. wie häufig er verkauft wird. Die Ergebnisse sind unter dem Spaltennamen  $N_i$  in Tabelle 6.5 zu finden. Diese werden nun der Größe nach sortiert und anschließend, beginnend bei dem kleinsten Wert, kumulierte Häufigkeiten  $N_i^*$  berechnet. Division aller Werte durch den Maximalwert geben dann den relativen Anteil eines jeden Produktes an den insgesamt verkauften Artikeln an. Nun können beliebige Grenzen festgelegt werden, um zu entscheiden, welche Artikel zu den A, B oder C-Teilen gehören. Oftmals werden diese Grenzen bei 80 % und 20 % gesetzt, d. h. alles, was zu dem Bereich gehört, der mehr als 80 % ausmacht, ist ein A-Teil, **Schnelldreher** oder auch **Renner**, zwischen 20 % und 80 % wird es dann zu einem B-Teil und der Rest gehört zu den C-Teilen, **Langsamdreher** oder **Penner**. Um nun Zugriffszeiten zu reduzieren, werden Lager häufig so aufgeteilt, dass A-Teile in der Nähe der Auslagerungsplätze liegen, B-Teile etwas weiter entfernt und C-Teile ganz hinten, so wie in Abbildung 6.4 skizziert.

Ob diese Strategie die geeignetste ist, kann nur anhand möglicher Ziele beantwortet werden, die in einem Lager verfolgt werden sollen. Soll die Auslagerungszeit

- je Artikel,
- je Bestellung
- oder
- insgesamt

möglichst kurz sein?

Wird das Lager wie in Abbildung 6.4 in verschiedene Zonen aufgeteilt, können die einzelnen Teile je nach Klassenzugehörigkeit in die entsprechenden Zonen eingelagert werden. Die Korpusse und die Lattenroste liegen nun dicht an dem Auslagerungsort und die seltener benötigten Liegen weiter hinten im Lager. In diesem sind nun unglücklicherweise auch die offenen Türen und die mit den Metallgriffen als C-Teile untergebracht. Die Konsequenzen sind in der Tabelle 6.4 noch einmal dargestellt. Die Markierung steht für die Zugehörigkeit der entsprechenden Produkte zu den eben bestimmten Klassen und die Zahl in der letzten Spalte für die Anzahl der verschiedenen Klassen, die auf dem jeweiligen Bestellschein gefunden werden. Bis auf wenige Ausnahmen ist hier immer eine 3 zu finden. Für das Auslagern bedeutet dieses, dass für die betreffenden Bestellungen alle drei den Klassen zugeordneten Regionen aufgesucht werden müssen, mit daraus

**Algorithmus 6.1 ABC-Analyse** Die Verweise beziehen sich auf die Tabelle 6.6

**Variablen**

$$\begin{array}{ll}
 N_i & : \text{Anzahl der Zugriffe auf den Artikel } i \\
 N_i^{(o)} & : \text{Anzahl der Zugriffe auf den Artikel an Position } i \text{ der sortierten Liste} \\
 N_i^* = \sum_{j=1}^i N_j^{(o)} & : \text{kumulierte Anzahl der Zugriffe auf den Artikel an Position } i
 \end{array}$$

**Berechnung**

- Sortiere die Zugriffszahlen der Größe nach - Spalte  $N_i^{(o)}$
- Berechne die kumulierten Zugriffszahlen - Spalte  $N_i^*$
- Bestimme den Anteil der kumulierten Zugriffszahlen an der gesamten Anzahl - Spalte Anteil
- Ordne die Anteile den einzelnen Klassen zu - Spalte Klasse

resultierenden langen Wegen. Nun muss die Auslagerung nicht unbedingt so organisiert sein, dass jeweils eine Bestellung als Ganzes bearbeitet wird, aber oftmals lässt sich dieses nicht vermeiden, z. B. dann, wenn das Lager ein Abhollager ist, in dem Kundenaufträge nicht gebündelt werden können. Eine weitere zu beachtende Frage ist, wie sich eine ABC-Aufteilung saisonal ändert oder regionale Eigenheiten aufweist.

Welche Möglichkeiten gibt es, die Wege zu verkürzen? Hier bietet sich eine **Clusteranalyse** an, bei der Artikel nach **Ähnlichkeit** gruppiert werden. Ähnlichkeit zwischen Artikeln bedeutet hier, dass sie gemeinsam in einem Warenkorb erscheinen. Natürlich kann vieles bereits im Vorfeld bestimmt werden, weil bekannt ist, dass Schränke stets eine Tür benötigen. Bei mehreren Türen, die zu einem Schrank passen, ist nicht bekannt, welche Tür verlangt wird. Es kann auch Zusammenhänge geben, die nicht so offensichtlich sind.

Die Ergebnisse einer Clusteranalyse für die gegebenen Einkäufe sind in Tabelle 6.6(a) zu finden. Spitzenreiter ist die Kombination Fachboden mit Rost gefolgt von Korpus mit Rost und Fachboden mit Korpus. Die Kombination Korpus mit Tür ist nicht auf den vorderen Rängen zu finden. Sollten sie deshalb nicht zusammen lagern?

Da es mehr Türenmodelle als Korpusse gibt, ist auch nicht zu erwarten, dass diese sehr häufig gemeinsam erscheinen, weil die einzelnen Türen selbst schon sehr selten sind. Deshalb kann eine weitere Analyse, die **Warenkorbanalyse** durchgeführt werden. Hierzu werden folgende Symbole eingeführt. Die Menge alle Einkäufe sei  $T$ , eine Transaktion  $t$  und  $|T| = 20$  die Gesamtzahl der Einkäufe.

**Definition .48 Support**

$$S(X) = |\{t \in T | X \subseteq t\}| \quad (6.12a)$$

ist die Anzahl der Transaktionen, die den Artikel  $X$  enthalten,

$$S(X, Y) = |\{t \in T | X \subseteq t, Y \subseteq t\}| \quad (6.12b)$$

(a) Clusteranalyse											(b) Warenkorbanalyse		
	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	$X$	$Y$	$\text{conf}(X \rightarrow Y)$
10	0	9	2	0	7	8	9	5	4	3	11	12	$\frac{5}{14}$ 0.36
11	9	0	5	2	7	9	10	7	3	6	12	11	$\frac{5}{5}$ 1.00
12	2	5	0	0	0	3	4	4	2	2	11	13	$\frac{2}{14}$ 0.14
13	0	2	0	0	0	1	1	1	0	1	13	11	$\frac{5}{2}$ 1.00
14	7	7	0	0	0	5	5	3	3	3	11	14	$\frac{7}{14}$ 0.50
15	8	9	3	1	5	0	11	6	5	5	14	11	$\frac{7}{7}$ 1.00
16	9	10	4	1	5	11	0	9	6	7	12	13	$\frac{0}{5}$ 0.00
17	5	7	4	1	3	6	9	0	0	4	12	14	$\frac{0}{7}$ 0.00
18	4	3	2	0	3	5	6	0	0	3	13	14	$\frac{0}{7}$ 0.00
19	3	6	2	1	3	5	7	4	3	0			

**Tab. 6.6:** Analysen der Einkäufe aus Tabelle 6.4. In der Tabelle der Warenkorbanalyse sind die confidence-Werte grau unterlegt, bei denen eine Tür an erster Stelle und der Korpus an zweiter Stelle stehen.

ist die Anzahl der Transaktionen, die  $X$  und  $Y$  enthalten.

Die Werte für jeweils einen Artikel sind die in der untersten Zeile von Tabelle 6.4 angegebenen Zahlen.

**Definition .49 Confidence**

Die confidence wird definiert als

$$C(X \rightarrow Y) = \frac{S(X, Y)}{S(X)} \quad (6.12c)$$

und sagt aus, wie häufig beim Kauf des Artikels  $X$  auch  $Y$  gekauft wurde.

Einige Werte sind in Tabelle 6.6(b) aufgelistet. Deutlich wird, dass immer dann, wenn eine Tür gekauft wurde, auch ein Korpus im Warenkorb lag, da alle *confidence*-Werte für Türen mit erstem und Korpus mit zweitem Argument immer gleich 1 sind. Dieses bedeutet, dass neben jeder Tür ein Korpus liegen oder Tür und Korpus stets auf einem gemeinsamen Weg liegen sollten. Die erste Forderung führt zu einer Abkehr von der *ABC*-Analyse, die zweite zu der Notwendigkeit einer **Routenplanung** für die Auslagerung. Wird diese auf der Grundlage einer bestehenden *ABC*-Einteilung vorgenommen, kann sie ungünstige Wege reduzieren. Da aber immer noch weite Wege durch alle Zonen aufgezwungen werden, ist keine optimale Lösung zu erwarten.

**Weisheit 6.2** Die strategische Entscheidung für eine *ABC*-Zonung in einem Lager verhindert eine optimale Lösung.

Optimale Lösungen sind nur bei einer Analyse der Zusammengehörigkeit von Artikeln zu erzielen. Da auch hier Ergebnisse saisonal und möglicherweise regional schwanken können und

Lager nicht stündlich umgeräumt werden können, ist der Einsatz sorgfältig zu überdenken und zu planen. Allein die datentechnische Realisierung großer Mengen von Warenkörben, in denen mehrere tausend verschiedene Artikel gefunden werden können, ist sehr rechenintensiv. Hier bieten beispielsweise *a priori*-Algorithmen mittlerweile Ansätze, diese auch für große Sortimente realisieren zu können. Eine solide Datenbasis und eine geeignete Ziel- oder Kostenfunktion sind unverzichtbar. Auch Analysen kosten Geld und die Aufwendungen hierfür sind in den Kostenbetrachtungen zu berücksichtigen. Wenn sich als Ergebnis einer Analyse zeigen sollte, dass die Lagerplatzaufteilung ungünstig ist, muss eine Entscheidung getroffen werden, ob die bestehende geändert werden soll. Dieses könnte durch Umräumen erfolgen. Es muss der hierfür erforderliche Aufwand mit dem Nutzen verglichen werden, der durch die neue Anordnung erzielt werden kann. Alternativ kann dieses ohne zusätzlichen Aufwand durchgeführt werden, in dem jedes neu einzulagernde Teil an die neue richtige Stelle gebracht wird. Ebenso kann während laufender Ein- oder Auslagerungsvorgänge eine Umlagerung mit geringen Kosten verbunden werden. Dieses führt jeweils dazu, dass keine Lagerplatzzuordnung statisch ist, d. h. strukturelle Informationen verloren gehen. Somit ist es für Menschen kaum noch möglich, ohne Hilfe Artikel zu finden. Hier müssen geeignete technische Systeme eingesetzt werden, die das Erkennen von Objekten mit Optimierung und der Steuerung von Menschen oder Gabelstaplern verbinden. Lagerprozesse werden sehr ähnlich zu Produktionsprozessen, bei denen nach vorgegebenen Plänen gearbeitet wird. Kommissionierstrategien, aus denen sich diese Pläne ergeben, und die Lagerplatzvergabe müssen stets gemeinsam betrachtet werden.

Auch wenn dieses reichlich Optimierungspotenziale sowohl bezogen auf die Auslastung als auch auf die Leistungsfähigkeit bietet, sind noch lange nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft bzw. Quellen der Verschwendung eliminiert. Ist das betrachtete Lager eines, aus dem heraus Verkaufsstellen beliefert werden, in denen die Ware noch in Regale eingeräumt werden muss, wird die Aufgabenstellung nochmals komplexer. Die Waren sollten so angeliefert werden, dass das Einräumen möglichst schnell geht. Zum einen, weil die benötigte Zeit natürlich Mitarbeiter bindet, zum anderen aber auch, weil herumstehende Paletten oder Rollcontainer die Attraktivität eines Geschäftes mindern und die Produktpräsentation stören. Auch bei der Versorgung einer Produktion kann eine gegebene Lagerplatzvergabe weitere Vorgänge behindern oder unterstützen. Eine ganzheitliche Betrachtung ist sicher nicht einfach, aber notwendig, um nachhaltig Verschwendung zu vermeiden. Ganzheitlich meint sowohl die beteiligten Akteure als auch die Analyse sämtlicher Daten.

*Wenige Menschen denken, und doch wollen alle entscheiden.*

Friedrich II. der Große, 1712-1786

# 7

## Entscheidungsfindung

### 7.1 Analysebasiert

In den letzten Kapiteln sind Methoden sowohl für die erste als auch die letzte der auf Seite 17 aufgeführten vier Phasen eines Projektes beschrieben worden. Zwischen dem Planen und Analysieren muss eine der möglichen Alternativen realisiert und betrieben werden. Aber welche? Gibt es nur eine Möglichkeit, ist es einfach, eine Entscheidung zu treffen. Es muss nicht einmal gefragt werden, ob diese schlecht oder gut ist. Wie beim Vorliegen eines einzigen experimentellen Ergebnisses gibt es keine Möglichkeit, die Qualität der Entscheidung zu bewerten. Häufig kommen Zielkonflikte hinzu, die selbst beim Vorliegen mehrerer Varianten eine Beurteilung erschweren. Ist eine Bewertung nicht möglich, kann gewürfelt werden. Die Frage nach produktionsgerechter Logistik, logistikgerechter Produktion, vertriebsgerechter Logistik oder logistikgerechtem Vertrieb lässt sich nicht allein mit mathematischen Methoden beantworten. Hier vorgestellte Verfahren ermöglichen es, eine gewählte Strategie zu verbessern, eine Entscheidung zu bewerten und die Konsequenzen deutlich zu machen. Der Einsatz von Methoden muss von Wissen, Beobachtungen und daraus abgeleiteten Erfahrungen unterstützt werden. **Skelettierer** und **Beobachter** sind hierbei unverzichtbare Teilnehmer.

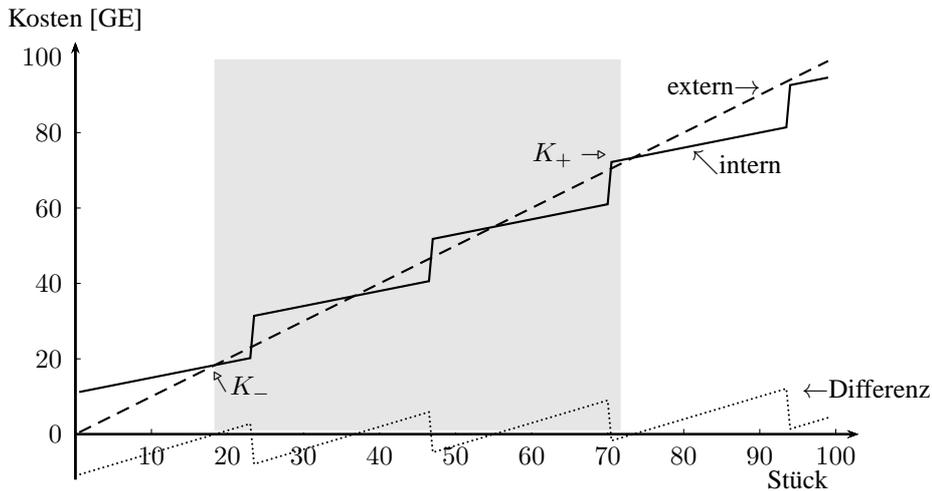
Auch wenn die im letzten Kapitel in Abbildung 6.3a gezeigten Daten nicht das Ergebnis einer Momentaufnahme bzw. Einzelbeobachtung waren, so können sie sich als Folge eines besonderen Ereignisses ergeben haben. War die Nachfrage nach dem Hocker vielleicht das Ergebnis einer Werbeaktion? Zusammenhänge ändern sich im Laufe eines Jahres. Grillkohle, Sonnenmilch und Adventskalender werden nur äußerst selten gemeinsam auf einem Kassensbon zu finden sein und sind auch nicht das ganze Jahr A-Artikel, aber vielleicht für einige Wochen oder Monate. Die saisonalen oder periodischen Schwankungen treten möglicherweise nur im Zusammenhang mit anderen periodischen Verläufen auf. All dieses macht es schwer, richtige Entscheidungen effektiv und effizient zu finden, eine methodische Unterstützung kann hier helfend eingesetzt werden. Für jedes zu lösende Problem muss unterschieden werden, ob alle entscheidungsrelevanten Daten

bereits zum Zeitpunkt der Entscheidung vorliegen oder nicht – es muss beantwortet werden, ob es sich um eine online oder offline Fragestellung handelt.

**Definition .50 offline und online Entscheidungsprobleme**

Bei der offline-Formulierung sind alle zur Entscheidungsfindung erforderlichen Informationen im Moment der Entscheidungsfindung bekannt. Diese müssen nicht in Form sicherer Informationen vorliegen. Bei einer online-Formulierung stehen die Informationen nur teilweise zur Verfügung oder können sich im Laufe der Entscheidungsfindung und auch während der Realisierung noch ändern.

Bei einer offline-Problematik können Analysen unterschiedlicher Art und Güte während des Entscheidungsprozesses durchgeführt werden. Bereits hierbei sind viele Einflussgrößen zu beachten, deren Auswirkungen erst in Zukunft sichtbar werden. Wenn vieles vage bleiben muss, so sollten zumindest die Aspekte konkret bewertet werden, die dieses zulassen, wie das folgende Beispiel zeigt. Hierbei geht es um die vielfach diskutierte Frage, ob eine Produktion im eigenen Haus durchgeführt oder fremd vergeben werden soll. Natürlich spielen Konzentration auf Kernkompetenz, *know how*-Transfer, Abhängigkeit von externen Dienstleistern eine Rolle. Wie viele Projekte zeigten, sind Kosten, besser Geldbeträge, am Ende dominant. Zumindest diese sollten klar und deutlich dargestellt werden und zusätzlich die anderen Aspekte beleuchtet werden.



**Abb. 7.1:** Vergleich interne und externe Fertigung mit  $C = 47$  Stück,  $k_x^{(e)} = 0.50$  GE je Stück,  $k_x^{(i)} = 0.20$  GE je Stück,  $k_M = 11$  GE je Maschine. Die durchgezogene Linie sind die Kosten für die Eigenfertigung aus Gleichung (7.1a), die gestrichelte die für die Fremdfertigung aus Gleichung (7.1b). Die gepunktete Linie zeigt die Differenz aus externen und internen Kosten. Grau hinterlegt ist der Bereich, in dem es von der Stückzahl abhängig ist, ob die interne oder die externe Fertigung kostengünstiger ist. Links von diesem Bereich führt die externe Fertigung stets zu geringeren Kosten, rechts davon immer die interne.

**Beispiel .30 make or buy**

Ein Unternehmen produziert für einen Adventskalender verschiedene Pralinen mit und ohne Nougat. Für die Pralinen ohne Nougat ist ausreichend Produktionskapazität vorhanden, für die

*Nougatpralinen fehlt Maschinenkapazität. Die zu beantwortende Frage lautet, ob neue Maschinen angeschafft oder die Produktion an ein externes Unternehmen vergeben werden soll.*

*$x$  sei die zu produzierende Stückzahl,  $k_x^{(i,e)}$  die Kosten je Stück bei interner -i- bzw. externer -e- Fertigung,  $k_M$  die Kosten je anzuschaffender Maschine und  $K^{(i,e)}(x)$  die Gesamtkosten für die beiden Alternativen. Ist  $C$  die Kapazität einer Maschine, ergibt sich für die Produktionskosten von  $x$  Stück bei Eigen- oder interner Produktion  $K^{(i)}(x)$ :*

$$K^{(i)}(x) = \underbrace{k_x^{(i)} \cdot x}_{\text{variabel}} + \underbrace{k_M \lceil \frac{x}{C} \rceil}_{\text{sprungfix}} \quad (7.1a)$$

*und im Fall der Fremdproduktion  $K^{(e)}(x)$ :*

$$K^{(e)}(x) = \underbrace{k_x^{(e)} \cdot x}_{\text{variabel}} \quad (7.1b)$$

*Um Verwirrungen vorzubeugen eine kurze Anmerkung zu den Einheiten:  $k_x^{(e,i)}$  sind Kosten je Stück,  $k_M$  Kosten je Maschine,  $x$  die Stückzahl und  $\lceil \frac{x}{C} \rceil$  ist die Anzahl der Maschinen.*

Auch wenn diese Darstellung der Kostenfunktion einige praktische Wünsche offen lässt, können erste Eigenschaften aus den Gleichungen (7.1a) und (7.1b) und den dazu gehörenden Graphen in Abbildung (??) abgelesen werden. Die Kosten bei Eigenfertigung zeigen einen stufenförmigen Verlauf, der durch die sprungfixen Investitionskosten hervorgerufen wird. Selbstverständlich ist das Vorzeichen der Differenz, d. h. welche der beiden Alternativen die günstigere ist, von der produzierten Stückzahl abhängig. In dem grau hinterlegten Bereich sind abhängig von der Stückzahl entweder die Eigen- oder die Fremdfertigung kostengünstiger. Immer dann, wenn eine neu hinzu kommende Maschine nur wenig ausgelastet wird, ist die Fremdfertigung vorzuziehen, später dann die Eigenfertigung. Zu erkennen ist, dass der Bereich, in dem die Eigenfertigung vorteilhaft ist, d. h. dort, wo die Differenz positiv ist, mit zunehmender Stückzahl immer breiter wird, bis die interne Produktion unabhängig von der Stückzahl  $x$  immer die bessere Variante wird. Links von dem grauen Bereich und für  $k_x^{(e)} \leq k_x^{(i)}$  ist jegliche kostenmäßige Diskussion überflüssig, hier ist die externe stets günstiger. Ist  $k_x^{(e)} > k_x^{(i)}$  wird die Breite des Bereiches, in dem die Vorteile wechseln, von dem Verhältnis von  $k_x^{(e)}$  zu  $k_x^{(i)}$  bestimmt. Mit steigendem  $k_x^{(e)}$  verschiebt sich der Bereich nach links und wird gleichzeitig schmaler.

Einem Einwand, dass dieses natürlich nicht die *gesamte Wahrheit* darstellt, kann nicht widersprochen werden. Es soll auch nur ein Anstoß sein. Gleichungen (7.1) können um weitere Kostenarten ergänzt werden. Es lassen sich auch denn verschiedene Szenarien betrachten und vergleichen. Andere Einflussgrößen, wie Abhängigkeit oder *know how*-Transfer können durch zusätzliche, quantitativ formulierte, Vorgaben eingebracht werden. So beispielsweise, wie viel es wert ist, dass der externe Dienstleister nun die Herstellung der Pralinen beherrscht und dieses möglicherweise künftig mit einem anderen Vertriebspartner oder für einen anderen Auftraggeber durchführen kann, es kommt zu Opportunitätskosten für den entgangenen Auftrag des kommenden Jahres.

Statt der Herstellung von Pralinen kann auch die Auslieferung von Waren betrachtet werden, Maschinen werden dann zu Lkws. Dieses verknüpft mit einer Prozesskostenrechnung stellt in *goodSyncRoLo* die Grundlage für eine Fuhrparkplanung dar, bei der der Einsatz eigener Fahrzeuge mit dem von Subunternehmen beliebig kombiniert werden kann.

		Nachfrage D →						$E_{u_A}$	$\sigma_{u_A}$
		4000 0.10	5000 0.15	6000 0.15	7000 0.30	8000 0.20	9000 0.10		
Auflage	5000	0	15000	15000	15000	15000	15000	<b>13500</b>	4500
	7000	-20000	-5000	10000	25000	25000	25000	<b>13750</b>	15600
A ↓	9000	-40000	-25000	-10000	5000	20000	35000	<b>-250</b>	21880

**Tab. 7.1:** Produktionskosten  $k_x = 10 \text{ €}$ , Verkaufspreis  $p_x = 15 \text{ €}$ , Fixkosten  $k_A = 10000 \text{ €}$ .  $p_i$  ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die zugehörige Nachfrage realisiert wird.

Die hier vorgenommene Betrachtung ist ein Ausschnitt dessen, was zu einer Entscheidung beitragen kann, auch weil hier, so wie zu Beginn dieses Buches angekündigt, nur Kosten und keine Preise einfließen. Eine einfache Bewertungsmöglichkeit, die sowohl Kosten als auch Einnahmen berücksichtigt, bietet eine **Entscheidungsmatrix** [EW93], die an folgendem Beispiel erläutert werden soll.

### Beispiel 31 Produktion von Adventskalendern

Ein Unternehmer plant, einen Adventskalender zu produzieren. In welcher Auflage soll der Kalender gedruckt werden? Der Verkaufspreis  $p_x$  betrage  $15 \text{ €}$  je Exemplar, die fixen Kosten  $k_A$  für eine Auflage von  $A$  Stück  $10000 \text{ €}$ , die leistungsmengeninduzierten oder Produktionskosten je Kalender  $k_x$   $10 \text{ €}$ . Der Gewinn  $G(A, D)$  für mögliche Szenarien, d. h. verschiedene Auflagen  $A$  und Nachfragen  $D$  wird durch

$$G(A, D) = \min(A, D) \cdot p_x - k_A - A \cdot k_x \quad (7.2)$$

beschrieben.

Tabelle 7.1 zeigt Ergebnisse möglicher Szenarien. Das Besondere an der Funktion (7.2) liegt darin, dass die Einnahmen gleichzeitig durch die Auflage und die Nachfrage beschränkt werden. Es können im günstigsten Fall so viele Kalender verkauft werden, wie produziert werden. Selbst bei einer sehr großen Nachfrage bleiben die Einnahmen begrenzt. Kann eine Nachfrage von 4000 Exemplaren als gesichert gelten, entsteht bei einer Auflage von 5000 Stück kein Verlust, jedoch auch nur ein bescheidener Gewinn. Bei einer Auflage von 9000 Büchern wären sowohl hohe Gewinne als auch herbe Verluste möglich.

Ist es möglich, diese Konjunktivsätze etwas abzusichern? Das Einzige, was der Verleger sicher entscheiden kann, ist die Höhe der Auflage, nicht jedoch die Nachfrage. Er kann durch gezielte Werbemaßnahmen die Nachfrage beeinflussen, ändert dadurch natürlich auch seine Kosten. Dieses bedarf nur einer Änderung des Parameters  $k_A$ , nicht einmal eines neuen Modells. Aus seiner Erfahrung kann er aber gewisse Verkaufszahlen mit Wahrscheinlichkeiten  $p_i$  belegen, wie sie in der Tabelle 7.1 auch angegeben sind. Nun könnte die Nachfrage mit der höchsten Wahrscheinlichkeit und dann die dazu gehörende Auflage mit dem höchsten Gewinn gewählt werden. Dieser Fall,  $A = D = 7000$  Stück tritt aber nur mit der angegebenen Wahrscheinlichkeit  $p_i = 0.30$  ein.

Eine andere Möglichkeit bietet der **erwartete Nutzen** oder *expected utility*. Stehen für eine zu treffende Entscheidung  $N$  mögliche Ausgänge  $A = \{A_1, \dots, A_N\}$  zur Auswahl, denen jeweils ein Nutzen  $u(A_i)$  zugeordnet werden kann und die mit den Wahrscheinlichkeiten  $p_i$  eintreffen, so ist

$$E_{u_A} = \sum_{i=1}^N p_i \cdot u(A_i) \equiv \sum_{i=1}^N R_i \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (7.3a)$$

der Erwartungswert der Einnahmen oder der erwartete Nutzen dieser Möglichkeiten. Der Nutzen einer Alternative kann hier sowohl positive als auch negative Werte annehmen, d. h. es können sowohl Gewinne als auch Verluste berücksichtigt werden. Die einzelnen Summanden

$$R_i = p_i \cdot u(A_i) \quad (7.3b)$$

stehen für das mit einer Alternative verbundene **Risiko**, ein Begriff, der oftmals fälschlicherweise synonym mit Gefahr, Gefährdung oder Schaden verwendet wird. Risiko setzt sich immer zusammen aus der **Eintrittswahrscheinlichkeit** für eine Alternative und dem durch dieses hervorgerufenen Nutzen – Schaden oder Gewinn. So führen eine Eintrittswahrscheinlichkeit von  $p = 0.01$  und ein Gewinn von  $u = 100 \text{ €}$  zu dem selben Risiko von  $1 \text{ €}$  wie  $p = 0.1$  und  $u = 10 \text{ €}$ . Es kann nun für jede einzelne Variante des Beispiels das Risiko, aber auch für jede mögliche Auflage der erwartete Nutzen berechnet werden. Die Ergebnisse für diesen erwarteten Nutzen jeder Auflage sind in der letzten Spalte dunkel unterlegt angeführt. Es zeigt sich, dass die beiden kleineren Auflagen zu fast gleichen Ergebnissen führen. Worin unterscheiden sich die beiden Alternativen? Offensichtlich in der Differenz zwischen größtem Verlust und höchstem Gewinn. Nun könnte der größtmögliche Verlust als ein Entscheidungskriterium genutzt werden. Dieses ist sicher keine gute Empfehlung. Würden in Tabelle 7.1 noch Werte für eine Nachfrage von 0 Stück ergänzt, ergäbe sich ein noch höherer Wert für diesen Verlust, der aber nur mit sehr kleiner Wahrscheinlichkeit zu erwarten und deshalb zumindest nicht mit gleichem Gewicht wie die anderen Werte zu berücksichtigen ist. Gleiches gilt für den größtmöglichen Gewinn als Entscheidungsgrundlage, da natürlich auch dieser unbegrenzt nach oben getrieben werden kann. Besser ist wiederum ein Maß, das analog zur Standardabweichung aus Gleichung (6.7a) zur Beurteilung eingesetzt wird und das die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Alternativen berücksichtigt.

$$\sigma_{u_A}^2 = \sum_{i=1}^N p_i (u(A_i) - E_{u_A})^2 \quad (7.3c)$$

Auch die hiermit erzielten Zahlen führen nicht unmittelbar zu einer Entscheidung, sie können aber genutzt werden, um zwischen verschiedenen Alternativen abzuwägen und zu einer Entscheidung zu gelangen. Zusätzlich zu absoluten Werten wird mit der Varianz noch ein Maß für die **Unsicherheit** geliefert. Um nun noch verschiedenen Sätze von Alternativen vergleichbar zu machen, müssen die Nutzenfunktionen  $u(A_i)$  geeignet normiert werden.

Kann der Nutzen wie bei der *make or buy*-Entscheidung berechnet werden, ist die Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten  $p_i$  eine der wichtigsten Bausteine für eine effiziente Logistik. Hierfür werden Daten, Informationen und Wissen benötigt. Sowohl bei der Planung einer Kalenderauflage als auch für die Fahrt von Hamburg nach München ist gutes Voraussehen eines Ereignisses Grundlage eines erfolgreichen Handelns. Ob angenehm oder unangenehm, zu wissen, was künftig geschieht, schafft Vorteile. Eine *präzise Kenntnis* des künftigen Wetters und der damit verbundenen Nachfrage nach Tomatenketchup, verhilft Produzenten, Dienstleistern und Verkäufern, ihre verfügbaren Kapazitäten rechtzeitig und genau zu planen. Das Beurteilen, ob sich ein gemeldeter Stau aufgelöst haben wird, wenn die betroffene Stelle erreicht wird, kann

eine stundenlange Verzögerung oder eine unnütze Umleitung ersparen helfen. So hat *Woolworth* durch ein erfolgreiches Vorausschauen seine Bestände um 20 % reduzieren können und dieses bei 80000 Artikeln, die in 330 Filialen an 300 Verkaufstagen verkauft werden [Ger06]. Wie kann vorhergesagt werden, was mit welcher Wahrscheinlichkeit zwei Stunden später auf einer Autobahn oder in einigen Monaten beim Verkauf eines neuen Kalenders geschieht? Im ersten Fall handelt es sich um die zeitliche Entwicklung der Zustandsvariablen eines Systems, im zweiten Fall um ein Ereignis, wie es ähnlich schon einmal beobachtet werden konnte. Es bieten sich folgende Möglichkeiten zum Vorhersagen zu erwartender künftiger Ereignisse an:

- **Prognosen**
- **Regressionsanalysen**
- **Simulationen**

### Regel 7.1 Prognoseverfahren

*Gleitender Mittelwert*

$$\hat{y}_{N+1} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} y_{N-i} \quad (7.4a)$$

*Gewogener gleitender Mittelwert*

$$\hat{y}_{N+1} = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \alpha_i y_{N-i}}{\sum_{i=0}^{m-1} \alpha_i} \quad (7.4b)$$

$$\alpha_i \in \mathbb{R}^+$$

*Exponentielle Glättung*

1. Ordnung

$$\begin{aligned} \hat{y}_{N+1}^{(1)} &= \alpha y_N + (1 - \alpha) \hat{y}_N^{(1)} \\ &= \hat{y}_N + \alpha \underbrace{(y_N - \hat{y}_N^{(1)})}_{\text{Prognosefehler}} \end{aligned} \quad (7.4c)$$

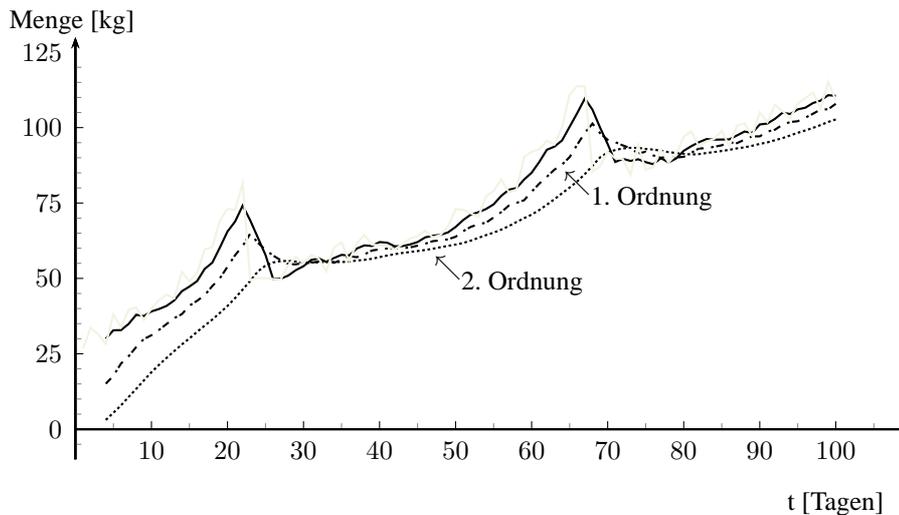
2. Ordnung

$$\hat{y}_{N+1}^{(2)} = \beta \hat{y}_N^{(1)} + (1 - \beta) \hat{y}_N^{(2)} \quad (7.4d)$$

mit  $0 < \beta < 1$

Beim Einsatz von Prognosen werden mit statistischen Verfahren, die gegebenenfalls ohne explizite Kenntnis der zugrunde liegenden Struktur angewandt werden können, aus vorliegenden Zeitreihen  $y_1, \dots, y_N$  für Zeiten  $t_1, \dots, t_N$ , erwartete Werte  $\hat{y}_{N+1}, \dots$  für zukünftige Zeiten  $t_{N+1}, \dots$  bestimmt [Mer93; MWH98; Neu06]. In Regel 7.1 sind einige der möglichen Verfahren aufgeführt. Die Berücksichtigung bestimmter Strukturen ist bei diesen Verfahren kaum möglich. Sind gleitende und gewogene gleitende Mittelwerte mit kleinem  $m$  sehr empfindlich gegen Spitzen oder saisonale Schwankungen so führen große Werte für  $m$  oder exponentielles Glätten mit kleinem  $\alpha$  stets dazu, dass diese kaum noch als Struktur zu erkennen sind. Beispiele prognostizierter Werte für die Verkaufszahlen aus Abbildung 6.3a sind in den Darstellungen 7.2 zu sehen.

Sind Gesetzmäßigkeiten – **strukturelle Informationen** – bekannt, lassen sich Ergebnisse entscheidend verbessern, d. h. die Eintrittswahrscheinlichkeiten erhöhen. Zu den möglichen struktu-



**Abb. 7.2a:** Prognosen mit Langzeitgedächtnis für die Daten aus Abbildung 6.3a. Die durchgezogene Linie zeigt die gleitenden Mittelwerte für  $m = 5$ , die gestrichelten, exponentielle Glättungen erster und zweiter Ordnung mit  $\alpha = \beta = 0.2 \dots$

rellen Informationen gehört z. B. die Kenntnis, ob Artikel zusammen gehören, Ursache-Wirkungs-Beziehungen oder das Wissen über periodische Einflüsse. Für die Fahrt von Hamburg nach München ist bekannt, dass in regelmäßigen Abständen getankt werden muss und die Größe dieser Abstände von der gefahrenen Geschwindigkeit abhängt. Ebenso kann aus der Analyse von Vergangenheitsdaten bestimmt werden, wie groß der Einfluss zufälliger Schwankungen ist. An bestimmten Stellen werden jeden Tag zur selben Zeit Verkehrsstörungen beobachtet. Dieses Auftreten kann nicht mehr als zufällig bezeichnet werden und deren Auswirkungen können zumindest abgeschätzt werden.

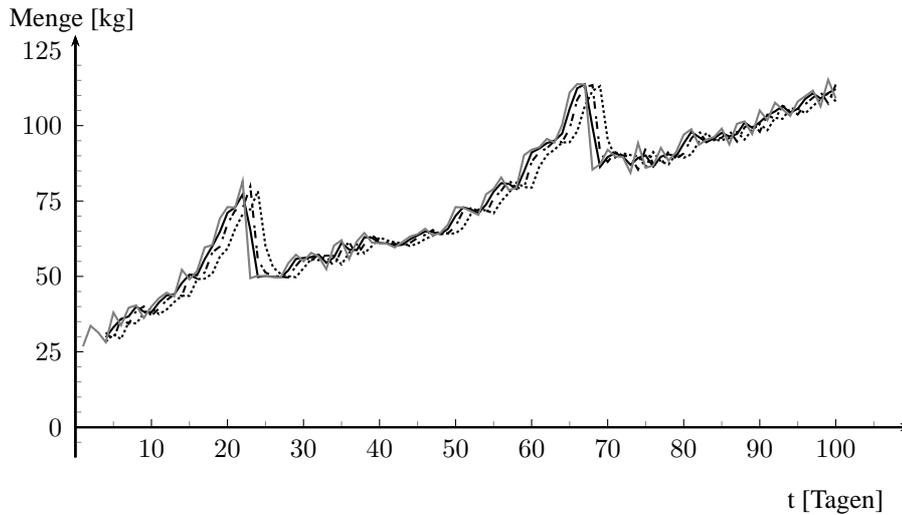
Ist die Struktur möglicher Verläufe bekannt, sind Regressionsanalysen ein hervorragendes Werkzeug, Vorhersagen für zukünftige Ereignisse zu machen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die beobachteten Werte  $y_1, \dots, y_N$  einer Gesetzmäßigkeit unterliegen und durch eine mathematische Funktion

$$y_i = f(c_0, \dots, c_M; t_i) \quad (7.5)$$

mit unbekanntem Parametern  $c_0, \dots, c_M$  beschrieben werden können. Zufälliges Schwanken ist hierbei auch als Gesetzmäßigkeit zu sehen. Bei diesem Vorgehen sind vom Anwender zwei Aufgaben zu erfüllen. Es müssen eine geeignete Modellfunktion  $f(c_0, \dots, c_M; t)$  gefunden und dann die Konstanten  $c_0, \dots, c_M$  bestimmt werden. Das Bestimmen der Konstanten ist recht einfach, indem das Minimum von

$$S^2 = \sum_{i=1}^N \left( f(c_0, \dots, c_M; t_i) - y_i \right)^2 \quad (7.6)$$

ermittelt wird. Anschaulich bedeutet dies, dass eine Funktion so gesucht wird, dass die Summe der Abweichungen der beobachteten Werte von den Funktionswerten möglichst klein wird. Die-



**Abb. 7.2b:** ... und mit Kurzzeitgedächtnis,  $m = 2$  und  $\alpha = \beta = 0.8$

ses als *Summe der kleinsten Fehlerquadrate* bekannte Verfahren kann für einfache Funktionen wie Polynome, d. h. Funktionen der Form

$$f(c_0, \dots, c_M; t) = c_0 + c_1 t^1 + \dots + c_M t^M \quad (7.7a)$$

wie z. B. für  $M = 3$

$$f(c_0, \dots, c_M; t) = c_0 + c_1 t^1 + c_2 t^2 + c_3 t^3 \quad (7.7b)$$

exakt gelöst werden. Für Funktionen, bei denen die Konstanten nicht ausschließlich linear auftreten, wie z. B.

$$f(c_0, \dots, c_2; t) = c_0 + c_1 e^{c_2 t} \quad (7.8)$$

bieten sich verschiedene numerische Verfahren an. Auch die Qualität der Lösungen, die durch die Summe der Abweichungen in Gleichung (7.6) gegeben wird, lässt sich berechnen. Sind die beobachteten Werte noch mit Unsicherheiten  $\Delta y_i$  behaftet, lassen sich deren Auswirkungen auf die Unsicherheit der Koeffizienten ermitteln. Gibt es dann überhaupt Probleme bei der Anwendung von Regressionsanalysen? Ein Problem liegt, so paradox es klingen mag, darin, dass die entstehenden Gleichungen lösbar sind. So sind im Fall von vier gegebenen Wertepaaren  $(y_1, t_1), \dots, (y_3, t_3)$  die vier Parameter aus Gleichung (7.7b) immer exakt bestimmbar. Selbst wenn das beobachtete System tatsächlich einer Funktion wie in Gleichung (7.8) folgen oder sich vollkommen zufällig verhalten würde, ergäben sich bei Verwendung der Funktion aus Gleichung (7.7b) problemlos Zahlen, kaum Ergebnisse. Hier obliegt dem Anwender die entscheidende Aufgabe, eine geeignete, d. h. die *richtige*, Modellfunktion zu finden. Führt das Hinzunehmen eines fünften Wertes dazu, dass die Abweichungen in (7.6) sehr groß werden, so wäre es fatal, das ursprüngliche Modell durch

$$f(c_0, \dots, c_3; t) = c_0 + c_1 t^1 + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 \quad (7.7b')$$

zu ersetzen. Dieses würde wieder zu einer exakten Lösung führen, die nach Erscheinen eines sechsten Wertes wieder verworfen werden müsste. Auch hier ist ein Miteinander theoretischer Überlegungen und experimenteller Untersuchungen entscheidend für den Erfolg.

**Weisheit 7.1** *Das Finden einer geeigneten Modellfunktion ist die zwingend erforderliche Voraussetzung für eine Regressionsanalyse. Das Bestimmen der unbekannt Parameter ist eine lösbare, technische Aufgabe.*

Sind die Funktionen bekannt, lassen sich leicht Funktionswerte für beliebige Zeiten, auch die gewünschten in der Zukunft liegenden berechnen.

Wie kann die Güte einer Funktion oder auch eines Prognoseverfahrens beurteilt werden? Hierzu bieten sich die bekannten Werte der Vergangenheit an. Es werden mit den ausgewählten Verfahren oder bestimmten Funktionen Prognosen für die Vergangenheit erstellt: Mit Werten der Vergangenheit werden jüngere Werte der Vergangenheit vorhergesagt. Es werden also beispielsweise  $y_1, \dots, y_{N-2}$  verwendet,  $\hat{y}_{N-1}$  bestimmt und mit dem bekannten  $y_{N-1}$  verglichen. Aus den Abweichungen dieser **ex-post-Prognosen** können Vorhersagen unbekannter Werte beurteilt und Modellannahmen validiert werden. Auch hier wird wieder deutlich, dass Daten eine entscheidende Grundlage für alles Handeln sind. Fehlerhafte Vergangenheitsdaten führen zu falschen Modellannahmen und fehlerhafter Validation.

**Weisheit 7.2** *Ohne Vergangenheitsdaten ist eine Validieren von Modellen nicht möglich. Ohne die Validation lassen sich keine belastbaren Vorhersagen für die Zukunft erstellen.*

Im Gegensatz zu den beiden anderen Vorgehensweisen bedürfen Simulationen kaum einer Erklärung. Simulationen sind Experimente, Experimente an einem Modell, wie auf S. 43 definiert, für die einzig die *richtigen* Spielregeln festgelegt werden müssen. Für eine Regressionsanalyse und für die Durchführung von Simulationen sind die Modellbeschreibung, das **Repositorium** aus Definition .19 und einige wenige technische Handwerkszeuge notwendig. Für die Modellbeschreibung ist der Anwender zuständig, wieder maßgeblich unterstützt von dem **Skelettierer** und dem **Beobachter**, das technische Handwerkszeug liefern andere.

## 7.2 Regelbasiert

Auch wenn im letzten Kapitel von Zeitreihen gesprochen wird, handelt es sich um statische Probleme oder die statische Betrachtung von Problemen. Natürlich ist es auch hierbei möglich, dass sich externe Parameter, Störgrößen, ändern. Liegen aber auch Systemparameter oder Zustandsgrößen, wie z. B. die Produktionskosten, nicht fest, können Vorhersagen nicht unverändert übernommen werden. In dynamischen System werden zumindest die Zustandsgrößen ständig verändert. In vielen Fällen werden sie durch die getroffenen Entscheidungen selbst geändert. Unsere Fahrt von Hamburg nach München aus Kapitel 2.1 kann sowohl als ein online als auch offline-Problem formuliert werden. Betrachten wir hierzu die Zustandsgröße *Verkehrsdichte*. Bei einer offline - Beschreibung würde hierfür ein konstanter Wert angenommen werden. Wird dieser nicht explizit angegeben, geht er implizit über eine Durchschnittsgeschwindigkeit in die Planung

ein. Das Ergebnis ist eine **Steuerung** oder **Regelung**. Werden Staumeldungen, d. h. Änderungen in der Verkehrsdichte, berücksichtigt, erhält das Problem online - Eigenschaften. Während des Betriebs des Systems kann festgestellt werden, ob sich die für eine Planung verwendeten Parameter ändern, d. h. es kann ermittelt werden, ob die Planungsgrundlagen und damit die erstellte Planung noch gültig sind. Die Fahrt nach München ist so langsam, Rechner und Algorithmen so leistungsfähig, dass während der Fahrt kontinuierlich neu geplant werden kann. Allerdings macht es wenig Sinn, dem Fahrer jedes Ergebnis einer neuen Planung mitzuteilen. Im Fahrzeug installierte Softwareagenten drängen sich geradezu auf um im Sinne eines *supply net event management* Meldungen richtig aufzubereiten. Hier kann eher von mehreren aufeinander folgenden offline als von einer online - Planung gesprochen werden. Auch ist in diesem Anwendungsfall eine Auswirkung der Entscheidung eines Fahrers auf das Gesamtsystem nicht beobachtbar. Da technische Realisierungen, wie z. B. *virtual spider*, nie fehler- und störungsfrei laufen werden, muss es einfache Alternativstrategien geben, die auch in Notsituationen sofort anwendbar sind. Anstelle einer neuen Planung, wie in Regel 2.4 gefordert, kann alternativ auch folgende noch einfachere Regel vorgegeben werden.

**Regel 7.2 Proaktives Handeln - Version 2**

*Wird ein Stau in einer Entfernung von weniger als einer Stunde Fahrzeit gemeldet, verlasse die Autobahn an der nächsten Ausfahrt.*

Dieses ist eine Vorgabe, die von einem Menschen ohne technische Hilfsmittel umgesetzt werden kann. Er muss nur die Fahrzeit zwischen seinem aktuellen Standort und dem gemeldeten Stau abschätzen können. Ist selbst dieses nicht möglich, kann 7.2 noch weiter vereinfacht werden.

**Regel 7.3 Proaktives Handeln - dilettantisch**

*Wird ein Stau auf der noch zu befahrenden Strecke gemeldet, verlasse die Autobahn an der nächsten Ausfahrt.*

Ob nun die von Fahrern tatsächlich getroffenen Entscheidungen besser sind, als die nach den hier vorgeschlagenen Regeln oder nicht, ließe sich nur durch einen Vergleich, d. h. ein Experiment, feststellen, bei dem zwei Fahrzeuge die verschiedenen Alternativen unter sonst gleichen Randbedingungen ausprobieren. Eine Simulation ist die einfachere und auch sicherere Variante. In dem *virtual spider* - Konzept können Simulationen sowohl auf dezentralen Fahrzeugrechnern als auch zentralen Rechnern durchgeführt werden. Sowohl Fahrzeuge als auch die Zentrale erhalten Ergebnisse, die ausgewertet und genutzt werden können.

Eine konkrete und überprüfbare Anwendung derartiger Überlegungen ist die Steuerung von Fahrzeugen, wie z. B. von Lkw - oder Gabelstaplerverkehren innerhalb von Werkgeländen, die an folgenden Beispielen diskutiert werden sollen. Hierbei handelt es sich um ein echtes online - Problem, bei dem Entscheidungen sofortige Auswirkungen haben, die wiederum beobachtet und analysiert werden können.

**Beispiel .32 Lkw-Steuerung - I**

*Vor einem Werkgelände mit 32 Entladestellen stehen 224 mit Behältern beladene, wartende Lkw. Jedes Fahrzeug hat Behälter für verschiedene Entladestellen geladen, so dass insgesamt 1346 Entladevorgänge bzw. Jobs zu betrachten sind.*

*In welcher Reihenfolge sollen die Lkw zu den Entladestellen gerufen oder geschickt werden?*

**Beispiel .33 Lkw-Steuerung - II**

Wie Beispiel .32, jedoch : In welcher Reihenfolge sollen die Entladestellen angefahren werden?

An diesen beiden Formulierungen können zwei grundsätzlich unterschiedliche Vorgehensweisen, analog zu den in Lieferketten in den Abbildungen 2.2a und 2.2b beobachteten, erkannt werden:

- Druck- oder **push-Prinzip**
- Sog- oder **pull-Prinzip**

Die Vorgabe eines der beiden Prinzipien erleichtert die Entscheidungsfindung erheblich, allerdings zu Lasten der Ergebnisqualität. Hauptgrund für schlechte Resultate ist das Nicht - Berücksichtigen des jeweils anderen Akteurs: Es werden entweder Lkw ohne Rücksicht der Entladestellen oder Entladestellen ohne Rücksicht auf die Lkw betrachtet. Von einem eine optimale Lösung anstrebenden Vorgehen kann in keinem der beiden Fälle gesprochen werden. Dafür ist für jede der beiden Vorgaben mit relativ einfachen Mitteln eine Realisierung zu finden.

Betrachten wir zunächst die Situation, bei der die Entladestellen ein Fahrzeug aus einer Menge wartender Fahrzeuge abrufen, eine Sogstrategie. In diesem Fall bieten sich die Möglichkeiten in Regel 7.4 an.

**Regel 7.4 Regeln für Fahrzeugauswahl bei Sogprinzip**

- first come first serve - fcfs / first in first out - fifo
- last come first serve - lcfs/ last in last out - lifo
- jobs in random order
- shortest job next

Da diese Überlegungen analog auf Ein- und Auslagerungsprozesse in einem Lager übertragen werden können, sind die gleichbedeutenden aber dort anders benannten Begriffe in die Liste mit aufgenommen.

Welche Konsequenzen folgen aus diesen Strategien? Der Einfachheit halber seien an dieser Stelle Fahrzeiten zwischen den einzelnen Entladestellen nicht berücksichtigt. Dieses ist für praktische Anwendungen keine Einschränkung, da Fahrzeuge bei Vorhandensein einer entsprechenden **Steuerstelle**, entsprechend der Entkopplung externer und interner Einrichtzeiten [Shi93] so rechtzeitig zu den entsprechenden Rampen geschickt werden können, dass durch das Fahren keine Verzögerung entstehen muss. Seien  $t_i^{(ff)}, t_i^{(lf)}, t_i^{(ran)}, t_i^{(short)}$  die Verweildauern des  $i$ -ten Fahrzeuges bei den entsprechenden Strategien und  $s_i^{(ff)}, s_i^{(lf)}, s_i^{(ran)}$  und  $s_i^{(short)}$  die Standardabweichungen. Dann gilt für die Mittelwerte und Standardabweichungen:

$$\overline{t^{ff}} = \overline{t^{lf}} = \overline{t^{ran}} = \overline{t^{short}} \quad (7.9a)$$

$$s^{ff} \leq s^{ran} \leq s^{lf} \quad (7.9b)$$

**Weisheit 7.3 Die mittleren Verweildauern sind unabhängig von der Strategie.**

Die *first come first serve* führt zu vielen gleich zufriedenen bzw. gleich unzufriedenen Kunden, *last-come-last-serve* zu sehr zufriedenen und zu sehr unzufriedenen. Bei einer zufälligen Auswahl liegt das Ergebnis dazwischen. Das Fahrzeug, das morgens als erstes erscheint wird bei der *lcfs*-Strategie als letztes bedient, dafür wartet das zuletzt gekommene gar nicht.

Sind in einem Werk Standgelder in Abhängigkeit der Standzeiten zu zahlen und soll die Qualität einer Strategie anhand der Höhe des Standgeldes bewertet werden, ist die Angabe eines Mittelwertes keine geeignete Kennzahl. Eine Alternative könnte der **Servicelevel** sein, der in der Form  $(75, 120)$  angegeben wird. Diese Angabe besagt, dass 75 % der Kunden in weniger als 120 Sekunden oder Minuten bedient werden. Welche Konsequenz hat es, wenn als Ziel vorgegeben wird, einen gegebenen Servicelevel realisieren zu müssen? Im Falle einer solchen Vorgabe führt die *last-come-first-serve*-Strategie, im Sinne der Einhaltung des Servicelevel, zu den besten Resultaten. Wenn die Wartezeit eines Kunden die 120 Sekunden Marke überschritten hat, ist es gleichgültig, ob dieser noch länger wartet oder nicht. Erhalten Fahrzeuge ab einer bestimmten, vertraglich vereinbarten, Verweildauer, z. B. 120 Minuten oder zwei Stunden, Standgelder, dann führt die Vorgabe eines Servicelevels dazu, dass alle Fahrzeuge über zwei Stunden gleich behandelt werden. Es spielt dann keine Rolle, ob ein Fahrzeug, das sich 2h25' auf dem Gelände befindet, noch 30' länger wartet oder eines, das bereits 8h25' wartet.

Um diese extrem langen Wartezeiten zu vermeiden, können den Fahrzeugen Prioritäten zugeordnet werden, die mit zunehmender Wartezeit oder Aufenthaltsdauer  $t_w$  steigen. Auf mögliche Unterschiede zwischen diesen beiden Zeiten soll hier nicht weiter eingegangen werden.

$$P^{(1)}(t_w) = \alpha_1 t_w \text{ mit } \alpha_1 = \text{const.} \quad (7.10a)$$

Immer dann, wenn ein Fahrzeug zu einer Entladestelle geschickt werden soll, wird das Fahrzeug mit der höchsten Priorität ausgewählt. Die Vergabe von Prioritäten aufgrund von Wartezeiten ist im Falle der Lkw-Steuerung nicht zwingend gleichbedeutend mit dem *fcfs*-Prinzip. Durch die unterschiedlichen Warte- und Arbeitszeiten an den einzelnen Entladestellen kann ein später ankommendes ein früheres überholen, da eines in dem Moment des Auswählens an einer Bedienstation entladen wird und somit nicht zur Verfügung steht.

Sollen nicht Wartezeiten sondern Standgeldansprüche niedrig gehalten werden, kann Gleichung (7.10a) modifiziert werden. Sind die ersten 120 Minuten standgeldfrei und erhöht sich der Standgeldanspruch jeweils alle 30 Minuten, kann die Priorität  $P$  mittels

$$P^{(2)}(t_w) = \beta_1 \max(0, t_w - 120) \bmod 30 \text{ mit } \beta_1 = \text{const.} \quad (7.10b)$$

bestimmt werden. Die Priorität nimmt proportional zur Nähe der nächste Stufe zu, bei der das Standgeld wieder erhöht wird. Ein Fahrzeug mit  $t_w = 140' = 2h20'$  erhält die selbe Priorität wie eines mit  $t_w = 440' = 7h20'$ . Die Addition von  $P^{(1)}(t_w)$  und  $P^{(2)}(t_w)$  führt zu einer Priorität, die das zu vermeidende Standgeld und die Wartezeit gleichzeitig berücksichtigt.

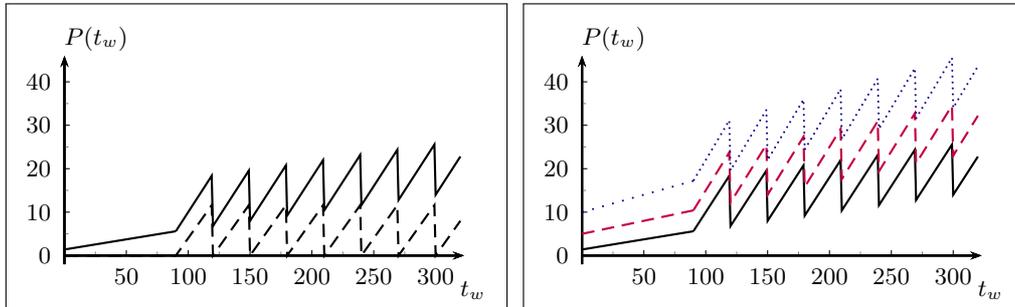
$$P(t_w) = \alpha_1 t_w + \beta_1 \max(0, t_w - 120) \bmod 30 \quad (7.10c)$$

Ein möglicher Verlauf der Prioritäten ist in Abbildung 7.3(a) gezeigt. Durch die Wahl von  $\alpha_1$  und  $\beta_1$  kann zwischen Standgeld und Wartezeit gewichtet werden.

Was geschieht, wenn Fahrzeuge ankommen, die besonders zügig abgefertigt werden sollen? Oder was passiert mit den Fahrzeugen, die ohne jeden Termin ankommen und für die keinerlei zeitlichen Restriktionen zu beachten sind? Hier können verschiedene Kategorien eingerichtet, entsprechende Auswahlregeln vereinbart oder aber Gleichungen (7.10) modifiziert und die Auswahl ausschließlich über Prioritäten vorgenommen werden.

Die Kategorien werden oftmals mit *VIP*, *A*, *B* und *C* bezeichnet. Die der Kategorie *VIP* zugeordneten Fahrzeuge sind besonders wichtig und müssen vor allen anderen bevorzugt abgefertigt

werden. In der Praxis sind dieses möglicherweise *just in time*-Verkehre oder *Engpassanstellungen*, d. h. Anstellungen, bei denen der zu erwartende Schaden, wenn sie nicht zügig abgearbeitet werden, besonders groß ist.



(a) ohne Kategorisierung der Kunden – durchgezogene Linie: Gleichung (7.10b), gestrichelt: Gleichung (7.10c) (b) Für drei Kundenkategorien, z. B. *VIP*, *A* und *B* nach Gleichung (7.11c)

**Abb. 7.3:** Prioritäten für die Lkw-Steuerung

Eine zu entscheidende Frage ist, ob ein ankommendes *VIP*-Fahrzeug ein anderes aus einer der übrigen Kategorien von einer Entladestelle verdrängen kann oder ob auch dieses privilegierte Fahrzeug solange warten muss, bis die benötigte Entladestelle frei wird. Die erste Variante führt zu einem größeren Aufwand, da wegen des zu unterbrechenden Ladevorganges ein Rangiervorgang notwendig wird und sich darum gekümmert werden muss, wohin das Fahrzeug, das bisher an der Rampe stand, zum Warten fahren soll. Die zweite Möglichkeit könnte dazu führen, dass ein Fahrzeug trotz der Zuordnung zur *VIP*-Kategorie lange warten muss. Auch hier ist eine strategische Entscheidung maßgeblich für das Systemverhalten. Die operative Ebene kann nur noch innerhalb des sich aus der strategischen Entscheidung resultierenden Rahmens agieren.

#### **Regel 7.5 Auswahl für *VIP*-Fahrzeuge – Alternative I**

*Schicke dieses sofort an die für es bestimmte Entladestelle. Wird dort ein anderer nicht *VIP*-Kunde bearbeitet, brich diesen Auftrag sofort ab.*

#### **Regel 7.6 Auswahl für *VIP*-Fahrzeuge – Alternative II**

*Schicke diesen an die für ihn bestimmte Entladestelle, sobald diese frei ist.*

Beide Regeln sagen nichts darüber aus, wie zu verfahren ist, wenn zwei *VIP*-Fahrzeuge gleichzeitig zum selben Ziel wollen.

#### **Regel 7.7 Auswahl mit absolutem Vorrang für *A*, *B* und *C*-Kunden**

*Bei Freiwerden einer Entladestelle wird stets ein Fahrzeug der höchsten nicht leeren Kategorie ausgewählt.*

*Innerhalb einer Kategorie wird jeweils das Fahrzeug mit der höchsten Priorität genommen.*

Die Prioritäten können wieder mit einer der Gleichungen (7.10) bestimmt werden. Dieses Vorgehen kann dazu führen, dass Fahrzeuge aus einer niedrigen Kategorie sehr lange warten müssen.

Um dieses zu vermeiden, werden alle Kategorien, außer *VIP* nach einer der beiden Auswahlstrategien bedient.

**Regel 7.8 Auswahl mit Vorrang für A,B und C-Kunden – Alternative I**

*Wähle abwechselnd erst drei Fahrzeuge aus der höchsten Kategorie, dann zwei aus der zweiten und dann eines aus der letzten.*

*Innerhalb einer Kategorie wird jeweils das Fahrzeug mit der höchsten Priorität genommen.*

**Regel 7.9 Auswahl mit Vorrang für A,B und C-Kunden – Alternative II**

*Lege Wahrscheinlichkeiten  $p_A, p_B$  und  $p_C$  mit  $p_A > p_B > p_C$  und  $p_A + p_B + p_C = 1$  fest. Bestimme jeweils eine Kategorie proportional zu dieser Wahrscheinlichkeit.*

*Innerhalb einer Kategorie wird jeweils das Fahrzeug mit der höchsten Priorität genommen.*

**Regel 7.10 Prioritätengesteuerte Auswahl für VIP,A,B und C-Kunden**

*Lege für jede Kategorie Basisprioritäten  $P_{VIP}^{(b)}, P_A^{(b)}, P_B^{(b)}$  und  $P_C^{(b)}$  mit*

$$P_{VIP}^{(b)} \gg P_A^{(b)} \geq P_B^{(b)} \geq P_C^{(b)} \quad (7.11a)$$

*und Koeffizienten  $\alpha_{VIP}, \alpha_A, \alpha_B, \alpha_C, \beta_{VIP}, \beta_A, \beta_B$  und  $\beta_C$ , mit*

$$\alpha_{VIP} > \alpha_A > \alpha_B > \alpha_C \quad \text{und} \quad \beta_{VIP} > \beta_A \geq \beta_B \geq \beta_C \quad (7.11b)$$

*fest und modifiziere (7.10b) folgendermaßen*

$$P(t_w) = \alpha_i t_w + \beta_i \max(0, t_w - 120) \bmod 30 + P_i^{(b)} \quad \text{mit } i \in \{VIP, A, B, C\} \quad (7.11c)$$

*Es wird jeweils das Fahrzeug mit der höchsten Priorität gewählt.*

Der Verlauf dieser Prioritäten ist in Abbildung 7.3(b) gezeigt. Alle hier aufgeführten Regeln lassen sich einfach automatisieren und können somit für eine agentenbasierte Transportsteuerung genutzt werden. So lassen sich aus der Kenntnis der Prioritäten aller und den Daten einzelner Fahrzeuge Ruhe- bzw. Pausenzeiten so einplanen, dass sie die Abläufe möglichst wenig stören. Auch bei einer von Disponenten durchgeführten Steuerung bieten diese Prioritäten eine hervorragende Grundlage, nach der entschieden werden kann. Ein wichtiger Vorteil dieses Vorgehens liegt auch darin, dass ein erforderlicher Eingriff durch einen Disponenten einfach realisiert werden kann, ohne das gesamte System und Abläufe zu stören. Der Disponent kann im Bedarfsfall für ein Fahrzeug die Basispriorität  $P_i^{(b)}$  erhöhen. Dann lässt sich dieses wie alle anderen auch weiter aus dem System heraus behandeln. Um die einmal festgelegten Regeln nicht zu sehr zu stören, können den Disponenten jeweils festgesetzte Kontingente an Prioritätspunkten zugewiesen werden, die diese im Laufe einer Schicht verbrauchen können.

Alle bisher beschriebenen Regeln berücksichtigen keine aktuellen Situationen oder sind in der Lage, auf Änderungen, z. B. in der Verteilung ankommender Fahrzeuge, zu reagieren. Hier können bisher beschriebene Konzepte miteinander verknüpft werden. Seien  $N$  Fahrzeuge zu betrachten, so kann jedem ein zu erwartender Nutzen bzw. Schaden  $u_i$  zugeordnet werden, der sich aus einem zu zahlenden Standgeld, Aufwendungen an der Entladestelle und den Kosten für die Folgen einer Störung des nachgelagerten Prozesses zusammensetzt. Wie dieser Nutzen konkret berechnet werden kann, ist vom Anwender festzulegen.

**Regel 7.11 Nutzenbasierte Auswahl**

Sind  $N$  Fahrzeuge  $C_i, 1 = i \dots N$  zu betrachten, bestimme für jedes den zu erwartenden Nutzen  $u_i$ . Wähle das Fahrzeug  $C_s$  mit

$$u_s = \max_{i=1, \dots, N} u_i \quad (7.12a)$$

Sind die Nutzenfunktionen der Anwendung angemessen definiert, erübrigt sich bei einem solchen Vorgehen die Zuordnungen von Kategorien. Dieses Vorgehen hat mehrere entscheidende Vorteile. Die oben beschriebenen Verfahren treffen eine Auswahl aufgrund des Anstellzeitpunktes. Nun können zwei bereits seit einer Stunde wartende Fahrzeuge für ein und die selbe Entladestelle bestimmt sein. Das Entladen des einen dauert siebzig Minuten, das des andere zehn Minuten. Ist nun das mit der Entladezeit von siebzig Minuten zuerst erschienen, erhält es die höhere Priorität und wird zuerst bedient. Die Entladung der Fahrzeuge ist dann nach einer Stunde plus siebzig bzw. achtzig Minuten abgeschlossen, für beide wäre, wenn ab zwei Stunden Standgeld fällig wird, diese Pönale zu zahlen. Erfolgt die Auswahl nach Gleichung (7.12a), würde das zweite Fahrzeug vorgezogen. Die Konsequenz wären Bearbeitungsenden nach einer Stunde und zehn Minuten bzw. einer Stunde plus achtzig Minuten: Nur für das zweite Fahrzeug wäre Standgeld zu zahlen. Nimmt die Anzahl der Fahrzeuge, die Anzahl der von einem Fahrzeug anzufahrenden Zielorte und die Anzahl der zu berücksichtigenden Entladestellen zu, werden diese Überlegungen noch bedeutsamer, aber auch kaum noch von Menschen durchführbar. Das zu betrachtende System ist ein dynamisches, in dem sich die Anzahl der zu betrachtenden Fahrzeuge ebenso ändert wie die Situationen an den Entladestellen. Kann eine gute Datenbasis geschaffen und bereitgestellt werden, ist folgendes Vorgehen realisierbar, bei dem der Nutzen  $u_i$  online zu  $u_i(t)$  aktualisiert wird.

**Regel 7.12 Zeitabhängige nutzenbasierte Auswahl**

Bestimme das Fahrzeug  $C_s$  so, dass

$$u_s = \max_{i=1, \dots, N} u_i(t) \quad (7.12b)$$

Es kann also jeweils der zu einem aktuellen Zeitpunkt zutreffende Nutzen oder Schaden betrachtet und berücksichtigt werden, aus einer offline wird eine online-Lösung. Die nächste Erweiterung besteht in der Betrachtung des Gesamtnutzens bzw. -schadens.

**Regel 7.13 Gesamtnutzenbasierte Auswahl**

Bestimme das Fahrzeug  $C_s$  so, dass

$$E_u = \sum_{i=1}^N u_i(t) \quad (7.12c)$$

maximal wird.

Die Auswahl ist hierbei nur noch mit geeigneten Methoden, wie sie durch **Simulationen, Optimierung** und **Informationslogistik** bereit gestellt werden, zu realisieren. Dann lassen sich auch

noch Einflüsse von und Auswirkungen auf zu beliefernden Stellen, wie z. B. Produktionsstillstände, Verfügbarkeiten und Arbeitszeitmodelle an den Bedienstationen bzw. Entladestellen, berücksichtigen. Dieses setzt wieder eine entsprechende Zielformulierung und Datenbasis voraus. Auch hier besitzen gut geplante Systeme die Möglichkeit, sich selbstlernend kontinuierlich zu verbessern. Im Gegensatz zu Menschen schaffen und erhalten Rechner eine gleich bleibende Datenbasis, die nicht durch ständige Schicht- und mögliche Mitarbeiterwechsel gestört wird.

Ist eine ganzheitliche Vorgehensweise nicht möglich, kann alternativ zu dem bisher betrachteten Sogprinzip, bei dem Fahrzeuge ausgewählt werden, wenn eine Entladestelle verfügbar wird, auch nach dem Druckprinzip vorgegangen werden. Immer wenn ein neues Fahrzeug oder ein zu erledigender Job erscheint, wird eine Entladestelle ausgewählt. Die Regeln in 7.14 stellen verschiedene Möglichkeiten hierfür dar.

**Regel 7.14 Auswahl der Bedienstation**

*Es wird vorausgesetzt, dass die Bedienstationen nummeriert sind. Für die für ein Fahrzeug möglichen Bedienstationen gibt es folgende Auswahlalternativen:*

- linear routing
- most idle station routing
- cyclic routing
- shortest service time routing

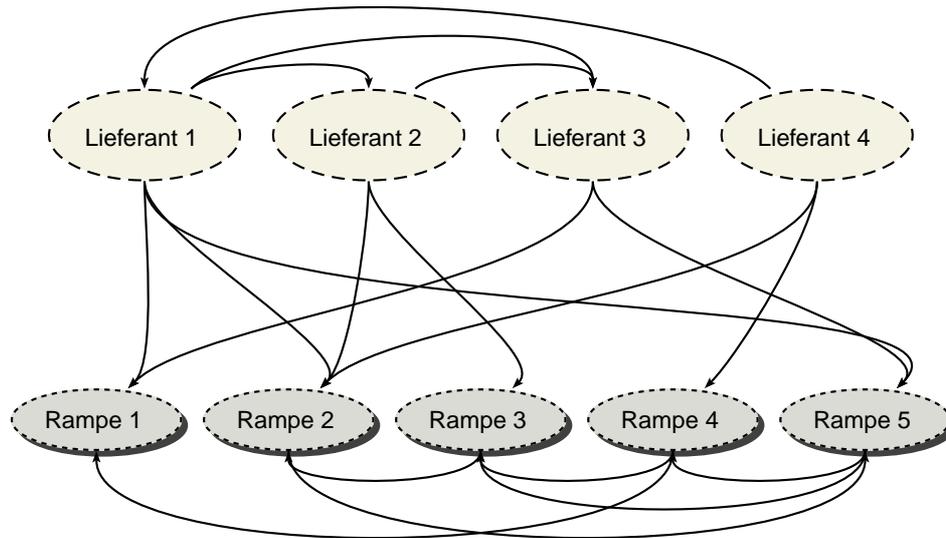
Lineares Routing führt dazu, dass die am Ende angeordneten Stationen relativ selten angefahren werden. Hierdurch bedingt, ist es möglicherweise nicht erforderlich, diese für den gesamten Arbeitstag mit Mitarbeitern zu besetzen. Alle anderen Strategien führen zu gleichen mittleren Auslastungen bei unterschiedlichen Varianzen.

**Weisheit 7.4** *Werden der Gesamtnutzen und alle Einflussgrößen konsequent betrachtet, kann auf eine Unterscheidung nach Druck- oder Sogprinzip verzichtet werden.*

Ist die Steuerung der Lkws noch mit einer Einsatzplanung von Gabelstaplern und Mitarbeitern, für die unterschiedliche Arbeitszeitmodelle vereinbart sind, verbunden, sind die hier vorgeschlagenen Strategien kaum geeignet, belastbare quantitative Aussagen zu liefern. Um die Auswirkungen derartiger Strategien in realen Systemen betrachten zu können, stellen Simulationen verknüpft mit einem Kennzahlensystem die einzige Möglichkeit dar. Ähnlich wie die *ex-post*-Prognose müssen die Simulationsergebnisse mit denen aus dem realen System verglichen werden. Die Verknüpfung von Experiment und Theorie ermöglicht es, Modelle und Modellannahmen zu validieren und numerische Verfahren zu verifizieren, um die Qualität von Entscheidungen beurteilen zu können. Das Wechselspiel von Theorie und Experiment wird künftige Entscheidungen verbessern - Simulationen und Optimierungen sind dafür unverzichtbare Werkzeuge.

## 7.3 Simulationen

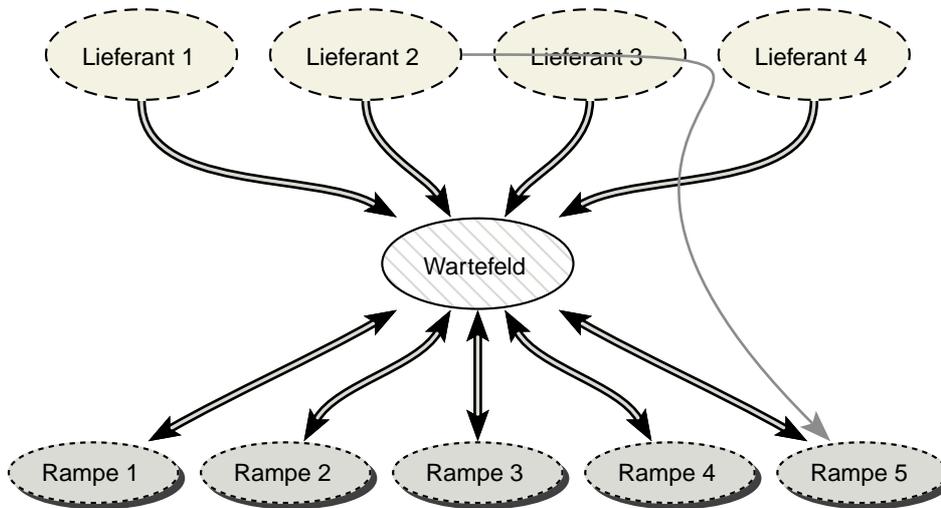
In den letzten Kapiteln sind verschiedene Möglichkeiten vorgestellt worden, um aus mehreren Alternativen eine, möglichst *die Beste*, auszuwählen. Können in vielen Fällen, wie der Lagerplatzvergabe oder der *make or buy*-Entscheidung, Alternativen mehr oder minder problemlos miteinander verglichen werden, so kann oftmals die Frage nach der Güte oder gar Richtigkeit einer Entscheidung erst lange nach der Entscheidungsfindung beantwortet werden. Noch schwerer



**Abb. 7.4a:** Modell für Waren- und Lkw-Bewegung zwischen Lieferanten und Empfänger – Variante I

wird es, wenn eine Entscheidung zu einem bestimmten Zeitpunkt getroffen werden muss, sich aber zugrundeliegende Sachverhalte danach, aber vor dem Wirksamwerden der Entscheidung, ändern. Gab es bei der ursprünglichen Entscheidungsfindung noch ausreichend Zeit, mögliche Varianten zu bedenken, muss dann *ad hoc* entschieden werden, und dieses bei gleicher Komplexität des Problems. Die Aufgabe besteht nicht nur darin, eine möglichst gute Entscheidung zu treffen, sondern dieses auch noch in der richtigen, oftmals gering bemessenen Zeit und im Einklang mit anderen Entscheidungen.

**Weisheit 7.5** *Relevante Grundlagen, Ergebnisse, Zustandsgrößen und Kennzahlen müssen auf allen Ebenen und in allen Phasen einer Entscheidungsfindung bekannt sein.*



**Abb. 7.4b:** Modell für Waren- und Lkw-Bewegung zwischen Lieferanten und Empfänger – Variante II

#### **Algorithmus 7.1 Simulation Lkw-Steuerung**

Die Simulation erfolgt in Zeitschritten  $\Delta t$ . Das Ende wird durch eine gegebene Anzahl von Fahrzeugen oder einen zu betrachtenden Zeitraum bestimmt. Jedes Fahrzeug hat einen Auftrag, der mehrere Jobs umfasst. Das Anfahren einer Entladestelle wird jeweils als ein Job betrachtet.

Wiederhole folgende Schritte bis Ende erreicht:

- Falls Fahrzeug an Werktor erscheint, übernehme Fahrzeug in das Wartefeld.
- Betrachte Wartefeld - siehe Algorithmus 7.2.
- Fahre Fahrzeuge - siehe Algorithmus 7.4.
- Entlade Fahrzeuge an Rampe - siehe Algorithmus 7.3.
- Betrachte das nächste Zeitintervall.
- Fahre Fahrzeuge - siehe Algorithmus 7.4.

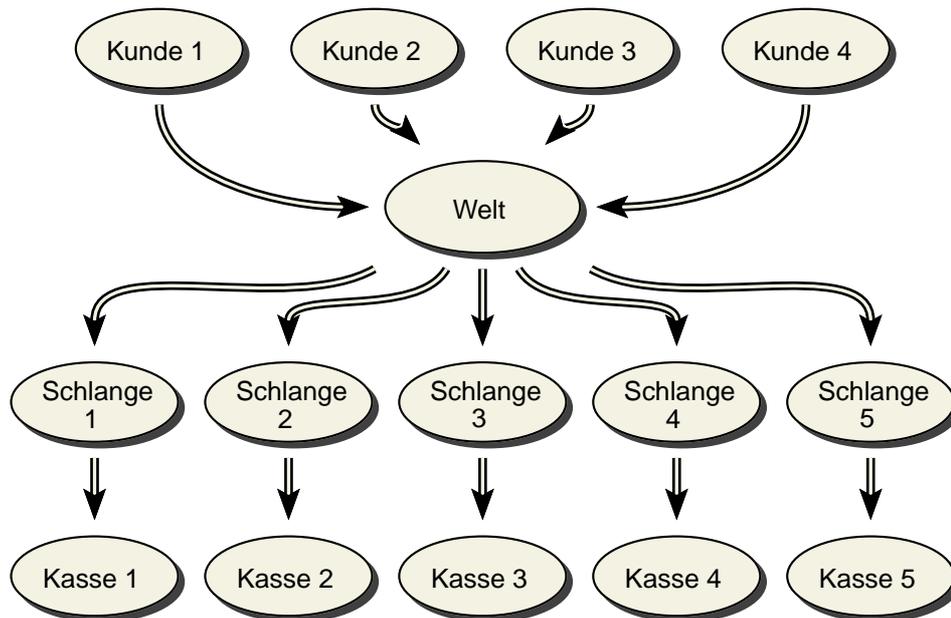
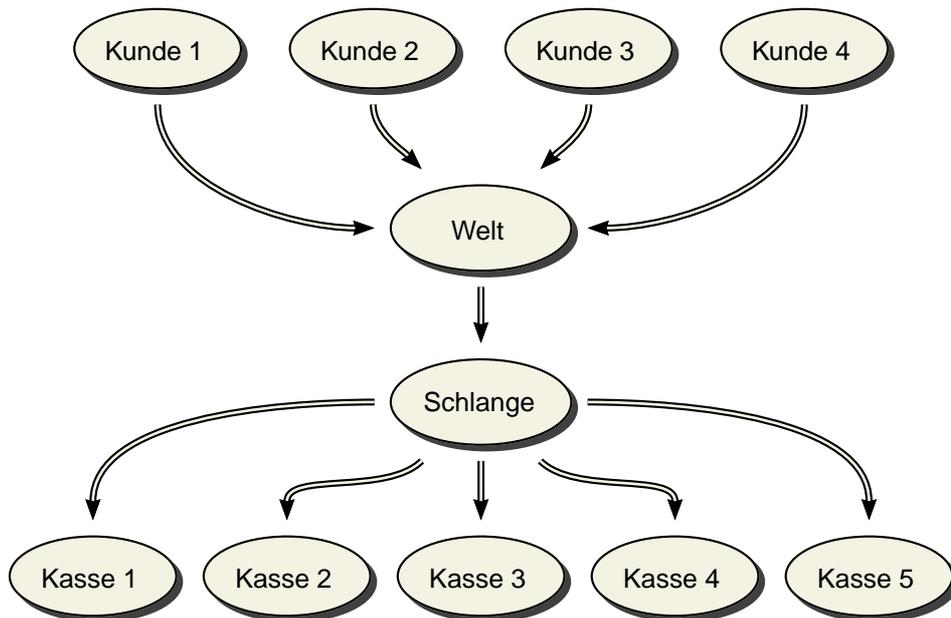


Abb. 7.5a: Warteschlangen in einem Supermarkt – Variante I

#### Algorithmus 7.2 Wartefeld

- Erhöhe die Prioritäten aller Fahrzeuge gemäß einer vorgegebenen Regel.
- Wähle von den Fahrzeugen, für die eine geeignete Entladestelle verfügbar ist eines nach einer der Regeln 7.7 - 7.13.
- Bestimme die Fahrzeit  $t_F^{(i)}$  des Fahrzeuges von aktuellem Standort zu Entladestelle und setze diese gleich der Restfahrzeit,  $t_R^{(i)} = t_F^{(i)}$ . Setze den Status des Fahrzeuges auf Auf Fahrt zu Entladestelle.
- Bestimme die Entladezeit  $t_J^{(i)}$  und setze diese gleich der Restentladezeit,  $t_R^{(i)} = t_J^{(i)}$

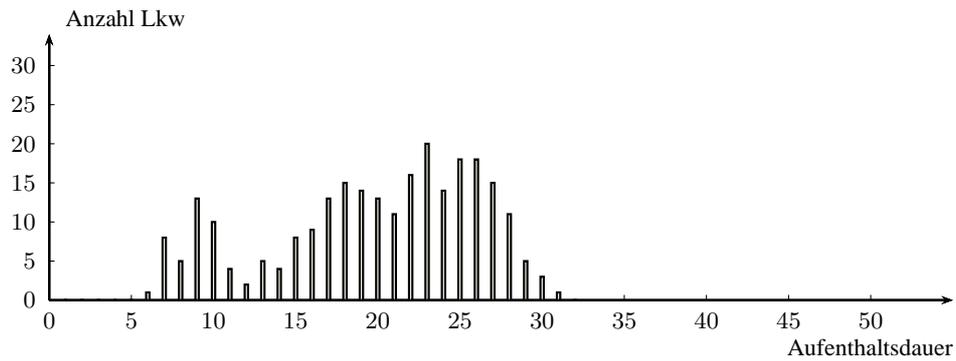
In Kapitel 3.2 wurde dargestellt, wie die Qualität von Prozessen mittels **Kennzahlen** bewertet werden kann. Die Ermittlung von Kennzahlen erfolgt üblicherweise im Nachhinein. Es kann erkannt werden, dass etwas nicht gut war. Ergänzend können **Zustandsgrößen** definiert und vorgegeben und während der Realisierung erfasst und ausgewertet werden. Dieses ermöglicht ein Erkennen von Abweichungen während des Prozessverlaufs und ist eine wesentliche Komponente von *SNEM*. Mögliche Korrekturen sind früher, aber immer noch erst dann möglich, nachdem Abweichungen beobachtet wurden, d. h. Störungen bereits aufgetreten sind. Für lang andauernde Prozesse bleibt Zeit zu reagieren und Prozesse zu ändern. Bei kurz andauernden bleibt nicht einmal kostspielige Zeit, sondern nur aufwendiges Reagieren. Um dieses vermeiden zu können, müssen Informationen so bereitgestellt werden, dass Störungen so rechtzeitig vor ihrem Auftreten erkannt werden, dass sie verhindert werden können – eine weitere wichtige Funktionalität



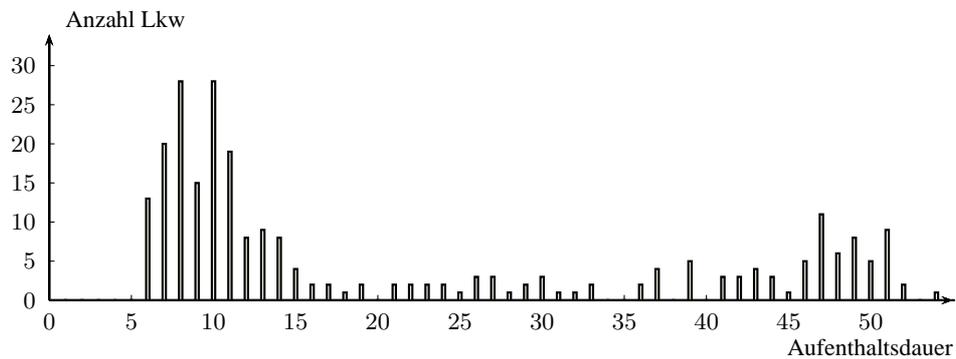
**Abb. 7.5b:** Warteschlangen in einem Supermarkt – Variante II

innerhalb von *SNEM*. Diese Forderung nach Prozesssicherheit ist mit der nach einer optimalen Lösung verbunden. Wie hier die Entscheidungsfindung verbessert werden kann, soll an folgender Fragestellung verdeutlicht werden. Wie sollen bei Steuerung von Lkws zur Materialbereitstellung innerhalb eines Werkgeländes erforderliche Wartungsarbeiten an den Gabelstaplern oder das Tauschen von Batterien berücksichtigt werden? Soll der Austausch immer am Schichtende erfolgen oder eher dann, wenn gerade eine geringe Auslastung beobachtet wird? Macht es Sinn, Batterien zu wechseln, die noch zu 50 % geladen sind? Eine ähnliche Fragestellung ist für die Planungen der Wartungsarbeiten bei ICE-Zügen [PS96] untersucht worden. Die dort formulierte Aufgabenstellung macht die vielschichtigen Fragestellungen deutlich, die beantwortet werden sollen und mittels Simulationen beantwortet werden können.

- Wann ist eine Wartung erforderlich? Müssen tatsächlich immer die festen Intervalle eingehalten werden, die so geplant sein müssen, dass auch im ungünstigsten Fall nichts passieren kann, also für fast alle Situationen viel zu eng und somit zu teuer?
- Wann stört eine Wartung den Betriebsablauf möglichst wenig? Bezogen auf die Lkw-Steuerung stellt sich die Frage, wann Gabelstapler zu einer Inspektion müssen. Dieses sollte so geplant werden, dass die Inspektionen so stattfinden, dass nicht unnötige Standgeldforderungen entstehen, weil sich die Durchlaufzeiten erhöhen.
- Bei gleichzeitig ankommenden Lkws kommt es zwangsläufig zu Wartezeiten und sich daraus ergebenden Stillstandzeiten. Ein Phänomen, das in vielen Unternehmen beobachtet werden kann, es sei denn, die Kapazitäten sind sehr großzügig, d. h. verschwenderisch, geplant und gebaut.



(a) mit Prioritäten, Produktivität 19.6 Lkw je Stunde

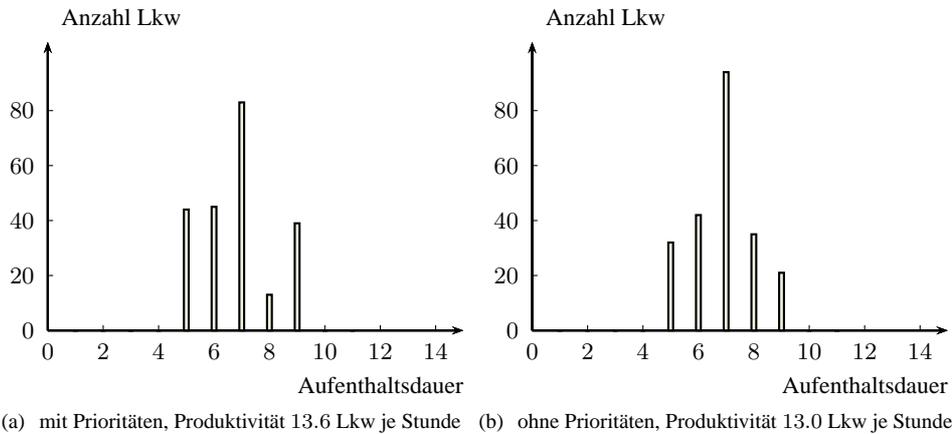


(b) ohne Prioritäten, Produktivität 19.2 Lkw je Stunde

**Abb. 7.6:** Aufenthaltsdauern von Lkws in einem Werkgelände mit 32 Entladestellen. 256 Lkw mit insgesamt 1535 Jobs erscheinen gleichzeitig morgens. Ein Intervall steht für 15 Minuten.

### Algorithmus 7.3 Entladen

- $t_R^{(i)} = t_R^{(i)} - \Delta t$
- Setze den Status des Fahrzeuges auf *Ladend*.
- Wenn  $t_R^{(i)} \leq 0$ ,
  - Schiebe Fahrzeug in das Wartefeld.
  - Bestimme den nächsten Parkplatz für das Fahrzeug.
  - Setze den Status des Fahrzeuges auf *Disponierbar* und Auf Fahrt zu Parkplatz.
  - Setze den Status der Entladestelle auf *Verfügbar*.



**Abb. 7.7:** Wie Abbildung 7.6, jedoch erscheinen die Fahrzeuge im Laufe des Tages gleichverteilt. Die Weivedauern der Lkws sind wesentlich kürzer, dafür ist die Produktivität deutlich niedriger.

#### Algorithmus 7.4 Fahren

- $t_R^{(i)} = t_R^{(i)} - \Delta t$
- Wenn  $t_R^{(i)} \leq 0$  und Status Auf Fahrt zu Entladestelle
  - Setze den Status des Fahrzeuges auf Entladend.
  - Setze den Status der Entladestelle auf Belegt.
- Wenn  $t_R^{(i)} \leq 0$  und Status Auf Fahrt zu Parkplatz
  - Setze den Status des Fahrzeuges auf Disponierbar und Wartend.

Natürlich können viele Ereignisse vorhergesagt werden, aber immer nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. So mag es eine der möglichen Alternativen geben, die kostenmäßig betrachtet extrem günstig ist. Werden auch die Kosten in der Planung berücksichtigt, die für das spätere Aufrechterhalten eines Prozesses erforderlich sind, könnte eine Auswahl möglicherweise anders ausfallen. Auch ist es wichtig, aus einer Vielzahl von Alternativen eine robuste auszuwählen, eine, die nicht bei jeder noch so kleinen Änderung gleich einer nachträglichen Reparatur bedarf. So darf eine Lkw-Steuerung nicht gleich deshalb zusammenbrechen, weil zu ladende Leerbehälter nicht verfügbar oder Batterien eines Gabelstaplers nicht mehr funktionsfähig sind.

**Weisheit 7.6** Aus den möglichen guten Alternativen ist eine zu wählen, die robust ist gegenüber äußeren Störungen.

Auch dieses muss und kann im Vorfeld betrachtet werden. So wie jedes Unternehmen, das Flugzeuge oder Autos baut, vor dem ersten Flug bzw. der ersten Fahrt mit Menschen, Versuche oder

Experimente mit **Modellen** plant und durchführt, kann dieses heute auch für logistische Prozesse umgesetzt werden.

#### **Definition .51 Simulationen**

*Simulationen sind Experimente an Modellen.*

Ergebnisse dieser Experimente liefern konkrete Grundlagen für eine rationale Entscheidungsfindung. Bevor auf weitere Einzelheiten eingegangen wird, soll an die Definitionen .15 und .16 und Klassifikation von Systemen aus Kapitel 2.3.1 erinnert werden: Dort wurden deterministische, stochastische und chaotische offene oder geschlossene Systeme angesprochen. Da deterministische in konkreten Anwendungen kaum zu beobachten sind, soll auf diese nicht weiter eingegangen werden. Ob nun ein System chaotisch ist oder nicht, lässt sich nur feststellen, wenn sämtliche Abhängigkeiten bekannt sind oder aber die Zustandsgrößen beobachtet wurden und ein Verhalten, wie z. B. in den Abbildungen 4.1, zu sehen ist. Nun sind Logistiker in der glücklichen Lage, ein natürliches System nicht ohne *wenn und aber* übernehmen zu müssen. Es können zu den von außen vorgegebenen Gesetzmäßigkeiten zusätzlich eigene Regeln und Gesetzmäßigkeiten vereinbart werden und zwar so, dass unerwünschte Eigenschaften ausgeschlossen oder zumindest unterdrückt sind. So kann bei der Versorgung mit Ketchup festgelegt werden, ob diese nach dem Sog- oder Druckprinzip erfolgen soll. Aus dieser Vorgabe resultiert bei gleichem Kundenverhalten ein unterschiedliches Verhalten des Systems. Im Falle einer Lkw-Steuerung wird oftmals nicht vorgegeben, in welcher Reihenfolge die Fahrzeuge das Werk erreichen. Es können aber Zeitfenster vereinbart und die Reihenfolge festgelegt werden, in der die Entladestellen anzufahren sind. Ebenso kann beeinflusst werden, wie lange die Fahrzeuge bei einer Entladung stehen müssen. Dieses kann direkt durch die Größe der Rampe, die Anzahl der Gabelstapler und die Position der zu entladenden Behälter auf dem Fahrzeug bestimmt werden. Dieses wiederum ist durch die Routenplanung der Spediteure oder die Lagerstruktur eines Gebietsspediteurs bestimmt und somit auch sowohl von der Logistikstrategie des Empfängers als auch von dem aktuellen Bestell- und Abrufverhalten einzelner Disponenten abhängig. Auswirkungen einzelner Entscheidungen lassen sich mittels Simulationen darstellen. Bevor aber simuliert werden kann, wird ein **Modell** benötigt. Zwei Möglichkeiten eines Modells für die **Materialbereitstellung** sind in den Abbildungen ?? gezeigt. In Abbildung 7.6 fahren einzelne Fahrzeuge nach einem *milk run*-Prinzip zu einem oder mehreren Lieferanten und innerhalb des Zielwerkes zu einer oder mehreren Entladestellen. In 7.7 erfolgt zunächst eine Erfassung der ankommenden Fahrzeuge möglichst frühzeitig in der *Welt*, d. h. bereits während der Anfahrt oder vor dem Werktor. Fahrtdaten können erfasst und genutzt werden. Eine **Lenkung** des weiteren Transportes durch eine zentrale Stelle, einer Steuerstelle oder *virtual spider* ist möglich.

In beiden Varianten nutzen die Fahrzeuge zunächst den öffentlichen Verkehrsraum, der von einer möglichen **Steuerstelle** nicht aktiv beeinflusst werden kann. Es können aber Informationen entgegenommen, aufbereitet und Pro-Aktionen eingeleitet werden. Für die Modellbildung ist zu entscheiden, was wirklich Teil des Systems ist. Die steuernde Einrichtung soll keinen Einfluss auf die ladenden Verkehre bei den Lieferanten haben. Die Fahrzeuge erscheinen, nachdem das Laden abgeschlossen ist, in der *Welt* und dann vor dem Empfangswerk. Dieser Bereich soll **Wartefeld** heißen. *Wartefeld* ist ein Synonym dafür, dass die Fahrzeuge sicht- und verfügbar sind und alle Daten bekannt sein können. Aus diesem Wartefeld heraus können dann die einzelnen Fahrzeuge nach den oben beschriebenen Regeln zu den richtigen Rampen geschickt oder von den Rampen abgerufen werden. Nach Erledigung eines Entladeauftrages begeben sie sich zurück in das Wartefeld. Dieses Wartefeld ist als ein logisches Gebilde und nicht als physische Fläche zu sehen.

Physisch kann dieses Wartefeld aus mehreren Einzelflächen bestehen. Denkbar ist eine Verteilung von Wartepositionen auf zentrale Parkplätze oder Vorstauflächen in unmittelbarer Nähe zu den Entladestellen.

Möglich sind immer noch andere Verkehre unter Umgehung dieses Wartefeldes, wie der von *Lieferant 2* nach *Rampe 5* in Abbildung 7.7 angedeutete. Dieses muss vermieden werden, wenn ein optimaler Ablauf erwünscht ist. Ist dieses Problem der Materialbereitstellung nun ein vollkommen neuartiges? Betrachten wir dazu die Abbildungen 7.5a und 7.5b. Hier sind Kundenflüsse in einem Supermarkt dargestellt. Die Lieferanten entsprechen den Kunden, die *Welt*, der nicht unmittelbar zu beeinflussende, aber beobachtbare Raum, ist die gesamte Verkaufsfläche. Es ist bekannt, dass Kunden kommen, aber nicht exakt, wann sie den Verkaufsraum betreten aber ungefähr, wie lange sie sich im Verkaufsraum aufhalten. An den Kassen erscheinen sie mit unterschiedlichen Inhalten ihrer Warenkörbe. Auch hierbei handelt es sich um ein nicht deterministisches System, für das lange vor der Inbetriebnahme die Anzahl der Kassen festgelegt werden muss. Auch dauert das Abrufen von Mitarbeitern, die zuhause in Bereitschaft stehen zu lange, um ein spontanes Reagieren zu realisieren. Ein Ändern der Struktur der Wartefelder, wie in den Abbildungen 7.5a und 7.5b skizziert ist nur mit großem Aufwand möglich.

Es gibt sicher einige Unterschiede zwischen einem Supermarkt und Lkw-Verkehren auf einem Werksgelände. Die Vergabe von Zeitfenstern und Prioritäten ist für Kunden kaum vorstellbar, dafür können sich Kunden in einer Schlange gegenseitig nicht überholen. Dieses ist bei Fahrzeugen problemlos möglich und erleichtert das Vorgehen ungemein. Demgegenüber kommt für Lkw-Verkehre erschwerend hinzu, dass diese mehrere Entladestellen anfahren müssen, Kunden hingegen sich immer nur bei einer Kasse anstellen. Durch die Einführung des *einen* Wartefeldes wird diese Erschwernis auch für die Lkw-Steuerung aufgehoben. Die Fahrzeuge werden jedes Mal wieder wie neu ankommend betrachtet. Immer dann, wenn es möglich ist, wird ein Fahrzeug ausgewählt. Werden Prioritäten vergeben oder der erwartete Nutzen betrachtet, spielt es überhaupt keine Rolle, wann das Fahrzeug und wie häufig es im Wartefeld erscheint.

Wird eine Entladestelle erst dann als verfügbar gemeldet, wenn sie wirklich frei ist und daran anschließend ein Fahrzeug zu dieser geschickt entstehen unproduktive Ruhezeiten. In praktischen Anwendungen lässt sich dieses dadurch umgehen, dass Fahrzeuge auf einem zusätzlichen Parkplatz vor der Entladestelle warten. Es wird also ein großes Wartefeld mit mehreren kleinen kombiniert. Heute zu beobachtende unproduktive Ruhezeiten der Entladestellen werden mit Platz und Ruhe- oder Wartezeiten der Fahrzeuge bezahlt. Eine gute Steuerung könnte, falls die Entladezeiten bekannt sind, Fahrzeuge vorausschauend so zu den Entladestellen schicken, dass hier keine Pufferzeiten notwendig sind. Sind die Entladezeiten nicht bekannt, kann der Mitarbeiter, der das Fahrzeug entlädt, zu einem richtigen Zeitpunkt eine Meldung, dass das Entladen des aktuellen Fahrzeuges bald beendet sein wird, an die Steuerstelle schicken. Diese Lösung ist sicher auch nicht die beste, so dass hier weitere Ansätze, unter Berücksichtigung technischer Möglichkeiten, notwendig sind, um dieses beträchtliche Einsparungspotenzial nutzen zu können. Lernfähige **Softwareagenten** eröffnen hier weitere Möglichkeiten. Wird die Anzahl der entladenden Behälter erfasst, kann ein solcher Softwareagent automatisch das Ende des Entladevorganges bestimmen. Durch eine Kommunikation mit einer Zentrale können diese Daten für die optimale Gestaltung des Gesamtsystems verfügbar gemacht werden. Wenn keine Zeiten vorliegen, die für das Entladen notwendig sind, können diese mit einem System wie *virtual spider* erfasst werden. Bei den ersten Einsätzen können nur geschätzte Werte genutzt werden. Von Vorgang zu Vorgang werden diese ohne jegliche Kosten besser und somit auch die Simulationen immer realistischer.

Für die hier beabsichtigte grobe Darstellung einer Simulation soll die Aufgabenstellung nicht weiter konkretisiert werden. Die Algorithmen 7.1 bis 7.4 skizzieren den möglichen Ablauf. Mit

dieser können bereits einige interessante Fragen beantwortet werden.

- Welche Strategie ist für eine gegebene Verteilung ankommender Fahrzeuge die beste?
- Wie wirken sich unterschiedliche Modelle für Standgeldberechnung auf die Auslastung einzelner Entladestellen aus?
- Ist es möglich, einzelne Entladestellen nur für eine eingeschränkte Zeit zu besetzen?
- Welche Potenziale ergeben sich, wenn Ladungen extern auf einem Lkw bereits so zusammengestellt werden, dass die Entladung im Werk effizienter erfolgen kann?

Für reale Systeme mit einigen zehn Entladestellen und mehreren hundert Fahrzeugen am Tag ermöglichen Simulationen zu diesen Fragen erhebliche Einsparungen, d. h. vielfältige Möglichkeiten zum Vermeiden von Verschwendung. Auch die Zeitpunkte für Wartung können mit wenigen Erweiterungen untersucht werden. Voraussetzung ist wieder, dass konkrete Kosten- und Nutzenfunktionen vorliegen. In *goodSyncInDoor* sind diese in einer parametrisierbaren Form hinterlegt. Simulationen zeigten erwartungsgemäß, dass eine Flexibilisierung der Zeiten für Wartung und Batterietausch zu beträchtlichen Einsparungen führt, auch wenn die Intervalle kürzer sind als die üblichen: Höhere Kosten führen zu einer kostengünstigeren Lösung.

**Weisheit 7.7** *Simulationen führen möglicherweise zu höheren Kosten. Diese werden durch den dabei erzielten Nutzen mehr als ausgeglichen.*

Eine weitere spannende Frage ist die nach einer Flexibilisierung von Arbeitszeiten bzw. Tätigkeiten. Soll es Mitarbeiter geben, die nur einen Teil ihres Arbeitstages entladen und die verbleibenden Stunden einer anderen Tätigkeit nachgehen? Kann es sinnvoll sein, ähnlich dem RAM eines Rechners, Ware erst auf einen schnellen Pufferspeicher zu stellen und trotz des höheren Handhabungsaufwandes geringere Kosten zu erzielen? Simulationen liefern auch allgemein gültige Ergebnisse, ihre Stärken entwickeln sie in der flexiblen Anpassungsfähigkeit an reale Umgebungen. Auch wenn es kaum Formeln gibt, bieten Simulationen die Möglichkeit, durch quantitative Analyse vieler offener Fragen gewaltige Potenziale offen zu legen.



*If the only tool you have is a hammer, you tend to see every problem as a nail.*

Abraham Maslow

# 8

## Optimierung

### 8.1 Vorgehen

Simulationen sind ein leicht und schnell einsetzbares Werkzeug, das das Spielen mit verschiedenen Alternativen ermöglicht. Gibt es viele Alternativen, ist es ratsam und notwendig, eine Strategie zu entwickeln, um die beste aller möglichen Lösungen oder vielleicht auch nur eine sehr gute finden zu können.

**Definition .52 Optimale Lösung**

*Unter einer optimalen Lösung soll die beste zu findende Lösung unter Berücksichtigung vorliegender Randbedingungen verstanden werden.*

Zu den Randbedingungen zählt auch die zur Lösung des Problems zur Verfügung stehende Zeit. Die Frage nach der kostengünstigsten Lösung lässt sich stets mit minimalem Aufwand beantworten.

**Weisheit 8.1** *Die Lösung mit den minimalen Kosten ist stets die, nichts zu tun.*

Abgesehen von dieser Trivillösung soll hier ungeachtet unterschiedlicher Ziele die Betrachtung auf Probleme beschränkt werden, bei denen Lösungen  $\mathcal{L}$  bewertet werden können. Dieses kann entweder in monetären Kosten oder allgemein durch die Definition einer Qualität oder Güte  $\mathcal{G}(\mathcal{L})$  erfolgen.

Das Bestimmen von Extremwerten von Funktionen ist sicher jedem vertraut, der dieses Buch liest. In der Logistik ist es nur ein kleiner Teil der zu lösenden Aufgabe, für ein vorliegendes Problem mathematisch eine optimale Lösung zu finden. Das Bestimmen optimaler Lösungen zerfällt in mehrere Teilschritte, die in der angegebenen Reihenfolge zu bearbeiten sind.

### Vorgehen 8.1 Bestimmen einer optimalen Lösung

- a. *Welches Problem soll gelöst werden? Welche Randbedingungen sind zu beachten?*
- b. *Welches Ziel soll erreicht werden?*
- c. *Gibt es ein oder mehrere Ziele, die zu verfolgen sind?*
- d. *Gibt es intern oder extern konkurrierende Ziele?*
- e. *Kann die Qualität der Lösung bewertet werden?*
- f. *Ist das Problem darstellbar?*
- g. *Ist das Problem lösbar?*
- h. *Wie viel Zeit steht zur Verfügung, um eine Lösung zu bestimmen?*
- i. *Wie kann die oder eine optimale Lösung bestimmt werden?*
- j. *Bestimmung der optimalen Lösung.*
- k. *Validation der Ergebnisse.*

- zu a : Die erste Frage beinhaltet die fachliche Beschreibung des Problems und der Randbedingungen und die Angabe, ob es sich um ein online oder offline Problem handelt. Ob eine durchzuführende Optimierung Kosten, liquiditäts- oder bilanzrelevante Aspekte berücksichtigen soll und wenn ja wie, muss ein Anwender formulieren. Es kann nicht von jedem Mathematiker erwartet werden, dass er diese Forderungen unausgesprochen richtig erkennt.
- zu b : Die Frage nach dem Ziel erscheint zunächst einfach, gestaltet sich in der Praxis häufig als extrem schwierig. Soll auf der Fahrt nach München die schnellste Möglichkeit gewählt werden oder eine, die mit hoher Sicherheit zu einem möglichst frühzeitigen Erscheinen führt, oder eine, die zu einem pünktlichen Erscheinen führt? Ist bei der Lkw-Steuerung eine möglichst geringe Aufenthaltsdauer der Fahrzeuge anzustreben oder soll für eine möglichst hohe Auslastung der Entladestellen gesorgt werden? Selbst die Definition eines Zieles ist nicht immer klar und eindeutig möglich. Soll im Falle einer Routenplanung für zehn Lkw die Gesamtfahrzeit aller Fahrzeuge oder die Fahrzeit der einzelnen Fahrzeuge minimiert werden. Im ersten Fall könnte es sein, dass neun Fahrzeuge jeweils die zur Verfügung stehende Zeit vollständig in Anspruch nehmen und das zehnte nur für wenige Minuten eingeplant wird. Im zweiten Fall würden alle Fahrzeuge gleichmäßig ausgelastet werden.
- zu c : Auch wenn mehrere, unterschiedlich lautende Ziele formuliert sind, heißt dieses nicht zwingend, dass dieses unterschiedliche Ziele sind. Oftmals können verschiedene Ziele so formuliert werden, dass aus mehreren eins wird. Im Falle einer Routenplanungen können das Erreichen
- einer kürzesten Strecke,
  - der geringsten Zeit oder

- den minimalen Kosten

mit den Qualitätsfunktionen  $\mathcal{G}^{(s)}(\mathcal{L})$ ,  $\mathcal{G}^{(t)}(\mathcal{L})$  oder  $\mathcal{G}^{(c)}(\mathcal{L})$  für eine Lösung  $\mathcal{L}$  als Ziele vorgegeben sein. Um den Aufgaben der Logistik gerecht zu werden, dass Ware zum richtigen Zeitpunkt eintreffen soll, ist Pünktlichkeit als ein weiteres Ziel denkbar. Wie kann nun eine Route bestimmt werden, die sehr kurz ist und bei minimalen Kosten gleichzeitig nicht zu lange dauert? Eine Addition die drei oben genannten Qualitätsfunktionen führt zu

$$\mathcal{G}(\mathcal{L}) = \mathcal{G}^{(s)}(\mathcal{L}) + \mathcal{G}^{(t)}(\mathcal{L}) + \mathcal{G}^{(c)}(\mathcal{L}), \quad (8.1a)$$

einem Ausdruck, dessen Anblick Schmerzen verursachen muss. Längen, Zeiten und Geldbeträge werden ohne Rücksicht auf Einheiten addiert. Das Ändern der Einheiten für die gefahrene Strecke von Kilometer in Meilen führt zu einer anderen Gewichtung der einzelnen Beiträge. In einem konkreten Projekt war es der Wunsch eines der Verantwortlichen, dass die Länge weniger als die Zeit berücksichtigt werden sollte. Sein Vorschlag lautete, die Länge zu ungefähr 30 % und die Zeit zu 70 % zu berücksichtigen. Gleichung (8.1a) bekäme ohne Berücksichtigung der Kosten die Gestalt

$$\mathcal{G}(\mathcal{L}) = 0.3 \mathcal{G}^{(s)}(\mathcal{L}) + 0.7 \mathcal{G}^{(t)}(\mathcal{L}). \quad (8.1b)$$

Dieses löst das Problem unterschiedlicher Einheiten nicht. Das Fortlassen von Einheiten, d. h. das Rechnen mit Zahlen anstelle von Größen, ist auch nicht zielführend, da Einheiten implizit erhalten bleiben. Kann keine exakte Kostenrechnung, besser Prozesskostenrechnung, durchgeführt werden, ist folgender einfacher Ansatz anwendbar, der sich aus der Antwort auf die oben nicht beantwortete Frage ergibt: Wie viel ist es dem Anwender wert, einen Kilometer und wie viel ist es ihm wert, eine Stunde einzusparen oder wie teuer sind 1 km bzw. 1 Stunde? Dieses überführt Längen, Zeiten und Kosten auf eine gemeinsame Basis. Die Antwort kann dem Optimierer als Parameter mitgegeben werden. Das Berechnen dieser Zahlen obliegt einer Person, die sich mit Kostenrechnung beschäftigt, nicht dem Optimierer. Hat der Anwender diese Größen bereit gestellt, kann statt (8.1a)

$$\mathcal{G}(\mathcal{L}) = \alpha_s \mathcal{G}^{(s)}(\mathcal{L}) + \alpha_t \mathcal{G}^{(t)}(\mathcal{L}) + \alpha_c \mathcal{G}^{(c)}(\mathcal{L}) \quad (8.1c)$$

verwendet werden. Abhängig von den Koeffizienten  $\alpha_s$ ,  $\alpha_t$  und  $\alpha_c$  ergeben sich verschiedene Funktionen. Eine nahe liegende Wahl ist die oben bereits eingeführte Betrachtung auf Kostenbasis. d. h.

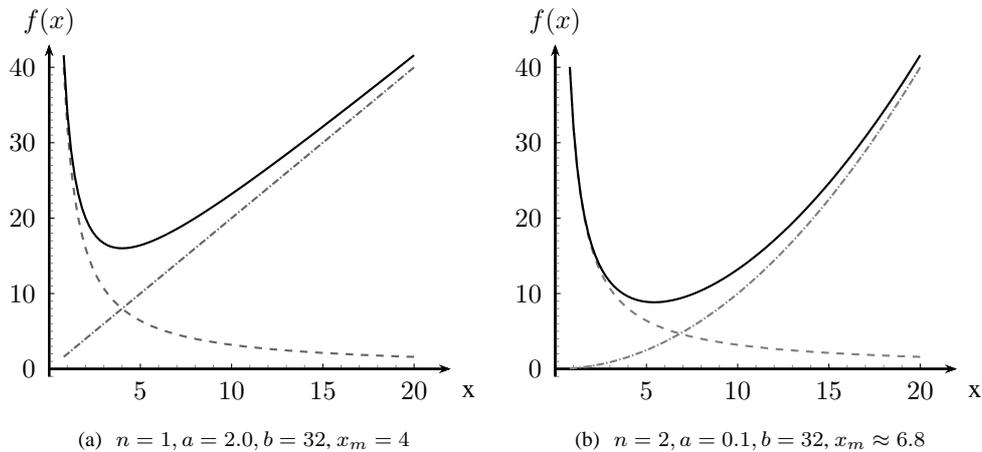
$$\alpha_l = k^{(l)}, [k^{(l)}] = \frac{\text{€}}{\text{km}}; \quad \alpha_t = k^{(t)}, [k^{(t)}] = \frac{\text{€}}{\text{h}}; \quad \alpha_c = k^{(c)}, [k^{(c)}] = \text{€} \quad (8.1d)$$

wobei  $k^{(l)}$  und  $k^{(t)}$  die Kosten je Längen - bzw. je Zeiteinheit sind. Dieses Vorgehen behebt das Problem der Einheiten. Gleichzeitig erfolgt aber auch eine Gewichtung der verschiedenen Ziele, verbunden mit einer Beeinflussung der zu erwartende Ergebnisse. Wird  $\alpha_t \approx 0$  gewählt, kann keine Lösung mit kurzer Fahrzeit erwartet werden. Der Bestimmung dieser Faktoren kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Es ist darauf zu achten, dass die Faktoren nicht Bestandteile anderer Kostenarten beinhalten. Angaben der Art 1.20 € je km, die sich aus Ausgaben für Treibstoff, Gehalt des Fahrers, Verschleiß und Abschreibung zusammensetzen, sind unbrauchbar.

**Weisheit 8.2** Für die Gewichtung der Ziele müssen Prozesskosten betrachtet werden. Die aus einer Kostenstellenbetrachtung abgeleiteten Zahlen sind unbrauchbar.

Wird bei Vorliegen mehrerer Ziele eine Gleichung der Form (8.1c) geschrieben, ist das Problem für den Anwender eines mit mehreren Zielen. Mathematisch wird es unabhängig von der Anzahl möglicher Ziele zu einer Aufgabenstellung mit einem Ziel. Die Suche nach einem Optimum kann auf Funktionen beschränkt werden, die für eine Liste von Parametern und Variablen einen Funktionswert liefern.

- zu d : Andererseits können Ziele, die als eines betrachtet werden, durchaus konkurrieren. So lautete der Titel einer Ausschreibung für ein Forschungsvorhaben *Lösungen zu intelligenter Transportsteuerung*. Ein Ziel hierbei war es, intelligente Systeme zu finden, um Kosten und Umweltbelastung zu reduzieren. Ein anderes hieß, Arbeitsplätze in Deutschland zu schaffen. Die zweite Forderung verlangt, dass mehr transportiert wird und steht in direktem Widerspruch zu dem ersten. Das Problem ist unlösbar und das Nachdenken über geeignete Algorithmen Verschwendung. Die Berücksichtigung indirekter Effekte gehört eher in den Bereich der Volkswirtschaft und verlangt eine gänzlich andere Betrachtungsweise. Konkurrierende Ziele finden sich auch bei Lkw-Steuerung. Der Empfänger möchte der Produktion angepasste Sendungen erhalten und flexibel auf kurzfristige Änderungen reagieren können. Dieses bedeutet oftmals kleine Sendungsgrößen bei schlechter Planbarkeit und geringer Auslastung. Eine geringe Auslastung führt zu hohen Kosten, die ein Einkäufer vermeiden möchte. Hohe Transportkosten sind hohe Einnahmen des Spediteurs, die dieser gerne erzielen möchte.
- zu e : Hier muss eine brauchbare Qualitätsfunktion der Art (8.1c) gefunden werden.
- zu f : Um ein Problem lösen zu können, muss es in einer geeigneten Form als **Modell** dargestellt werden können. Ist dieses nicht möglich, erübrigt sich die Suche nach einem Optimum.
- zu g : Hier helfen zunächst oftmals einfache Überlegungen, wie bei der Fahrt nach München. Können zehn Lkws eines Fuhrparks jeweils 30 Behälter laden, kann eine Planung, bei der 400 Behälter zu transportieren sind und jedes Fahrzeug nur einmal fahren darf, kein Ergebnis liefern. In vielen Fällen kann als ein Hinweis auf die Lösbarkeit eines Problems ein kurzer Blick in die Praxis helfen. Jeder laufende Prozess ist eine Lösung eines Problems. Die Existenz einer in der Praxis vorgefundenen Lösung heißt aber nicht, dass es tatsächlich eine Lösung für das beschriebene Problem gibt. Oftmals werden Randbedingungen so angepasst, dass es eine Lösung gibt. So werden Lenkzeiten oder maximale Zuladungen nicht immer so eingehalten, wie dieses gesetzlich vorgegeben ist. Ein Optimierer, der sich strikt an gesetzliche Vorgaben hält, kann mit praktischen Realisierungen oftmals nicht konkurrieren. Ein anderer Hinderungsgrund für das Finden einer optimalen Lösung stellt auch das Fehlen von Alternativen dar. Wird für eine gegebene Anzahl von Kunden eine Optimierung der Routen durchgeführt, so wird möglicherweise die Fahrzeit von acht auf sieben Stunden reduziert. Liegen keine weiteren Aufträge vor, kann die nun frei gewordene Stunde nicht sinnvoll genutzt und trotz Optimierung keine bessere Lösung gefunden werden.
- zu h : Bei zeitkritischen Problemen kann es hilfreich sein, zunächst mit einem sehr schnellen Verfahren eine gute Lösung zu finden, die nachfolgend weiter verbessert werden kann. Gleichzeitig kann diese erste Lösung auch als Vergleich für weitere herangezogen werden.
- zu i : Dieses ist der erste Punkt, bei dem von Optimierungsverfahren gesprochen werden muss. Auch wenn eine *make or buy*-Entscheidung für das Durchführen der Optimierung eine



**Abb. 8.1:** Beispiel für Andlerformel – die gestrichelte Linie zeigt  $h(x)$ , die strichpunktierte  $g(x)$ .

Fremdvergabe als Ergebnis hat, ist die Auswahl des richtigen Optimierungswerkzeuges wichtig. Andernfalls könnten bei einer späteren nochmaligen Durchführung viele der vorbereitenden Arbeiten erneut anfallen. Werkzeug bezieht sich sowohl auf Verfahren als auch die Softwarelösung, in der dieses Verfahren umgesetzt ist.

zu j : Wenn das Problem richtig beschrieben und das richtige Verfahren gewählt wurde, geht es nur noch darum, die geeignete Plattform bereitzustellen. Optimierungsverfahren für große Anwendungen können Minuten oder Stunden an Rechenzeit verbrauchen.

zu k : Auch nach dem Vorliegen der Ergebnisse sollten diese nicht einfach übernommen werden. Nicht nur Fehler in der Problemformulierung, auch mögliche Fehleingaben, z. B. Eingaben von Zeiten in Minuten statt in Stunden, können vollkommen unbrauchbare Ergebnisse liefern. Hier bedarf es einer definierten Qualitätskontrolle. Das Optimierungsprogramm ist ein Werkzeug, mit dem Ergebnisse produziert werden, die so, wie die Produkte einer Produktion behandelt werden sollten. Zur Qualitätskontrolle sollten Experimente durchgeführt werden, um Theorie und Praxis vergleichen zu können. Ist eine mit einem Algorithmus erzeugte Lösung schlechter als die praktische, so muss das nicht bedeuten, dass der Algorithmus fehlerhaft ist. Hier ist eine offene Diskussion zwischen Theoretikern und Praktikern erforderlich, die durch experimentelle Logistik unterstützt werden kann. In einem Routenplanungsprojekt für ein Entsorgungsunternehmen wurden sehr viel schlechtere Routen ermittelt als die tatsächlich gefahrenen. Bei Betrachtung der vorliegenden Wiegedaten der Fahrzeuge stellte sich heraus, dass deren *durchschnittliche* Zuladung 10% über der maximal zulässigen lag. Der Optimierungsalgorithmus ging zunächst davon aus, dass die maximal zulässige Zuladung nicht überschritten werden darf. Das Einfügen flexibler Grenzen für Zuladung und Arbeitszeit führte dann zu Touren, die besser waren als die aus der Praxis.

**Abb. 8.2:** Beispiel für eine lineare Regression mit den Daten aus Abbildung 6.3a. Die durchgezogene Linie zeigt die erhaltene Regressionsgerade, die mit Berücksichtigung sämtlicher Punkte erhalten wurde, für die gestrichelte wurden die periodischen Anteile nicht berücksichtigt.

## 8.2 Klassische Verfahren

### 8.2.1 Differentiation

Ist ein Problem in Form einer stetig differenzierbaren Funktion gegeben, ist die Lösung einfach. Eine Funktion  $f(x)$  besitzt an der Stelle  $x_m$  einen Extremwert, wenn  $f'(x_m) = 0 \wedge f''(x_m) \neq 0$ . Auf andere Fälle, wenn die zweite Ableitung auch 0 wird, soll hier nicht eingegangen werden. Ein durchaus praxisrelevantes Beispiel ist die Funktion:

$$f(x) = \underbrace{ax^n}_{g(x)} + \underbrace{\frac{b}{x}}_{h(x)} + c \quad (8.2)$$

mit dem Minimum bei

$$x_m = \sqrt[n+1]{\frac{b}{a}} \quad (8.3)$$

Diese Funktion zeigt oftmals zu beobachtende Eigenschaften realer Probleme. Gegeben sind drei Funktionen, hier  $g(x)$ ,  $h(x)$  und  $c$ , für deren Summe ein Extremwert gesucht wird. Jede dieser drei Funktionen zeigt ein grundsätzlich anderes Verhalten:

- $g(x)$  ist streng monoton steigend, d. h. je größer  $x$ , desto größer wird  $g(x)$ .
- $h(x)$  ist streng monoton fallend, d. h. je größer  $x$ , desto kleiner wird  $h(x)$ .
- $c$  ist konstant, und der Funktionswert ist unabhängig von  $x$ .

Wie leicht zu sehen ist, hängt die Lage des Extremwertes  $x_m$  nicht von der Konstanten  $c$  ab. Zwei Beispiele sind in der Abbildung 8.1 zu sehen.

Ein anderes Beispiel soll im Zusammenhang mit Prognosen diskutiert werden. Auf Seite 164 wurde die **Regressionsanalyse** angesprochen, die hier nun zunächst ausführlicher am Beispiel von

$$y = f(x) = c_0 + c_1 x \quad (8.4)$$

beschrieben wird. Bei der Erstellung von **Prognosen** werden Funktionen gesucht, die eine beobachtete Reihe von Messergebnissen  $y_i = y(t_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$  möglichst gut beschreiben, um dann Werte für künftige Zeitpunkte vorhersagen zu können. Gut war hierbei in Gleichung (7.6) durch das Minimum der Summe der Abweichungsquadrate der beobachteten Werte von den Funktionswerten charakterisiert. Die Suche des Extremwertes bedeutet hier, dass Lösungen für

die unbekannt Koeffizienten  $c_0, \dots, c_M$  zu bestimmen sind. Für  $M = 1$  sind die Gleichungen

$$0 = \frac{\partial (S^2)}{\partial c_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - c_0 - c_1 x_i) = -2S_y + 2Nc_0 + 2c_1 S_x \quad (8.5a)$$

$$0 = \frac{\partial (S^2)}{\partial c_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - c_0 - c_1 x_i) x_i = -2S_{xy} + 2c_0 S_x + 2c_1 S_{x^2} \quad (8.5b)$$

mit

$$S_x = \sum_{i=1}^N x_i, \quad S_{x^2} = \sum_{i=1}^N x_i^2, \quad S_{xy} = \sum_{i=1}^N x_i y_i \quad \text{und} \quad S_y = \sum_{i=1}^N y_i \quad (8.6a)$$

zu lösen. Dieses ist ein System linearer Gleichungen

$$S_y = c_0 N + c_1 S_x \quad (8.7a) \quad S_{xy} = c_0 S_x + c_1 S_{x^2} \quad (8.7b)$$

für die beiden Koeffizienten  $c_0$  und  $c_1$  mit den Lösungen

$$c_0 = \frac{S_y S_{x^2} - S_x S_{xy}}{N S_{x^2} - S_x^2} \quad (8.8a) \quad c_1 = \frac{N S_{xy} - S_x S_y}{N S_{x^2} - S_x^2}. \quad (8.8b)$$

Ein Beispiel für den Einsatz dieses Verfahrens auf der Grundlage der Daten aus Abbildung 6.3a ist in der Abbildung 8.2 zu sehen. Hier sind zwei Ergebnisse gezeigt. Einmal wurde die vollständige Funktion betrachtet, das andere Mal der periodische Anteil nicht berücksichtigt. Die durchgezogene Linie mit  $c_1 = 0.76$  und  $c_0 = 35.80$  zeigt die erhaltenen Koeffizienten für die vollständige Kurve, die gestrichelte die ohne Berücksichtigung der periodischen Werte. Die sich hieraus ergebenden Koeffizienten  $c_1 = 0.81$  und  $c_0 = 29.02$  liegen sehr dicht an den tatsächlichen von  $c_1 = 0.80$  und  $c_0 = 30.00$ .

Das Vorgehen für Polynome höherer Ordnung oder Summen beliebiger Funktionen, in den jeweils nur die Koeffizienten gesucht sind, z. B.

$$f(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 \quad (8.9a)$$

oder

$$f(x) = c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 e^x \quad (8.9b)$$

kann direkt übertragen werden und führt ebenfalls zu lösbarer linearen Gleichungssystemen. Sind die Unsicherheiten  $\Delta y_i$  in den beobachteten Daten bekannt, kann Gleichung (7.6) zu

$$S = \sum_{i=1}^N \left( \frac{f(c_0, \dots, c_M; x_i) - y_i}{\Delta y_i} \right)^2 \underset{M=3}{=} \sum_{i=1}^N \left( \frac{c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 - y_i}{\Delta y_i} \right)^2 \quad (8.10)$$

modifiziert werden. Hierdurch erlangen die besseren Werte, d. h. die mit einem kleineren  $\Delta y_i$  ein höheres Gewicht. Da die Unsicherheiten einfache Zahlenwerte sind, bleibt der oben beschriebene Rechenweg unverändert. Um nun auch noch Aussagen zur Qualität der Lösungen erhalten zu können, sind die in Kapitel 6.2 nachzulesenden Regeln der Fehlerfortpflanzung anzuwenden,

	Zutaten für		Vorrat in kg
	<i>mild</i>	<i>scharf</i>	
Tomaten	0.700	0.600	2160
Tomatenmark	0.020	0.025	75
Olivenöl	0.1	0.06	480
Chilli	0.004	0.012	32.4

**Tab. 8.1:** Rezeptur für die beiden Ketchupsorten mild und scharf und vorhandene Vorräte. Der Gewinn beträgt 0.16 € je kg für die milde und 0.24 € je kg für die scharfe Sorte. Mengenangaben der Zutaten sind in kg je Flasche Ketchup.

d.h.

$$\Delta c_j = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial c_j}{\partial y_i} \Delta y_i \right)^2} \quad (8.11)$$

Dieses kann natürlich noch mit Stift und Papier erledigt werden, jedoch bieten hier geeignete Programme, wie *Mathematica* oder *Matlab* wertvolle Hilfen zur Reduzierung von Zeit und Fehlern.

## 8.2.2 Lineare Programmierung

Sind Zielfunktionen durch differenzierbare Funktionen darstellbar, können unterschiedliche Randbedingungen zu beachten sein, die durch Ungleichungen gegeben sind. Die Fahrt nach München muss nicht genau um 20:00Uhr, sondern spätestens um 20:00Uhr abgeschlossen sein. Für die Herstellung eines Produktes, wie unseren Ketchup, sind Bestände verfügbar, die höchstens verbraucht werden können, aber nicht genau verbraucht werden müssen. Wie solche Probleme gelöst werden können, soll an folgendem Beispiel demonstriert werden.

### Beispiel .34 Produktionsplanung

Ein Unternehmen stellt zwei Sorten Ketchup her, für die die in Tabelle 8.1 aufgeführten Zutaten notwendig sind. Es soll so produziert werden, dass mit der am Lager verfügbaren Menge der größtmögliche Gewinn erzielt wird.

Was unterscheidet dieses Problem von den bisher betrachteten und wie lässt es sich mathematisch darstellen? Es gibt zwei unabhängige Variablen, die zu produzierende Anzahl der Flaschen milden Ketchups  $x$  und die des scharfen  $y$ . Die Vorgaben aus Tabelle 8.1 lassen sich durch folgendes System aus Ungleichungen beschreiben:

$$\text{Tomaten} \quad 0.7x + 0.6y \leq 2160 \quad (8.12a)$$

$$\text{Tomatenmark} \quad 0.02x + 0.025y \leq 75 \quad (8.12b)$$

$$\text{Öl} \quad 0.1x + 0.06y \leq 480 \quad (8.12c)$$

$$\text{Chilli} \quad 0.004x + 0.012y \leq 32.4 \quad (8.12d)$$

	Tomaten	Mark	Öl	Chilli
Tomaten		(1621,1703)	(2400,792)	(1071,2347)
Mark	(1621,1703)	-	(2069,1345)	(638,2490)
Öl	(2400,792)	(2069,1345)		(1571,2181)
Chilli	(1071,2347)	(638,2490)	(1571,2181)	

**Tab. 8.2:** Eckpunkte des Simplexes

Für den durch ein Paar  $(x, y)$  beschriebenen Produktionsplan beträgt die Qualität  $\mathcal{G}$  der Lösung  $\mathcal{L} = \mathcal{L}(x, y)$ , die hier mit dem Gewinn gleich gesetzt werden kann:

$$\mathcal{G}(\mathcal{L}(x, y)) = 0.16x + 0.24y \quad (8.13)$$

Ein Umschreiben der Gleichungen (8.12) und (8.13) ermöglicht eine grafische Darstellung.

$$\text{Tomaten} \quad y \leq -1.17x + 3600 \quad (8.12a')$$

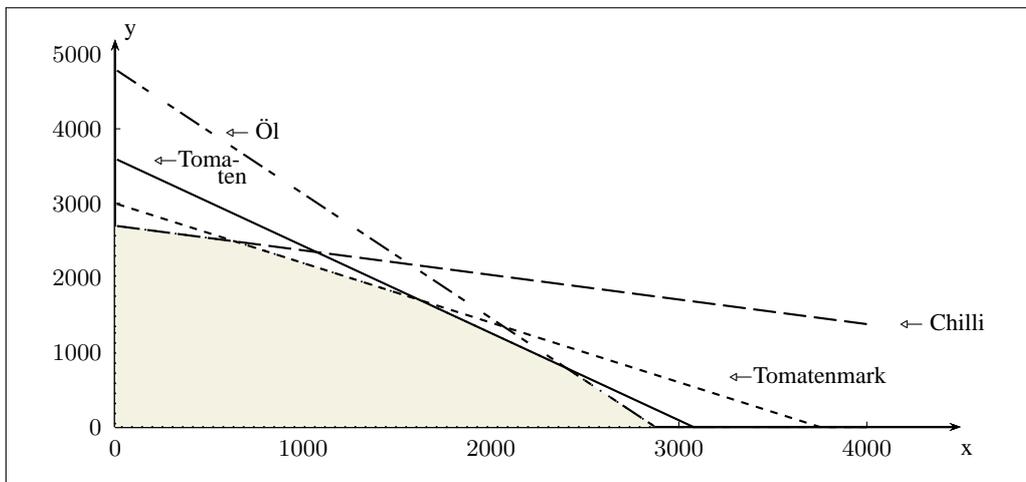
$$\text{Tomatenmark} \quad y \leq -0.8x + 3000 \quad (8.12b')$$

$$\text{Öl} \quad y \leq -1.67x + 4800 \quad (8.12c')$$

$$\text{Chilli} \quad y \leq -0.33x + 2700 \quad (8.12d')$$

und

$$y = -\frac{0.16}{0.24}x + \frac{1}{0.24}\mathcal{G}(\mathcal{L}) \quad (8.13')$$



**Abb. 8.3:** Zulässige Lösungen für das Problem aus Tabelle 8.1

Wird zusätzlich noch  $x > 0$  und  $y > 0$  beachtet, können die Wertepaare, die sämtliche Ungleichungen erfüllen, dem grau unterlegten Bereich aus Abbildung 8.3, einem **Simplex**, ent-

nommen werden: Diese sind alle Paare  $(x, y)$  mit  $x, y > 0$ , die unter allen Geraden liegen, die den Gleichungen genügen, wenn die Ungleichheitszeichen in (8.12a') bis (8.12d') durch Gleichheitszeichen ersetzt werden. In das Diagramm ist ebenfalls eine mögliche Qualitätsfunktion oder Gewinngerade aus Gleichung (8.13') für den  $y$ -Achsenabschnitt  $\frac{1}{0.24}\mathcal{G}(\mathcal{L}) = 1500$ , d. h.  $\mathcal{G}(\mathcal{L}) = 360 \text{ €}$  eingezeichnet. Grafisch kann die optimale Lösung dadurch ermittelt werden, dass diese Gewinngerade so lange verschoben wird, bis sie das Gebiet der zulässigen Lösungen in einem Eckpunkt des Simplexes verlässt. Werte der Eckpunkte sind in Tabelle 8.2 aufgeführt. Der zugehörige Gewinn kann dann aus dem  $y$ -Achsenabschnitt abgelesen werden. Ist die Gewinngerade parallel zu einer der begrenzenden Geraden, gibt es mehrere Lösungen mit gleichem Gewinn. Eine Erweiterung dieser zeichnerischen Lösung auf drei oder mehr Unbekannte bzw. Dimensionen ist nicht möglich.

Rechnerisch können Lösungen für beliebig viele Dimensionen ermittelt werden. Hier soll das Vorgehen nur soweit skizziert werden, dass der Bezug zum praktischen Problem deutlich wird. Die Ungleichungen aus (8.12a) bis (8.12d) werden durch Einführen von **Schlupfvariablen**  $s_{To}$ ,  $s_{Ma}$ ,  $s_{Öl}$  und  $s_{Ch}$ , die nur positive Werte annehmen können, zu Gleichungen umgeformt.

$$0.7x + 0.6y = 2160 + s_{To} \quad (8.14a)$$

$$0.02x + 0.025y = 75 + s_{Ma} \quad (8.14b)$$

$$0.1x + 0.06y = 480 + s_{Öl} \quad (8.14c)$$

$$0.004x + 0.012y = 32.4 + s_{Ch} \quad (8.14d)$$

Diese Schlupfvariablen stehen für die Mengen, die nicht verbraucht werden. In der Praxis sind das die Mengen, die bei dem zu bestimmenden Produktionsplan im Lager verbleiben. Aus vier Ungleichungen mit zwei Unbekannten wird ein Gleichungssystem mit vier Gleichungen und sechs Unbekannten [BG93].

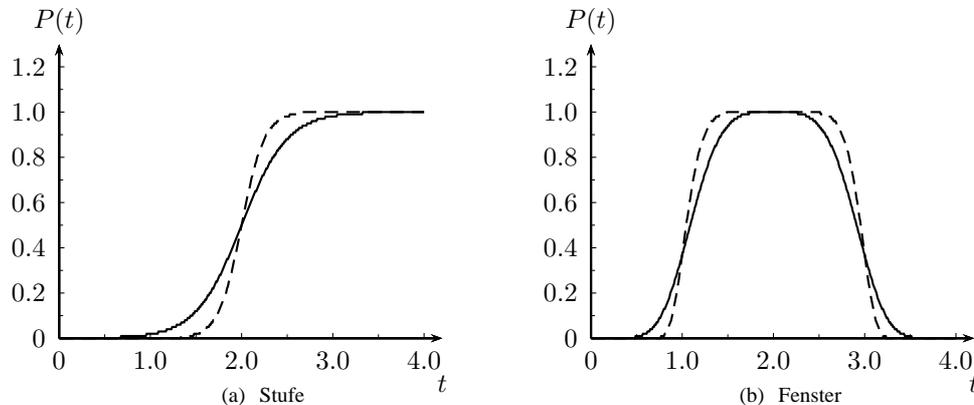
Heutzutage gibt es verschiedene rechnergestützte Möglichkeiten, wie *mathematica* oder *Matlab*, derartige Probleme schnell und zuverlässig zu lösen. Mit *mathematica* sind folgende Zeilen für die Lösung dieses Problems ausreichend [Wol97].

```
ConstrainedMax[0.16x + 0.24y,
{0.7x + 0.6y < 2160, 0.02x + 0.025y < 75, 0.1x + 0.06y < 480,
0.004x + 0.012y < 32.4, x > 0, y > 0}, {x, y}]
```

Das Ergebnis für die gegebenen Randbedingungen lautet  $x = 642.857, y = 2485.71$  bei einem Gewinn von  $700 \text{ €}$ . Das entspricht dem Schnittpunkt der Geraden für Chili und Tomatenmark. Zusätzlich zu der Angabe des Ergebnisses, kann abgeleitet werden, dass diese beiden Produktionsfaktoren die begrenzenden Größen sind. Nun kann durch das Verändern einzelner Parameter untersucht werden, welche Auswirkungen es hätte, wenn für diese limitierenden Größen zusätzliche Mengen beschafft werden und wie sich dadurch der Gewinn ändern würde. Auch die mit verfügbaren Produktionskapazitäten verbundenen Beschränkungen lassen sich problemlos einbeziehen, ebenso eine Berücksichtigung externer oder interner Produktion. Hier muss die Gewinnfunktion nur um Terme der Form ähnlich wie in (7.1a) ergänzt werden.

Diese Methode bietet eine einfache und schnell durchführbare Möglichkeit, eine **Entscheidungsfindung** zu unterstützen. Bisher wurde nur ein winziger Bruchteil der Möglichkeiten klassischer Verfahren [siehe z. B.: Dom90; Dom95; DD96; BJS95; Zim92; BG93; NM93] angesprochen,

dennoch soll dieses hier abgeschlossen und eine gänzlich andere Art von Vorgehensweisen vorgestellt werden.



**Abb. 8.4:** Straffunktionen nach Gleichung (8.17). Die durchgezogenen Linien sind mit  $n = 2$  und die gestrichelten mit  $n = 4$  berechnet.

## 8.3 Naturanaloge Verfahren

### 8.3.1 Einführung

Das bewusste Suchen optimaler Lösungen mag für viele Menschen ein Trend sein, der erst in den letzten Jahren in Erscheinung getreten ist. In der Natur ist dieses bereits seit Milliarden von Jahren ein Standardproblem, für das sie viele phantastische Verfahren gefunden hat.

- Jedes Atom befindet sich in seinem energetisch günstigsten Zustand. Wird dieser gestört, fällt es ohne äußeres Zutun auf dieses günstigste Niveau zurück und sendet dabei sogar noch die frei werdende Energie aus.
- Ein Lichtstrahl, der auf eine Wasseroberfläche trifft, nimmt den Weg, der am schnellsten ist, egal, ob die Oberfläche glatt oder rauh ist.
- Ein Stahlrohr, das langsam abkühlt, findet abhängig von Randbedingungen seine optimale Form und verharrt in dieser.
- Ameisen finden kürzeste Wege zu Futterplätzen und können diese Artgenossen mitteilen.
- Auch der Mensch kann als eine optimale Lösung eines Evolutionsproblems gesehen werden, auch wenn manche Artgenossen an anderen etwas auszusetzen haben.

Ob belebt oder unbelebt: Ohne unser Zutun entwickeln sich in der Natur optimale Lösungen, die innerhalb gewisser Grenzen sogar robust gegen sich ändernde Umwelteinflüsse sind. In den sechziger Jahren des letzten Jahrhunderts wurde begonnen, die Verfahren der Natur zu beobachten und für die Lösung menschlicher Probleme zu nutzen [Rec73; Hol92; DSW93].

Ausgehend von der Fahrt von Hamburg nach München soll der Umgang mit Zielen und Randbedingungen und das Finden einer optimalen Lösung beschrieben werden.

**Beispiel .35 Fahrt von Hamburg nach München**

Die mehrfach angesprochene Fahrt von Hamburg nach München soll dazu genutzt werden, dass auf dem Weg mehrere Kunden  $\mathcal{C}^* = \{C_1, \dots, C_{N_C}\}$  besucht werden. Einige von diesen Kunden sind nur zu bestimmten Zeiten anzutreffen. Da der Fahrer möglichst viel Zeit in München zur Verfügung haben möchte, ist eine Lösung mit möglichst geringer Fahrzeit bzw. möglichst früher Ankunftszeit gesucht.

Sämtliche Fahrzeiten zwischen Kunden und Start- und Zielort seien bekannt bzw. können mit Algorithmus 5.1 berechnet werden. Die Bedien- oder Servicezeiten  $t_i^{(s)}$  und zu berücksichtigende Zeitfenster  $\Delta T_i^{(w)}$  für jeden Kunden  $C_i$  werden vorgegeben.

Um die Schreibweise nicht unnötig umständlich zu machen, werden Start- und Zielort wie zu besuchende Kunden betrachtet und als Bedienpunkte bezeichnet.

**Definition .53 Bedienpunkt**

Jeder Punkt, an dem ein Fahrzeug anhalten und irgendeine Aufgabe erledigen muss, heißt Bedienpunkt.

Statt Startort  $S_{\text{start}}$ , Zielort  $S_{\text{Ziel}}$  und Kundenliste  $\mathcal{C}^*$  betrachten wir

$$\mathcal{S} = \{S_{\text{start}}, C_1, \dots, C_{N_C}, S_{\text{Ziel}}\} \equiv \{S_1, \dots, S_N\} \quad (8.15)$$

Jede Permutation von  $\mathcal{S}$ , die die Positionen von  $S_1$  und  $S_N$  unangetastet lässt, ist eine zulässige Lösung  $\mathcal{L}$ . Zur Bestimmung einer optimalen Lösung wird

$$\mathcal{G}'(\mathcal{L}) = \mathcal{G}'^{(t)}(\mathcal{L}) + P'^{(t)}(\mathcal{L}) \quad (8.16a)$$

als Qualitätsfunktion definiert. Hierbei ist  $\mathcal{G}'^{(t)}(\mathcal{L})$  die Gesamtdauer der Lösung  $\mathcal{L}$  und  $P'^{(t)}(\mathcal{L})$  eine **Straffunktion**, mit der Verletzungen der Zeitfenster oder eine Verspätung am Zielort belegt werden. Um die Qualitäten verschiedener Lösungen vergleichbar zu machen, müssen analog zu der Diskussion auf Seite 187 die Fahrzeiten und die Verletzungen von Zeitfenstern wieder auf eine gemeinsame Basis gestellt werden. Hierzu werden Konstanten  $\alpha_t$  und  $\alpha_p$  eingeführt, die Zeiten in Kosten umwandeln und (8.16a) wird zu:

$$\mathcal{G}(\mathcal{L}) = \alpha_t \mathcal{G}'^{(t)}(\mathcal{L}) + \alpha_p P'^{(t)}(\mathcal{L}) \equiv \mathcal{G}^{(t)}(\mathcal{L}) + P^{(t)}(\mathcal{L}) \quad (8.16b)$$

Wie können Straffunktionen berechnet werden? Eine Möglichkeit bei Berücksichtigung von Zeitfenstern besteht darin, dass die Straffunktion dem entspricht, was zu zahlen wäre, wenn die verspätete Ankunft auf andere Art, z. B. durch ein anderes Fahrzeug, ausgeglichen werden würde. Im Falle eines zu spät ankommenden Lkws könnten dieses die Kosten für die Anlieferung mit einem Taxi oder Hubschrauber sein. Wichtig ist, dass die Werte realistisch sind, um Lösungen erzielen zu können, die in der Praxis auch Bestand haben.

**Weisheit 8.3** Werden Zeitfenster als Zeitpunkte angegeben, die exakt eingehalten werden müssen, kann es keine optimale Lösung geben.

Ankunftszeiten sind analog zu der Diskussion von Pünktlichkeit auf Seite 77 immer als Intervalle anzugeben oder aber Abweichungen von einem exakten Termin zuzulassen. Werden bereits

smallest delays are punished, so it can only then lead to a good and realistic solution, if this is also in practice handled exactly. When do the penalties fall? If the delivery is made directly to a production line, every delay is very hard to punish, but a late arrival is less so. In the case of a hotel's laundry, it is safer to accept softer boundaries. To be sure to have a practicable procedure, one can use functions like

$$P^{(s)}(t) = \frac{1}{1 + (e^{t-t_p})^{2n}} \quad (8.17a)$$

$$P^{(w)}(t) = e^{-(t-t_p)^{2n}} \quad (8.17b)$$

with which stages and time windows of different hardnesses can be represented, and used. The examples shown in Figure 8.4 can be converted into almost arbitrary forms and hardnesses by inserting suitable constants. In addition to time restrictions, one can also take into account maximum loads, by adding a penalty function and thus without problem on the same basis extended. With the functions defined on page 94, *ceil* and *floor* can represent stages, e.g. for the consideration of fixed costs as in the case of a standing fee, as shown.

#### **Algorithmus 8.1 Next neighbour – Verfahren**

$\mathcal{V}$  ist die Menge nicht markierter Knoten.

##### **Initialisierung**

- Setze  $\mathcal{V} = \mathcal{S} \setminus \{S_1, S_N\}$ .
- Nimm  $S_1$  als aktuellen Knoten  $S_a$ .
- Nimm als vorläufige Lösung  $\mathcal{L}_a = \{S_1\}$ .

##### **Iteration**

Wiederhole folgende Schritte, bis  $\mathcal{V} = \emptyset$

- Suche aus  $\mathcal{V}$  den Knoten  $S_t$ , der den geringsten Abstand zu  $S_a$  aufweist.
- Füge  $S_t$  der Lösung  $\mathcal{L}_a$  hinzu.
- Setze  $\mathcal{V} = \mathcal{V} \setminus \{S_t\}$
- Setze  $S_a = S_t$

##### **Ende**

Füge  $S_N$  der zuletzt erhaltenen Lösung  $\mathcal{L}_a$  hinzu.

### 8.3.2 Heuristic procedures

The problem to be solved can now be formulated very simply: Find the permutation of the points from equation (8.15), which minimizes the expression in (8.16b). The starting point of every procedure should be a feasible solution.

#### **Definition .54 Zulässige Lösung – I**

Jede Lösung  $\mathcal{L}(S)$ , in der jeder anzufahrende Punkte genau einmal enthalten ist und keine harte Randbedingung unveränderbar verletzt ist, heißt zulässig.

Lösungen, bei denen Zeitfenster verletzt werden oder Lkws überladen sind, werden hier als zulässig betrachtet, weil davon ausgegangen wird, dass dieses im Laufe der Optimierung behoben werden kann. Gibt es zwölf Kunden, die jeweils genau um 6:00Uhr morgens mit frischen Brötchen beliefert werden sollen und stehen elf Fahrzeuge zur Verfügung, ist eine harte Randbedingung verletzt und es gibt keine zulässige Lösung. Gleiches gilt, wenn zwanzig Gitterboxen mit einem Fahrzeug transportiert werden sollen, das nur Platz für sechzehn bietet.

Eine zulässige Lösung  $\mathcal{L}$  kann dadurch erzeugt werden, dass alle Punkte aufsteigend sortiert werden. Diese Lösung liefert bereits eine erste Vergleichsgrundlage für alle weiteren. Ein weitere sehr einfache Möglichkeit ist das in Algorithmus 8.1 beschriebene *next neighbour*-Verfahren, das wiederum sehr schnell zu einer Lösung führt und eine erste quantitative Abschätzung für die Qualität  $\mathcal{G}(\mathcal{L}^{(\text{best})})$  der besten Lösung [SCB97] ermöglicht:

$$\mathcal{G}(\mathcal{L}^{(\text{next})}) < O(\log N) \mathcal{G}(\mathcal{L}^{(\text{best})}) \quad (8.18)$$

### Algorithmus 8.2 Nearest insertion-Verfahren [nach SCB97]

#### Initialisierung

- Nimm  $\mathcal{L}_a = \{S_1\}$  als aktuelle Lösung.

#### Iteration

Wiederhole folgende Schritte bis alle Knoten berücksichtigt

- Bestimme den Knoten  $S_l$  mit  $d_{i,l} = \min_{\substack{j \in \mathcal{L}_a \\ k \notin \mathcal{L}_a}} d_{j,k}$ , d. h. bestimme den Knoten außerhalb der aktuellen Lösung  $\mathcal{L}_a$ , der den kleinsten Abstand zu einem beliebigen Knoten dieser Lösung aufweist.
- Bestimme die Kante  $(v_i, v_j) \in \mathcal{L}_a$  mit  $d_{i,l} + d_{l,j} - d_{i,j}$  ist minimal
- Erzeuge eine neue aktuelle Lösung  $\mathcal{L}_a$  indem  $(v_i, v_j)$  durch  $(v_i, v_l, v_j)$  ersetzt wird.

#### Ende

Füge  $S_N$  der zuletzt erhaltenen Lösung so hinzu, dass die Verschlechterung minimal ist.

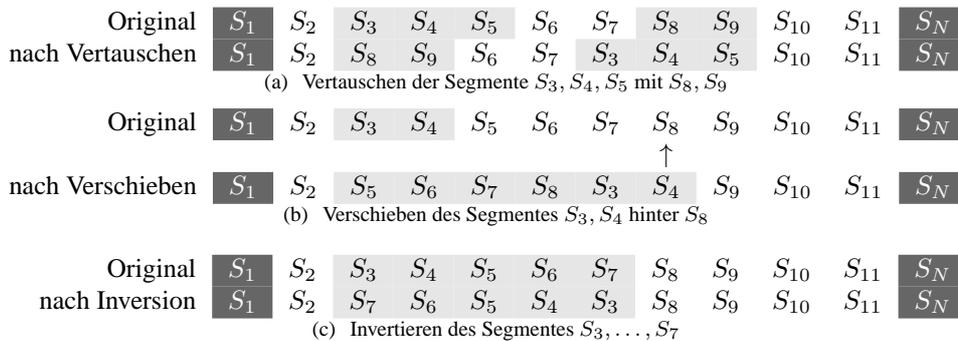
Ein weiteres schnelles und einfaches Verfahren wird in Algorithmus 8.2 beschrieben. Für die Lösung gibt es wieder eine obere Schranke

$$\mathcal{G}(\mathcal{L}^{(\text{near})}) < 2\mathcal{G}(\mathcal{L}^{(\text{best})}) \quad (8.19)$$

Alle bisher beschriebenen Verfahren liefern genau eine Lösung. Es gab keine Möglichkeit, diese zu verbessern. Dieses Vorgehen ist für natürliche Prozesse untypisch. Kann es nicht manchmal besser sein, auch Wege zu versuchen, die sich als Irrwege erweisen? Dieses Ausprobieren wird bei den heuristischen Verfahren angewandt und ist in Algorithmus 8.3 beschrieben. Diese Beschreibung mag nicht so konkret erscheinen, wie für einen Algorithmus erwartet, es verbleiben

Steps, at which the user is asked. So it is from a given schema, temperature and water level the talk. Like when cooling of metals has also here the user to decide, whether he wants a fast or slow cooling with the consequences like the material properties. There are no unique instructions, how new solutions should be generated, only different alternatives, which with not better defined probabilities to be selected. These properties require, that when dealing with such procedures always something *played* must or may. So it can be, that a procedure for a route planning with 100 customers works excellently, but for 1000 customers fails. As in a practical application such numbers or boundary conditions can only slowly change, one can also adapt the procedure to new data, evolutionarily develop. The optimization parameters themselves become the object of optimization. It should always be noted, that the procedure *finds* a solution, but no statement about it, whether it is optimal. Repeated independent calculations, possibly with different procedures, deliver further results and statements about the quality.

**Wisheit 8.4** Heuristische Verfahren finden eine Lösung, die sehr gut sein kann, aber nicht gut sein muss.



**Abb. 8.5:** Beispiele für die Anwendung verschiedener Operatoren in heuristischen Verfahren. Das Vertauschen von zwei Punkten ist gleich dem Tauschen von Segmenten mit der Länge 1.

**Algorithmus 8.3 Heuristische Verfahren****Initialisierung**

- Bestimme eine zulässige Lösung  $\mathcal{L}_a$  und berechne  $Q(\mathcal{L}_a)$ .
- Lege Temperatur  $T$  oder Wasserstand  $S$  fest. Im folgenden wird immer nur von Temperatur gesprochen.
- Lege Auswahlregel für Operatoren fest.
- Lege Auswahlschema fest.

**Iteration** Wiederhole folgende Schritte bis Abbruchbedingung erfüllt

- a. Wähle nach einem vorgegebenen Schema einen Operator aus.
- b. Erzeuge hiermit aus  $\mathcal{L}_a$  eine neue Lösung  $\mathcal{L}_t$  und berechne für diese  $Q(\mathcal{L}_t)$ .
- c. Entscheide, ob nach einer vorgegebenen Regel  $\mathcal{L}_a$  durch  $\mathcal{L}_t$  ersetzt wird.
- d. Ändere gegebenenfalls die Temperatur.

Folgend werden die einzelnen Schritte des in 8.3 beschriebenen Algorithmus erläutert:

zu a : Es gibt keine festen Regeln, nach denen zwischen den einzelnen Operatoren ausgewählt werden soll. Die einfachste Regel lautet, dass alle abwechselnd verwendet werden. Hier muss ein dem Problem angepasstes Vorgehen festgelegt werden. So wie auch ein guter Koch durch Erfahrung und Beobachtung anderer über Nuancen seiner Rezeptur entscheidet, trifft dieses auch für Optimierer zu. *Learning by training* ist hier unumgänglich. Mögliche Operatoren sind:

- Vertauschen von zwei Segmenten oder Punkten – Abbildung 8.5(a)
- Verschieben eines Segmentes – Abbildung 8.5(b)
- und
- Inversion eines Segmentes – Abbildung 8.5(c)

Nicht nur die Auswahl zwischen den verschiedenen Operatoren bedarf Fingerspitzengefühl, auch die Festlegung, ob Segmentlängen gleich bleiben oder mit zunehmender Dauer verändert werden sollen.

zu b : Beispiele für die Anwendung der Operatoren sind in Abbildung 8.5 zu finden. Bei deren Anwendung ist sicher gestellt, dass Lösungen stets zulässig bleiben. Würden auch nicht zulässige erzeugt werden, müssten diese entweder verworfen oder aber durch andere Mechanismen repariert werden. Beides ist machbar, aber mit erheblichem Rechenaufwand verbunden. Beim Vertauschen von zwei Segmenten können Probleme auftreten, wenn sich die beiden ausgewählten Stücke überschneiden. Beim Verschieben ist darauf zu achten, dass das Ziel nicht innerhalb des zu verschiebenen Elementes liegt. Dieses sind technisch lösbare Probleme.

zu c : Diese Regeln bilden das Kernstück des Verfahrens und deren richtige Wahl und richtiger Einsatz entscheidet über die Qualität der Lösung und die Geschwindigkeit, mit der diese erzielt wird. Beim *hill climbing* werden jeweils nur bessere Lösungen akzeptiert. Dieses

ist die schlechteste aller Möglichkeiten, weil hier die große Gefahr besteht, dass das Verfahren einen lokalen Extremwert findet und sich von diesem nicht mehr entfernen kann. Bei allen anderen werden auch Verschlechterungen zugelassen. Deren Ausmaß kann über den Temperaturparameter gesteuert werden. *Threshold accepting* akzeptiert alle schlechteren Lösungen innerhalb des Toleranzbereiches mit gleicher Wahrscheinlichkeit, schlechtere Lösungen finden keine Beachtung. Beim *simulated annealing* haben auch diese eine Chance. Dieses kann immer dann von Vorteil sein, wenn das Verfahren in einem guten lokalen Maximum zu verharren droht und andere bessere Lösungen nur über sehr schlechte zu erreichen sind. Ist  $T \approx 0$  verhalten sich *threshold accepting* und *simulated annealing* ungefähr wie *hill climbing*. Dieses bedeutet insbesondere, dass bessere Lösungen  $\mathcal{L}_t$  nie verworfen werden.

zu d : Hier muss ein Kompromiss gefunden werden, der es ermöglicht, auch lokale Extremwerte wieder verlassen zu können, dabei aber eine gefundene, möglicherweise sehr gute, Lösung nicht wieder zu verlieren. Zu Beginn der Suche kann  $T$  sehr groß gewählt werden, um den Raum möglicher Lösungen möglichst uneingeschränkt absuchen zu können. Mit zunehmender Anzahl an Iterationen sollte  $T$  schrittweise verkleinert werden. Hier spielt wieder die Frage eine entscheidende Rolle, wie viel Zeit zum Finden einer Lösung zur Verfügung steht. So kann bei diesen Verfahren durch schnelles Abkühlen sehr schnell eine gute Lösung gefunden werden. Erneutes Erhöhen und abermaliges, jetzt vielleicht langsames Abkühlen, liefert möglicherweise weitere, bessere Lösungen.

#### Regel 8.1 Auswahlregeln heuristischer Optimierungsverfahren

Hier ist  $\mathcal{G}(\mathcal{L}_{a,t}) \equiv \mathcal{G}_{a,t}$  gesetzt. Die hier beschriebenen Regeln gelten für das Suchen eines Minimums, d. h. eine Lösung  $\mathcal{L}_t$  ist dann besser als  $\mathcal{L}_a$ , wenn  $\mathcal{G}_t < \mathcal{G}_a$ .

Wähle  $\mathcal{L}_t$

falls  $\mathcal{G}_t < \mathcal{G}_a$  **hill climbing** (8.20a)

falls  $\mathcal{G}_t < \mathcal{G}_a + T$  **threshold accepting** (8.20b)

mit Wahrscheinlichkeit

$$p = \min \left( 1, e^{-\frac{\mathcal{G}_t - \mathcal{G}_a}{T}} \right) \quad \text{simulated annealing} \quad (8.20c)$$

falls  $\mathcal{G}_t < T$  **flood algorithm** (8.20d)

Diese Verfahren sind unter anderem in dem Programmpaket *goodSyncRo1o* realisiert, das für ungefähr 1000 Kunden, einschließlich der Berücksichtigung von Zuladungen und Zeitfenstern

bei einem Fuhrpark mit ausreichend Fahrzeugen in ungefähr drei Minuten eine sehr gute Lösung findet.

Auch weitere der in den letzten Jahren entwickelten und genutzten Verfahren, wie Ameisenalgorithmen [ZB05] und *tabu search* [HTW97] sind hervorragend geeignet, schnell sehr gute Lösungen zu liefern.

### Exkurs 8.1 Vergleich Graycode - Dualzahl

Bei Verwendung gewöhnlicher Dualzahlen sind im Dezimalsystem kleine Übergänge oftmals nur schwer durch einfache Operationen zu erreichen. Im Graycode sind benachbarte Zahlen durch Vertauschung eines einzigen Bits zu erzeugen, wie der nebenstehenden Tabelle zu ersehen ist. So wird 0000 durch das Ändern des ersten Bits in der Dualdarstellung zu 1000 bzw. 8, wohingegen der Übergang von 7 nach 8 nur durch eine Änderung in allen Bits möglich wird. Auch bei Nutzung des Graycodes kann das Ändern eines Bits eine merkliche Auswirkung auf die dargestellte Zahl haben. So wird aus 0000 durch Ändern eines Bits 0100, d. h. 7.

$n$	Dual	Gray
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100

Tab. 8.3: Vergleich von Dualzahlen und Graycode

### Vorgehen 8.2 Partially matched cross over

Nachkommen werden so erzeugt, dass sie in einem vorgegeben Intervall mit den Eltern identisch sind.

- Zunächst werden die Elemente in den Kopierintervallen übertragen - 8.3(b). Die anderen Positionen bleiben unbesetzt.
- Anschließend werden die Positionen aufgefüllt, für die es keine Konflikte gibt, d. h. für die es keine doppelten Einträge gibt – 8.3(c).
- Abschließend werden Einträge in die verbleibenden Lücken geschrieben. Hierbei wird das Element gewählt, das gegen das in Elter an dieser Position stehende getauscht wurde. An der zweiten Stelle stand in  $\mathcal{L}_i^e$  das Element  $S_3$ . Dieses wurde gegen  $S_9$  getauscht und somit erscheint  $S_9$  an der Position, die ursprünglich  $S_3$  einnahm – 8.3(d).

**Algorithmus 8.4 Genetischer Algorithmus****Variablen**

$\mu, \lambda$	:	Anzahl Eltern bzw. Kinder
$\mathcal{P}^{(e,k)} = \{\mathcal{L}_1^{(e,k)}, \dots, \mathcal{L}_{\mu,\lambda}^{(e,k)}\}$	:	Eltern- bzw. Kindergeneration
$\mathcal{L}_i^{e,k}$	:	$i$ -tes Individuum der Eltern- bzw. Kindergeneration
$Q(\mathcal{L})$	:	Qualität einer Lösung $\mathcal{L}$
$F(\mathcal{L})$	:	Fitness einer Lösung $\mathcal{L}$

**Initialisierung**

- Wähle eine geeignete Codierung der Chromosomen.
- Lege  $\lambda$  und  $\mu$  fest.
- Bestimme zufällig eine Population  $\mathcal{P}^e = \{\mathcal{L}_1^e, \dots, \mathcal{L}_\mu^e\}$  aus  $\mu$  Eltern.

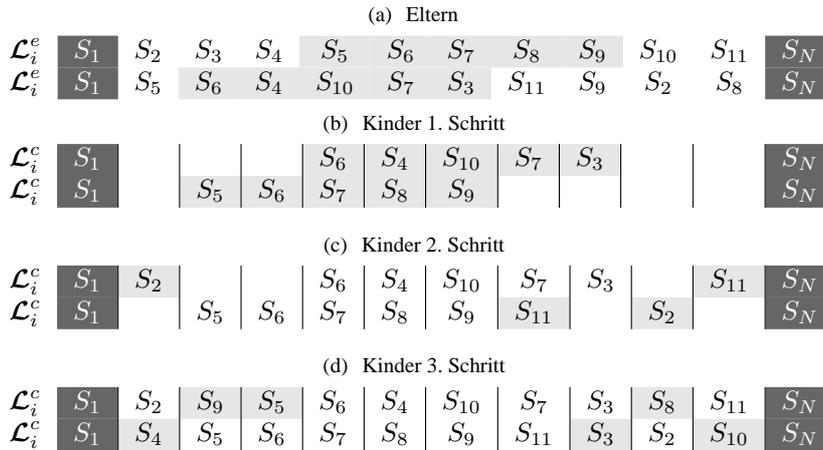
**Iteration**

Wiederhole folgende Schritte bis Abbruchkriterium erreicht:

- Bewerte alle Elemente der aktuellen Population, d. h. berechne  $Q(\mathcal{L}_i^{(e)})$  und  $F(\mathcal{L}_i^{(e)}) \forall \mathcal{L}_i^{(e)} \in \mathcal{P}^{(e)}$
- Erzeuge eine Kindergeneration  $\mathcal{P}^{(k)}$ 
  - Selektiere  $\lambda$  Paare  $(\mathcal{L}_i^{(e)}, \mathcal{L}_j^{(e)})$  gemäß einem Heiratsschema.
  - Erzeuge  $\lambda$  Nachkommen  $\mathcal{L}_l^{(k)}, l = 1, \dots, \lambda$
  - Bewerte alle Elemente der Kinderpopulation
- Mutiere ausgewählte Individuen
- Ersetze Elemente der Elterngeneration  $\mathcal{P}^{(e)}$  durch Kinder  $\mathcal{L}_i^{(k)}$  gemäß einem Ersetzungsschema.

**8.3.3 Genetische Algorithmen**

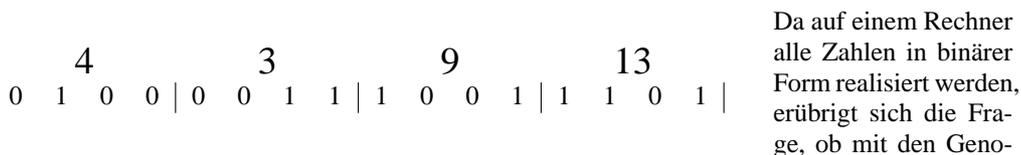
Die bis hierher vorgestellten Verfahren gehen überwiegend auf Vorgänge in der unbelebten Natur zurück. Haben die zuerst betrachteten klassischen Verfahren nur genau eine Lösung geliefert, so wurden bei den heuristischen Algorithmen bereits viele Lösungen bestimmt. Von diesem wurde in jedem Schritt eine ausgewählt oder, anders ausgedrückt, eine verworfen. Dieses ist eine in der Natur kaum zu beobachtende Verschwendung. Vererbung bei Organismen übernimmt stets Merkmale beider Elternteile. In Anlehnung an dieses Verhalten haben Rechenberg und Holland [Rec73; Hol92] unabhängig voneinander gemeinsam mit Kollegen die **Evolutionstrategie** und **genetische Algorithmen** zur Lösung praktischer Probleme entwickelt und eingeführt. Die



**Tab. 8.4:** *Partially Matched Crossover für TSP*

durch das Verwerfen einer Lösung hervorgerufene Vernichtung möglicherweise guter Informationen in Algorithmus 8.3 wird bei diesen Verfahren dadurch vermieden, dass stets mehrere Lösungen oder **Individuen**, eine **Population**, betrachtet werden.

Ein Unterschied zwischen genetischen Algorithmen und Evolutionsstrategien ist in der Codierung des Problems zu sehen. So können für die Bestimmung der Koeffizienten aus Gleichung (8.10) diese als reelle Zahlen oder alternativ in binärer Form dargestellt werden. Für die Darstellung auf einem Rechner wird diese Unterscheidung hinfällig: So wie bei einem Chromosom ein Protein, der Phänotyp, durch eine Folge der Art *ATG TTG CTG CCG*, dem Genotyp, dargestellt wird, entspricht *0100 0011 1001 1101* einer Zahl bzw. einer Folge von Zahlen. Stehen jeweils vier Bit für die Darstellung einer Zahl zur Verfügung, so können mit dieser Folge von Bits vier Koeffizienten  $c_0, \dots, c_3$  dargestellt werden. In einer für einen Menschen vertrauteren Form sind dies:



oder Phänotypen gearbeitet werden soll. Es sind zwangsläufig Genotypen. Die Genauigkeit oder Auflösung wird durch die Anzahl der zur Verfügung gestellten Bits bestimmt. So können für die Darstellung sowohl 32 als auch 16 oder 64-Bit verwendet werden.

Die in Abbildung 8.6 gewählte Darstellung als Dualzahl ist nicht die einzig mögliche Form. Da Dualzahlen die Eigenschaft aufweisen, dass kleine Änderungen, wie das Ändern eines Bits von 0 nach 1 große Änderungen hervorrufen können, andererseits kleine Änderungen nur durch Modifikation von vielen Bits bewirkt werden, ist oftmals die Verwendung des in Exkurs 8.1 skizzierten **Graycodes** zu empfehlen.

Viele im Zusammenhang mit genetischen Algorithmen verwendeten Begriffe sind in Analogie zu den biologischen gewählt [Mic92; Kin94]. So wird eine Lösung  $\mathcal{L}$  auch als Individuum oder

**Exkurs 8.2 Auswahl proportional zu Qualität oder Fitness****Auswahl einer Lösung proportional zur Fitness**

Gegeben sind  $N$  Lösungen mit Fitness  $F_i \equiv F(\mathcal{L}_i)$ . Hieraus werden die kumulierte Fitness

$$\mathbf{F}_i = \sum_{j=1}^i F_j = \mathbf{F}_{i-1} + F_i \quad (8.21a)$$

mit  $\mathbf{F}_0 = 0$  und die normierten Werte  $\mathbf{F}_i^*$

$$\mathbf{F}_i^* = \frac{\mathbf{F}_i}{\mathbf{F}_N} \quad \text{für } i = 0, \dots, N \quad (8.21b)$$

berechnet. Für die normierte Fitness gilt:

$$0 \leq \mathbf{F}_i^* \leq 1 \quad \text{und} \quad \mathbf{F}_i^* \leq \mathbf{F}_{i+1}^* \quad (8.21c)$$

Zur Auswahl einer Lösung wird eine **Zufallszahl**  $r$  mit  $0 < r \leq 1$  bestimmt und die Lösung  $\mathcal{L}_i$  gewählt, für die

$$\mathbf{F}_{i-1}^* < r \leq \mathbf{F}_i^* \quad \text{mit } 1 \leq i \leq N \quad (8.21d)$$

gilt.

Chromosom bezeichnet. Dieses können Reihenfolgen anzufahrender Kunden

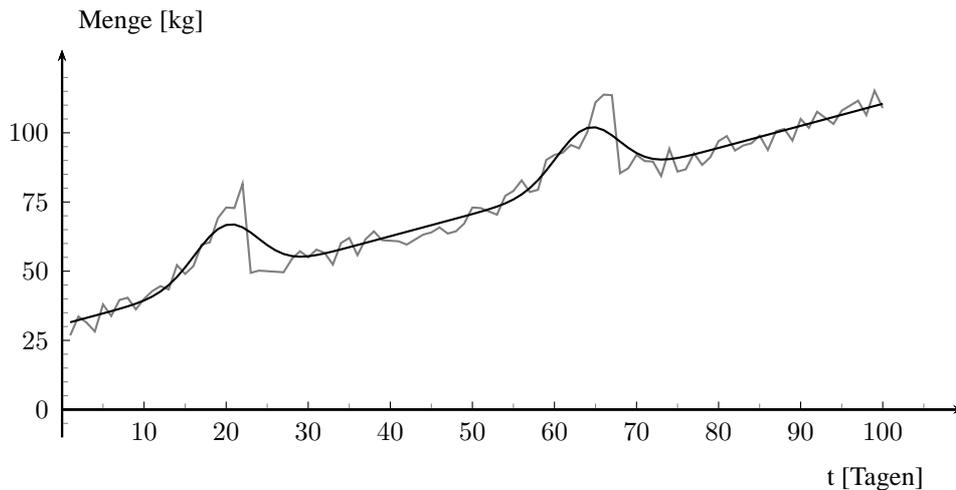
$$\mathcal{L}^{(R)} = \{S_1, \dots, S_N\} \quad (8.22a)$$

oder auch die zu bestimmenden Koeffizienten aus Gleichung (8.9a) sein. Dann ist

$$\mathcal{L}^{(C)} = \underbrace{\{c_0, \dots, c_M\}}_{\text{Gene}} \quad (8.22b)$$

Jeder Koeffizient in Gleichung (8.22b) ist ein Gen und kann wie in Abbildung 8.6 gezeigt dargestellt werden. Geno- und Phänotypen sind die kodierte Darstellung bzw. das Erscheinungsbild. Auch wenn manche Formulierungen etwas hart klingen mögen, geht es bei dem mit Algorithmus 8.4 beschriebenen Verfahren nur um die Operationen mit Zahlen auf einem Rechner. Ein **Elter** ist stets nur eine Folge von Bits oder Zahlen, und das Nichtüberleben von Eltern oder Kindern bedeutet lediglich das Löschen eines Feldes. Die Sprache ist aber hilfreich, Ähnlichkeiten zu natürlichen Prozessen erkennen und möglicherweise nutzen zu können. Die Geschwindigkeit, mit der ein menschlicher Körper eine Antibiotikumresistenz erwirbt oder ein AIDS-Virus sich ändert, indem er seine Erscheinungsform modifiziert und so für sich optimiert, ist erfreulich oder beängstigend – in jedem Fall faszinierend. *Transposons*, *springende Gene* und andere geniale *Erfindungen* der Natur können uns zeigen, wie schnell gute Lösungen erreicht werden können. Die hier folgende Beschreibung beschränkt sich allerdings auf schon lange bekannte, als klassisch zu bezeichnende, Verfahren der Vererbung.

Abhängig davon, ob ein Minimum oder ein Maximum gesucht wird, ist bei der Betrachtung der Qualität  $\mathcal{G}(\mathcal{L})$  einer Lösung  $\mathcal{L}$  ein niedriger oder hoher Wert anzustreben. Um hier nicht immer



**Abb. 8.6a:** Beispiel für die Anwendung eines genetischen Algorithmus. Die graue Linie stellt die beobachteten Verbrauchswerte aus Abbildung 6.3a dar, die schwarze die mit einem genetischen Algorithmus angepasste Modellfunktion der Form aus Gleichung 8.24. Die Rechnungen wurden mit *goodSyncOpti* durchgeführt.

unterscheiden zu müssen, wird zusätzlich die Fitness  $F(\mathcal{L})$  einer Lösung eingeführt. Diese wird so definiert, dass stets ein Maximum der Fitness gesucht wird. Soll in dem zu lösenden Problem ein Maximum bestimmt werden, kann

$$F(\mathcal{L}) = \mathcal{G}(\mathcal{L}) \quad (8.23a)$$

gewählt werden. Wird ein Minimum gesucht und gilt für alle Lösungen  $\mathcal{G}(\mathcal{L}) > 0$ , so kann

$$F(\mathcal{L}) = \frac{1}{\mathcal{G}(\mathcal{L})} \quad (8.23b)$$

gesetzt werden. Folgend werden die einzelnen Schritte des Algorithmus 8.4 erläutert. Ein Abbruchkriterium kann die Anzahl maximal zu betrachtender Generationen sein oder aber auch, dass für mehrere Generationen keine Verbesserung beobachtet wird. Die genaue Formulierung des Kriteriums gestaltet sich hier ähnlich schwierig wie bei den heuristischen Verfahren. Selbst wenn über viele Generationen keine Verbesserung beobachtet wird, bedeutet das nicht, dass keine möglich ist.

zu a : Hier werden die definierte Qualitäts- und eine Fitnessfunktion wie in (8.23) definiert, verwendet.

zu b : Auch wenn es etwas unromantisch und elitär klingt, könnte ein mögliches Heiratsschema lauten: Wähle Individuen zufällig proportional zu ihrer Qualität oder Fitness, wie in dem Exkurs auf Seite 205 beschrieben. Ein mögliches Verfahren zur Erzeugung von Nachkommen ist das aus der Natur bekannte *cross over*, bei dem zwei Segmente zwischen zwei Chromosomen ausgetauscht werden. Anders als bei den Operatoren heuristischer Verfahren können hierbei unzulässige Lösungen entstehen. Bei der Codierung von Koeffizienten

ist jede Lösung zulässig, bei der Bestimmung einer optimalen Route kann es leicht zu fehlenden und doppelten Punkten kommen. Diese nicht zulässigen Lösungen können entweder verworfen oder repariert werden. Eine Möglichkeit der Reparatur ist das *partially matched cross over* [Mic92], wie es im Vorgehen 8.2 beschrieben ist.

zu c : Bei einer Binärdarstellung können einzelne Bits jeweils negiert werden.

zu d : Dieses beeinflusst die Konvergenzgeschwindigkeit maßgeblich. Grundsätzlich kann zwischen zwei Strategien, der + – und der , – Strategie unterschieden werden. Bei der + – Strategie werden die neuen  $\mu$  Individuen aus den  $\mu + \lambda$  Eltern und Kindern bestimmt, bei der , – Strategie nur aus den  $\lambda$  Kindern. Zur Auswahl werden die Fitnesswerte für die in Frage kommenden Individuen, Kinder oder Kinder und Eltern, betrachtet. Anwendbare Regeln sind [SHF94]:

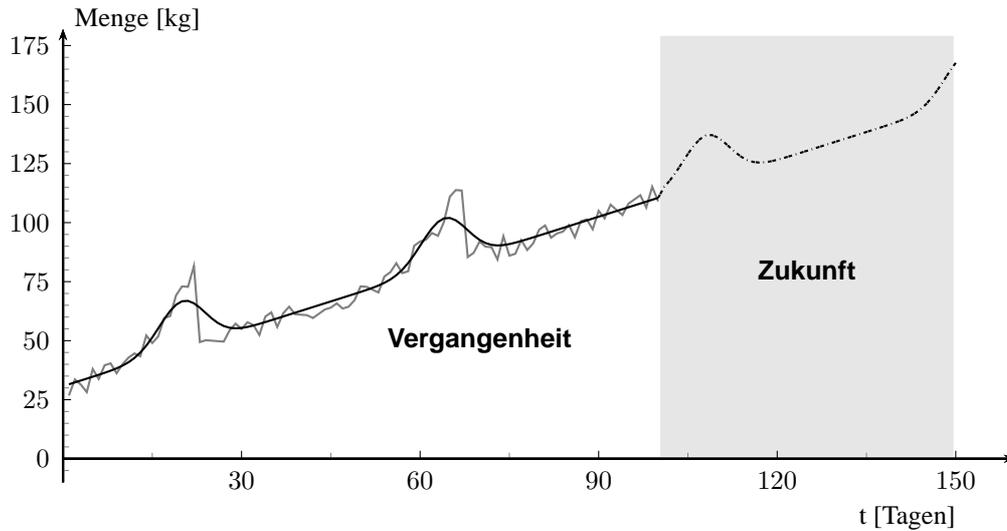
- Führe keine Mutation durch und übernehme die  $\mu$  besten Individuen. Dieses ist auch als **Elitismus** oder *survival of the fittest* bekannt.
- Übernehme die  $\mu$  besten Individuen in mutierter Form. Dieses ist auch als schwacher Elitismus oder *survival of the fittest* bekannt.
- Übernehme  $\mu$  Individuen proportional zu ihrer Fitness.
- Bestimme eine Zahl  $\nu < \mu$ . Übernehme die besten  $\mu - \nu$  Individuen und anschließend  $\nu$  zufällig.

Das Verhältnis  $s = \frac{\mu}{\lambda}$  heißt Selektionsdruck und beeinflusst entscheidend das Verhalten des Algorithmus.

Die Leistungsfähigkeit genetischer Algorithmen soll an dem bereits mehrfach angesprochenen Problem der Kurvenanpassung demonstriert werden. Ausgangspunkt sind wieder die Daten aus Abbildung 6.3a. Das Ziel soll es abermals sein, aus diesen Beobachtungswerten **Prognosen** für das zukünftige Verhalten zu erstellen. Mit den Verfahren in Regel 7.1 wurde eine erste Möglichkeit angedeutet und Ergebnisse in den Abbildungen 7.2a und 7.2b dargestellt, die lineare Regression in Abbildung 8.2 stellte eine zweite Möglichkeit dar. Beiden ist gemeinsam, dass sie die periodischen Schwankungen nicht oder nur unzureichend berücksichtigen können. Dieses wird nun durch den Einsatz genetischer Algorithmen behoben. Ausgangspunkt ist entsprechend der Anteile aus Gleichung (6.8) folgende Modellfunktion:

$$f(c_0, \dots, c_5; t) = \underbrace{c_0}_{X^{(k)}(t)} + \underbrace{c_1 t}_{X^{(l)}(t)} + \underbrace{c_2 e^{-\frac{(t-c_3)^2}{c_4}} + c_5 e^{-\frac{(t-c_5)^2}{c_4}}}_{X^{(p)}(t)} \quad (8.24)$$

Es werden durch den Einsatz eines genetischen Algorithmus die Koeffizienten  $c_0, \dots, c_5$  durch Suchen des Minimums der Funktion aus Gleichung (8.10) bestimmt. Hierzu werden die vorhandenen Werte, d. h. die bekannten Werte der Vergangenheit, verwendet. Eine Rechnung von wenigen Sekunden liefert die in Abbildung 8.3.3 aufgeführten Ergebnisse.



**Abb. 8.6b:** Die aus den Ergebnissen des genetischen Algorithmus abgeleitete Prognose. Wie Abbildung 8.6a. Die gestrichelte Kurve zeigt die prognostizierten Werte. Die Rechnungen wurden mit *goodSyncFore* durchgeführt.

$c_0 = 30.745$	$c_1 = 0.797$
$c_2 = 20.005$	$c_3 = 20.017$
$c_4 = 30.020$	$c_5 = 64$

Die sich mit diesen Koeffizienten ergebende Regressionsfunktion ist in Abbildung 8.6a zusammen mit den Ausgangsdaten gezeigt. Die zufälligen Schwankungen werden von dieser Kurve hervorragend ausgeglichen. Die periodischen Einflüsse werden bereits sehr gut beschrieben. Die berechnete Lage stimmt mit den beobachteten überein, jedoch sind die Formen unterschiedlich. Die Anstiege liegen aufeinander, jedoch weichen die rechten Flanken voneinander ab. Ursache ist die Modellfunktion (8.24), bei denen der periodische Anteil jeweils durch symmetrische Funktionen repräsentiert wird und der genetische Algorithmus natürlich auch versucht, eine solche Funktion anzupassen. Trotz dieser kleinen Diskrepanz, kann das Ergebnis hervorragend für das Erstellen einer **Prognose** genutzt werden. Eine solche Vorhersage zukünftigen Verhaltens ist in Abbildung 8.6b zu sehen. Rechenzeiten von wenigen Minuten gestatten es mühelos, verschiedene Modellfunktionen zu testen. Auch nicht symmetrische Funktionen lassen sich berücksichtigen. Dieses Ergebnis ist jedoch bereits so gut, dass weitere Verbesserungsmöglichkeiten nicht bei dem Einsatz der Optimierungsverfahren zu suchen sind. Entscheidend in der praktischen Anwendung ist es nun, die Datenqualität zu erhöhen und Möglichkeiten zu schaffen, Vorhersagen im Sinne experimenteller Logistik überprüfen zu können: Diese Vorhersagen liefern einen Beitrag zum **Datenkreislauf**, operative Daten müssen ihren Anteil beisteuern. **Informationsentropie** kann erheblich reduziert werden, die Planung entscheidend verbessert und Effizienz erheblich gesteigert werden.

Alle beschriebenen Verfahren stellen sehr leistungsfähige Werkzeuge dar, optimale Lösungen

---

auch für komplexe Probleme zu finden. Sie können nie blind oder mechanisch angewandt werden. Sie sind abhängig von unterschiedlichen Parametern wie die Art der Erzeugung neuer Lösung, der Wahl der Operatoren, Auswahlmechanismen, Temperaturen oder Populationsgrößen. Die Übertragung eines einmal erfolgreichen Vorgehens kann genauso erfolgversprechend sein wie die Verwendung eines für die Bearbeitung eines Tisches erfolgreich eingesetzten Schwing schleifers zum Polieren eines Autos – kann, muss aber nicht. Bei den Verfahren handelt es sich um Techniken, die erst durch den richtigen Umgang zu Werkzeugen werden. Das Verständnis der Probleme, das Kennen der Techniken und das Wissen um ihre Möglichkeiten ist gleichermaßen erforderlich. Dieses gilt ebenso für die handfesteren Techniken des folgenden Kapitels, die auch erst durch die richtige Nutzung zu guten Werkzeugen werden können.



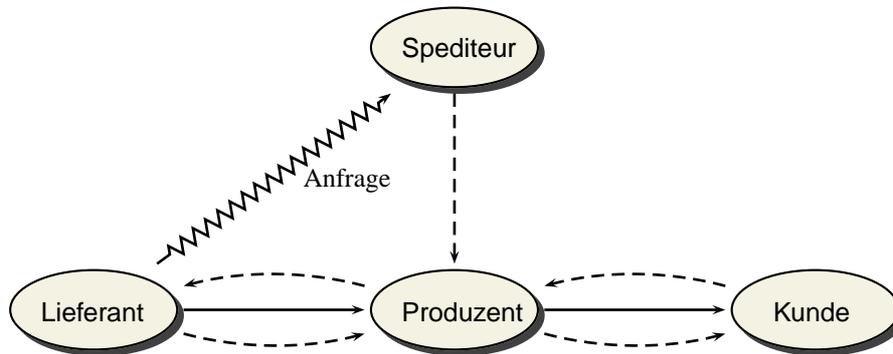
# 9

## Technik für die Logistik

### 9.1 Komponenten

Im letzten Kapitel wurden nach der Beschreibung mathematischer Methoden handfesteres angekündigt. Dieses wird sofort wieder eingeschränkt. Für eine Diskussion des wirklich Handfesten, wie Lager-, Förder- oder Handhabungssysteme wird auf andere Literatur [z. B. JS99] verwiesen. Die Säule *Technik* in Abbildung 1.2 wird auf den elektronischen Teil reduziert. Bereits bei dieser eingeschränkten Betrachtung fällt es nicht immer leicht, den Überblick zu behalten. Wird *GSM* benötigt oder *UMTS*, oder *GPRS* und was unterscheidet dieses von *GPS* oder ist es ähnlich zu *GSM-R*? Funktioniert ein *GPS*-Sender auch, wenn ein Auto in einer Tiefgarage steht oder müssen wir hier auf *GALILEO* warten oder kann vielleicht doch *GLONASS* oder *LORAN-C* genutzt werden, oder gibt es möglicherweise gar keinen *GPS*-Sender sondern nur *GPS*-Empfänger? Sollen aktive *smart label*, semi-aktive Transponder, passive *RFID tags*, *data matrix* oder *OCR-label* zur Kennzeichnung an Paletten angebracht werden und wird dieses von *APO* im *ERP* über ein *VPN* unterstützt? Die Vielzahl der Möglichkeiten erscheint grenzenlos, die Menge an Begriffen unendlich. So wie ein Algorithmus kein Problem lösen kann, sondern nur ein Werkzeug zum Lösen ist, muss auch jedes technische Gerät gesehen werden. Es ist kein Ersatz für die verloren gegangene Spielzeugeisenbahn, sondern ein Hilfsmittel. Es soll helfen, die Ziele der Logistik aus Kapitel 1.1, die *effiziente Realisierung von Kundenaufträgen*, zu erreichen und dabei **Informativonsfähigkeit** und **Reaktionsfähigkeit** sicher zu stellen.

Auch bei der technischen Realisierung eines Prozesses ist auf Schlankeheit zu achten. Ein ausschließliches Beäugen der Investitionskosten und der damit verbundenen Kapitalbindung kann verheerende Auswirkungen haben. Eine prozessorientierte Betrachtung, d. h. eine Betrachtung der *total cost of application (TCA)* oder *total cost of ownership (TCO)*, zusammen mit einer Nutzenbetrachtung ist angebracht. Das Entwickeln einer von jedem Laien bedienbaren technischen Lösung erfordert einen hohen Aufwand und somit hohe Kosten. Eine weniger aufwendig entwickelte Lösung ist preiswerter, bedarf aber gut ausgebildeten Personals und somit hoher Kosten für



**Abb. 9.1:** Teil der Lieferkette für Automobilproduktion

die Qualifikation. Es ist das Minimum gegenläufiger Funktionen zu bestimmen, das Minimum von Funktionen, die für die gesamte Lebensdauer Bestand haben müssen. Es ist beispielsweise zu entscheiden, ob es wirklich erforderlich ist, jedes Fahrzeug mit dem aktuell jeweils günstigsten Bordcomputer auszustatten, um dann bei jedem Versionswechsel auf jedem Fahrzeug eine für jeden Rechnertyp unterschiedliche neue Version installieren zu müssen oder ob es günstiger ist, eine teurere Standardlösung zu wählen, die mit einer identischen Software ausgestattet werden kann und bei der der Pflegeaufwand gering ist.

Zur Diskussion erforderlicher technischer Komponenten und der Anforderungen an diese soll ein Ausschnitt des auf Seite 20 skizzierten Prozesses, bei dem ein kleiner Teil der Lieferkette eines Automobils gezeigt ist, etwas detaillierter betrachtet werden. Abbildung 9.2 gibt einen Überblick über die beteiligten Akteure und mögliche Kommunikationswege. Ansprechpartner für den Kunden ist oftmals nicht der Produzent sondern eine anonyme Institution, die für die Auftragsabwicklung zuständig ist und dem Kunden gegenüber auskunftsfähig sein soll. Für den Kunden sollte diese Unterscheidung vollkommen belanglos sein. Ansprechpartner für Fragen, die zwischen Produzent, Spediteur, Frachtführer und Lieferant auftreten, ist ein anderer Akteur.

**Abb. 9.2:** Akteure eines Lieferkette und deren Verbindungen

Auf die Integration eines möglichen Lieferanten des Lieferanten soll hier verzichtet werden. Ob es sich bei der Betrachtung um ein Cockpit oder einen Motor handelt, ist vollkommen unbedeutend. Was muss oder was soll gemacht werden, damit das von dem Kunden bestellte Fahrzeug rechtzeitig ausgeliefert werden, der Kunde nach der Auftragsbestätigung noch Änderungswünsche vorbringen und sich über den aktuellen Status seiner Bestellung informieren kann? Die Übersicht aus Exkurs 9.1 zeigt die einzelnen Schritte und die jeweils benötigten technischen Ausstattungen, um zu jedem Zeitpunkt eine größtmögliche Informationsfähigkeit zu ermöglichen.

Zusammengefasst werden

**Exkurs 9.1 Auftragsabwicklung und benötigte Technik****Kunde bestellt Fahrzeug**

Der Kundenwunsch muss übermittelt, erfasst und an interne Systeme übertragen werden. Abschließend ist der Auftrag zu bestätigen.

Es werden Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Kunde und Produzent und innerhalb der internen Systeme benötigt. Für die Erfassung der Kundendaten und die Konfiguration des Fahrzeuges wird ein Zugriff auf Datenbanken, d. h. Rechner, benötigt.

**Produktionsplanung**

Der Auftrag muss eingeplant und die Verfügbarkeit der benötigten Teile sichergestellt werden.

Es müssen Daten von verschiedenen internen Systemen, d. h. Rechnern, zur Verfügung gestellt werden. Für die Planung wird Rechenleistung benötigt. Für die Steuerung der Produktionsanlagen werden Rechner benötigt, die in Echtzeit reagieren können.

**Bereitstellung**

Die Anlieferung des Cockpits ist sicher zu stellen.

Daten des Lieferanten, Daten des Spediteurs und gegebenenfalls eines Frachtführers sind mit den internen Planungs- und Produktionsdaten zu verbinden. Hier werden Rechner und Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Disponenten und Rechnern benötigt. Für die Steuerung der Transportprozesse sind Fahrzeugrechner, Kommunikation mit den Fahrzeugen, Ortung der Fahrzeuge und Identifikation des Materials bzw. der Behälter erforderlich. Die Daten sind mit internen Daten und denen von Dienstleistern zu verbinden, d. h. Datenbanken müssen miteinander kommunizieren. Für das Erfassen des Materials werden mobile Geräte, Scanner und hierin integrierte Rechner benötigt.

**Produktion**

Die Produktion des Fahrzeuges ist sicher zu stellen.

Für die Steuerung der internen Bereitstellung ist die gleiche Ausstattung erforderlich wie für die Bereitstellung, allerdings für Gabelstapler und nicht für Lkw, d. h. eine inhouse-Lösung. Produktionsdaten sind mit Logistikkdaten zu verknüpfen.

**Distribution**

Die Anlieferung des Fahrzeuges ist sicher zu stellen.

Hier gilt das Gleiche wie im Falle der Bereitstellung, allerdings muss mit dem Kunden mit den von diesem zur Verfügung gestellten Mitteln kommuniziert werden. Gibt es bei der Kommunikation zwischen Produzent und Lieferant die Möglichkeiten, technische Details in Rahmenvereinbarungen festzulegen, muss bei der Kommunikation mit Kunden jede gängige Technik möglich sein.

Klasse	Staub	Wasser
0	Kein Berührungsschutz, kein Schutz gegen feste Fremdkörper	Kein Wasserschutz
1	Schutz gegen großflächige Berührung mit der Hand Schutz gegen Fremdkörper $\varnothing > 50$ mm	Schutz gegen senkrecht fallende Wassertropfen
2	Schutz gegen Berührungen mit den Fingern Schutz gegen Fremdkörper $\varnothing > 12$ mm	Schutz gegen schräg fallende Wassertropfen (beliebiger Winkel bis zu $15^\circ$ zur Senkrechten)
3	Schutz gegen Berührungen mit Werkzeug, Drähten o. ä. mit $\varnothing > 2,5$ mm Schutz gegen Fremdkörper $\varnothing > 2,5$ mm	Schutz gegen Wasser aus beliebigem Winkel bis zu $60^\circ$ aus der Senkrechten
4	Schutz gegen Berührungen mit Werkzeug, Drähten o. ä. mit $\varnothing > 1$ mm Schutz gegen Fremdkörper $\varnothing > 1$ mm	Schutz gegen Spritzwasser aus allen Richtungen
5	Schutz gegen Berührung Schutz gegen Staubablagerungen im Inneren	Schutz gegen Wasserstrahl (Düse) aus beliebigem Winkel
6	Vollständiger Schutz gegen Berührung Schutz gegen Eindringen von Staub	Schutz gegen vorübergehende Überflutung
7		Schutz gegen Wassereindringung bei zeitweisem Eintauchen
8		Schutz gegen Druckwasser bei dauerndem Untertauchen

**Tab. 9.1:** IP-Schutzklassen technischer Geräte – Die Angabe erfolgt in der Form IP64, wobei die erste Ziffer für den Schutz gegen Staub und die zweite für den gegen Wasser steht.

- Rechner,
- Ortung und
- Kommunikation,
- Identifikation

benötigt.

## 9.2 Rechner

Rechner kommen in allen vorstellbaren Ausführungen zum Einsatz: Endgeräte, PC's oder Bildschirme an Arbeitsplätzen, Serversysteme für Datenbanken, Systeme zum *Rechnen – number cruncher* –, mobile Geräte in Fahrzeugen und eine Vielzahl so genannter *embedded*-Systeme in diversen Endgeräten. Für alle Rechner sind folgende technischen Anforderungen zu definieren:

- Verfügbarkeit,
- Speicherkapazität,
- Reaktionszeit,
- Zugriffsgeschwindigkeit,
- Rechenleistung und
- Kommunikationsfähigkeit

Für logistische Anwendungen sind diese jeweils in realen Umgebungen zu betrachten und somit

die möglichen Auswirkung von Umwelteinflüssen bei der Auswahl von Systemen zu berücksichtigen. Zu den zu beachtenden Einwirkungen zählen:

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| a. Staub,                              | d. Temperatur,                   |
| b. Feuchtigkeit,                       | e. Spannungsschwankungen,        |
| c. Erschütterungen und Vibrationen und | f. elektromagnetische Strahlung. |

zu a und b: Hier gibt es die Klassifikation gemäß des *international protection*-Code oder IP-Schutzklassen, die bestimmen, welche Einflüsse durch Staub und Feuchtigkeit von einem Gerät ausgehalten werden müssen. Die Angabe erfolgt durch *IP* gefolgt von zwei Ziffern, also z. B. IP65. Die erste Ziffer gibt an, wie hoch die Empfindlichkeit gegenüber Staub ist, die zweite die gegenüber Feuchtigkeit. Eine höhere Zahl bedeutet jeweils einen höheren Schutz bzw. eine geringere Empfindlichkeit: IP00 steht somit für absolut ungeschützt, alle anderen Werte können Tabelle 9.1 entnommen werden. Bei Auswahl der erforderlichen Schutzklasse ist zu bedenken, dass feucht gewordener und wieder angetrockneter Betonstaub nahezu jedes bewegliche Teil unwiderruflich zerstört.

zu c : Erschütterungen in dem Fahrerhaus eines gefederten Lkw sind andersartig als die eines vollgummibereiften Gabelstaplers oder eines Güterwaggon. Wird ein Güterwaggon mittels eines Prellbocks abgebremst oder stößt ein Gabelstapler beim Rangieren gegen die Ecke eines Regales, treten kurzzeitig extrem hohe Beschleunigungskräfte auf, die Verbindungsstellen leicht zerstören können. Auch die Festplatten von Rechnern und Steckverbindungen sind mechanische Teile, deren Fehlfunktion nach heftigen Erschütterungen zu einem Ausfall komplexer System führen kann.

zu d : Temperaturbedingte Einflüsse sind sehr vielfältig: In einem Fahrerhaus, das auf einem sonnigen Parkplatz steht, kann die Temperatur auf über 70°C steigen, im Winter auch unter -30°C sinken. Displays und Batterien verlieren ihre Funktionsfähigkeit bei Kälte. Wird Luft abgekühlt, nimmt ihre Fähigkeit ab, Feuchtigkeit aufzunehmen. Die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit schlägt sich als Reif nieder. Gelangt warme, normal feuchte Luft in einen Lagerraum, der auf -28°C gekühlt ist, können bewegliche Teil durch diesen Reif festfrieren und Antriebe beschädigen.

zu e : Auf Fahrzeugen treten zeitweise beträchtliche Spannungsschwankungen, z. B. beim Zünden oder beim Aufnehmen großer Lasten, auf. Im Extremfall können diese die Elektronik zerstören. Sind viele der mechanischen Belastungen bekannt und reproduzierbar, so trifft dieses für für elektrische Störungen nur bedingt zu. Da diese teilweise nur Bruchteile von Sekunden andauern, fällt das Beobachten sehr schwer, auch wenn die Schäden beträchtlich sind. Da diese Störungen oftmals nur im Zusammenspiel mehrerer Faktoren zum Vorschein kommen, bedarf das Feststellen derart kurzer Störungen eines sorgfältigen und geplanten Vorgehens.

Ein weiterer großer Feind stationärer und mobiler Geräte sind statische Aufladungen, die z. B. durch Reibung von Schuhen auf Boden entstehen können. Das Öffnen von Gehäusen und Berühren der Bauteile ohne eine vorherige Erdung muss vermieden werden.

zu f : Elektromagnetische Strahlung, gewollt hervorgerufen durch Mobiltelefone, Transponder, *blue tooth* oder drahtlose Netzwerke oder ungewollt, wie z. B. durch die auf Gabelstaplern stattfindende Umwandlung von Gleich- in Wechselstrom, erfüllen mit unterschiedlichen Eigenschaften unsere gesamte Umgebung. Diese kann die Funktionsfähigkeit nicht ausreichend geschützter Geräte beeinflussen. Wie bei den Spannungsschwankungen ist es auch

hierbei ein Problem, dass Menschen kein Sinnesorgan für diese Art von Verschmutzung haben und diese oftmals ebenfalls nur sporadisch und sehr kurzzeitig auftritt und folglich nur schwer nachzuweisen ist. Sind diese technische Störeinflüsse, die bei der Betrachtung von Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit elektronischer Geräte beachtet werden müssen, so führen Geräte, wie z. B. Rechner, gleichwohl selbst zu Störungen. Rechner sind Sender mit nicht spezifizierten Frequenzen und einer Sendeleistung, die höher ist als die von Mobiltelefonen. Beim Einsatz verschiedener Rechner ergibt sich ein Wirrwarr elektromagnetischen Schrotts, der sich insbesondere bei dem Versuch, schwache elektromagnetische Signale, wie denen von Transpondern, zu empfangen sehr störend auswirken kann.

Wenn auch nicht häufiger, so doch oftmals sehr viel gravierender, sind die durch den Anwender hervorgerufenen Störungen.

- |                                    |                                      |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| a. Installation von Software,      | c. benutzerdefinierte Einstellungen, |
| b. automatische und <i>updates</i> | d. neue Hardware.                    |

zu a : Dieses lässt sich gänzlich vermeiden und ist dennoch die Hauptursache für Fehlfunktionen. Das Spielen mit unbekanntem und nicht beherrschten Eigenschaften neuer Software dauert Stunden, Diskussionen selbst ernannter Experten über Tricks und neue *features* kostet Zeit, das Ausprobieren neuer Funktionen kann Datenverluste nicht immer vermeiden.

zu b : Natürlich kann ständig mit der neuesten Version gearbeitet werden wollen. Wie sollen Dokumentationen gepflegt, Mitarbeiter geschult und der Erfahrungsaustausch zwischen Mitarbeitern gestaltet werden, wenn jeder eine etwas andere Version einsetzt? Wie ist sicher gestellt, dass jede neue Version die geforderten und bekannten Eigenschaften erfüllt? Das Öffnen eines jeden Arbeitsplatzrechners für beliebige *updates* stellt ein Sicherheitsrisiko dar.

zu c : Dieses ist das Greuel schlechthin. Das Ändern von Systemparametern, das Hinzufügen neuer Dienste, neue Länder- oder Spracheinstellungen oder das Verstellen der Systemzeit sind schnell umgesetzt, die Auswirkungen kosten Stunden oder Tage. Es ist schwierig genug, Messer für Linkshänder zu finden, weitaus seltener sind jedoch Dokumentationen für Linkshänder. Auch wenn es angenehmer sein mag, eine *mouse* in die linke Hand zu nehmen und die rechte mit der linken *mouse*-Taste zu vertauschen, sollten die Konsequenzen deutlich sein. Der Wunsch, die Eigenschaften zu sehen, führt zum Öffnen der Datei. Die Vorstellung, dass bei einem Auto Gas- und Bremspedal vertauscht werden, ist ähnlich. Einem Fahranfänger das Fahren mit vertauschten Pedalen zu erklären oder dieses in einer Stresssituation zu erleben, ist sicher nicht ungefährlich. Das Ändern der Schriftgröße führt zu unvollständigen Ausgaben, schönere andere Farben können eine Dokumentation wertlos machen, weil ehemals blaue Schaltflächen in leuchtendem Rot und ehemals rote in kräftigem Blau erscheinen.

zu d : Natürlich kann alles verbessert werden, aber für Rechner gilt „Never touch a running system!“ Bastler und technikbegeisterte Spielkinder sollten ihren Spieltrieb nicht an Rechnern auslassen, mit denen gearbeitet werden soll.

**Weisheit 9.1** *Rechner in Unternehmen sind Werkzeuge – keine Spielzeuge.*

Beispiele aus der Praxis könnten hier zuhauf aufgeführt werden: Die Installation neuer noch schnellerer Grafik- oder Netzwerkkarten mit der Anpassung von Adressen können einen stundenlangen Technikereinsatz nach sich ziehen, da Auswirkungen der Modifikationen oftmals nicht

sofort sichtbar sind. Noch schlimmer sind selbst entwickelte, nein *selbst gestrickte*, Makros oder Dokumentenvorlagen, die aus zweiseitigen Formularen bei längeren Nachnamen dreiseitige machen und Versuche, Datenbankfunktionalitäten mit einer Tabellenkalkulation nachzubilden. All dieses führt zu reduzierter Verfügbarkeit, fehlerhaftem Verhalten und hohen Kosten.

Auch wenn die Installation neuer Versionen von eigenen Mitarbeitern durchgeführt wird, entstehen Kosten. Diese *eh da*-Kosten übersteigen schnell die einer Fernwartung. Werden solche Arbeiten von verschiedenen Mitarbeitern ohne Festlegung von Regeln durchgeführt, sind Folgekosten unvermeidbar. Besonders schlimm wird dieses, wenn Software installiert wird, die erwartet, dass der Nutzer Administratorenrechte benötigt. Dies bedeutet, dass jeweils ein Systemadministrator erscheinen muss. Erhält jeder Nutzer die vollen Administratorenrechte, ist dieses eine Garantie für das Nichtfunktionieren bei gegebenen Anforderungen. Allein die Tatsache, dass ein Mitarbeiter die Zeiteinstellung an seinem Rechner verstellen kann, weil er ständig mit einem Kollegen in Mexiko zu tun hat, ist eine Katastrophe. Die von ihm erstellten Dateien hinken alle der Zeit hinterher. Wird auf diesem Rechner eine Datei geändert, die von dem Rechner aus dem Nachbarbüro mit normaler Zeit stammt, so ist der Zeitstempel der Änderung vor dem des Erstellens. Da Zeiten, Zeitpunkte und -räume in der Logistik eine entscheidende Rolle spielen, muss ein solches Verhalten ausgeschlossen werden. Bei einer Nutzung in einem multikulturellen Umfeld ist eine Entscheidung, mit welcher Zeit und in welcher Sprache gearbeitet wird, auch für einen Rechner entscheidend und nicht beliebig änderbar. Zu den bei einer Betrachtung aller Kosten relevanten Aspekte zählen auch die Ausgaben, die dadurch entstehen, dass ein Termin nicht eingehalten wird, weil ein Datum in der Form *05-07-06* automatisch erstellt und dieses falsch interpretiert wird oder weil in einem auf einem Rechner erstellten Brief das Datum automatisch erstellt wird. Nach dem Senden dieses Briefes als Anhang einer *email* kann der Empfänger diesen öffnen und erhält als Datum das zu dem Zeitpunkt des Öffnens auf seinem Rechner aktuelle. Missverständnisse, z. B. bei Zahlungszielen sind unvermeidbar.

Auch wenn Rechner mittlerweile sehr *billig* geworden sind, sollten Anforderungen für Rechner, Hard- und Software, und Anwender präzise definiert und erst dann die Umsetzung geplant werden. Dieses muss nicht für jeden Arbeitsplatz, im Büro oder im Fahrzeug, erfolgen, sondern jeweils für eine Klasse von Arbeitsplätzen. Folgende Fragen sind an die Systemeigenschaften zu stellen:

- |                           |                    |
|---------------------------|--------------------|
| a. Mehrbenutzerfähigkeit  | d. Skalierbarkeit  |
| b. Prioritätengesteuert   | e. Offenheit       |
| c. <i>multi job fähig</i> | f. Zuverlässigkeit |

zu a : Dieses bedeutet, dass mehrere Benutzer gleichzeitig an einem System arbeiten können sollen, ohne sich gegenseitig zu behindern oder zu stören. Benutzer sollen gleichzeitig auf einen Datenbestand so zugreifen können, dass sie einen konsistenten Datenbestand sehen. Zwei Disponenten sollen gleichzeitig eine Routenplanung durchführen können, ohne Fahrzeuge einzuplanen, die der andere gerade reserviert.

zu b : Es können nicht alle Aufgaben mit gleicher Wichtigkeit behandelt werden. Sollen z. B. Daten gesichert werden, muss es möglich sein, dieses zu tun, auch mit der Konsequenz, dass geöffnete Dateien geschlossen und laufende Programme nach festen Regeln abgebrochen werden. Wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt eine Routenplanung erstellt werden muss, darf der Termin nicht dadurch gefährdet sein, dass jemand anders eine Budgetplanung für das übernächste Jahr erstellt.

- zu c : Können mehrere Programme gleichzeitig auf einem Rechner laufen, ohne sich zu behindern? Ein Modul, das auf mögliche Meldungen von Fahrern wartet, soll ständig bereit, muss aber nicht sichtbar sein. Sobald eine Meldung eingeht, muss eine Reaktion erfolgen können. In Ergänzung zu einer Prioritätensteuerung kann es erforderlich sein, dass diese auch dann wahrnehmbar ist, wenn der Nutzer den Lautsprecher abgestellt hat oder mit einer anderen Anwendung arbeitet. Wünschenswert wäre es zu wissen, ob diese Meldung von höherer Priorität ist als die Sitzung, die der Anwender gerade leitet.
- zu d : Dieses birgt eines der großen Einsparpotenziale heutzutage im Einsatz befindlicher kaufmännischer und logistischer Lösungen. So werden für Rechner auf Gabelstaplern andere Systeme eingesetzt als beim Disponenten und wenn aus einem Disponenten eine Dispositionsabteilung mit mehreren Mitarbeitern wird, muss wieder etwas Neues angeschafft werden. Systeme sollten so sein, dass sie unabhängig von ihrer Größe gleich aussehen und auch gleiche Module nutzen können. In einem Fahrzeug kann kein Großrechner oder *main frame* eingesetzt werden, und in einem Büro kein Mikrocontroller mit einem Echtzeitbetriebssystem. Wichtige Oberflächen, die in verschiedenen Umgebungen benötigt werden, müssen für alle Nutzer gleich sein. Wird der Fuhrpark von hundert auf tausend Fahrzeuge vergrößert, mögen ein neuer Rechner und eine neue Lizenz gekauft werden müssen, aber keine neue Software und schon gar keine neue Softwareentwicklung. Dieses ist wie die Selbstähnlichkeit chaotischer Systeme: Egal in welcher Vergrößerung sie betrachtet werden, sie sehen immer gleich aus. Dieses steigert die Zuverlässigkeit und reduziert Wartungs-, Instandhaltungs- und Schulungskosten. Die Anpassung an geänderte Gegebenheiten muss so erfolgen können, dass alle Beteiligten und laufende Anwendungen möglichst wenig gestört werden.
- zu e : Die Systeme müssen so offen sein, dass sie mit möglichst weit verbreiteten Anwendungen arbeiten können. Für das Lesen von Texten bieten sich *.pdf*-Dokumente an, für den Austausch einfacher Daten Textdateien in Standardformaten, in denen mit einfachen Mitteln sowohl Datenschutz als auch Datensicherheit zu gewährleisten sind oder Datenbanken, die unabhängig von einem Betriebssystem eingesetzt werden können und auf die über Standardabfragesprachen wie *structured query language (SQL)* zugegriffen werden kann. Die Kommunikation zwischen Rechnern darf nicht durch technische Probleme behindert werden. Standardisierte Protokolle wie *TCP/IP* liefern Leistungsfähigkeit, Offenheit und vielfältige Möglichkeiten in einem. Das Einrichten eines *virtual private network (VPN)* gestattet einen sicheren und schnellen Datenaustausch.
- zu f : Für Anwendungen ist die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems bestehend aus Hard- und Software entscheidend. Eine Zuverlässigkeit von 99.9 % bedeutet, dass das System noch mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.1 % ausfallen kann. Dieses entspricht 0.365 Tagen oder ungefähr neun Stunden je Jahr. 99.995 % entsprechen einer Nicht-Verfügbarkeit von ungefähr dreißig Minuten. Ein Neustart eines Rechners muss schon sehr gut überlegt werden, eine Neuinstallation mit verbundenem Abschalten eines Systems faktisch ausgeschlossen sein, wenn eine solche hohe Verfügbarkeit verlangt wird. Ein Verschieben auf Nacht- oder Wochenendstunden hilft nicht, wenn ein Zugriff Rund-um-die-Uhr garantiert ist. System und Anwendung müssen robust sein gegen fehlerhafte Eingaben oder falsche Bedienung. Das zufällige Betätigen eines Aus-Schalters darf nicht möglich sein.
- Es darf möglich sein, dass eine Berechnung nicht durchgeführt wird. Es darf nicht möglich sein, dass falsche Ergebnisse erstellt werden. Unter keinen Umständen dürfen vorhandene Daten vernichtet oder ungewollt verändert werden können.

Auch bei der Auswahl von Rechnern und Systemen sind die Grundprinzipien der Logistik, das

Streben nach den 8 r, anzuwenden. Nicht die Maschine ist das Entscheidende, sondern die Fähigkeit, ein oder mehrere gegebene Probleme effizient lösen zu können. Nicht jede aus dem privaten Umfeld vertraute Maschine und Software kann direkt in eine Büro- oder Produktionsumgebung übernommen werden.

## 9.3 Kommunikation

Gleiches gilt für die richtige Auswahl von Kommunikationstechniken. Nach der Diskussion möglicher Kommunikationsformen in Kapitel 3.3 sollen hier verschiedene technische Möglichkeiten vorgestellt und verglichen werden. Die Kommunikation zwischen zwei Rechnern ist oben bereits angesprochen worden. In dem in Exkurs 9.2 skizzierten Beispiel sind insgesamt folgende Schnittstellen zu bedienen:

- Mensch ↔ Mensch
- Mensch ↔ Maschine
- Maschine ↔ Maschine

Jede einzelne hat seine Besonderheiten, die nicht ohne Änderung auf eine andere übertragen werden können [Dah06]. Betrachten wir hierzu einen kleinen Ausschnitt aus dem Datenfluss, die erforderliche Kommunikation, damit ein Produktionsmitarbeiter nach Ändern des Produktionsplans weiß, dass das benötigte Cockpit rechtzeitig ankommt. Er fragt bei dem für das Material zuständigen Disponenten nach, der, vorausgesetzt er weiß, auf welchem Fahrzeug sich das Material befindet, Kontakt mit dem Fahrer des Fahrzeuges aufnimmt. Setzen wir ferner voraus, dass dieser weiß, welchen Behälter er überprüfen muss, ergibt sich folgender möglicher Ablauf.

### Vorgehen 9.1 Überprüfen eines Behälters

- *Der Produktionsmitarbeiter fragt bei dem bei Disponenten an.*
- *Der Disponent ruft den Fahrer an.*
- *Der Fahrer sucht den richtigen Behälter.*
- *Der Fahrer scannt den Behälter mittels eines Scanners, der mit einem mobilen Rechner verbunden ist.*
- *Der Scanner schickt die Daten an den mobilen Rechner.*
- *Der Rechner überträgt die Daten mittels SMS an einen zentralen Rechner.*
- *Der zentrale Rechner erfasst diese Nachricht.*
- *Dieser Rechner übermittelt die Daten an das System, mit dem der Disponent arbeitet.*
- *Dieses Programm stellt die Nachricht auf dem Bildschirm dar.*
- *Der Disponent liest diese Nachricht auf seinem Bildschirm.*
- *Der Disponent teilt dieses dem Produktionsmitarbeiter mit.*

Aufgeführt sind hier nur die Schritte, bei denen ein auch von außen sichtbarer Medienbruch auftritt. Abgesehen von der Suche des Behälters und dem Lesen der Nachricht finden alle weiteren Schritte elektronisch unterstützt statt. Für die elektronische Kommunikation lassen sich folgende Technologien nutzen:

- WLAN,
- Betriebsfunk,
- GSM,
- GPRS und
- DECT,
- blue tooth.

Werden hierdurch gängige Techniken beschrieben, können folgende Medien zum Einsatz kommen, wenn Menschen einen Teil der Kommunikation bilden:

- Gespräch,
- Brief auf Papier,
- Fax und
- email,
- Formular auf Papier ,
- elektronisches Formular.

Gespräche oder Briefe können nicht nur elektronisch sondern immer noch auf konventionellem Weg, d. h. in Form eines persönlichen Gespräches oder mittels eines Blattes Papier, stattfinden. Bei der Wahl des geeigneten Mediums sind Fragen der

- Geschwindigkeit,
- Sicherheit,
- Verfügbarkeit  
und
- Dokumentenfähigkeit,
- Authentizität,
- Menge

zu beachten. So ist eine *SMS* für zeitkritische Anforderungen ebenso ungeeignet wie ein Faxgerät bei sicherheitsrelevanten Datenübertragungen. Für den Datenaustausch sind wieder auf der Grundlage zu definierender Anforderungen, den 8 rder Informationslogistik, geeignete Lösungen zu suchen.

Unabhängig von den technischen Möglichkeiten können die Kommunikationspartner als Knoten in Netzwerken aufgefasst werden, in denen die verschiedenen Wege die Kanten darstellen. Die Bewertungen der Kanten erfolgt in Kosten, Durchlaufzeiten, Kapazitäten und Verfügbarkeiten. Die Knoten sind wie Bedienstationen bei der Beschreibung von Warteschlangen zu betrachten. So kann leicht untersucht werden, wie sich die Kommunikationsqualität ändert, wenn eine der Kanten oder einer der Knoten überlastet ist oder ausfällt.

Eine Diskussion von Kommunikation kommt natürlich nicht an dem *Netz aller Netze*, dem **Internet**, vorbei. Was ist das? Es ist nichts anderes als eine Infrastruktur, die dafür sorgt, dass das Netz, ein Graph, immer zusammenhängend ist. Jeder Knoten kann zu jeder Zeit zu jedem anderen Knoten eine Verbindung herstellen. Mehr leistet das Internet nicht, alles weitere muss durch Anwendungen realisiert werden. Dass der Lieferabruf zu dem richtigen Lieferanten gelangt, wird nicht durch Standards des Internet garantiert, sondern durch die im Abruf stehende und von dem Anwender generierte Adresse. Das Internet ist aufgrund seiner Konzeption anarchisch. Soll jemand daran gehindert werden, auf einen Knoten zuzugreifen, muss dieser Knoten selbst dafür sorgen. Auch Verfügbarkeiten sind zunächst für alle gleich und deshalb wiederum für Anwendungen mit definierten Anforderungen nicht geeignet. Wird beispielsweise gefordert, dass zu einer bestimmten Uhrzeit eine bestimmte Datenmenge zwischen zwei Knoten ausgetauscht werden muss, weil auf dem einen eine Datensicherung durchführt wird, kann dieses nicht in dem

öffentlichen Teil des Internets umgesetzt werden. Hier kann ein *virtual private network (VPN)* all das bieten, was benötigt wird. Die Struktur eines solchen kleinen Netzes kann ebenso sein, wie die des Internet. Es stellt aber einen überschaubaren geschützten logischen Raum mit klar spezifizierten Anforderungen dar. Das kleine Netz ist selbständig zu dem großen.

Ob die Datenübertragung über Kupferkabel, Glasfaser oder drahtlos erfolgt, darf für eine Anwendung keine grundsätzliche Rolle spielen. Dass Kosten von garantierten Datenmengen oder Übertragungszeiten abhängen und bei Datenaustausch zwischen zwei Kontinenten anders sind als bei dem zwischen zwei Räumen eines Gebäudes ist eine andere Seite. Auch bei der finanziellen Betrachtung bieten unterschiedliche Techniken gänzlich unterschiedliche Möglichkeiten: So lassen sich zur preisgünstigen und flexiblen Kommunikation auf einem Betriebsgelände *DECT*, *WLAN* oder Betriebsfunk einsetzen. In öffentlichen Verkehrsräumen mit wechselnden Akteuren bieten sich nur *GSM* in Form von *SMS* oder Telefonat oder *GPRS* an. Auch wenn *SMS* und *GPRS* zu ein und demselben Standard zählen, unterscheiden sich die Dienste fundamental: *SMS* ist verbindungsorientiert und *GPRS* paketorientiert. Für jede *SMS* wird unabhängig von ihrer Länge eine neue Verbindung aufgebaut. Dieses kostet Zeit und Geld. Das Übertragen von zwei Zeichen ist ebenso teuer wie das von einhundert. Bei einer *GPRS*-Lösung ist das Endgerät ein Knoten in einem Netzwerk, der ständig verfügbar ist, und es wird, abgesehen von einem Grundpreis, nur die übertragene Datenmenge berechnet. Zu beachten ist, dass jedes Einschalten stets zu einer Datenübertragung führt, mit der das Endgerät als verfügbar gemeldet wird. Der Planung und Realisierung der Kommunikation muss in vernetzten Systemen eine entscheidende Rolle zugestanden werden und sollte nicht ausschließlich denjenigen überlassen werden, die mit Kommunikation Geld verdienen, mit mehr Kommunikation mehr als mit wenig.

## 9.4 Kennzeichnung und Identifikation

... oder Identifikation und Kennzeichnung?

Da diese beiden Begriffe häufig synonym verwendet werden, sollen sie hier definiert werden:

### **Definition .55 Kennzeichnung und Identifikation**

*Kennzeichnen ist das Versehen eines Objektes mit einem Kennzeichen. Identifizieren bedeutet, die Identität eines Objektes feststellen.*

Identifikation ist ohne Festlegung der Identität und einen Vergleich mit vorhandenen Daten nie möglich und somit ein Prozess. Die Kennzeichnung ist nur an ein Objekt geknüpft. Bei dieser Verknüpfung muss die einmal getroffene Zuordnung erhalten bleiben, d. h. Kennzeichnungen dürfen nicht zwischen ungleichartigen Objekten, besser gar nicht, getauscht werden, muss aber nicht weltweit eindeutig erfolgen. So gibt es sicher Umgebungen, in denen ein Fahrzeug *Der große Blaue* genannt wird, und dies keine Probleme hervorruft. Die an Kennzeichnungen zu stellenden Anforderungen können sehr unterschiedlich sein und ergeben sich daraus, wozu diese benötigt werden. Einsatzgebiete sind

- Identifikation,
- Signalisierung und
- Handlungsanweisungen

Bei der Signalisierung wird beispielsweise verlangt, dass eine Kennzeichnung ermöglicht zu erkennen, ob sich ein Objekt in einem bestimmten Raum befindet oder diesen verlässt. Ein Beispiel

sind Diebstahlsicherungen, bei der zu sichernde Objekte mit einer Kennzeichnung versehen werden, die beim Passieren eines Durchganges ein Signal aussenden, die von einem Empfangsgerät erfasst werden. Notwendig ist eine sofortige Reaktion, eine Information. Eine Signalisierung kann auch ein Hinweisschild an einem Fahrzeug sein, das darauf hinweist, dass bestimmte Gefahrgüter geladen sind.

### **Exkurs 9.2 Robustheit verschiedener Kennzeichnungsmedien**

*Gegen mechanische Gewaltanwendung ist kein Medium sicher.*

#### **Etiketten aus Papier oder Kunststoff**

- *Diese können zerrissen, zerkratzt oder verschmutzt werden.*
- *Schlechte Lichtverhältnisse erschweren das Lesen.*
- *Materialien können die Etiketten verdecken.*

#### **Transponder**

- *Antennen können zerbrechen bzw. die Verbindung zwischen Antenne und Chip kann zerstört werden.*
- *Die Energieversorgung aktiver Transponder arbeitet nicht.*
- *Feuchtigkeit zwischen Transponder und Lesegerät dämpft die Strahlung.*
- *Metalle oder metallbeschichtete Flächen, wie Sonnenschutzverglasungen erschweren das Lesen.*
- *Elektromagnetische Wellen anderer Maschinen stören die Signale.*

Der Hinweis auf Gefahrgut kann gleichzeitig eine Handlungsanweisung sein, ein kurzer prägnanter Begriff, aus dem ein bestimmtes Verhalten abgeleitet werden kann. Ein solches Kennzeichen muss eindeutig sein und darf nicht verändert werden können. Bei Diebstahlsicherungen bedeutet Eindeutigkeit die Zuordnung zu einem definierten Raum, den ein Gegenstand nicht verlassen darf. Auch hier sollten Kennzeichnungen fälschungssicher robust gegen äußere Einflüsse sein. Im Fall des Cockpits muss die Kennzeichnung deutlich machen, zu welchem Auftrag und zu welchem Fahrzeug dieses gehört. Auf dem Cockpit oder dessen Verpackung muss vermerkt sein, für wen die Ware bestimmt ist. Bei mehreren Einzelteilen einer Sendung muss deutlich werden, welchem Produktionsauftrag diese zugeordnet sind. Der Fahrer muss den Empfänger erkennen, d. h. identifizieren, den Produktionsauftrag nicht.

Robustheit gegen äußere Einflüsse umfasst auch, dass sich eine Kennzeichnung nicht von einem Objekt lösen darf bzw. von einem Objekt gelöst werden kann, ohne dass es bemerkt wird. An einem Etikett eines tief gefrorenen Hähnchens in einem Supermarkt werden die vielfältigen Anforderungen deutlich. Der Kunde muss neben Menge und Haltbarkeit den Preis auch dann ablesen können, wenn er im Rahmen einer Verkaufsaktion geändert wurde und zwar ohne ein technisches Gerät zu Hilfe nehmen zu müssen. Die Kasse muss die selben Daten erfassen, unabhängig davon, ob dieses manuell oder automatisch erfolgt. Gleichzeitig muss an der Kasse Sicherheit darüber herrschen, dass die an der Ware befindliche Kennzeichnung nicht verändert wurde und wirklich zu dem Hähnchen gehört, an dem sie sich befindet. Diese unterschiedlichen Anforderungen lassen sich sowohl mit gedruckten als auch elektronischen Etiketten realisieren. Die Lebensmitteltauglichkeit wird stillschweigend vorausgesetzt.

Für die Realisierung gedruckter Kennzeichnungen gibt es vielfältige Möglichkeiten.

- Lineare Barcodes, wie in Abbildung ??, mit denen Nummern, wie Artikelnummern oder Adressnummern, aufgebracht werden können. Durch das Hinzufügen von Ziffern oder Zeichen kann die Lesbarkeit für Menschen hergestellt werden. Die Gleichheit von Code und Ziffern muss beim Erstellen garantiert werden.
- Zweidimensionale Barcodes, wie in Abbildung ??, die sich von den Barcodes durch die mögliche Datenmenge unterscheiden. Der größere Dateninhalt kann genutzt werden, um mehr Daten zu hinterlegen, Fehlererkennung oder die Lesbarkeit auch bei Teilbeschädigungen zu ermöglichen.
- Klarschrift wie in Abbildung ??, mit der Artikelnummern oder Anweisungen in gewöhnlichen, lesbaren Zeichen angebracht werden. Besondere Zeichensätze, die eigens für die automatische Texterkennung entwickelt wurden, ermöglichen hohe Geschwindigkeiten bei geringer Fehlerquote.
- Symbole oder Piktogramme können ebenfalls gedruckt werden, mit all den Vor- und Nachteilen von Symbolen.

Am weitesten verbreitet sind Etiketten mit gewöhnlicher Schrift und eindimensionale Barcodes. Bei den Barcodes werden die zu kodierenden Zeichen durch helle und dunkle Striche bzw. Zwischenräume unterschiedlicher Breite dargestellt. Ein Start- und ein Stoppzeichen sorgen dafür, dass die Richtung eindeutig definiert ist und nur die Zeichen zwischen diesen beiden Markierungen als Nutzdaten interpretiert werden. Sind bei den beiden ersten Beispielen aus Abbildung ?? nur die dunklen Striche zur Darstellung genutzt, werden beim *2 of 5 interleaved* Striche und Zwischenräume verwendet. Das Lesen erfolgt mit Scannern, die einen Lichtstrahl aussenden und dann in dem reflektierten Licht den Code erkennen. Eine Schwierigkeit für einen automatisierten Einsatz ist das Finden des Codes auf einem Objekt wie einer Verpackung. Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass mögliche Lesefehler nicht durch Menschen korrigiert werden können. Bei Verwendung von Klarschrift kann das Etikett fotografiert und das Bild gespeichert werden. Kommt es zu einem Fehler, besteht die Möglichkeit, diese Aufnahme einem Menschen zur weiteren Bearbeitung zuzuleiten. Dieses kann die Zuverlässigkeit erheblich steigern.

Werden mehr Daten benötigt, bieten sich zweidimensionale Codes an. Dieses können einfach mehrere übereinander angeordnete eindimensionale Codes, sogenannte **Stapelcodes** sein oder solche, bei denen kleine Flächen, wie in Abbildung ?? zu sehen, für die Codierung verwendet werden. Beispiele hierfür sind *data matrix* oder *PDF417*. Der *data matrix*-Code besitzt drei funktionsbestimmende Elemente:

- *finder pattern* : Dieses ermöglicht einem Lesegerät, den Code zu finden und dessen Orientierung zu bestimmen.
- *alternating pattern* : Hier wird die Symbolgröße und somit auch die Datenmenge angegeben.
- *data region* : Dieses ist das Feld, das die Nutzdaten enthält.

Auch zweidimensionale Barcodes müssen mit geeigneten Scannern gelesen werden. Bei der Verwendung von Klarschrift werden Zeichen direkt als Ziffern oder Buchstaben geschrieben, von einer Kamera aufgenommen und anschließend ausgewertet. Dieses verlangt optische Systeme mit einer ausreichenden Auflösung, um verschiedene Zeichen voneinander unterscheiden zu können. Eine Schwierigkeit hierbei sind möglicherweise nicht ausreichende Lichtverhältnisse. Scanner bringen ihre Beleuchtung stets mit, normale Kameras sind auf Umgebungslicht angewiesen. Durch die Verwendung retroreflektierender Folien in Verbindung mit einer mit der Kamera verbundenen Lichtquelle, können hier wesentliche Verbesserungen erzielt werden. Ein Vorteil von Kennzeichnungen mit Klarschrift liegt darin, dass diese auch ohne Hilfsmittel von Menschen ge-

sehen und gelesen werden können. Es können ohne Hilfsmittel mögliche Defekte, wie fehlende oder fehlerhafte Zeichen erkannt werden. Dieses ist sowohl bei Barcodes als auch bei Transpondern unmöglich.

**Transponder**, auch als *radio frequency identification (RFID)* bezeichnet, stellen die aktuell am intensivsten diskutierte elektronische Kennzeichnungsmöglichkeit dar, üben eine nahezu magische Anziehungskraft auf viele Menschen aus und werden mit schier unbegrenzten Erwartungen verknüpft. Allerdings ebbt die Euphorie zumindest bei einigen großen Unternehmen in den USA bereits wieder ab, um von einer realistischeren Einschätzung der Möglichkeiten abgelöst zu werden [Wei07]. Was sind nun eigentlich Transponder, was kann von ihnen erwartet werden und was ist notwendig, um die Vorteile wirklich ausschöpfen zu können? Transponder bestehen aus einem Chip, einer Antenne und gegebenenfalls einer Batterie [Fin02; Swe06]. Sie können Daten speichern, senden und empfangen. Der Datenaustausch erfolgt über magnetische Induktion oder als elektromagnetische Welle mit allen hiermit verbundenen Eigenschaften. Für den praktischen Einsatz wird ein System, bestehend aus Antenne und Empfangseinheit oder Lesegerät bzw. *reader*, benötigt, das mit diesem Transponder kommunizieren und die gespeicherten Daten lesen oder modifizieren kann. Transponder können nach den im Exkurs 9.3 zusammengestellten Kriterien unterschieden werden.

### Exkurs 9.3 Unterscheidungsmöglichkeiten für Transponder

#### **Frequenz**

*Transponder kommen in Frequenzbereichen zwischen 128 kHz, 13.56 MHz, 868 MHz und 2.54 GHz zum Einsatz.*

#### **Energieversorgung**

*Hier wird zwischen passiv, semi-aktiv und aktiv unterschieden. Semi-aktive und aktive sind mit einer eigenen Batterie ausgestattet, passive beziehen die benötigte Energie ausschließlich aus dem externen Strahlungsfeld. Aktive senden in festen Zeitabständen. Dieses führt zu einer festen, kalkulierbaren Lebensdauer der Batterie. Da passive keine eigene Batterie besitzen, ist hierdurch die Lebensdauer nicht eingeschränkt. Anders verhält es sich bei den semi-aktiven. Diese werden immer dann zum Senden veranlasst, wenn sich ein Lesegerät in der Nähe befindet. Aber wie häufig ist das? Befindet sich ein solcher Transponder an einem leeren Behälter, der in der Nähe einer Rampe lagert, auf der ständig be- und entladen wird, kann ein vorbeifahrender mit einem Lesegerät ausgestatteter Gabelstapler diesen Transponder permanent wach halten und dadurch die Batterie beanspruchen. Ein ungestörter Transponder in der hintersten Ecke eines Lagers hingegen kann eine vielfach längere Lebensdauer haben.*

#### **Beschreibbarkeit**

*Hier gibt es Möglichkeiten wie write once-read multiple oder auch write multiple-read multiple.*

#### **Speicherkapazität**

*Es gibt Transponder, die nur eine eigene Identifikationsnummer besitzen bis hin zu solchen, die mehrere tausend Byte speichern können. Eine besondere Art der Transponder stellen die 1-Bit-Transponder auf Grundlage der elektro- und akustomagnetischer Technologien dar, die bei sehr geringen Frequenzen arbeiten, dadurch unempfindlich gegen Metall sind und deshalb oftmals zum Diebstahlschutz eingesetzt werden [Zec01].*

#### **Reichweiten**

*Diese variieren von wenigen Zentimetern bis hin zu einigen hundert Metern.*

#### **Lesegeschwindigkeit**

*Auch wenn sich die Signale mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, hängt die Übertragungsrate bzw. die Lesegeschwindigkeit von der Frequenz ab. Je höher die Frequenz desto höher wird die Datenübertragungsrate.*

Ein entscheidender Unterschied von Transpondern zu allen anderen Kennzeichnungsmöglichkeiten liegt in der Flexibilität, mit der Daten geschrieben und wieder gelesen werden können. Dieses eröffnet die Möglichkeit, Transportverläufe zu dokumentieren, indem an jedem interessierenden Ort die erforderlichen Daten direkt auf den Datenträger geschrieben werden. Natürlich ist er wie jedes andere Medium nicht unverwundlich, nicht gegen mechanische und auch nicht gegen magnetische Gewaltanwendung, jedoch bietet er die zusätzliche Möglichkeit einer Verschlüsselung, so dass Inhalte nur von geeigneten Lesegerät entschlüsselt werden können. Folgend sollen einige oftmals zu hörende Eigenschaften von Transpondern aufgeführt, diskutiert und einige Unklarheiten erklärt werden.

- a. Zum Lesen eines Transponders ist kein Sichtkontakt erforderlich.
- b. Die Lage und die Ausrichtung eines Transponders sind belanglos für Reichweite und Lesqualität.
- c. Die Reichweite muss möglichst groß sein.
- d. Kein Transponder führt zu gleicher Reaktion wie ein defekter Transponder.
- e. Transponder müssen im Gegensatz zu Barcodes oder Klarschriftetikett zum Lesen nicht gesucht werden.
- f. Transponder sind pulkfähig.
- g. Transponder vertragen sich nicht mit Metall.

Anzahl	Sicherheit			
	99%		99.9%	
2	0.35	0.17	0.50	0.25
5	0.90	0.18	1.25	0.25
6	1.20	0.20	1.60	0.27
8	1.80	0.23	2.70	0.34

**Tab. 9.2:** Zeitbedarf in Sekunden zum Auslesen von Transpondern für zwei mögliche Sicherheitsstufen [Fin02]. Die zweite Zahl ist jeweils die mittlere Zeit je Transponder.

zu a : Diese Aussage macht so keinen Sinn. Es stimmt, dass für ein menschliches Auge unsichtbare, z. B. durch eine Pappe verdeckte, Transponder gelesen werden können. Dafür können aber Transponder eventuell nicht gelesen werden, die sich hinter einer Glasscheibe befinden, und mit dem menschlichen Auge gesehen werden können. Das, was Menschen unter Sichtkontakt verstehen, bezieht sich auf das, was mit menschlichen Augen wahrgenommen werden kann. Dieses ist weit jenseits des Frequenzbereiches, in dem Transponder arbeiten. Für Menschen sind ein mit Wasser gefüllter Becher oder eine sonnenschutzverglaste Windschutzscheibe transparent, für einen Transponder absolut undurchlässig. Dafür ist für ihn ein Buchdeckel transparent. Ein Stahlgitter oder ein Einkaufswagen wiederum stellen für ein Auge nur eine kleine Beeinträchtigung dar, für einen Transponder ein unüberwindliches Hindernis. Erschwerend bei diesen Überlegungen kommt hinzu, dass die Effekte frequenzabhängig sind. So wird hochfrequente Strahlung viel stärker von Wasser absorbiert als niederfrequente und nicht jede Anordnung von Metallstäben ist ein undurchdringliches Gitter.

- zu b : Dieses stimmt nicht. Es würde nur dann gelten, wenn die Abstrahlung der Transponder kugelsymmetrisch ist. Dieses gilt nicht für alle Typen. Hinzu kommt, dass die Strahlung oftmals polarisiert ist. Dieses kann dazu führen, dass ein Transponder, der hervorragend erkannt wird, nach einer Drehung um  $90^\circ$  nur noch abgeschwächt oder gar nicht mehr gelesen werden kann. Dieses kann nachteilig sein, bietet aber gleichzeitig die Möglichkeit, die Reichweite gezielt an individuelle Bedürfnisse anpassen zu können.
- zu c : Dieses ist von der Anwendung abhängig. Soll in einem Hochregal erkannt werden, welche Palette sich in den einzelnen Fächern befindet, darf die Reichweite nicht zu groß sein. Sonst sieht ein Lesegerät auch gleichzeitig Paletten, die in Nachbarfächern stehen und selbst eine grobe Ortsbestimmung wird unmöglich.
- zu d : Hierin ist eine der größten Schwachpunkte zu sehen. Ist ein Transponder defekt, wird dieser von dem Lesegerät schlichtweg ignoriert. Dieses muss zweifelsohne ein Horrorszenerario für jede Diebstahlsicherung darstellen, wie folgendes Beispiel zeigt:

**Beispiel .36 Preiswerter Einkauf an einer automatischen Kasse**

*Ein Kunde kauft für ein abendliches Menu alle Zutaten in einem Supermarkt, der die üblichen Kassen durch Systeme ersetzt hat, bei dem an den Waren angebrachte Transponder beim Durchgang automatisch erfasst werden. Der Kunde nimmt einen eigens für diese Anwendung hergestellten Einkaufswagen, der ausschließlich aus Kunststoff hergestellt ist und packt in diesen als erstes einen Schnellkochtopf, an dem ein besonderer, metalltauglicher Transponder angebracht ist. Die übrigen Einkäufe kommen direkt in diesen Topf. Da der Platz nicht ausreicht, nimmt er sich noch einen zweiten. An der Kasse angekommen, werden die Schnellkochtöpfe erfasst. Alle übrigen Teile bleiben dem Lesegerät verborgen. Den Kassenraum verlassen entschließt sich der Kunde, auf die Schnellkochtöpfe zu verzichten und gibt diese an der Information zurück. Die freundlichen Mitarbeiter erstatten den Kaufpreis anstandslos.*

- zu e : Dieses stimmt nur eingeschränkt, da durch äußere Einflüsse der Sichtkontakt eingeschränkt oder aufgrund der Abstrahlcharakteristik ein Transponder nicht erfasst wird. Ein Suchen ist dann überflüssig, wenn es keine Störeffekte gibt und der Transponder in alle Richtungen gleich abstrahlt.
- zu f : Dieses ist einer der großen Vorteile von Transpondern verglichen mit gedruckten Datenträgern: Es können mehrere kollisionsfrei gleichzeitig gelesen und auch beschrieben werden. Das Beschreiben erfolgt nach dem *broadcast*-Prinzip, bei dem der Sender seine Daten ausstrahlt und jedes geeignete Empfangsgerät diese aufnimmt. Ob sich die richtigen Empfänger im Sendebereich befinden, muss entweder vor dem Senden oder im Nachhinein durch eine Empfangsbestätigung geprüft werden. Eine Ursache für eine hohe Anzahl datenzerstörender Kollisionen ist das unkoordinierte Senden einzelner Transponder. Dieses wird mit geeigneten Verfahren, wie dem *slotted ALOHA*-Verfahren verhindert [Fin02]. Das Lesegerät sendet ein Signal aus, das die inneren Uhren der Transponder synchronisiert, die dann nur zu definierten Zeiten, pünktlich, d. h. in festen Zeitfenstern, senden können. Der maximale Durchsatz kann hiermit von 20 % auf knapp 40 % gesteigert werden.

Eine genaue Angabe von Lesezeiten ist nur schwer zu erhalten. Diese bewegen sich in der Größenordnung von Millisekunden. Jedoch setzen Hersteller und Anbieter stets voraus, dass es eine geeignete Ordnung gibt. Diese kann darin bestehen, dass alle Transponder stets auf einer Seite eines Packstückes angebracht sein müssen. Welche Lesezeiten zu erwarten sind, wenn beliebig geformte Gegenstände in einen Einkaufswagen geworfen werden, ist nicht dokumentiert. Eigene Untersuchungen an Fototaschen zeigten, dass *ungeschicktes* aber nicht ungewöhnliches Packen die Lesezeiten erheblich erhöhen und die Lesesicherheit

erheblich senken können.

Welche Auswirkungen haben diese Zeiten? Nehmen wir ein System, bei dem das Lesen des Transponders 20 ms, ungefähr ein Fünftel eines menschlichen Wimpernschlags, dauert. Im günstigsten Fall könnten fünfzig Transponder in einer Sekunde gelesen werden. Ein Lkw, der mit einer Geschwindigkeit von 25 km/h durch ein Tor fährt, legt in einer Sekunde ungefähr sieben Meter zurück, ein Mensch, der in Spaziergeschwindigkeit von 4 km/h seinen ebenfalls mit 50 Artikeln gefüllten Einkaufswagen durch eine Supermarktkasse schiebt, schafft immerhin noch etwas mehr als einen Meter. Realistische Zahlen für Lesedauern und -raten sind Tabelle 9.2 zu entnehmen. Die durchschnittlichen Zeiten je Transponder liegen mit ungefähr 0.2 s, d. h. 200 ms weit über den oben erwähnten und von Anbietern genannten und nehmen mit steigender Anzahl weiter zu. Für den Lkw bedeutet die kleinste dort angegebene Zahl, dass für fünfzig Transponder  $50 \cdot 0.17 \text{ s} = 8.5 \text{ s}$  benötigt werden, eine Zeit, in der der Lkw eine Strecke von ungefähr sechzig Metern zurücklegt. Um diese auf sieben Meter zu reduzieren, dürfte die Geschwindigkeit maximal 3 km/h betragen. Für ein Lesefeld mit einer Größe von einem Meter darf die Geschwindigkeit noch ungefähr 0.4 km/h betragen.

Ist nur eine kürzere Aufenthaltsdauer realisierbar, werden statt 99 % der Transponder vielleicht nur 80 % oder auch 85 % gelesen. Wie unter d bereits ausgeführt, wird nicht erkannt, dass ein Transponder nicht gelesen wird. Nur in Verbindung mit einem weiteren System, das die Gesamtanzahl kennt, kann ein Fehler festgestellt werden. Danach muss dieser noch behoben werden.

zu g : Auch hier gibt es keine eindeutige Antwort. Metalle sind für die von Transpondern emittierte Strahlung undurchlässig, jedoch gibt es Transponder, die hervorragend arbeiten, wenn sie auf metallischen Oberflächen aufgebracht sind. Inwieweit metallische Gitter, wie die von Einkaufswagen störend wirken, hängt von der Frequenz und von den Gitterabständen ab. Sollen Transponder in Supermärkten eingesetzt werden, müssen sämtliche Regale und Einkaufswagen transpondergerecht gestaltet werden. Regale mit wasserhaltigen Flüssigkeiten – Milch, Wein, Limonaden – werden zum Tabu.

Ungeachtet dieser Einschränkungen sind für Transponder vielfältige Einsatzmöglichkeiten interessant. Im Zusammenhang mit Rückverfolgbarkeit wäre es denkbar, Orte und Uhrzeiten automatisiert direkt auf einem Transponder am Objekt zu hinterlegen. Auch in einer Verbindung von Produktion und Logistik lassen sich Transponder hervorragend nutzen:

- Das Versehen von Ladungsträgern wie Paletten bietet vielfältige Möglichkeiten, da hier klare Randbedingungen vorgegeben werden können. Die Position kann fest vorgegeben und es kann davon ausgegangen werden, dass der Transport waagrecht erfolgt.
- Zu produzierende Türen werden mit Transpondern versehen und entlang der Produktionslinie Lesegeräte an entscheidenden Positionen angebracht. Jede Tür kann der entsprechenden Maschine mitteilen, wie groß die Ausschnitte sein müssen, ob sie den Anschlag rechts oder links haben soll und den kommenden Arbeitsplätzen mitteilen, wie und mit welchem Material gearbeitet werden soll. Dieses setzt eine entsprechende Flexibilität voraus.
- Das Reinigen oder Waschen von Textilien könnte revolutioniert werden. Jede Textilie kennt ihren eigenen Reinigungsplan und kann dafür sorgen, dass Waschmittel und Temperatur richtig dosiert und eingestellt werden. Für die optimale Auslastung der Maschinen müsste aber doch noch ein geeignetes Programm entwickelt und so an die Maschinen angepasst werden, dass das getrennte richtige Waschen nicht zu einer Ineffizienz bei der Maschinenauslastung und späteren Auslieferung führt.

- Wäre ein zu produzierendes Auto mit einem Transponder ausgestattet, könnte dieses wissen, welche Teile verbaut werden müssen und beim Erreichen eines Arbeitsplatzes das richtige Video mit einer Einbauanleitung starten. Dieses erklärt dem Mitarbeiter die notwendigen Schritte und ersetzt kostspielige Schulungsmaßnahmen. Auch hier könnte ein Gewinn an Flexibilität mit zunehmender Automatisierung verknüpft werden. Es entfällt aber die zusätzliche Kontrollfunktion, die ein Mitarbeiter bisher vor Ort übernommen hat. Dieses muss bereits vorher bei der Planung berücksichtigt werden, die wesentlich weniger Fehler enthalten darf als heute. Werden geschulte Mitarbeiter durch solche ersetzt, die nur nach Vorgaben arbeiten, führen Fehler in den Vorgaben zwangsläufig zu Katastrophen.

**Weisheit 9.2** *Transponder liefern nur Daten. Sie erhöhen die Menge der verfügbaren Daten und den benötigten Aufwand, um hieraus Informationen zu gewinnen.*

Im Sinne des Datenkreislaufes gestatten es Transponder, wenn einmal installiert, Daten nahezu zum Nulltarif zu sammeln. Ist die geeignete Auswertelogik implementiert, können Kennzahlen kostenlos ermittelt und Prognosen ebenfalls zum Nulltarif erstellt werden. In der Planung nicht bemerkte Fehler werden schnell sichtbar. All dieses bedarf eines Umdenkens von der Fokussierung auf *hard ware* mit ein wenig *soft ware* hin zu *brain ware* und zum Einsatz von Simulationen und Experimenten, wie sie in den Naturwissenschaften üblich sind. Es muss untersucht werden, ob ein Gabelstapler genau dann Störstrahlung erzeugt, wenn Last aufgenommen und ein Transponder detektiert werden soll. Es ist unwichtig zu wissen, dass er beim Fahren keine Probleme verursacht. Ebenso muss untersucht werden, ob Störeffekte witterungsabhängig sind. Was nutzt ein System, dessen Verfügbarkeit von 99.995 % bei Sonnenschein auf 80 % bei Regen oder Frost abfällt? Unscharfe Formulierungen der Umgebungsbedingungen, die beim Einsatz von Menschen durch diese kompensiert wurden, können bei der Nutzung empfindlicher Sender schnell zu deutlichen Einbrüchen führen. Auch hier ist das Suchen von Fehlern mit großem Aufwand verbunden. Eine nachts aufgetretene temperaturbedingte Störung wird am folgenden Tag nicht mehr beobachtet.

Die Transpondertechnologie, d. h. Transponder und Lesegerät, ist hierbei nur ein Element in einem Netzwerk, dessen Weiterentwicklung notwendig aber nicht ausreichend für die Nutzung von Potenzialen ist. Diese Weiterentwicklung bezieht sich natürlich auch auf die Preise einzelner Transponder. Hier mag es künftig einen gewaltigen Schub geben, wenn Chips auf Polymerbasis serienmäßig gefertigt werden können. Aber auch diese, auf einem Joghurtbecher angebracht, werden nicht dafür sorgen, dass elektromagnetische Strahlung plötzlich die im Joghurt enthaltenen Flüssigkeiten durchdringt. Es mag sein, dass es dann möglich sein wird, so viele Transponder auf einem Becher anzubringen, dass stets mindestens einer gelesen werden kann. Der Preis dafür sind noch mehr Daten, für die sicher gestellt werden muss, dass alle angebrachten Transponder genau zu einem Becher gehören: Lösbare Probleme, aber doch noch Probleme. Transponder von sechshundert Packstücken mit von Kunden ausgewählten Waren in einer Minute mit einer Sicherheit von 99 % lesen zu können, erscheint ein zumindest hehres Ziel. Die Steigerung auf 99.9 % ein noch hehreres.

Das Fehlerproblem lässt sich beim Einsatz von Klarschrift und Kameras erheblich reduzieren. Wird ein fehlerhafter Transponder ignoriert, so kann ein Foto im Nachhinein notfalls auch durch Menschen analysiert werden. Der entscheidende Vorteil liegt darin, dass das Erfassen, d. h. das Fotografieren und Erkennen getrennt werden können. Handelsübliche industrietaugliche Kameras können mehr als dreißig Bilder pro Sekunde aufnehmen. Das Auswerten kann dann auf ei-

	Barcode	data matrix	Trans- ponder	Schrift
veränderbar	nein	nein	ja	nein
Datenmenge	gering	mittel	hoch	variabel
Lesege- schwindigkeit	mittel	mittel	hoch	hoch
Suche	Auge	Auge	Gerät	Gerät/ Auge
Lesbar	Gerät	Gerät	Gerät	Gerät/ Auge
Eindeutigkeit	ja	ja	ja	nein
Positionierung	ja	ja	nein	nein
Empfindlichkeit	Schmutz	Schmutz	EMF	Schmutz
Datensicherheit	möglich	möglich	möglich	kaum

**Tab. 9.3:** Vergleich verschiedener Kennzeichnungsmedien

nem nachgelagerten, leistungsfähigen Rechner erfolgen und im Bedarfsfall weitergeleitet werden. Diese Kontrollmöglichkeit ist weder bei Barcodes noch bei Transpondern gegeben.

## 9.5 Ortung

Auch wenn Ortung häufig gemeinsam mit dem Begriff Navigation verwendet wird, soll hier eine Trennung vollzogen werden.

### Definition .56 Ortung

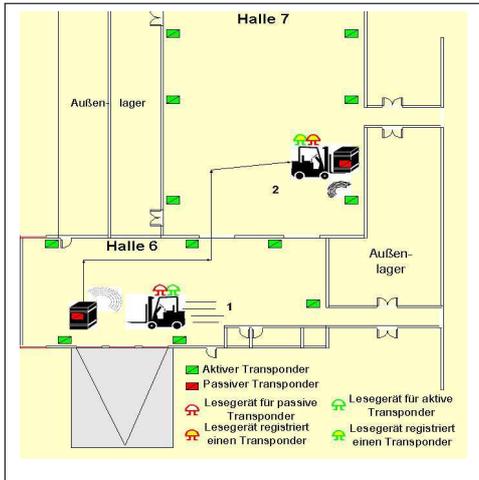
*Ortung ist die Bestimmung des eigenen Standortes bzw. der eigenen Position oder der eines anderen Objektes.*

Was ist ein **Standort** bzw. wie kann ein Standort angegeben werden? Eines gilt für alle Standortangaben: Jede Angabe ist relativ und nur unter Angabe und Kenntnis eines Bezugssystems, vgl. Kapitel 4.2.3, sinnvoll. Ist jede richtige Antwort auf die Frage „Wo befinden Sie sich?“, eine brauchbare Standortangabe? Nehmen wir folgendes Beispiel:

### Beispiel .37 Positionsangaben – Variante I

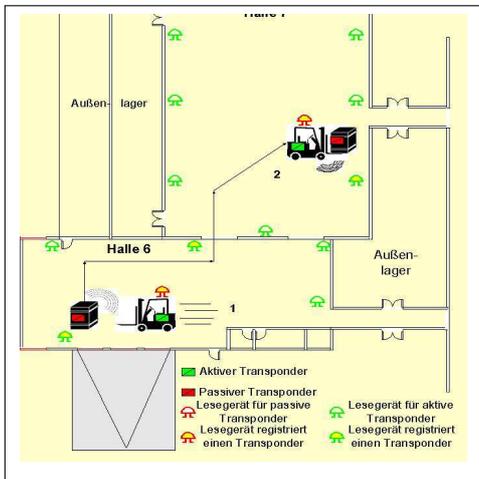
*Eine Person startet bei herrlichem Sonnenschein zu einer Fahrt mit einem Fesselflugballon. Nach einiger Zeit beginnt der Himmel, sich zu verdunkeln und der Ballon verliert über einer Wiese an Höhe. Glücklicherweise sieht der Ballonfahrer unter sich einen Mann auf dem Feld stehen. Er ruft nach unten und fragt: „Können Sie mir sagen, wo ich im Moment bin?“ Ohne einen Moment des Zögerns kommt die Antwort: „Sie befinden sich in dem Korb eines Fesselflugballons zehn Meter über dem schönsten Holunderbusch auf meiner Weide.“ Wenig glücklich setzt er seinen Flug fort und sieht kurze Zeit später einen weiteren Mann am Boden stehen, dem er die gleiche Frage stellt. Nach einem kurzem Blick auf ein kleines Gerät an seinem Handgelenk antwortet er: „Sie befinden sich zehn Meter über mir und meine Position ist 52° 11' 23" nördlicher Breite und 11° 23' 34" östlicher Länge.“*

Beide Antworten sind richtig und unbrauchbar. Betrachten wir ein weiteres Beispiel.



**Abb. 9.3a:** Ortung von Gabelstaplern und Behältern mittels Transpondern – Variante I

An den Wänden angebrachte Transponder werden von an den Gabelstaplern angebrachten Lesegeräten beim Vorbeifahren erfasst. Aus der Nummer des Transponders kann die aktuelle Position bestimmt werden. An den Behältern angebrachte Transponder werden ebenfalls von dem Gabelstapler erfasst. Ob die Transponder aktiv oder passiv sein sollen, ist abhängig von der Anwendung und wird im Text diskutiert.



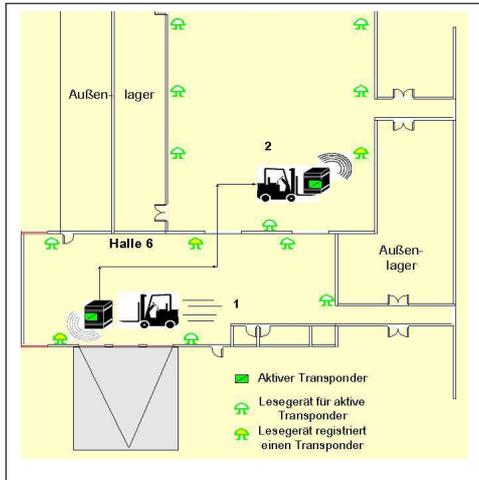
**Abb. 9.3b:** Ortung von Gabelstaplern und Behältern mittels Transpondern – Variante II

Im Unterschied zu Abbildung 9.3a sind Lesegeräte an den Wänden und Transponder an den fahrenden Objekten angebracht.

### Beispiel .38 Positionsangaben – Variante II

Wenn in dem Moment, in dem ich dieses schreibe, meine Frau aus der Küche ruft und fragt, wo ich bin, könnte ich „Ich sitze am Telefon“, antworten. Ruft sie mich hingegen von ihrem Mobiltelefon aus auf meinem Mobiltelefon an, könnte sie die selbe Antwort berechtigterweise als unzureichend empfinden. Auch die Angabe von zwei Koordinaten könnte als unpassend angesehen werden, die absolut korrekt Antwort „Hier!“, Unmut hervorrufen.

Die Bestimmung einer Position und deren Angabe sind zwei Aspekte, die unabhängig voneinander und in einem konkreten Kontext betrachtet werden müssen. Zur Definition des Kontextes gehört auch, ob sich das Objekt bewegt oder in Ruhe befindet. Nehmen wir an, die Position des von Hamburg nach München fahrenden Autos wäre fehlerfrei bestimmt und in der Art angegeben, dass der Empfänger dieses richtig versteht. Nun wird diese als SMS verschickt und kommt dreißig Minuten später an. Was ist dann diese Meldung noch wert, wie lange bleibt die Angabe der Position eine **Information**? Das Fahrzeug überträgt seine Positionen online an einen zen-



**Abb. 9.4:** Ortung von Behältern mittels Transpondern – Variante III

In diesem Beispiel sind an ortsfesten Punkten an den Wänden Lesegeräte und nur an den Behältern Transponder angebracht.

tralen Rechner, der diese als farbigen Fleck auf einer Karte auf einem Bildschirm anzeigt. Wie genau kann die Position nun noch erkannt werden? Welchem Durchmesser entspricht der Fleck in Wirklichkeit?

Zur Bestimmung von Positionen gibt es verschiedene Techniken, von sehr alt bis hochmodern und noch nicht verwirklicht:

- Sterne,
- Leuchttürme,
- GPS,
- GLONASS,
- GALILEO,
- Radar,
- Laser
- GSM und
- WLAN,
- LORAN-C,
- Barken,
- Transponder.

Sterne sind unveränderbar, von Menschenhand nicht zu beeinflussen und von jedem Ort der Erde bei klarem Himmel sichtbar. Leuchttürme hingegen werden von Menschen platziert und sind nur in einem begrenzten Umkreis des jeweiligen Standortes zu nutzen. Satelliten verbinden die Möglichkeiten der Leuchttürme mit denen der Sterne. Sie können im Weltall wie erforderlich positioniert werden und sind jeweils für große Regionen der Erde sichtbar. Aktuell gibt es zwei existierende satellitengestützte Systeme: Das von der ehemaligen Sowjetunion entwickelte *Global Navigation Satellite System (GLONASS)* und das *Global Positioning System (GPS)*, das Gegenstück der Amerikaner. Zu diesen wird in den kommenden Jahren möglicherweise das europäische System **GALILEO** hinzukommen. Wird die Position bei Nutzung von Sternen und Leuchttürmen jeweils durch Winkelbetrachtungen bestimmt, erfolgt dieses bei Satellitennavigation durch Entfernungsbetrachtungen, Triangulation wird durch **Trilateration** ersetzt.

Die Funktionsweise soll anhand des GPS erläutert werden. Dieses System besteht aus drei Stationen an Land und 24 Satelliten  $S_1, \dots, S_{24}$ , die die Erde in einer Höhe von ungefähr 20000 km umkreisen und in regelmäßigen Abständen Signale aussenden. Diese enthalten ihre aktuelle Positionen  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  und die Uhrzeit. Steht nun ein GPS-Empfänger zur Verfügung, dessen Koordinaten  $P(x_e, y_e, z_e)$  bestimmt werden sollen, so werden von diesem die Signale einiger Satelliten empfangen. Wird ein Signal zur Zeit  $T_i$  vom Satelliten  $S_i$  ausgesendet und zur Zeit

$T_e^{(\text{ex})}$  vom Empfänger empfangen, kann hieraus die Laufzeit  $\Delta t_i = T_e^{(\text{ex})} - T_i$  und mit der Lichtgeschwindigkeit  $c$  als Ausbreitungsgeschwindigkeit der Abstand  $d_{e,i}$  zwischen Satellit  $S_i$  und Empfänger nach Gleichung (5.4) berechnet werden.

$$d_{e,i} = c \cdot \Delta t_i \quad (5.4')$$

Im praktischen Leben muss eine etwas aufwendigere Gleichung genommen werden, da die Ausbreitungsrichtung des Lichtes nicht geradlinig ist. Der Übergang vom luftleeren Raum in die feuchte Atmosphäre führt durch Beugung ebenso zu einer Krümmung wie die durch das Gravitationsfeld der Erde hervorgerufenen relativistischen Effekte. Die geringere Schwerkraft sorgt zusätzlich dafür, dass die Uhren in den Satelliten anders gehen als die auf der Erde. Beide Störungen sind bekannt und die Auswirkungen können korrigiert werden. Es verbleibt eine Schwierigkeit in der Bestimmung der Zeitdifferenz. Die Uhren der Satelliten können als synchron angesehen werden, die Uhr des Empfängers hat irgendeine Uhrzeit, die mit der im Weltall nichts zu tun hat. Wie in Kapitel 5.2.2 gezeigt, müssen die Laufzeiten aber auf Bruchteile einer Millisekunde exakt bestimmt werden, was, wenn überhaupt, nur mit Atomuhren möglich wäre. Da diese kaum in jedes Auto und schon gar nicht in einen mobilen Empfänger eingebaut werden können, wird die Uhrenungenauigkeit  $\epsilon$  als weitere zu bestimmende Unbekannte betrachtet und es folgt:

$$T_e^{(\text{ex})} = T_e + \epsilon \Rightarrow \Delta t_i = T_i - T_e - \epsilon, \quad (9.1)$$

wobei  $T_e$  die ungenaue Empfängeruhrzeit ist. Wird der Abstand wie in Gleichung (5.6) definiert als Luftlinienabstand betrachtet, können die zu bestimmenden Koordinaten  $x_e$ ,  $y_e$  und  $z_e$ , mit der Laufzeit in Verbindung gebracht werden.

$$\sqrt{(x_e - x_i)^2 + (y_e - y_i)^2 + (z_e - z_i)^2} = d_{e,i} = (T_i - T_e - \epsilon)c \quad (9.2)$$

Bei bekanntem  $d_{e,i}$  kann gesagt werden, dass der gesuchte Punkt  $P(x_e, y_e, z_e)$  auf der Oberfläche einer Kugel mit dem Mittelpunkt  $P_i(x_i, y_i, z_i)$  und dem Radius  $d_{e,i}$  liegt. Wird ein zweites Signal empfangen, kann diese Angabe auf die Schnittmenge zweier Kugeln, einen Kreis, reduziert werden. Bei drei Signalen ergeben sich zwei Punkte. Ohne die Uhrenungenauigkeit wären also drei Signale bzw. drei Gleichungen für die Positionsbestimmung ausreichend. Der zweite mögliche Punkt liegt weit entfernt von der Erde im Weltall und kann mittels Plausibilitätsüberlegungen ausgeschlossen werden. Mit der Uhrenungenauigkeit  $\epsilon$  kommt eine vierte Unbekannte hinzu und es werden vier Gleichungen benötigt, um diese bestimmen zu können. Ein in einem Fahrzeug installierter Empfänger muss in der Lage sein, die irdene Lösung zu finden. Da mögliche Lösungsverfahren iterativ vorgehen, kann ein Empfänger, der Lösungen im Abstand von wenigen Sekunden berechnen muss, die alten als Startwert für ein Näherungsverfahren verwenden und dadurch sehr schnell arbeiten. Wird aber ein Gerät erstmalig in Betrieb genommen, so wird wesentlich mehr Zeit benötigt. Diese als *time-to-first-fix* bezeichnete Zeit kann einige Minuten betragen, verglichen mit wenigen Sekunden bei einem Warmstart. Wird ein Fahrzeug von Europa nach Amerika verschifft, steht das Navigationssystem am Zielhafen erst nach dieser Zeit zur Verfügung.

Auch im Betrieb sind die Ergebnisse mit Fehlern behaftet, die in der Größenordnung einiger zehn Meter liegen können. Das über viele Jahre genutzte *differential GPS* zur Verbesserung der Daten bringt heutzutage keinen Qualitätsgewinn. Dieses war erforderlich, weil die amerikanischen Betreiber unterschiedliche Daten für die zivile und militärische Nutzung bereitstellten. Die zivilen

wurden absichtlich verschlechtert. Dieses als *selective availability* bekannte Vorgehen ist aber seit längerer Zeit abgeschaltet, da sich der originäre Benutzer, das amerikanische Militär, hiermit insbesondere während des ersten Golfkrieges vor zu große Probleme gestellt sah. Ein nützlicher Nebeneffekt des hier beschriebenen Vorgehens ist es, dass ein Auto mit GPS-Empfänger automatisch die exakte Uhrzeit kennt. Eine zusätzliche Uhr im Auto wird zur Verschwendung.

Ein Empfänger liefert Koordinaten in einem Koordinatensystem, in dem auch die Satelliten ihre Positionen beschreiben, dem *world geodetic system 1984 (WGS84)*. Dieses ist ein raum- und kein erdbezogenes Koordinatensystem, wie es für Anwendungen auf der Erdoberfläche zweckmäßig ist. Sollen diese Koordinaten für Berechnungen auf der Erde verwendet werden, ist es hilfreich, sie in ein erdfestes System zu transformieren. Für Abstandsberechnungen ist zusätzlich eine Projektion der gekrümmten Erdoberfläche auf eine Ebene zweckmäßig. Derartige Projektionen können entweder flächen- oder längentreu sein. Hierbei ist das *oder* ein ausschließendes *oder*, d. h., es ist keine Projektion möglich, die gleichzeitig flächen- und längentreu ist. Weit verbreitet ist die *Universale Mercator Projektion (UTM)*, bei der die Erde in Zonen mit einer Breite von  $6^\circ$  entlängs der Längengrade eingeteilt wird. Die Oberflächen der hierdurch wie Apfelsinenstückchen aussehenden entstehenden Elemente werden dann eben dargestellt. Die Flächen in der Nähe der Pole erscheinen bei dieser Projektion sehr viel größer als sie tatsächlich sind. Gebiete in der Nähe des Äquators werden unrealistisch klein. Deutschland liegt in den Zonen 32 und 33 und berührt am westlichen Rand die Zone 31. Lassen sich einige Umrechnungen mit einfachen Formeln durchführen [VoB06], so gibt es seit einigen Jahren für die Verwendung digitaler Straßenkarten spezielle entwickelte Datenbankformate, mit denen viele Anforderungen einfach erfüllt werden können.

Die folgende mit Oracle realisierte Abfrage liest Koordinaten aus einer Tabelle mit dem Namen `karte`

```
select a.id as id,sdo_cs.transform(a.geom,m.diminfo,83032) geom
from karte a
```

und gibt diese, gesteuert über den Parameter 83032 als kartesische UTM-Koordinaten aus. Angaben sind dann von der Art  $x = 497828.404$  und  $y = 5487623.97$  und für die Verwendung zur grafischen Darstellung bestens geeignet. Für Menschen, wie den Ballonfahrer aus Beispiel .37 ist diese Positionsangabe sicher noch weniger aussagekräftig als die Angabe von Winkeln.

### **Beispiel .39 Positionsangaben – Variante III**

*Nehmen wir wieder einmal die Fahrt von Hamburg nach München, bei der der Fahrer auf der linken Spur fahrend einen Unfall beobachtet und eine Meldung an seine Zentrale schickt, in der er seiner Zentrale mitteilt, dass er einen Unfall gesehen hat und diese bittet, dieses sofort weiterzuleiten. Da die Zentrale seine mit einem GPS-Empfänger bestimmte aktuelle Position kennt, übermittelt sie diese perfekten Daten an die Polizei, möglicherweise ergänzt um den Hinweis, dass sich der Unfall auf der Gegenfahrbahn ereignet hat.*

Wohin sollen Polizei und Rettungswagen fahren? Es ist klar, dass es die A7 ist, aber in welche Richtung? Um zu wissen, welche Fahrtrichtung die Gegenrichtung ist, muss die Polizei wissen, in welche Richtung das Fahrzeug fährt, das die Meldung abgesetzt hat. Bei einer Ungenauigkeit von zehn Metern können die Koordinaten durchaus einen falschen Schluss zulassen. Bei der Entscheidungsfindung des Rettungswagenfahrers gibt es nur die Alternativen *wahr* oder *falsch*, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die mittlere Leitplanke überwunden werden kann. Hier ist wieder das zu beachten, was in Kapitel 6.2 gesagt wurde:

**Weisheit 9.3** Die Aussagekraft einer Anzeige eines GPS-Empfängers ist für viele Anwendungen sehr gering. Ein GPS-Empfänger liefert Daten und keine Informationen.

Die Mitteilung „Ich befinde mich auf der A7 zwischen den Abfahrten Bockenem und Rhüden in Fahrtrichtung Kassel“, ist weniger präzise, hat aber einen höheren Informationsgehalt. Wie lässt sich diese informative Positionsangabe automatisch mit Hilfe eines GPS-Empfängers erstellen? Zunächst kann aus aufeinanderfolgenden Positionen die Fahrtrichtung so ermittelt werden, dass Himmelsrichtungen angegeben werden. Hiermit ist immer noch nicht klar, auf welcher Straße sich das Auto bewegt. In dem hier angedeuteten Beispiel ist es möglicherweise einfach, weil die Straßendichte dort recht gering ist. Nun gibt es aber auch Regionen, in denen direkt neben einer Autobahn eine Bundesstraße verläuft. Um die Information über die aktuell befahrene Straße zu erhalten, müssen die Positionsangaben mit einer Straßenkarte abgeglichen werden. Das Vorliegen einer Routenplanung hilft ungemain. Es wird folglich mehr benötigt als ein GPS-Empfänger, um Positionen angeben zu können. Die gefahrene Strecke ist aufzuzeichnen und auszuwerten. Soll hingegen nur der Fluchtweg eines Autodiebes oder dessen aktuelles Versteck angezeigt werden, sind Positionsangaben ohne weitere Analyse möglicherweise ausreichend.

Kann hier ein GPS-Sender helfen? Auch wenn gelegentlich über derartige Geräte gesprochen wird, ändert es nichts an der Tatsache, dass es diese nicht gibt. Die Positionsbestimmung mit GPS ist ausschließlich passiv. Dieses gilt ebenfalls für **GSM-Ortung**, bei der zwischen technischen und rechtlichen Möglichkeiten zu unterscheiden ist. Technisch können mittels Feldstärkemessung, vgl. Gleichung 5.5, die Abstände zu Sendemasten, deren Position bekannt ist, bestimmt und dann wie bei GPS auch, die Position des Endgerätes ermittelt werden. Die aktuelle Situation stellt sich so dar, dass als Ortungsinformation nur die Angabe der Zelle, in der das Gerät eingebucht ist, angegeben wird. Die Genauigkeit ergibt sich dann aus den Zellgrößen, die zwischen einigen hundert Metern in dicht bebauten Gebieten und einigen Kilometern in dünn besiedelten liegen kann. Da für eine Ortung die Flächenabdeckung entscheidend ist, gibt es immer noch Regionen, in denen eine Ortung fast nicht möglich ist. Das Orten von Seecontainern auf einem Schiff im Ozean mittels GSM ist vollkommen unmöglich, da dort kein GSM-Netz verfügbar ist. Ein weiterer entscheidender Nachteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Daten für eine Anwendung nicht direkt zugänglich sind. Sie liegen zunächst auf einem Rechner des Netzbetreibers, von dem aus diese abgerufen werden müssen. Dieses geht zu Lasten der Geschwindigkeit und des Geldbeutels. Dort, wo die Zellen relativ klein sind, also in Städten, sind Fahrspuren in verschiedene Richtungen sehr dicht beieinander und auch die Abstände verschiedener Straßen sind gering. In ländlichen Gebieten, in denen Straßen nicht so dicht sind, ist die Angabe der Zelle ungenauer. Der Fehler wird dort kleiner wo er auch kleiner werden muss, in den Städten, aber ist weit davon entfernt, für logistische Anforderungen klein genug zu werden.

Eine Positionsbestimmung der Art, dass klar wird, ob ein Fahrzeug fährt und wo es sich aufhält, ist mit den aktuell verfügbaren GSM-Lösungen nicht möglich. Der Versuch, zwei aufeinander folgende Punkte zu bestimmen macht keinen Sinn, da diese in der selben Zelle liegen können, obwohl sich das zu ortende Objekt bewegt hat. Da ein sendendes Modem über praktisch keine Intelligenz verfügt, müsste die Abfrage nach der Zelle stets von der Zentrale initiiert werden, was jedes Mal mit Kosten verbunden ist. Hinzu kommt die beim Einsatz von GSM-Modulen übliche Problematik mit der Verfügbarkeit der Stromversorgung. Ist das Gerät ständig im *stand by*-Betrieb, müssen Batterien ähnlich häufig wie die eines gewöhnlichen Mobiltelefons getauscht werden. Wird es nur zu bestimmten Zeiten aktiviert, ist eine Steuerung über eine Zentrale praktisch unmöglich. Diese GSM-Lösungen sind nicht mit denen zu verwechseln, bei denen

die Ortung mittels *GPS* erfolgt und die Daten über ein *GSM*-Modem und hier dann über *GPRS* übertragen werden.

Auch wenn Anforderungen ähnlich sind, gelten gänzlich andere Rahmenbedingungen bei der Ortung innerhalb von Gebäuden oder Werkgeländen. Es werden oftmals Positionsangaben auf mehreren Ebenen einer Produktions- oder Lagerhalle oder eines Hochregals benötigt, von denen nicht einmal digitale Karten vorliegen. Decken verhindern den Empfang von *GPS*-Signalen. Ebenso können die Anforderungen sehr unterschiedlich sein. Für viele Anwendungen ist es vollkommen ausreichend zu wissen, in welchem Bereich, z. B. in welcher Halle sich ein Gabelstapler befindet. Sollen hingegen Positionen bestimmt werden, an denen der Stapler Paletten oder Behälter abgestellt hat, kann eine Genauigkeit von weniger als einer halben Palettenbreite, d. h. weniger als einem halben Meter, benötigt werden. In jüngster Zeit hat sich hier eine sehr interessante Option gezeigt, die wie *GPS*, aber innerhalb von Gebäuden, arbeitet. Diese, nennen wir sie ***inhouse positioning system*** oder *IPS*, Lösung verwendet statt der Satelliten fest montierte Sender, die ein definiertes Signal aussenden. Hierbei wird die sogenannte *chirp spread spectrum*-Technologie eingesetzt [Sch07].

Es werden wieder die Laufzeiten der Signale zwischen einzelnen Modulen und dann mittels **Tri-lateration** die Position einzelner Objekte ermittelt. Da Störungen, wie z. B. durch Reflektionen, nicht ausgeschlossen werden können und die komplette Überdeckung großer Werkgelände nicht möglich ist, sollten diese Systeme durch andere ergänzt werden. Hier bieten sich

- Odometrie
- Beschleunigungsmessungen  
oder
- Transpondern bzw. Baken

an. Bei der Odometrie werden Radumdrehungen gezählt und daraus zurückgelegte Strecken berechnet. Beschleunigungsmesser sind in unterschiedlichen Ausführungen, Genauigkeiten und Größen verfügbar und messen, wie der Name sagt, Beschleunigungen  $a$ , aus denen dann Geschwindigkeiten  $v$  und gefahrene Strecken  $s$  berechnet werden können. Dieses kann in zwei oder drei Richtungen erfolgen, so dass jede Bewegung im Raum erfasst werden kann. Durch das Messen positiver und negativer Beschleunigungen  $a(t)$  wird wirklich die Bewegung des Objektes erfasst. Schlupf beim Anfahren und auf glattem Untergrund oder blockierende Räder verfälschen das Ergebnis nicht. Da

$$s(t) = \int_0^t v dt' = \int \int a dt' dt' \quad (9.3a)$$

durch diskrete Gleichungen der Art

$$s(t + \Delta t) = s(t) + v(t)\Delta t \quad \text{und} \quad v(t + \Delta t) = v(t) + a(t)\Delta t \quad (9.3b)$$

ersetzt werden muss und die Messungen der Beschleunigung ebenfalls in diskreten Zeitabständen durchzuführen ist, sind Fehler unvermeidbar. Diese Messungen müssen dann wieder mit den Ergebnissen anderer Methoden verglichen und die Ergebnisse kalibriert werden. Dieses kann mittels *IPS* oder Baken realisiert werden.

Unter Baken sollen in diesem Zusammenhang alle exakt vermessenen Markierungen verstanden werden. Dieses können reflektierende Folien sein und vorbeifahrende, mit einer Lichtquelle ausgestattete Objekte stellen anhand des reflektierten Lichtes ihre Position fest. Da diesen Folien

keine optisch übertragbare Kennzeichnung aufgeprägt werden kann, muss eine entsprechende Logik für eine weitere Orientierung sorgen. Dieses ist immer dann notwendig, wenn ein Objekt, wie ein Gabelstapler eine Halle verlässt und über eine Freifläche in eine andere Halle fährt. Dieses Problem kann vermieden werden, wenn Transponder als Baken eingesetzt werden. Da Transpondern eine eindeutige Nummer zugeordnet ist und in diesen auch noch weitere Daten, wie Hallennummern, gespeichert werden können, lässt sich die Position eindeutig bestimmen. Der Einsatz von Transpondern ist auf Regionen beschränkt, in denen der Anwender bauliche Maßnahmen vornehmen kann, also Hallen oder Werkgelände. Auf Freiflächen ist dieses kaum machbar.

#### **Beispiel .40 Ortung mittels Transpondern im Sommer und Winter**

*In einem gescheiterten Projekt sollten Transponder zur Ortung von Schienenfahrzeugen eingesetzt werden. Hierzu wurden Lesegeräte in die Gleiskörper eingelassen und vernetzt. Das System wurde im Frühjahr getestet. Am Ende des folgenden Winters traten Probleme auf. Eine Überprüfung ergab, dass alles hervorragend funktionierte.*

*Ursache des Problems war, dass etwas Schnee auf die Lesegeräte gefallen war und dieser zusammen mit dem folgenden Tauwasser dazu führten, dass die Strahlung absorbiert wurde. Bei der Überprüfung war das Tauwasser verdunstet und das System funktionierte natürlich perfekt.*

Eine Einsatzmöglichkeit für Transponder ist in den Abbildungen 9.3a bis 9.4 gezeigt. Die Position wird immer dann erfasst, wenn Transponder und Lesereinheit sich gegenseitig erkennen. Bei einer ausschließlichen Nutzung dieser Technik ist es nicht möglich, Bewegungen zwischen zwei Baken zu erkennen. Steht ein Gabelstapler, so wird dieses nicht bemerkt. Stehen und Rangieren in einem durch zwei Baken begrenzten Bereich führen zu identischen Ergebnissen. Ebenso können Fahrtrichtungen nicht mit einer einzigen Messung bestimmt werden. In einem angeschlossenen System muss hinterlegt sein, woher ein Fahrzeug kommt, um beim Passieren einer Bake sagen zu können, in welche Richtung es fährt.

Ein großer Vorteil bei diesem Verfahren ist es, dass es hervorragend an individuelle Bedürfnisse in bezug auf Qualität und Kosten angepasst werden kann. Durch das Anbringen weiterer Transponder an ausgesuchten Stellen kann genau dort die Genauigkeit gesteigert werden, wo sie benötigt wird. Wird dieses System mit anderen kombiniert, müssen die Positionen nicht einmal vermessen werden. Dieses kann *on the fly* erfolgen. Wird davon ausgegangen, dass das System nicht absichtlich gestört wird, werden Fehler bei der Positionsbestimmung mit jeder Messung kleiner. Einige Punkte sind jedoch bei der Auswahl der richtigen Transponder zu beachten:

- Werden Transponder mit großer Reichweite verwendet, ist die Positionsbestimmung sehr ungenau. Werden Transponder mit geringer Reichweite gewählt, müssen Lesegerät und Transponder entsprechend dicht zusammen kommen oder geeignet ausgerichtet sein.
- Sind Abstrahl- und Empfangscharakteristik kugelsymmetrisch, ergibt sich ebenfalls eine große Ungenauigkeit.
- Bei Verwendung gerichteter Antennen können der Öffnungswinkel des Empfangskegels reduziert und gleichzeitig auch Transponder in großen Abständen erfasst.

Ob es sinnvoller ist, Lesegeräte stationär und Transponder mobil oder stationäre Transponder mit mobilen Lesegeräten einzusetzen ist anwendungsabhängig. Sollen nur wenige Gabelstapler erfasst werden, ist sicher die zweite Variante zu bevorzugen. Sind auch Behälter zu erfassen, ist es sicher günstiger, Lesegeräte stationär und Transponder an den Behältern einzusetzen.

Alternativ können die Behälter von dem Stapler erfasst werden. Dann erfolgt die Positionsbestimmung des Behälters aber nur indirekt über die des Gabelstaplers. Gibt es noch die Möglichkeit, dass Behälter ohne geeignete Fahrzeuge bewegt werden, sind diese verloren. Hier sind

Umsetzungsmöglichkeiten abhängig von den Prozessen und den zur Verfügung gestellten Ressourcen. Sollen Betten in einem Krankenhaus erfasst werden, sind Transponder an den Betten und Lesegeräte an Durchgängen zu platzieren. Für eine Bewertung der verschiedenen Möglichkeiten sollten Installations- und Wartungskosten stets von Beginn an betrachtet werden. Für das Anbringen der Transponder ist weder eine Anbindung an ein Stromnetz noch an ein Rechnernetz erforderlich, Lesegeräte benötigen beides. Die Anbringung einer neuen stationären Komponente, entweder wegen des Ausfalls einer bereits vorhandenen oder, um die Qualität zu steigern, ist für Transponder sehr einfach, schnell und kostengünstig, für Lesegeräte nicht. Diese Fragestellung ist eine interessante Herausforderung an eine Kostenrechnung.

Anwendungen aller bisher diskutierten greifbaren und nicht greifbaren Techniken werden im folgenden Teil diskutiert.

+1



*Es waren Bruchpiloten, die das Fliegen vorangebracht haben, nicht Zuschauer.*

Impulse 10/2005

# 10

## Probleme und ihre Lösungen

### 10.1 Die 8 r der Logistik

In den letzten Kapiteln ist eine Vielzahl unterschiedlicher Techniken vorgestellt worden, die alle dem zu Beginn formulierten Ziel nach der Erfüllung der 8 r der Logistik dienen sollen, jedoch Bruchlandungen nicht gänzlich verhindern können. In dem nun folgenden Teil sollen ausgewählte Probleme formuliert, beschrieben und Lösungen skizziert werden. Als Grundlage jedweden Handelns in einer Lieferkette muss Folgendes angesehen werden:

**Weisheit 10.1 *Der Gelderhaltungssatz***

*Die insgesamt zur Erfüllung eines Kundenauftrages zur Verfügung stehende Menge Geld ist das, was der Kunde dem Händler übergibt. Alle nachfolgenden Stellen verursachen Kosten.*

Der Kunde übergibt beim Kauf eines Produktes eine bestimmte Menge Geld an den Händler und es gibt keine weitere sprudelnde Geldquelle entlang der kompletten Lieferkette, nur Geldsenken, die möglichst eliminiert werden sollen. Vor diesem Hintergrund ist das Streben nach den 8 r stets zu betrachten. Was bedeutet dieses?

Um feststellen zu können, ob es sich um die richtige Ware handelt, muss eine Sendung identifiziert werden. Identifizieren bedeutet, dass eine an der Sendung angebrachte Kennzeichnung erkannt und dieses mit dem Eintrag auf einem Auftrag verglichen wird. Die Frage nach der richtigen Menge bedeutet bei einer Auslieferung an einen Kunden, dass er die *richtige Menge* erhält, bezogen auf Produktionsprozesse, dass die richtige Menge zur Verfügung steht. Das Abgeben einer Sendung beim Nachbarn, der kurz darauf verreist, reicht nicht aus. Es ist zu wenig, eine Palette irgendwo auf einem Lkw des Werkgeländes abgestellt zu haben. Das Material muss an dem Zielort zur Verfügung stehen. Mengen sind sowohl auf Waren als auch auf Ressourcen zu

beziehen. Was nützt die richtige gelieferte Menge, wenn weder Gabelstapler noch Stauffläche vorhanden sind und Ersatzlösungen gesucht werden müssen, die die Kosten erhöhen und die Qualität senken. Die Logistik muss in Planung und Lenkung hervorragend agieren und alle beteiligten Akteure müssen kooperieren. Im Falle der Lieferung und Materialbereitstellung nimmt die Logistik eine mehr defensive oder konservative, d. h. bewahrende, Rolle ein. Dieses gilt auch bei Transporten und Lagerung, wo sie dafür sorgen muss, dass die Qualität eines Produktes nicht schlechter wird.

**Weisheit 10.2** *Jeder Handhabungsvorgang verursacht Kosten und kann die Qualität eines Produktes im günstigsten Fall beibehalten.*

Logistik kann aktiv mitgestalten, dass Fehler und unnötige Beanspruchung vermieden werden. Mit einer zunehmenden Austauschbarkeit der Produkte muss die Logistik eine offensivere Rolle übernehmen, indem sie dafür sorgt, dass die vom Kunden erkennbare Leistung positiv wahrgenommen werden kann. Hierzu gehört die Vorgabe des richtigen Zeitpunktes und des richtigen Ortes. Diese Aufgabenstellungen beginnen bei der Planung und enden erst mit der Datenanalyse, um Informationen und Wissen für künftige Vorgänge bereit stellen zu können. Beim Thema Kosten ist die Logistik in einer ähnlichen Situation wie bei der Qualität, oftmals in einer defensiven. Entwirft ein Designer Adventskalender in einer Größe von  $40 \times 40 \text{ cm}^2$ , können weder Euro- noch Düsseldorfer Paletten kostengünstig gepackt werden: Erforderliche Verpackungen bieten nicht gleichzeitig Schutz und sind unendlich dünn. Aktiv kann und soll der Logistiker Vorschläge unterbreiten, die einen effizienten Ablauf ermöglichen. Für die Kalender sind Maße vorzugeben. Die effiziente Gestaltung seiner eigenen, der logistischen Prozesse, kann er direkt beeinflussen und er muss teure Feuerwehreaktionen vermeiden helfen. Hierzu bedarf es der richtigen Informationen, für die gesorgt werden muss und die mit dem richtigen Wissen zu bearbeiten sind. Zu dem richtigen Wissen gehört auch die Kenntnis dessen, welche Methoden und Techniken verfügbar und anschließend für welche Zwecke sie einsetzbar sind. Wurden in den vorherigen Kapiteln Methoden beschrieben, sollen hier zunächst Problemklassen eingeführt und dann typische Beispiele von der Formulierung des Problems bis hin zur Lösung skizziert werden.

## 10.2 Problemklassen

Da einzelne Begriffe oftmals sehr unterschiedlich verwendet werden, sind in Tabelle 10.3 einige der häufig verwendeten definiert. Mit der Beschreibung der Problemklassen wird die sehr knapp gehaltene Aufzählung von Seite 31 wieder aufgenommen.

### **Bestandsmanagement**

Dieses Thema ist eines der am heftigst diskutierten. Zunächst stellt sich die Frage, was ist Bestandsmanagement? Ist dieses die Bewirtschaftung der Vorräte in einem Lager? Hieraus würde resultieren, dass Bestandsmanagement ein Teil des Lagerwesens ist und als Teilaufgabe der Lagerhaltung zu betrachten wäre. Ist das Bestellwesen Teil des Bestandsmanagements oder ist das Bestandsmanagement Teil des Bestellwesens? Wie sind Waren-, Materialwirtschaft und Einkauf mit diesem Thema verbunden? Hier gilt wie immer, dass Fragen bereichsübergreifend zu betrachten und stets die Ziele der Logistik anzustreben sind, d. h. Verschwendung vermieden werden soll. Konkrete Fragestellungen werden im weiteren Verlauf aufgegriffen.

$N_S$	$N_S!$
69	17112245242814131137246833888 12728390922705448935203693936 48040923257279754140647424000 0000000000 $\approx 1.7 \times 10^{98}$
450	$1.7 \times 10^{1000}$
1000	$4.0 \times 10^{2567}$
7000	$8.8 \times 10^{23877}$

**Tab. 10.1:** Anzahl  $N_S!$  möglicher Lösungen für Routenplanungsproblem in Abhängigkeit der Anzahl  $N_S$  anzufahrender Punkte.

### Gebietsplanung

Es wird die Aufteilung eines großen Bezirkes in kleinere Teilbereiche gesucht, wie beispielsweise bei der Festlegung der Zustellbezirke für Tageszeitungen, der Abfuhrgebiete für die Hausmüllentsorgung oder von Verkaufsgebieten im Einzelhandel.

### Tourenplanung

Sind Gebiete festgelegt, müssen Touren bestimmt werden. Diese sind alle Bedienpunkte, die in einem zusammenhängenden Arbeitsgang, z. B. an einem Tag von einem Mitarbeiter, bearbeitet werden können. So sind Stadtbezirke, in denen Müll entsorgt werden soll, Gebiete, die für jeden Tag in realisierbare Touren für jedes einzelne Fahrzeug zu unterteilen sind. Für Verkaufsgebiete umfasst eine Tour alle Verkaufsstellen, die an einem Tag bzw. auf einer Fahrt besucht werden sollen.

### Routenplanung

Dieses ist sicher eine der am intensivsten untersuchten Fragestellungen und eine spezielle Form der in Kapitel 8.3 beschriebenen Reihenfolgeplanung. Steht eine Tour für die Menge aller anzufahrenden Kunden, beschreibt die Route die Reihenfolge, in der diese aufzusuchen sind. Die Wege zwischen den einzelnen Kunden, die **Streckenführungen** oder **Kantenzüge**, sind nicht Bestandteil einer Route, sondern können sie ergänzen. Routenplanungen können in zwei Klassen unterteilt werden:

#### Definition .57 Problem des Handlungsreisenden

Gegeben sind  $N_S$  Bedienpunkte. Gesucht ist eine optimale Reihenfolge, die alle Punkte miteinander verbindet. Dieses ist auch als **traveling salesman problem (TSP)** bekannt.

#### Definition .58 Briefträgerproblem

Gegeben sind  $N_S$  Kanten. Gesucht ist eine optimale Reihenfolge, bei der jede Kante einmal befahren wird. Dieses heißt auch **chinese postman problem (CPP)**.

Die Anzahl möglicher und zulässiger Lösungen für ein Problem mit  $N_S$  anzufahrenden Punkten ist gleich  $N_S!$ . Um einen Eindruck zu gewinnen, was ein solches Symbol bedeutet, sind in Tabelle 10.1 Werte für in der Praxis durchaus gebräuchliche Zahlen aufgeführt. Um eine Vorstellung von der Größe der Zahlen zu erhalten, mag die Anzahl der Atome aus denen unsere Erde besteht, ungefähr  $10^{52}$ , als Orientierungshilfe dienen.

Die Beschreibung beider Problemklassen kann mit unterschiedlichen Zusatzbedingungen, wie einzuhaltenden Zeitfenstern oder zu beachtenden Zuladungen, wie in Kapitel 8.1 bereits beschrieben, versehen werden. Es wird hier auch nicht gefordert, dass jeder Punkt bzw. jede Kante genau einmal befahren werden muss. Beispiele für ein CPP sind die Straßenreinigung, Winterdienste oder eben das Verteilen von Post und Zeitungen. Das Verteilen von Paketen hingegen ist ebenso ein TSP wie das Bestücken einer Platine mit

Bauelementen oder das Anliefern von Waren auf einem Werkgelände.

### **Pack - und Zuschnittprobleme**

Auch wenn diese hier nur kurz angesprochen werden sollen, sind sie von großer praktischer Relevanz und Lösungsverfahren sind bereits seit vielen Jahren im Einsatz. Im Stahlbau sind Verfahren als Schachtelalgorithmen bekannt. Diese berechnen, wie aus großen Blechen kleine so zugeschnitten werden können, dass der Verschnitt möglichst gering ist. Sind alle Ecken rechtwinklig, ist dieses die mit Abstand einfachste Variante. Schon interessanter wird es in der Textilindustrie, wenn aus Stoffballen die für das Nähen eines Sakkos richtigen krummlinig begrenzten Zuschnitte erstellt werden müssen, die dann auch noch nach dem Zuschneiden, Nähen, mehrmaligem Tragen und etlichen Waschvorgängen eine perfekte Form des Kleidungsstückes garantieren müssen. Aber auch das Zuschneiden von Holz birgt seine Tücken, wenn in einem Auto der Luxusklasse sowohl am Cockpit als auch in den Türgriffen Material aus dem selben Furnier verarbeitet werden, dessen Maserung auch bei minimalem Verschnitt wie natürlich aussehen soll.

Der Übergang zu dreidimensionalen Problemen führt zu vielen spannenden Fragestellungen an die Mathematiker der kommenden Jahre. Sollen Süßigkeiten besser in Form von *Smarties*<sup>TM</sup> oder Liebesperlen produziert werden? Macht es Sinn, den Tankstutzen eines Tanks als ein eigenes Teil zu planen, um dann mit weniger Transportbehältern auskommen zu können, aber dafür die beiden Teile später wieder zusammen führen zu müssen? Wie viele Flaschen sollen in einem Bierkasten stehen? Welches ist die günstigste Form einer Flasche? Um wie viel günstiger könnten Ravioli sein, wenn Tetrapaks statt Dosen verwendet werden würden? Welche Paketgrößen soll ein Paketdienstleister anbieten, um seine Fahrzeuge optimal auslasten zu können? Wie ist das Fahrzeug eines Baustoffhändlers zu beladen, bei dem zwei Kunden Styropor und Zement bestellt haben und der Zement früher angeliefert werden muss als das Styropor oder das eines Herstellers von Solartechnik, der gleichzeitig Heizkessel und Sonnenkollektoren ausliefert.

Eine andere Art von Packproblemen ergeben sich im Zusammenhang mit Lagerplatzoptimierung. Kann im Falle eines Hochregals jeweils ein Packstück einem Fach zugeordnet werden, so ist die Platzwahl bei einer Blocklagerung frei. Jedoch ist nicht nur eine optimale Ausnutzung der verfügbaren Fläche oder des Raumes zu betrachten sondern auch die Behinderungen, die durch eine möglicherweise optimale Ausnutzung hervorgerufen werden – ein zu 100 % ausgelasteter Bereich verhindert jegliches *Atmen*. Eine statisch optimale Lösung kann untauglich werden, wenn dynamische Gesichtspunkte wichtig werden.

Algorithmen zur Lösung dieser Probleme können nicht nur optimale Ladungen bestimmen, sondern auch wichtige Grundlagen für ein Kennzahlensystem, vgl. Abschnitt 3.2, liefern. Die maximale Auslastung eines Lkw bei der Beladung mit Papierrollen für einen Zeitungsverlag ist nicht das Volumen, das sich aus Höhe, Breite und Länge ergibt, sondern ein wesentlich geringeres, das sich aus dem zylindrischen Format der Rollen und dem sehr hohen Gewicht einer Rolle ergibt. Zielfunktion einer Optimierung und Definition einer Kennzahl sind sehr eng miteinander verknüpft.

### **Ressourcenplanung**

Mag dieses für Papierrollen in Anbetracht der geringen Anzahl noch einfach sein, sind Ressourcenoptimierungsprobleme ansonsten sowohl vielschichtig als auch komplex. Bei der Lkw-Steuerung werden nicht nur Gabelstapler zum Entladen benötigt sondern auch Menschen, die diese fahren können, und Staufflächen, auf denen Ware abgestellt werden kann. Hiermit verbundene Probleme sind fast immer zeitabhängig. Da es keine perfekten Systeme gibt, müssen Störungen berücksichtigt werden. Dieses führt dazu, dass Ressour-

cenplanungen durch Simulationen unterstützt werden müssen. Kann eine Einsatzplanung für Mitarbeiter auf der Grundlage von Arbeitszeitmodellen lange im Voraus erstellt werden, sind Auswirkungen witterungsbedingter Störungen oftmals zeitnah zu betrachten. So muss die Planung aller in einem Werkgelände benötigten Ressourcen eine Kombination aus lang- und kurzfristiger Optimierung und Simulation sein.

### **Standortplanung**

Standorte sind grundlegend für fast jede Planung. Soll ein Fahrstuhl dort stehen bleiben, wo der letzte Fahrgast ihn verließ? Ist es besser, ihn in einem Bürohaus morgens zurück in die Tiefgarage und abends zurück in eine der Büroetagen zu schicken? Wo sollen Laderampen sein? Wo sollen Gabelstapler stationiert werden, wenn sie nicht in Betrieb sind? Wo sollen die Akkus für Gabelstapler geladen werden? Wo soll ein Einzelhandelsunternehmen, das zwei Distributionszentren betreibt, diese ansiedeln? Oder soll es besser mit vier Zentren arbeiten? Unabhängig von der Verzahnung mit anderen Bereichen sind die zu beantwortenden Fragen ganz einfach: Wo ist der am besten geeignete Standort oder wo sind die besten Standorte, aber auch wie viele Standorte werden benötigt? Gibt es Rampen, an denen zwingend ein Gabelstapler sein muss? Ist es vertretbar, hier nur für einen begrenzten Zeitraum ein Fahrzeug vorzuhalten? Standortplanung beeinflusst die Ressourcenplanung, oder ist es umgekehrt? Ist dieser Standort, diese Entscheidung, die heute getroffen wird, auch morgen noch optimal? Wie hängt der gefundene Standort von dem ab, was andere Akteure entscheiden? Das folgende sehr einfache Beispiel soll zeigen, wie facettenreich ein im Grunde triviales Problem bereits sein kann.

#### **Beispiel .41 Das Eisverkäufer- am -Strand- Problem**

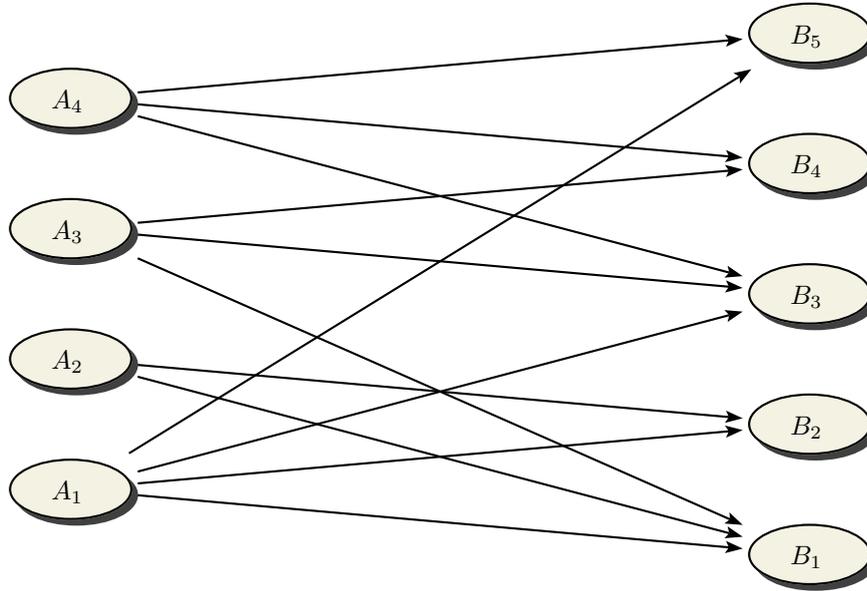
*Stellen Sie sich einen Strand vor, der zehn Meter breit und 100 Meter lang ist. Im Osten und Westen wird er durch Felsen, im Süden durch das Meer und im Norden durch eine Uferpromenade begrenzt. An diesem Strand gibt es genau zwei Eisverkäufer mit je einem Eisverkaufsstand auf der Uferpromenade. Der Verkaufsstand kann nur auf der Promenade und nicht im Sand bewegt werden. Gesucht ist der optimale Standort beider Eisverkäufer. Nehmen wir an, dass beide das gleiche Eis zu gleichen Preisen verkaufen. Eine Diskussion, die Preise, Qualität und Service umfasst, ist natürlich möglich, soll hier aber nicht geführt werden. Die Standorte  $P_1$  und  $P_2$  beider Verkaufsstände sind jeweils 25 m von den beiden Begrenzungen im Osten und im Westen entfernt. Da die Geschäfte gut liefen, haben sich beide Verkäufer abgesprochen und das Gebiet aus ihrer Sicht so gerecht aufgeteilt.*

*An einem regnerischen Tag mit schlechtem Umsatz überlegt sich einer der beiden, seine Position zu verbessern und verschiebt seinen Stand vier Meter in Richtung Mitte. Somit vergrößert er das Gebiet, das ausschließlich von ihm bedient wird und erhöht gleichzeitig seine Attraktivität auch für Kunden, die bisher seinem Mitbewerber zuzuordnen waren. Er vergrößert sein Einzugsgebiet zu Lasten des anderen. Dieser bemerkt das und verschiebt am nächsten Tag auch seinen Stand in Richtung Mitte. Da er seine Verluste nicht nur kompensieren, sondern sein Einzugsgebiet auch gegenüber der Ausgangssituation vergrößern möchte, nicht nur um vier sondern um acht Meter. Dieses kann nun solange fortgesetzt werden, bis sich beide in der Mitte treffen und beide wieder jeweils ein gleich großes Einzugsgebiet haben. Nun hat wieder keiner einen Vorteil gegenüber dem anderen. Für keinen einzigen Badegast hat sich die Situation verbessert, für viele verschlechtert.*

*Wird davon ausgegangen, dass die Bereitschaft der Badegäste, ein Eis zu kaufen von der zurückzulegenden Weglänge abhängt, wird der Gesamtumsatz abnehmen. Nur die in der Mitte liegenden Gäste haben jetzt, verglichen mit der Ausgangssituation, kürzere Wege zurückzulegen, alle anderen längere. Die Eisverkäufer machen weniger Umsatz bei vielen*

unzufriedeneren Kunden.

Werden Standorte nicht auf einer Linie sondern in einer Region gesucht, sollen nicht nur Kosten, sondern auch andere logistische Ziele, wie z. B. Liefertreue, betrachtet werden, steigen die Anforderungen sowohl an die Problembeschreibung als auch die an die Lösungsalgorithmen.



**Abb. 10.1:** Einfaches Transportproblem vgl. Abbildung 4.6a mit vier Angebotsorten  $A_1, \dots, A_4$  und fünf Bedarfsorten  $B_1, \dots, B_5$

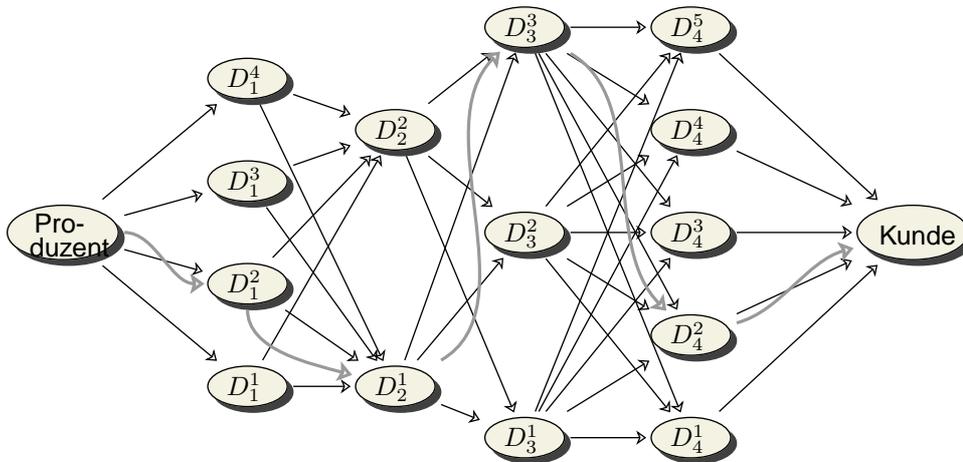
### Transportproblem

Sind Standorte von Lagern und Empfangsorten, z. B. Distributionsnetze und Filialen, vorgegeben, ist die Frage zu beantworten, welche Filiale von welchem Lager beliefert werden soll. Abbildung 10.1 zeigt ein einfaches Problem, in dem vier Lager oder Angebotsorte  $A_1, \dots, A_4$  und fünf Filialen oder Nachfrageorte  $D_1, \dots, D_5$  gegeben sind. Gesucht wird ein zulässiger optimaler Transportplan, d. h. eine Angabe der Form  $Q = q_{i,j}$ , die angibt welche Mengen  $q_{i,j}$  vom Angebotsort  $A_i$  zum Bedarfsort  $D_j$  geliefert werden sollen. Die Darstellung ist die eines **bipartiten Graphen** von Seite 110 und zeigt gleichzeitig eine einstufige Distribution wie auf Seite 29 beschrieben. Die Problemstellung soll folgendes Beispiel deutlich machen:

#### Beispiel .42 Belieferung mehrerer Kunden von mehreren Standorten

*Eine Brauerei braut an verschiedenen Standorten mehrere Sorten Bier, verpackt diese in unterschiedliche Gebinde und beliefert von diesen Standorten Getränkegroßhändler und zentrale Lager von Einzelhändlern. Einige Biersorten werden an mehreren Produktionsstätten abgefüllt. Von welchem Standort sind welche Kunden zu bedienen?*

Gibt es an den Standorten Abfüllanlagen unterschiedlicher Kapazität, müssen die Überlegungen um Ressourcenbetrachtungen ergänzt werden. Ein etwas aufwendigeres Transportproblem zeigt Abbildung 10.2, das zu folgendem Beispiel gehört:



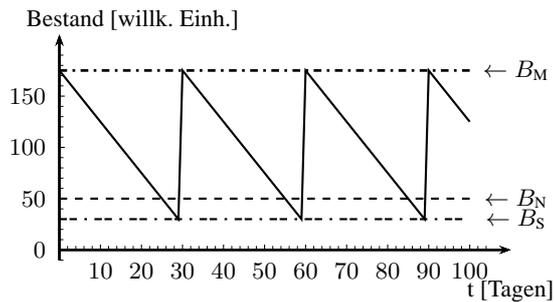
**Abb. 10.2:** Standort- und Transportproblem mit Umladen und ein möglicher Warenweg vom Produzent zum Kunden – vgl. Abbildung 4.6b

#### Beispiel .43 Distributionsnetz für Ersatzteile

Ein Automobilproduzent aus Asien garantiert seinen Kunden, dass jedes bis 16:00Uhr eines Tages bestellte Ersatzteil um 9:00Uhr des nächsten Morgen in jeder Werkstatt Europas verfügbar ist.

Es stehen 17 Stunden zur Verfügung, um dieses zu erfüllen. Da es einerseits nicht vertretbar ist, in jeder Werkstatt jedes Ersatzteil zu lagern und andererseits ein Lufttransport zu aufwendig, müssen in Europa ein oder mehrere Lager eingerichtet werden. Wenn dieses in der geographischen Mitte Europas läge, wäre es nicht möglich, sowohl Skandinavien als auch Spanien in der zur Verfügung stehenden Zeit zu beliefern. Eine zu beantwortende Frage ist nun nach Art und Lage der Standorte. Hinzu kommen: Werden in Europa ein oder mehrere Häfen angefahren? Wie viele Lager werden von dem bzw. den Häfen beliefert? Gibt es zwischen diesen Lagern noch ein oder zwei weitere Lagerstufen und wo befinden sich diese?

Diese Problemklasse wird auch als *warehouse location problem* bezeichnet. Auch die Positionierung von Leseköpfen bei Festplatten oder Regalbediengeräten in einem Hochregallager sind Standortprobleme, diese von der Art, dass sie ständig neu zu lösen sind. Was ist an dem Ergebnis einer Standortplanung optimal, wenn eine Tourenplanung dazu führt, dass alle Lkw gleichzeitig beladen werden müssen, um die Filialen pünktlich beliefern zu können? Standort- und Transportprobleme sind stets eng verbunden mit Touren- und Routenplanungsproblemen, für die statische und dynamische Aspekte zu beachten sind.

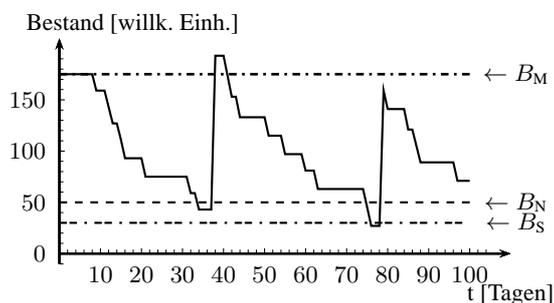


**Abb. 10.3a:** Bestandsverlauf für einen konstanten Verbrauch von  $\lambda = 5$  Einheiten pro Tag und eine Wiederbeschaffungszeit von  $t_w = 5$  Tage. ,  $B_M = 175$  Einheiten ist der Maximal-,  $B_N = 50$  Einheiten der Meldebestand und  $B_S = 30$  Einheiten der Sicherheitsbestand.

## 10.3 Anwendungen

### 10.3.1 Bestandsmanagement und Bestellwesen

Für die Versorgung mit Ersatzteilen aus Beispiel .43 drängt sich folgende Frage auf: Ist es sinnvoll, einige ausgewählte Ersatzteile vielleicht doch vor Ort in den Werkstätten zu lagern? Wenn ja, welche und wie viele sollen es sein? Gleich lautende Fragen können auch für jedes Zwischenlager gestellt werden. Um dieses beantworten zu können, müssen die verschiedenen Funktionen, die Bestände oder ein Lager haben, gegeneinander abgewogen [Pfo95], oder wie hier, zumindest aufgelistet werden.



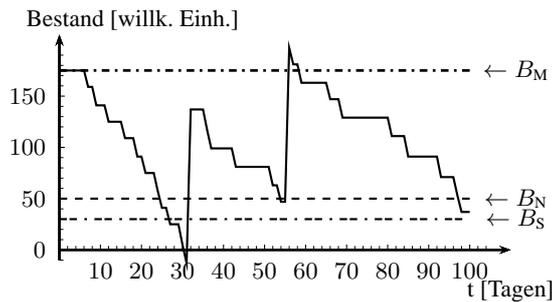
**Abb. 10.3b:** Bestandsverlauf bei schwankendem Bedarf und Bestellung gemäß der  $(s, Q)$ -Heuristik. Siehe hierzu Tabelle 10.2

#### Bestände ermöglichen

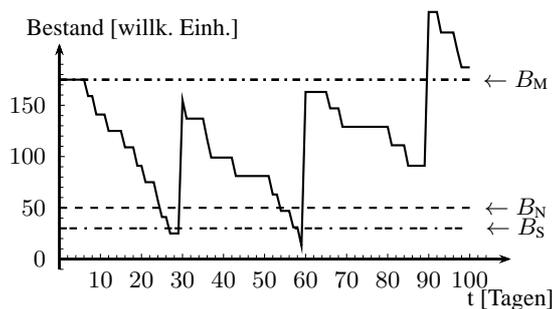
- reibungslose Produktion,
- prompte Lieferung,
- Überbrückung von Störungen,
- wirtschaftliche Fertigung und
- konstante Auslastung.

#### Bestände verdecken

- störanfällige Prozesse,
- unabgestimmte Kapazitäten,
- mangelnde Flexibilität,
- Ausschuss und
- mangelnde Liefertreue.



**Abb. 10.3c:** Wie Abbildung 10.3b, jedoch sind hier auch die Wiederbeschaffungszeiten nicht konstant.



**Abb. 10.3d:** Wie Abbildung 10.3b, jedoch mit Anwendung der  $(t, Q)$ -Heuristik.

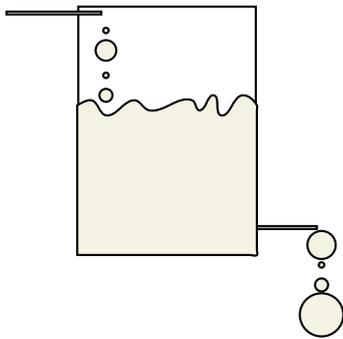
Wären Nachfragen gleichmäßig und exakt bekannt und gäbe es weder Störungen noch zu beachtende optimale Losgrößen, wären Bestände nicht notwendig. Da diese Voraussetzungen sehr weltfremd sind, lassen sich Bestände nicht vermeiden, nur die Höhe kann beeinflusst werden. Vereinfacht ausgedrückt gibt es folgende Gründe für Bestände

- Unsicherheiten,
- fehlende zeitliche und räumliche Synchronisation und
- mengenabhängige Kosteneffekte.

Auf die ersten beiden Punkte kann die Logistik direkt einwirken. Unsicherheit hängt mit fehlender Information, vgl. Abschnitt 3.1.3, zusammen. Durch **Prognosen**, eine höhere Prozesssicherheit und die Informationsfähigkeit in logistischen System lassen sich Unsicherheiten und damit Bestände reduzieren. Das Beispiel aus Abbildung 8.6b zeigt, wie durch eine Prognose die Unsicherheit gesenkt werden kann. Der zukünftige Bestand ist noch immer nicht bekannt, aber doch mit einer sehr hohen Genauigkeit. In der Praxis wird die statistische Unsicherheit von einer subjektiven überlagert. Dieses führt zu dem **Peitschen-** oder *bullwhip*-Effekt. Werden entlang einer Lieferkette Teile bestellt, so führt die Ängstlichkeit der beteiligten Personen dazu, dass jeder etwas mehr bestellt. Sind dieses in jedem Schritt nur 5 %, so macht das nach fünf Schritten bereits das  $1.05^5$ -fache oder ungefähr 30 % aus. Die Unsicherheit resultiert einerseits daher, nicht einwandfreie Teile oder nicht ausreichende Mengen zu erhalten, andererseits aus nicht verlässlichen Lieferzeiten [RCB06]. Abbildung 10.3a zeigt einen sehr stark vereinfachten Bestandsverlauf, bei dem die vielfach diskutierte konstante Verbrauchsrate angenommen wird, die weder praktisch zu beobachten noch theoretisch zu begründen ist. Konstante Verbrauchsraten

und exakt eingehaltene Lieferzeiten gibt es nicht. Nur für einen solchen Fall sind die in Tabelle 10.2 aufgeführten Bestellheuristiken anwendbar. Die Auswirkungen der  $(s, Q)$ -Heuristik auf realistischere Bestandsverläufe sind in den Abbildungen 10.3b und 10.3c gezeigt. Beim Erreichen des Meldebestandes  $s = B_N$  wird jeweils eine feste Menge  $Q$  bestellt. Da die Nachfrage diskret und nicht kontinuierlich ist, muss diese Strategie modifiziert werden: Es wird dann bestellt, wenn der Meldebestand erreicht oder unterschritten ist. In Abbildung 10.3b führt diese Strategie dazu, dass der Maximalbestand nach der ersten Bestellung überschritten wird kann, weil die Nachfrage während der Wiederbeschaffungszeit  $t_W$  geringer ist als erwartet. Das im zweiten Zyklus zu beobachtende Nicht-Erreichen ist weniger kritisch. In Abbildung 10.3c sind zusätzlich auch noch die Lieferzeiten mit geringen Schwankungen versehen, das Ergebnis selbstredend. Bei den hier zu beobachtenden Verläufen ist die Ängstlichkeit von Mitarbeitern mit dem sich hieraus erklärbaren **Peitscheneffekt** durchaus zu verstehen. Bisher wurden Bestände nur aus der Sicht der Bestellenden betrachtet. Hat der Lieferant, bei dem die Bestellungen eingehen, feste Lieferzeiten zugesagt, muss er entweder Pufferzeiten eingeplant haben oder die Mengen kurzfristig in aufwendigen hohem Ruck Aktionen produzieren. Kostensenkende Produktionsplanungen, die zu zeitlichen Verschiebungen führen können, werden erschwert. Hat der Lieferant mehr als einen Kunden, wird das System schnell unbeherrschbar, *fire fighting* und tägliche, Geld kostende, Dispositionsstunden gehören zur Tagesordnung. Auch hier zeigen einfache Simulationen, wie vernetzte Systeme auf unterschiedliche Eingriffe reagieren und wie eine höhere Stabilität erreicht werden könnte.

Abbildung 10.3d zeigt einen möglichen Verlauf bei Anwendung der  $(t, Q)$ -Strategie, die unausweichlich zu Panikaktionen führen muss. Auch hier kann mittels Simulationen untersucht werden, wie diese Strategie sich in vernetzten Systemen auswirkt und wie eine Vermischung mehrerer möglicher Strategien Bestände in einem Liefernetz beeinflussen. Werden dann noch Produktionsdauern und Losgrößen hinzu genommen, ergibt sich ein interessantes Abhängigkeitsverhältnis. Besonders spannend wird es, wenn in den Beständen noch saisonale Schwankungen, wie in Abbildung 6.3a, zu beobachten sind. Hier gibt es eine Vielzahl von Aufgaben für eine theoretische Logistik, deren Lösung die Leitung logistischer Systeme erleichtern und effizienter machen würde.



**Abb. 10.4:** Entkopplung von Nachfrage und Verbrauch

Die Aufgabe des Bestandsmanagements kann direkt aus Abbildung 10.4 abgelesen werden: Wie ist der obere Zufluss zu gestalten, damit bei minimalen Kosten immer die gewünschte Menge abfließen kann? Anderes ausgedrückt kann das Bestandsmanagement auf folgende Frage reduziert werden: Zu welchem Bestellzeitpunkt  $T_B$  wird welche Bestellmenge  $Q$  bestellt? Für den

	$S$	$Q$
$s$	$(s, S)$	$(s, Q)$
$t$	$(t, S)$	$(t, Q)$

**Tab. 10.2:** Bestellheuristiken [Pfo95]

$s \equiv B_N, S \equiv B_M, t$  ist ein fester

Bestellrhythmus,  $Q$  die bestellte Menge.

$(s, S)$  bedeutet, dass beim Erreichen des Meldebestandes das Lager bis zum Maximalbestand  $S$  bzw.  $B_M$  aufgefüllt wird. Bei Anwendung der  $(t, Q)$ -Heuristik wird in festen Zeitabständen  $t$  jeweils eine konstante Menge  $Q$  bestellt.

idealisierten Fall aus Abbildung 10.3a mit konstanter **Lagerabgangsrate**  $\lambda$  und einer festen **Wiederbeschaffungszeit**  $t_W$  kann dieses exakt berechnet werden.

**Definition .59 Wiederbeschaffungszeit**

*Dieses ist die Zeit  $t_W$  vom Erkennen, dass eine Beschaffung notwendig ist, bis zu dem Zeitpunkt, zu dem die Ware zur Verfügung steht.*

Bei dieser Definition beginnt die Uhr zu ticken, wenn die Notwendigkeit des Bestellens erkannt wird. Die Zeit, die von diesem Zeitpunkt noch vergeht, um die Bestellung einzuleiten, ist Teil der Wiederbeschaffungszeit. Die Kosten je Bestellung einer Menge  $Q$  können mit folgende einfacher Formel beschrieben werden:

$$K^{(B)}(Q) = k_B + k_Q \cdot Q \quad (10.1a)$$

$k_B$  sind die fixen Kosten je Bestellung,  $k_Q$  die variablen je Stück. Die bestellte Menge  $Q$  reicht insgesamt für einen Zeitraum

$$t_Q = \frac{Q}{\lambda}, \quad (10.1b)$$

im Mittel liegt innerhalb dieser Zeitraumes die Menge  $\frac{Q}{2}$  im Lager. Sind  $k_L$  die Lagerkosten je Mengen- und Zeiteinheit, ergeben sich für die Dauer  $t_Q$  Lagerkosten in Höhe von

$$K^{(L)}(Q) = k_L t_Q \frac{Q}{2} = k_L \frac{Q}{\lambda} \frac{Q}{2} \quad (10.1c)$$

und somit Gesamtkosten

$$K^{(G)}(Q) = K^{(B)}(Q) + K^{(L)}(Q) = k_B + k_Q \cdot Q + k_L \frac{Q}{\lambda} \frac{Q}{2} \quad (10.1d)$$

Soll zusätzlich berücksichtigt werden, dass für die ein- und ausgehende Waren unterschiedliche Zahlungsziele vereinbart sind, ist der Ausdruck für die Lagerkosten entsprechend zu modifizieren. Gesucht sind die geringsten Kosten  $k^{(G)}(Q)$  je Zeiteinheit, Monat oder Jahr, die sich aus der Division von  $K^{(G)}(Q)$  durch  $t_Q$  ergeben.

$$k^{(G)}(Q) = \frac{K^{(G)}(Q)}{t_Q} \stackrel{(10.1b)}{=} K^{(G)}(Q) \left(\frac{Q}{\lambda}\right)^{-1} = \frac{K^{(G)}(Q)\lambda}{Q} = \frac{k_B}{Q} + k_Q + k_L \frac{Q}{2\lambda} \quad (10.1e)$$

Dieses ist Gleichung (8.2) mit

$$x = Q; \quad n = 1; \quad a = \frac{k_L}{2\lambda}; \quad b = k_B \quad \text{und} \quad c = k_Q$$

und der Lösung

$$Q_M = \sqrt{\frac{2\lambda k_B}{k_L}} \quad (10.1f)$$

Dieses ist auch als **Losgrößenformel** von Andler für die optimale Bestellmenge bekannt. So-

mit ist die Frage nach der Menge für diesen stark idealisierten Fall beantwortet. Zu welchem Zeitpunkt ist nun zu bestellen? Ist  $B_S$  der Sicherheitsbestand, der nicht unterschritten werden soll, so kann aus der Abgangsrate  $\lambda$  und der Wiederbeschaffungszeit  $t_W$  der **Meldebestand**  $B_N$  berechnet werden:

$$B_N = \lambda \cdot t_W + B_S \quad (10.2)$$

Sobald dieser Bestand erreicht wird, muss eine Meldung ausgelöst werden. Über was wurde hier eigentlich geschrieben?

- Was ist der Bestand, oder was ist ein Bestand?
- Wieso gab es ein Kapitel über Prognosen, wenn sich eine derart wichtige Frage mit so einfachen Methoden beantworten lässt?

Dass, was in der Herleitung zu Gleichung (10.1f) ausgenutzt wurde, ist nichts anderes als die implizite Anwendung einer Prognose. Bei der Bestimmung der Bestellmenge nach der Andler'schen Losgrößenformel und des Bestellpunktes wird eine Vorhersage auf der Grundlage eines konstanten Verbrauchs, d. h. eines ausschließlich linearen Trends im Bestandsverlauf, durchgeführt. Ist diese Annahme verletzt, gilt Gleichung (10.2) nicht, d. h.  $B_N$  kann nicht berechnet werden.

Ist es nicht klar, was *Bestand* ist? Sehen Kaufleute und Logistiker verschiedene Arten von Beständen? Grundsätzlich muss stets zwischen einer **administrativen** und einer **physischen** Betrachtungsweise unterschieden werden. Buchhalterisch ist die erste Sichtweise von Bedeutung, logistisch die zweite. Die Definition .60 gibt eine Übersicht über mögliche Bestandsarten.

**Definition .60 Bestandsarten [Koet04 ]**

*Auch wenn es nicht überall explizit erwähnt ist, muss jeweils zwischen der physischen und administrativen Betrachtung unterschieden werden.*

*Lagerbestand*

*Physisch vorhandener Bestand, der durch Zählen bestimmt werden kann.*

*Administrativ vorhandener Bestand, der durch eine Datenbankabfrage bestimmt werden kann.*

*Reservierter Bestand*

*Physisch vorhandener aber bereits für Lieferungen eingeplanter Bestand.*

*Bestellbestand*

*Menge der noch nicht gelieferten Bestellungen.*

*Verfügbarer Bestand*

*Der Bestand, auf den ohne Einschränkung zugegriffen werden kann.*

*Disponierbarer Bestand*

*Der Bestand, der verplant werden kann.*

*Werkstattbestand*

*Bestand, der sich in einem Werkstattbereich außerhalb eines Lagers befindet. Dieser ist aus dem Lagerverwaltungssystem bereits ausgebucht, steht aber physisch noch zur Verfügung.*

*Pufferbestand*

*Dieser ist wie der Werkstattbestand nicht als Lagerbestand erfasst, steht aber physisch zur Verfügung.*

*Meldebestand:*

*Dieses ist ein Wert, bei dem eine Meldung erzeugt werden muss, dass eine neue Bestellung ausgelöst wird.*

*Sicherheitsbestand*

*Dieser wird bei planmäßigem Verlauf nicht angetastet. Die Höhe kann aus der Standardabweichung der Verbräuche ermittelt werden [Sch02].*

Ändert sich die für das Bestandsmanagement zu beantwortende Frage bei genauer Betrachtung dieser Bestandsarten? Ja, in welcher Bestandsart wird beispielsweise der Meldebestand abgelesen? Die obigen Definitionen lassen zusätzlich eine wesentliche Frage des Bestandsmanagement offen:

**Weisheit 10.3** *Jede Bestandsbetrachtung muss zeitabhängig erfolgen.*

Auch wenn in der Herleitung zu der Andler'schen Losgrößenformel Zeiten enthalten sind, handelt es sich um ein stationäres und somit quasi zeitunabhängiges Problem. Die Frage nach dem Bestellzeitpunkt wird über eine Menge beantwortet. In realen System ist dieses nicht machbar, hier sind Zeitabhängigkeiten zu berücksichtigen, wie in den Abbildungen 10.3b bis 10.3d deutlich wird. Wie kann dann die Aufgabe des Bestandsmanagements unter Berücksichtigung zeitabhängiger Einflüsse definiert werden?

**Weisheit 10.4** *Aufgabe des Bestandsmanagements muss es sein, eine kostenoptimale Verfügbarkeit unter Beachtung verfügbarer Kapazitäten sicher zu stellen.*

In diesen Satz ist eine wichtige Zusatzbedingung aufgenommen worden: Das Auffüllen eines Lagers kann nur erfolgen, wenn Ressourcen verfügbar sind, mit denen die bestellten und gelieferten Mengen auch verfügbar gemacht werden können. Was nützt es, wenn ein Programm für Bestandsmanagement sagt, dass Tomatenmark fehlt, aber entweder kein Tomatenmark in der gewünschten Qualität zu einem akzeptablen Preis am Markt verfügbar ist oder keine Transportkapazitäten beschafft werden können. Eine Bestandsbetrachtung muss immer mit der von Kapazitäten und verfügbaren Ressourcen abgestimmt werden.

**Definition .61 Kapazität**

*Dieses ist die im Sinne der Gültigkeit von Stammdaten, vgl. .22, unveränderliche Eigenschaft eines Objektes, die beschreibt, welche Leistung es maximal erbringen kann.*

So ist die maximale Lagerkapazität  $B_M$  die Eigenschaft eines Lagers. Können in diesem 20 % mehr als  $B_M$  gelagert werden, ist  $B_M + 20\%$  die Kapazität und nicht  $B_M$ . Natürlich kann es, wie im Zusammenhang mit der Diskussion von Straffunktion auf S. 195 ausgeführt, weiche Grenzen geben. Soll zugelassen werden, dass Fahrzeuge überladen, Gassen und Fahrwege als Lagerfläche betrachtet werden, ist die Kapazität entsprechend anzugeben. Auslastungen sind variabel, Kapazitäten nicht. Beim Schaffen neuer Kapazitäten ändern sich Stammdaten, d. h. es gibt neue Kapazitäten.

Für die folgenden Betrachtungen soll der Sicherheitsbestand gleich 0 gesetzt werden. Er kann, wenn nötig, als konstanter Wert addiert werden. Eine weitere Schwierigkeit wurde bereits angedeutet: Der Unterschied zwischen physischem und administrativem Bestand. Um die Diskussion

an dieser Stelle nicht zu umfangreich werden zu lassen, soll hier davon ausgegangen werden, dass beide zu einem aktuellen Zeitpunkt  $T_0$  gleich sind. In der Filiale eines Supermarktes mit einem guten Kassensystem ist der physische oftmals niedriger als der administrative, da zerrissene Verpackungen, verlegte Ware und gestohlene Artikel nur die physischen und nicht die administrativen Bestände senken.

Der verfügbare oder disponierbare Bestand  $B^{(d)}$  wird oftmals als Differenz aus vorhandenem  $B$  und reserviertem Bestand  $B^{(r)}$  definiert, d. h.

$$B^{(d)} = B - B^{(r)} \quad (10.3a)$$

Dieses mag richtig sein, wenn wir heute ins Lager gehen und nachschauen, was vorhanden ist. Oder doch nicht? Was heißt reserviert? Reservieren Sie heute schon Kaffee für den Besuch, den Sie in sechs Wochen erwarten? Sicher nicht, aber möglicherweise Rotwein, den Sie auf einer kleinen *Finca* während ihrer Urlaubsreise nach Mallorca erstanden haben. Wie ist das mit der Lieferung, die bereits im Wareneingang liegt oder morgen eintreffen wird, d. h. mit dem Bestellbestand oder erwarteten  $B^{(e)}$ ?

$$B^{(d)} = B - B^{(r)} + B^{(e)} \quad (10.3b)$$

Ohne eine zeitliche Komponente machen diese Gleichungen keinen Sinn: Es muss klar sein, für wann etwas reserviert und wann etwas eintreffen wird. Der verbrauchte Kaffee kann schnell nachgefüllt werden, der getrunkene mallorquinische Rotwein nicht. Die Aufgabe des Bestandsmanagements soll noch einmal neu formuliert werden: Zum Zeitpunkt  $T_D$  liegt eine Nachfrage  $D(T_D)$  vor. Aufgabe ist es nun, dass zu diesem Zeitpunkt eine ausreichende Menge  $B(T_D)$  mit

$$B(T_D) \geq D(T_D) \quad (10.4)$$

verfügbar ist und gleichzeitig

$$B(t) \geq 0 \quad \forall T_D > t > T_0 \quad (10.5)$$

erfüllt ist. Da es im Betrachtungszeitraum nicht nur ein Nachfrage gibt und mehrere Zugänge möglich sind, kann  $B(T_D)$  mittels

$$B(T_D) = \Delta \mathcal{B}(T_D, T_0) + B(T_0) \quad (10.6)$$

berechnet werden [vgl. Sch02]. Hierbei ist  $\Delta \mathcal{B}(T_D, T_0)$  die kumulierte erwartete Bestandsänderung im Zeitraum  $[t_0, t_D]$ , d. h. die Summe der erwarteten Warenein- und -ausgänge,  $\vec{Q}(t')$  und  $\overleftarrow{Q}(t')$ , ab dem heutigen Tag:

$$\Delta \mathcal{B}(t_D, t_0) = \sum_{t' \in [t_0, t_D]} \vec{Q}(t') - \sum_{t' \in [t_0, t_D]} \overleftarrow{Q}(t') \quad (10.7)$$

Wäre ein fester zeitlicher Endpunkt der Betrachtung vorgegeben, könnten kürzeste Wege Verfahren oder das Wagner-Whitin-Modell [Gru02; GT05] verwendet werden. In die Überlegungen ist aber zumindest noch der Zeitraum  $T_D + t_w$  einzubeziehen, damit keine Bestände verbraucht werden, die für diesen Zeitraum reserviert und nicht mehr rechtzeitig zu beschaffen sind.

Konkret lässt sich die Berechnung mit verfügbaren Techniken umsetzen. Sind die geplanten Warenein- und -ausgänge in einer Datenbank in den Spalten  $QE_{in}$  und  $QA_{us}$  hinterlegt, kann die Berechnung der Summe in Gleichung (10.7) mit

```
select sum(QEin) where ((time > t0) and (time < td));
```

```
select sum(QAus) where ((time > t0) and (time < td));
```

erfolgen. Diese bietet auch eine hervorragende Grundlage zur Bestimmung optimaler Bestellzeitpunkte und -mengen. Mit Simulationen können Szenarien mit verschiedenen Bestellzeitpunkten und -mengen auf ihre Tauglichkeit hin untersucht werden, d. h. analysiert werden, ob alle Kundenwünsche erfüllt, Randbedingungen nicht verletzt und welche Kosten verursacht werden. Hier auf aufbauend bietet sich natürlich der Einsatz der in den Kapiteln 6.1 und 8.1 beschriebenen unterschiedlichen Prognosewerkzeuge an, um dann Zu- und Abgänge auch über den Zeitraum  $T_D + t_W$  hinaus berücksichtigen zu können. In dieser zeitabhängigen Sichtweise sind natürlich wieder wirkliche Kosten wünschenswert, die Berücksichtigung von Ein- und Auszahlungen bietet sich geradezu an.

In der Regel kann ein Produkt nicht unabhängig von anderen betrachtet werden. Die zur Verfügung stehende Lagerkapazität wird von allen Produkten beansprucht, ebenso ist es sinnvoll, Transporte so zu planen, dass hier eine hohe Auslastung erzielt werden kann und Rampenplätze nicht durch zu viele Kleinstladungen unnötig blockiert werden. Dafür muss aber auch nicht für alle Produkte eine detaillierte Untersuchung durchgeführt werden. **Clusteranalysen** liefern Zusammengehörigkeiten, **Warenkorbanalysen** Abhängigkeiten. Ist also bekannt, wie viele Korpusse aus Tabelle 6.4 benötigt werden, kann die Anzahl der Türen, die bereitgehalten werden müssen, mit geringem Aufwand bestimmt werden. Dieses ist nicht exakt möglich. Auch bei sehr vielen heute eingesetzten Verfahren ist vieles nur sehr vage bis gar nicht bekannt. Bei dem hier skizzierten Ansatz findet die Planung zukunftsorientiert unter Berücksichtigung bekannter und erwarteter Ereignisse statt. Dieses bietet die große Chance, permanent Planungen mit den tatsächlichen Daten zu vergleichen. Dieser Ansatz der Verknüpfung eines theoretischen modellartigen Vorgehens, einer **theoretischen Logistik** mit einer **experimentellen Logistik** eröffnet nicht nur Potenziale zur Kostensenkung, sondern auch zur Steigerung der Prozesssicherheit. Eine Bedingung hierfür ist natürlich, dass Bereiche, wie hier Bestands- und Ressourcenmanagement nicht isoliert betrachtet werden dürfen.

Um mögliche Probleme bei einer Umstellung reduzieren und eine Notfallstrategie implementieren zu können, ist die gleichzeitige Verwendung konventioneller Heuristiken aus Tabelle 10.2 möglich. Die hierdurch veranlassten Bestandsänderungen sind nichts anderes als erwartete Eingänge. Auch wenn Bestandsmanagement überwiegend durch den Umgang mit Daten geprägt ist, darf nicht vergessen werden, dass Waren immer noch transportiert werden müssen, d. h. das Planen von Transporten und Routen bleibt eine permanente Aufgabe.

### 10.3.2 Routenplanung

Für die folgenden Ausführungen wird davon ausgegangen, dass Fahrzeuge zur Verfügung stehen und nur noch zu planen ist, wie die Fahrzeuge einzusetzen sind.

#### **Problem 10.1 Routenplanung - praktische Formulierung I**

*Am morgigen Tag sind bei  $N_C$  Kunden Waren abzuholen und auszuliefern. Es steht hierfür ein Fahrzeug zur Verfügung. Die Fahrt beginnt an einem Betriebshof  $G_1$  und endet am selben oder einem anderen Betriebshof  $G_2$ . Die Waren sind an  $N_D$  Depots*

$D_1, \dots, D_{N_D}$  zu laden bzw. zu entladen.  
Es soll die kostengünstigste Fahrtroute bestimmt werden.

Werden abzuholende bzw. auszuliefernde Mengen jeweils mit entgegengesetzten Vorzeichen versehen, ist es nicht erforderlich, zwischen Sammel- und Verteiltouren zu unterscheiden. Dieses ist ein TSP aus Definition .57. Die erste Aufgabe liegt darin, die praktische und die mathematische Fragestellung zusammen zu bringen. Wie das mathematische Problem gelöst werden kann, wurde in Kapitel 8.1 beschrieben. Was ist hierfür zu tun? Um eine optimale Route bestimmen zu können, muss eine Ziel- oder Qualitätsfunktion  $\mathcal{G}(\mathcal{R})$  wie in Gleichung (8.1c) definiert werden. Hierzu werden die in Tabelle 10.4 aufgeführten zeit- und streckenbezogenen und fixen Kosten benötigt.

Jeder Umlauf beginnt an einem Betriebshof  $G_1$  und endet an einem Betriebshof  $G_2$ . Das Fahrzeug kann mehrfach in einem Depot oder einer Deponie  $D_i$  be- oder entladen werden. Hiermit kann eine Lösung oder Route  $\mathcal{R}$  in der Form

$$\mathcal{R} = G_1, D_1, C_1, \dots, D_{i_1}, \dots, C_{N_C}, D_2, G_2 \equiv S_1, S_2, \underbrace{S_3, \dots, S_{N_S-2}}_{\text{Bedienpunkte}}, S_{N_S-1}, S_{N_S} \quad (10.8)$$

geschrieben werden. Erfolgt die Beladung auf dem Betriebshof, d. h. sind die dem Betriebshof und dem Depot zugeordneten Knoten identisch, ist der Abstand zwischen diesen beiden automatisch gleich 0. Die hier gewählte Formulierung ermöglicht:

- Betriebshof und Depot können, müssen aber nicht an zwei verschiedenen Orten liegen. Diese logische Trennung erlaubt eine flexiblere Betrachtung von Arbeitszeiten. Sind Betriebshof und Depot identisch, kann die Beladung des Fahrzeuges zu Fahrtbeginn berücksichtigt werden, ohne diese auf die Fahrzeit anrechnen zu müssen. Ebenso kann die Ladezeit an einem Depot durch einen anderen Mitarbeiter erfolgen und hier eine Pausen- oder Ruhezeit realisiert werden.
- Der Start- und Zielbetriebshof müssen nicht identisch sein. So kann ein Fahrer eine Tour morgens in Hamburg beginnen, abends in Stuttgart beenden und am nächsten Tag von dort aus eine neue Tour beginnen. Diese Option ermöglicht eine einfache Erweiterung auf die Planung für mehrere aufeinander folgende Tage.

Bevor auf diese Erweiterungen eingegangen wird, soll zunächst die Kostenbetrachtung konkretisiert werden. Es sollen nur die leistungsmengeninduzierten, variable und sprungfixe, Kosten betrachtet werden. Die Lohnkosten werden hierbei stets als zeitabhängige variable Kosten betrachtet.

### Exkurs 10.1 Lohnkosten - fix oder variabel

Werden Lohnkosten als fixe Kosten gesehen, ist in der bisher gegebenen Problemformulierung, in der keinerlei Einschränkungen vorgegeben werden, die kostenoptimale Lösung gleich der kürzesten, da ausschließlich Kosten je gefahrenem Kilometer variiert werden können. Werden die Lohnkosten als variabel betrachtet, kann eine optimale Lösung so sein, dass der Fahrer bei einer achtstündigen Sollarbeitszeit bereits nach sechs Stunden seine Tour beendet. Wie mit den frei gewordenen zwei Stunden umzugehen ist, muss vom Anwender entschieden werden. Vorteile dieser Vorgehensweise werden bei Betrachtung mehrerer Fahrzeuge offensichtlich. Es ist sinnvoll, zwischen **Nutz-** und **Leerkosten** zu unterscheiden.

Da die Auswirkungen auch bei größeren Problemen, mit mehreren Fahrzeugen eines Fuhrparks ähnlich auftreten, sollen hier einige grundsätzliche Fragen diskutiert werden, die nicht von ei-

dem Algorithmus sondern vom Anwender entschieden werden müssen. Nehmen wir hierzu eine Sollarbeitszeit von acht Stunden. Was ist zu tun, wenn es eine Route gibt, bei der in sechs Stunden alle Aufträge bearbeitet werden können? In zwei konkreten Anwendungsfällen wurde vorgegeben, dass die Mitarbeiter acht Stunden arbeiten sollten. Wurde dieses als Randbedingung in *goodSyncRoLo* eingegeben, kam es zu ungewöhnlich aussehenden Lösungen. Die Dauer betrug fast genau acht Stunden, unabhängig davon, wie viele Kunden zu bedienen waren. Bei Betrachtung der geplanten Routen zeigte sich, dass der Algorithmus Schleifen an verschiedenen Stellen der Routen so einfügte, dass die Gesamtarbeitszeit erreicht wurde. Dieses war kein Fehler in dem Algorithmus, sondern das klare und richtige Ergebnis für die gegebene Aufgabenstellung, die die Vorgabe einer achtstündigen Arbeitszeit beinhaltete. Eine andere Gewichtung der Ziele, Einhaltung der Arbeitszeit und kürzeste Strecke, wäre praktisch analog der Diskussion auf Seite 187 möglich. Flexible Lohnkosten und variable Arbeitszeiten führen zu nochmals anderen Ergebnissen: Fahrer und Lkw wären nach sechs Stunden zurückgekehrt und hätten nicht noch zusätzlichen Treibstoff verbraucht.

**Weisheit 10.5** Die direkte oder indirekte Vorgabe fester Arbeitszeiten behindert das Finden optimaler Touren und Routen.

Die Kosten bzw. die Qualität  $\mathcal{G}(\mathcal{R})$  lassen sich wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned} \mathcal{G}(\mathcal{R}) &= \underbrace{\sum_{i=1}^{N_S-1} k_{S_i, S_{i+1}}^{(s)}}_{\text{Streckenkosten}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{N_S} k_{S_i}^{(v)}}_{\text{Knotenkosten}} + k_S + k_U + K_O \\ &\equiv \underbrace{\sum_{i=1}^{N_S-1} k_{i, i+1}^{(s)}}_{S_i \text{ ist durch } i \text{ ersetzt}} + \sum_{i=1}^{N_S} k_i^{(v)} + k_S + k_U + K_O \end{aligned} \quad (10.9)$$

$K_O$  sind **Opportunitätskosten**, die übrigen sind in Tabelle 10.4 definiert. In dieser Formulierung, in der Betriebshöfe und Depots Bedienpunkte und damit gewöhnliche Elemente der Route sind, werden Ladezeiten wie Stoppzeiten bei den Kunden betrachtet. Die Streckenkosten  $k_{i,j}^{(s)}$  setzen sich wie folgt zusammen:

$$k_{i,j}^{(s)} = k^{(l)} \cdot d_{i,j}^{(l)} + k^{(t)} \cdot d_{i,j}^{(t)} \quad (10.10)$$

Hierbei sind  $d_{i,j}^{(l)}$  und  $d_{i,j}^{(t)}$  die Abstände zwischen  $S_i$  und  $S_j$  bezogen auf Länge bzw. Zeit. Sind die Opportunitätskosten null und Fahrerkosten unabhängig von der Fahrzeit, macht es keinen Sinn, eine Route zu suchen, die in einer kürzeren Zeit zurückgelegt wird als eine andere. Zwei Routen mit Dauern von sechs oder acht Stunden sind dann gleichwertig.

#### Beispiel .44 Straßen mit Maut

Nehmen wir einen Mitarbeiter mit  $k^{(t)} = 30 \frac{\text{€}}{\text{h}}$  und ein Fahrzeug mit  $k^{(s)} = 0.30 \frac{\text{€}}{\text{km}}$  und betrachten die beiden folgenden Varianten:

Variante A : Es wird eine langsame Straße benutzt, auf der keine Maut zu entrichten ist.

Variante B : Es wird eine schnellere Straße benutzt, die mit Maut belegt ist.

Bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 50 km/h dauert eine Fahrt von 100 km in Variante A genau 120 min oder 2 h. Die Kosten betragen somit

$$2h \cdot 30 \frac{\text{€}}{h} + 100km \cdot 0.30 \frac{\text{€}}{km} = 90\text{€} \quad (10.11)$$

und somit

- $45 \frac{\text{€}}{h}$  und  $0.90 \frac{\text{€}}{km}$ .

Auf der Strecke aus Variante B kann eine Durchschnittsgeschwindigkeit von  $70 \frac{km}{h}$  gefahren werden kann. Die Fahrzeit beträgt dann 1.43 h bzw. 1h25'. Hieraus ergeben sich zeitabhängige Kosten in Höhe von 42.86 € und bei angenommener gleicher Streckenlänge Gesamtkosten in Höhe von  $30.00 \text{ €} + 42.86 \text{ €} = 72.86 \text{ €}$ . Dieses führt zu

- $51.51 \frac{\text{€}}{h}$  und  $0.73 \frac{\text{€}}{km}$ .

Die Kosten je gefahrenem Kilometer sinken, die je Stunde steigen. Wird die Produktivität des Fahrers in gefahrener Strecke je Zeiteinheit gemessen, steigt auch die Produktivität bei steigenden Kosten je Zeiteinheit. Der Grund liegt einzig darin, dass schneller gefahren wurde.

Bei Mautgebühren von  $0.12 \frac{\text{€}}{km}$  erhöhen sich die Gesamtkosten in Variante B um 12.00 € auf 84.86 € bzw.

- $39.34 \frac{\text{€}}{h}$  und  $0.85 \frac{\text{€}}{km}$ .

. Die Gesamtkosten sind immer noch gut 5 % niedriger als in dem Fall der Nutzung einer mautfreien Straße. Zusätzlich stehen Fahrzeug und Fahrer 35' mehr zur Verfügung, dies entspricht einer Effizienzsteigerung bzw. einem Potenzial zur Effizienzsteigerung von ungefähr 25 %. Führt diese Effizienzsteigerung aber auch zu einer Kostensenkung?

Werden alternativ nur streckenbezogene Kosten wie in Gleichung (10.10') verwendet, ist ein Durchschnittswert zu bestimmen. Legen wir diesen zu  $0.875 \frac{\text{€}}{km}$  fest und betrachten nun den Einfluss der Maut. Die Konsequenzen sind in Tabelle 10.5 zu sehen. Die Fahrt über die mit Maut belegte Straße wird sehr viel teurer, verglichen mit dem alten Ergebnis. Auch hier muss die Frage nach den Opportunitätskosten gestellt werden: Welchen Wert hat eine Zeitersparnis von 35'.

Gleichung	(10.10)			(10.10')		
	ohne Maut	ohne Maut	mit Maut	ohne Maut	ohne Maut	mit Maut
Fahrzeit	2h00'	1h25'	1h25'	2h00'	1h25'	1h25'
Streckenkosten in €	30.00	30.00	30.00	87.50	87.50	87.50
Zeitkosten in €	60.00	42.86	42.86	—	—	—
Maut in €	0	0	12.00	0	0	12.00
Gesamtkosten in €	90.00	72.86	84.86	87.50	87.50	99.50
Kosten je km	0.90	0.73	0.85	0.88	0.88	1.00
Kosten je h	45.00	50.95	59.34	43.35	61.19	69.58

**Tab. 10.5:** Vergleich der Varianten A und B für die Nutzung mautbelegter Straßen. Unterlegt sind die Ergebnisse für Variante A. Die Länge der gefahrenen Strecke beträgt jeweils 100 km.

**Exkurs 10.2 Kostenrechnung**

In vielen Unternehmen wird statt Gleichung (10.10) oftmals eine Formel der Art

$$k_{i,j}^{(s)} = k^{(l')} \cdot d_{i,j}^{(l)}, \quad (10.10')$$

gefunden, in die die Zeitabhängigkeit und möglicherweise auch noch echte und unechte Gemeinkosten durch  $k^{(l')}$  implizit eingehen. Da es kaum eine Aufgabenstellung gibt, bei der die Senkung der Kosten nicht ein zentrales Thema ist, sollen hier einige Gedanken, soweit sie für die Anwendung in diesem Buch erforderlich sind, besprochen werden. Grundsätzlich muss zwischen zwei Arten von Kostenbetrachtungen unterschieden werden:

- einer prozess- oder verursachungsbezogenen bzw. activity based und
- einer buchhalterischen oder Kostenstellen bezogenen Sichtweise.

Abgesehen von Veränderungen, die den Kunden betreffen, sind Verschiebungen innerhalb einer Lieferkette Nullsummenspiele. Das, was ein Akteur weniger ausgibt, nimmt ein anderer weniger ein. Wenn komplette Lieferketten wirklich besser werden sollen, sind entweder Akteure gegen solche auszutauschen, die geringere Kosten verursachen oder Lieferketten besser zu gestalten, d. h. prozessbezogene Kosten zu senken. Aber bereits hier gibt es Interessenkonflikte: So wie es Spielwiesen für technikverliebte Menschen gibt, so gibt es diese auch für Juristen und Politiker, die immer wieder neue Schriftsätze verfassen, die laufende Prozesse zum Unwohlle aller behindern und eine ständig neue Befassung mit ein und demselben Thema erzwingen. So müssen Kostenrechnungen ständig aktualisiert werden, weil es neue steuerrechtliche Anforderungen und Pseudo-Einsparmöglichkeiten gibt. Wenn es Geld dafür gibt, dass Menschen eingestellt werden, macht es keinen Sinn, Fahrtrouten zu optimieren, was zu einer Reduzierung der Anzahl der erforderlichen Mitarbeiter führen könnte. Eine konkrete Kostenbetrachtung wird unmöglich gemacht, weil in der betriebswirtschaftlichen Literatur nicht einmal Einigkeit darüber besteht, was unter Kosten zu verstehen ist [Wöh96]. Die fundamentale Größe vieler Maßnahmen ist nicht definiert. Es soll ein Wettkampf im 100 m Sprint stattfinden: Ein Lauf wird mit einer Stoppuhr gestoppt, bei dem anderen werden die Atemzüge gezählt. Anschließend wird in einer ausgiebigen Diskussion ein Sieger gekürt. Das Ergebnis wird sein, dass abhängig von gewissen Erwägungen der eine oder der andere Sieger ist.

Für die Kostendiskussion im Rahmen dieses Buches soll der Grundsatz der Vermeidung von Verschwendung von Seite 13 gelten – beschränkt auf den Teilbereich, der von der Logistik beeinflusst werden kann. Die Diskussion zur prozessbezogenen Kostensenkung kann auf

- Kostensenkung bei notwendigen
- Elimination nicht notwendiger

Tätigkeiten konzentriert werden.

**Definition .62 Fixe und Variable Kosten**

Fixe Kosten fallen unabhängig von der erbrachten Leistung immer in gleicher Höhe an, variable Kosten ändern sich mit der Menge der erbrachten Leistung.

Die Verwendung von Gleichung (10.10') vermengt fixe und variable Kosten derart, dass hiermit eine Kostenbetrachtung mit dem Ziel, Kosten zu senken, stark eingeschränkt wird.

Fixe Kosten sind **leistungsmengenneutral** und variable **leistungsmengeninduziert**. Vergibt ein Unternehmen seine Transporte an einen externen Dienstleister, sind die hiermit verbundenen Kosten leistungsmengeninduziert, verfügt es über einen Fuhrpark, so sind die Abschreibungen der Fahrzeuge, weil dieses steuerrechtlich auf einen festen Zeitraum festgelegt wurde, leistungsmengenneutral. Ein und derselbe Prozess verursacht abhängig von dem ausführenden Akteur unterschiedliche Kosten. Bei der Fremdvergabe macht es Sinn, ein Fahrzeug einzusparen, bei der Durchführung mit Fahrzeugen des eigenen Fuhrparks nicht. Ähnlich ist der Unterschied zwischen einer Lieferung

frei Haus und einer Lieferung ab Werk. Im ersten Fall wird der Absender die Kosten in den Preis des Produktes, und somit in die Materialkosten, einrechnen. Im zweiten Fall gehen die Kosten zu Lasten des Empfängers, der diese möglicherweise auf eine Logistikkostenstelle bucht. Ein weiterer Grund für Schwierigkeiten liegt darin, dass viele als leistungsmengenneutral bezeichnete Kosten oftmals nicht fixer sondern sprungfixer Natur und somit leistungsmengeninduziert sind, wie bei der Diskussion über make or buy-Entscheidungen auf Seite 161 gezeigt.

Ausgaben für Disponenten werden oftmals auch als fixe Personalkosten angesehen. Zeigt nun eine Optimierung, dass die Anzahl der Fahrzeuge um 10 % reduziert werden kann, muss dann die Anzahl der Disponenten gleich bleiben? Falls nicht, werden auch die Kosten für die Disposition variabel und rechnergestützte Disposition erhält eine reelle Chance.

Welche Konsequenzen unterschiedliche Betrachtungsweisen haben können, wird an dem Beispiel der Entscheidung für und wider einer mautbelegten Straße gezeigt. Auch diese Zahlen können weiteren Anlass zur Diskussion liefern. Der höhere Dieserverbrauch auf der Autobahn führt zu höheren Kosten und somit kann die schnellere Strecke doch wieder die teurere werden. Die Weiterverfolgung solcher Fragen macht nur bei einer ehrlichen prozessbezogenen Kostenrechnung und einer entsprechenden Planung Sinn. Ein Vorteil einer optimierten Route ergibt sich erst dann, wenn die frei gewordene Zeit genutzt werden kann. Dieses wiederum verlangt die Abstimmung zwischen Logistik, Produktion und Vertrieb bzw. Beschaffung. Es entstehen **Koordinationskosten**, die auch einbezogen werden müssen. Eine klare und eindeutige Unterscheidung von Kostenarten, wie Transaktions-, Opportunitäts-, Autonomie-, Koordinations- oder Fehlkosten sind auch für die Logistik wichtig, solange sie prozessbezogen betrachtet werden.

Würde das Fahrzeug die länger dauernde Strecke wählen und dadurch einen Auftrag nicht übernehmen können, wäre dieses ein typisches Beispiel von **Opportunitätskosten**: Dem Unternehmen entgeht eine mögliche Einnahme. Zugegebenermaßen hinkt diese Diskussion etwas, wenn nur ein Fahrzeug betrachtet wird. Bei einem Fuhrpark mit mehreren Fahrzeugen addieren sich die Effekte. Dieses kann ein Algorithmus aber nur dann richtig behandeln, wenn die Fuhrparkkosten als sprungfixe und nicht als fixe Kosten betrachtet werden. Eine hierfür geeignete Kostenrechnung ist wünschenswert.

Ist die Kostenbetrachtung ein eher als technisch anzusehender Aspekt, so ist mit der Beschreibung eines Problems und der Formulierung der Ziele und Randbedingungen eine konkret zu lösende Aufgabe verbunden. Ob alles richtig berücksichtigt wird, kann durch Simulationen oder **experimentell** durch den Vergleich mit realen Daten überprüft werden. So müssen auch praktische Randbedingungen in mathematische Formulierungen überführt werden können, um Straffunktionen verwenden zu können. Die Tabelle 10.6 zeigt einige übliche Vorgaben und das mathematische Pendant, das jeweils als Fenster oder Stufe realisiert werden kann.

Die Definition .54 für eine zulässige Lösung kann für die praktische Anwendung folgendermaßen umgeschrieben werden:

**Definition .63 Zulässige Lösung** – vgl. Definition .54

Eine **Lösung** oder **Route  $\mathcal{L}$**  heißt **zulässig**, wenn jeder Kunde genau einmal angefahren wird und der Startbetriebshof an der ersten, ein Depot an der zweiten, ein Depot an der vorletzten und der Zielbetriebshof an der letzten Position stehen.

**Weisheit 10.6** Ziele und Randbedingungen müssen realitätsnah beschrieben und durch Simulationen oder Experimente überprüft werden.

Sind in der Praxis kleine Überschreitungen der Lenkzeit zugelassen, muss dieses auch in den Randbedingungen abgebildet und über geeignete Straffunktionen berücksichtigt werden [Pöp05].

Kommen wir nun zu einer Erweiterung des Problems aus Beispiel 10.1:

**Problem 10.2 Routenplanung mit einem Fuhrpark mit mehreren Fahrzeugen**

Am morgigen Tag sind bei  $N_C$  Kunden  $C_1, \dots, C_{N_C}$  Waren abzuholen und auszuliefern. Die Waren sind an verschiedenen Depots zu laden.

Es steht ein Fuhrpark mit  $N_F$  eigenen Fahrzeugen zur Verfügung, die von verschiedenen oder gleichen Betriebshöfen starten und bei verschiedenen oder gleichen Betriebshöfen wieder ankommen können. Bei Bedarf können Fremdfahrzeuge gechartert werden.

Gesucht ist wiederum eine optimale Lösung.

Für die Lösung eines derartigen Problems sind zwei unterschiedliche Strategien möglich:

**Definition .64 Ein- und zweistufige Verfahren zur Routenplanung**

Bei zweistufigen Verfahren werden im ersten Schritt Touren und im zweiten für jede Tour eine optimale Route bestimmt. Bei einstufigen Verfahren werden Touren und Routen in einem Schritt ermittelt.

Das Bestimmen einer Tour bei dem zweistufigen Vorgehen bedeutet, dass Kunden bereits einem Betriebshof oder einem Fahrzeug zugeordnet werden und dann nur noch innerhalb dieser Touren eine Optimierung stattfindet, d. h. die Reihenfolge bestimmt wird, in der die Kunden anzufahren sind.

**Weisheit 10.7** Bei zweistufigen Verfahren bleiben Optimierungspotenziale zu einem großen Teil ungenutzt.

Ein Vorteil des zweistufigen Vorgehens ist darin zu sehen, dass die von einem Fahrzeug anzufahrenden Kunden in der Regel in einem klar erkennbaren und von den anderen unterscheidbaren Gebieten liegen können. So könnte die Vorgabe einer Tour in der Art „Fahre zu allen Kunden westlich des Flusses“, erfolgen. Bei einem einstufigen Verfahren können geographisch zusammenhängende Gebiete im Extremfall von allen Fahrzeugen angefahren werden. Dieses trifft insbesondere auf Regionen in der Umgebung der Betriebshöfe und für die Zufahrtsstraßen zu. Da es kaum Aufwand bedeutet, hier noch einen Kunden *en passant* mitzunehmen, wird ein Optimierungsalgorithmus, wie auch ein guter Disponent, diese Bereiche nutzen, um Fahrzeuge und damit Routen geschickt aufzufüllen.

Hier soll nun das Vorgehen für eine einstufige Planung beschrieben werden, so wie es in *good-SyncRolo* durch Anwendung heuristischer Verfahren realisiert ist. Durch Einfügen zusätzlicher Betriebshöfe und Depots in die Lösung aus Gleichung (10.8) ergibt sich:

$$\mathcal{L} = \underbrace{G_1, D_1, C_1, \dots, C_{n_1} D_2, G_2, \dots}_{u_1} \dots \underbrace{G_{2N_F-1}, D_{2N_F-1}, C_{n_f}, \dots, C_{N_C} D_{2N_F}, G_{2N_F}}_{u_{N_F}}, \quad (10.12a)$$

Die Lösung (10.12a) kann nach bekanntem Schema wieder in folgender Form geschrieben werden:

$$\mathcal{R} = S_1, \dots, S_{N_S} \quad (10.12b)$$

Die Lösung aus 10.8 wird zu einer Megaroute mit mehreren Umläufen  $\mathcal{U}_1, \dots, \mathcal{U}_{N_F}$ . Jedes Paar  $G_{2i-1}, \dots, G_{2i}$  mit  $1 \leq i \leq N_F$  steht für ein eingesetztes Fahrzeug, das an einem Betriebshof losfährt und an dem gleichen oder einem anderen Betriebshof wieder ankommt. Zu Beginn eines jeden Umlaufs steht ein Fahrzeug ohne Einschränkungen zur Verfügung: Es gibt weder eine Restladung noch eine zu beachtende bereits abgeleistete Fahrzeit eines Fahrers. Ein Fahrerwechsel kann in dieser Formulierung zwischen zwei Betriebshöfen stattfinden, muss aber nicht.

Ist die Anzahl der tatsächlich benötigten Fahrzeuge nicht fest vorgegeben oder unbekannt, können dieser Route weitere Fahrzeuge in Form von Paaren  $G_{2j-1}, G_{2j}$  hinzugefügt werden, die bei Bedarf eingefügt oder an das Ende verschoben werden. Für Fahrzeuge aus dem Fuhrpark fallen für die an das Ende verschobenen Paare keine variablen Kosten an, für externe Fahrzeuge weder variable noch fixe Kosten. Dieses gestattet eine Analyse des günstigsten Fuhrparks, auch für den gemischten Einsatz eigener und fremder Fahrzeuge. Bei dem Finden neuer Lösungen sind die in Algorithmus 8.3 beschriebenen Operatoren so zu modifizieren, dass die Lösungen stets zulässig bleiben. Zusätzlich zu der Bedingung, dass jeder Kunde einmal enthalten sein muss, ist jetzt noch zu beachten, dass im Innern der Route Betriebshöfe immer paarig erscheinen und jedes Paar von einem Depot angeführt und einem Depot abgeschlossen wird, d. h. es müssen immer Ausdrücke der Form

$$\dots D_j \underbrace{G_i G_{i+1}}_{\text{Fahrzeugwechsel}} D_{j+1} \dots \quad (10.13)$$

garantiert werden. An jedem Betriebshofpaar findet ein Fahrzeug- oder ein Fahrerwechsel statt. Ein Fahrzeugwechsel ist auch stets mit einem Fahrerwechsel verbunden. Wird nur der Fahrer gewechselt, kann bei der Betrachtung der Lenkzeiten von Neuem begonnen werden. Es muss aber für die Einhaltung von Zeitfenstern berücksichtigt werden, dass das Fahrzeug vorher schon im Einsatz war. Wird nur das Fahrzeug gewechselt, kann die Arbeitszeit wieder zu einem beliebigen Zeitpunkt beginnen. Für diese Art von Problemen gibt es mehrere mögliche Zielfunktionen, u. a.:

- minimale Gesamtfahrzeit aller Fahrzeuge  
Dieses kann zu einer sehr ungleichmäßigen Auslastung der einzelnen Fahrzeuge führen.
- gleichmäßige Fahrzeiten der Fahrzeuge  
Dieses kann zu kostenmäßig schlechten Lösungen führen.
- gleichmäßige Auslastung der Fahrzeuge  
Dieses kann schlechte Lösungen hervorrufen.
- minimale Anzahl von Fahrzeugen  
Dieses führt dazu, dass die Auslastung einzelner Fahrzeuge möglichst hoch wird, d. h. Fahrzeuge Kunden anfahren, die etwas neben einer günstig erscheinenden Wegstrecke liegen. Bei einer richtigen Formulierung der Kostenfunktion ist eine kostenoptimale Lösung möglicherweise derart, dass sie für ein menschliches Auge etwas sonderbar aussieht.

Ist die Vereinbarung einer Zielfunktion oftmals schwierig genug, so stellt in der Praxis die Datenqualität ein vermeidbares sehr großes Problem dar. Adressen müssen in einer Form verfügbar gemacht werden, dass ein für die Routenplanung geeigneter Graph genutzt werden kann. Probleme mit falsch geschriebenen Straßennamen können mit den in Kapitel 5.2 beschriebenen Ver-

fahren teilweise behoben werden. Vielfach gibt es aber noch sehr viel schwerer wiegende, aber vermeidbare, Fehler, auf die in Exkurs 10.3 zumindest teilweise eingegangen wird.

### **Exkurs 10.3 Datenqualität**

*Mäßige Datenqualität stellt in der Praxis oftmals ein großes dar. Die Erhebung und Validierung von Kundendaten machen bis zu 90 % des Aufwandes eines Optimierungsprojektes aus [Kal06]. In vielen Unternehmen liegen Kundendaten immer noch auf Karteikarten vor. Manchmal sind diese ohne Qualitätsänderung in ein Tabellenkalkulations- oder gar Textverarbeitungsprogramm übertragen worden, die immer noch nicht mehr als Karteikarten darstellen, zwar elektronisch gespeichert, dafür aber leicht und unbemerkt veränderbar. Dieses ist ein Beispiel für den Einsatz moderner Technik zum Nachteil der Anwendung.*

*Kundennummern sind nicht gepflegt, Adressdaten unvollständig oder in der Form Parkplatz am Friedhof, Postleitzahlen und Straßen passen nicht zusammen, Rechnungs- statt Lieferanschriften werden für die Routenplanung zur Verfügung gestellt und vieles mehr. Oftmals stehen auf Aufträgen Kundennamen, die von Mitarbeitern sehr unterschiedlich geschrieben werden, oder Ansprechpartner, die teilweise schon vor Jahren das betreffende Unternehmen verlassen haben. Zeitfenster sind in der Form morgens angegeben, was sowohl zwischen 6:00Uhr und 8:00Uhr als auch zwischen 7:00Uhr und 11:00Uhr bedeuten kann. Zeitfenster werden seit Jahren schon nicht mehr in der hinterlegten Form berücksichtigt, weil der Fahrer eine anders lautende und nicht dokumentierte Absprache mit dem Kunden getroffen hat. Werden Kundennummern händisch auf Aufträge geschrieben, kommt es zu Fehlern. Ein EDV-Programm, das anhand der Kundennummer einen Kunden identifiziert, findet diesen entweder nicht oder plant für den richtigen aber nicht gemeinten Kunden. Es ist unbedingt erforderlich, dass Schreibfehler erkannt werden, damit ein Programm eine entsprechende Meldung erzeugen kann. Jede Datenhaltung auf Basis von EXCEL oder WORD oder ähnlicher Produkte ist ungeeignet, ebenso alle Anwendungen, bei denen Daten als Textdateien ohne geeignete Sicherungsmaßnahmen hinterlegt sind. Das eigenständige und freihändige Vergeben von Kunden- oder Auftragsnummern durch Anwender, möglicherweise noch durch mehrere gleichzeitig, zählt ferner zu den Quellen für sichere Probleme. In einem Unternehmen haben die Buchhaltung, die Disposition und die Produktion Kundennummern vergeben. In Buchhaltung und Disposition waren gleich mehrere Mitarbeiter dazu befugt. Obwohl bei ungefähr 200 Kunden einige Kunden gar keine Nummer hatten, gab es insgesamt weit über 300 Kundennummern. 30 % nicht maschinell verwertbare Daten sind durchaus keine Seltenheit. Dieses ist weder ein schwieriges noch technisch unlösbares Problem, es verlangt lediglich die Bereitschaft, Daten wie Rohstoffe und Software wie Werkzeuge zu betrachten.*

Welche Randbedingungen können bei der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise berücksichtigt werden? Einige dieser Formulierungen können auch als ein Ziel vorgegeben sein. Werden sie als Randbedingung betrachtet, müssen Einhaltung und Verletzungen über Straffunktionen in die Qualitätsfunktion eingehen.

- Die Zuladungen dürfen vorgegebene Werte nicht übersteigen.
- Es sind Zeitfenster für die Beladung und die Bedienung der Kunden zu beachten.
- Die Lenkzeit der Fahrer darf einen vorgegebenen Wert nicht übersteigen.
- Es sind Pausenzeiten zu beachten.
- Fahrzeuge müssen beim Erreichen des Betriebshofes vollständig entladen sein.
- Es sollen bevorzugt Fahrzeuge des eigenen Fuhrparks eingesetzt werden.
- Die Fahrzeuge sollen kapazitätsmäßig möglichst gleichmäßig ausgelastet sein.
- Die Fahrzeuge sollen alle eine möglichst gleichmäßige Fahrzeit aufweisen.

- Die Anzahl der Fahrzeuge soll möglichst gering sein.
- Fremdfahrzeuge sollen bevorzugt in der Nähe ihres Standortes eingesetzt.

Randbedingungen und Ziele müssen so dargestellt sein, dass sie für die Nutzung eines Algorithmus geeignet sind. Eine Mindestanforderung sollte hierbei sein, dass die beteiligten Akteure, für die Routenplanung z. B. Fuhrparkleiter, Disponenten und Fahrer, diese verstehen. Die aktuelle Fassung der *Verordnung zu Lenk- und Ruhezeiten* genügt diesen Mindestanforderungen absolut nicht. Die Planung einer Tour des morgigen Tages ist bei Beachtung dieser Verordnung nur möglich, wenn sämtliche Daten der letzten zwei Wochen verfügbar sind. Eine korrekte Berücksichtigung erscheint in Theorie und Praxis gleich schwierig. Regelungen mitsamt ihrer Ausnahmen müssen lebbar sein und nicht nur juristischen Ansprüchen genügen.

**Weisheit 10.8** *Viele Verordnungen, wie z. B. die zu Lenk- und Ruhezeiten, sind rechtlich verordnete Vermeidungen von Optimierungen, eine zu vermeidende Verschwendung.*

Hier geht es nicht darum, Lenkzeiten für Fahrer oder Spediteure ungünstiger zu gestalten, es geht nur darum, dass Vorgaben so erstellt werden müssen, dass betroffene Menschen sie ohne **Interpreter** verstehen können müssen. Trotz dieser vermeidbaren Beschränkung von Optimierungspotenzialen soll folgende Erweiterung dargestellt werden.

**Problem 10.3 Routenplanung für mehrere Tage**

*Es liegen Aufträge für  $N_C$  Kunden  $C_1, \dots, C_{N_C}$  vor. Jeder Auftrag muss innerhalb der nächsten  $N_d$  Tage ausgeliefert werden. Die übrigen Vorgaben sind wie bei den bisherigen Problemen.*

Dieses kann durch Einführen von **Litfaßsäulenaufträgen** mit den hier skizzierten Verfahren gelöst werden. Dieses sind Aufträge, die ausgeliefert werden können, aber noch nicht müssen. Alternativ kann der Algorithmus prioritätengesteuert zwischen Muss- und Kann-Aufträgen unterscheiden. Sind noch nicht alle Aufträge für Folgetage bekannt, müssen Prioritäten so vergeben werden, dass Aufträge für Tage in naher Zukunft oder Tage mit bereits hoher Auslastung bevorzugt eingeplant werden. Hierdurch werden Engpässe vermieden, die durch das Hinzukommen neuer Aufträge entstehen könnten. Dieses Planen für mehrere Tage im Voraus schafft noch einmal gewaltige Einsparpotenziale, da in Touren, die an einem Tag aufgrund ungünstig liegender Zeitfenster nicht optimal ausgelastet waren, nun die entstandenen Lücken aufgefüllt werden können. Bei der Planung für mehrere Tage ist es entscheidend, die Fahrzeuganzahl variabel gestalten zu können.

Zusätzlich wurde eine weitere Art von Punkten, die **Hotels**, eingeführt. Dieses sind Punkte innerhalb einer Route, an denen keine Änderung an der Ladung eines Fahrzeuges vorgenommen, jedoch die Lenkzeit unterbrochen wird. Die Fahrt kann mit Unterbrechung vom selben Fahrer oder ohne Unterbrechung von einem anderen Fahrer fortgesetzt werden, ein **Fahrerwechsel** wird möglich. Insbesondere bei Anwendungen, in denen nicht die Zuladung sondern die Fahrzeiten die begrenzende Größe sind, ergeben sich hierdurch erhebliche Einsparungen, wie Rechnungen für Außendienstmitarbeiter eines großen Unternehmens zeigten.

**Problem 10.4 Gebiets- und Routenplanung für Außendienstmitarbeiter**

Ein Unternehmen, das ungefähr 200 Außendienstmitarbeiter beschäftigt, wollte seine Gebietseinteilung überprüfen. In einem ersten Schritt sollte untersucht werden, ob die von den Mitarbeitern gefahrenen Routen optimiert werden können. Die Vorgabe für das Optimierungsprogramm lautet in etwas vereinfachter Form: Kunden sollen jeweils sechs oder zwölf Mal je Jahr besucht werden, die Besuchsdauer je Kunde beträgt 20 Minuten. Zu bestimmen sind die kostengünstigsten Fahrtrouten. Es gab bereits eine feste Gebietseinteilung, die jedem Kunden einen Mitarbeiter, einem Bezirksleiter zuordnete. Jeder Bezirksleiter wiederum ist einem Verkaufsleiter unterstellt, der für mehrere Bezirksleiter zuständig ist.

Wie in der Überschrift zu diesem Problem bereits angedeutet, ist dieses eine Fragestellung in der mehrere Problemkreise

- Routenplanung
- Standortplanung
- Gebietsplanung
- Mitarbeiterereinsatzplanung

zusammen treffen und zunächst entschieden werden muss, was gemacht werden soll. Durch die vorgegebene Bezirkseinteilung sind Kunden den Außendienstmitarbeitern bereits zugeordnet und es ist festgelegt, welche Kunden an welchem Tag zu besuchen sind, die Standort-, Gebiets- und Tourenplanung sind abgeschlossen. In diesem einfachsten Fall wird für jeden Tag eine Routenplanung durchgeführt. Bei ungefähr zehn bis zwanzig Besuchen je Tag ist das keine wirkliche Herausforderung. Interessanter sind folgende Fragen:

- a. An welchem Tag sollen welche Kunden besucht werden?
- b. Was bedeutet zwölf mal im Jahr?
- c. Für welche Gebiete sollen die Mitarbeiter zuständig sein?
- d. Wo sollen die Außendienstmitarbeiter wohnen?
- e. Sollen Mitarbeiter abends zu ihrem Wohnort zurückkehren?
- f. Ist der Einsatz von Springern sinnvoll?

Bevor auf diese Fragen eingegangen wird, soll eine mögliche Zielfunktion diskutiert werden. Für dieses Buch soll hierfür die Produktivität der Mitarbeiters verwendet werden. Was aber wird bei einem Außendienstmitarbeiter unter Produktivität verstanden? In Anlehnung an Gleichung (3.6g) kann diese hier als

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Besuchszeit}}{\text{Gesamtzeit}} \quad (10.14a)$$

definiert werden. Wird die zum Fahren aufgewendete Zeit bei gleicher Kundenanzahl reduziert, nimmt die Gesamtzeit ab und somit die Produktivität zu. Der Vergleich verschiedener Gebiete ist mit dieser Zahl nicht möglich, da unterschiedliche geographische Strukturen zwangsläufig zu Unterschieden in dem Anteil der Fahrzeit führen müssen. Auf alle Fälle sollte

$$\text{Produktivität} \neq \text{Arbeitszeit} \quad (10.14b)$$

gelten. Im Sinn der Vermeidung von Verschwendung sollte es nicht zu überflüssigen Fahrzeiten kommen. Die notwendigen Fahrzeiten sind *value adding activities*, die nicht notwendigen *non*

*value adding activities*. Aufwendige Planungen und unzählige Telefonate oder *emails*, die einer Terminabsprache dienen sollen, sind ebenfalls den nicht notwendigen *non value adding activities* zuzurechnen. Folgende Definition bietet sich für alle Mitarbeiter an.

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Besuchszeit} + \text{erforderliche Fahrzeit}}{\text{Gesamtzeit}} \quad (10.14c)$$

Die *erforderliche Fahrzeit* kann mit einem Optimierungsalgorithmus wie dem hier vorgestellten für alle Mitarbeiter berechnet werden. Wichtig ist hierbei, dass diese Routenplanung nicht für jeden Tag einzeln betrachtet wird. Dieses hätte zur Folge, dass eine schlechte Terminplanung mit einer sich daraus ergebenden Fahrzeit immer noch zu einer hohen Produktivität führen könnte. Werden zwei Termine an einem Tag für Kunden an zwei unterschiedlichen Randpunkten des Gebietes vereinbart, wird auch die dann erforderliche Fahrzeit groß, aber nur weil vorher bereits schlecht geplant wurde. Auch für das beste Optimierungsprogramm gilt das *gigo-Prinzip* – *garbage in garbage out*.

**Weisheit 10.9** *Auf der Grundlage einer schlechten langfristigen Planung kann keine gute kurzfristige erfolgen.*

Folgend werden die oben gestellten Fragen diskutiert:

- zu a : Das Lösen dieses Problems kann analog zum bisher Beschriebenen vorgenommen werden. Es werden Metarouten der Art (10.12a) erstellt, in die jeder Kunde, entsprechend seiner Besuchshäufigkeit, mehrfach aufgenommen wird. Zusätzlich wurde durch das Einfügen von Hotels die Option zugelassen, dass sich ein Umlauf über mehrere Tage erstrecken kann. Betriebshöfe waren die Wohnorte der Mitarbeiter, Depots gab es keine. Ein erster Lauf brachte ein zu erwartendes optimales Ergebnis: Jeder Kunden wurde direkt hintereinander zwölf Mal besucht.
- zu b : Ohne weitere Bedingungen muss dieses die beste Lösung sein. Die Vorgabe zwölf Mal im Jahr muss konkretisiert werden. Heißt zwölf Mal im Jahr, jeden Monat einmal? Dieses führt zu Komplikationen, da die Monate unterschiedlich viele Tage haben. Eine andere zeigte der Optimierer: Wird vorgegeben, dass ein Kunde in einem Kalendermonat nur einmal besucht werden darf, ist es optimal, einen Kunden am Ende eines Monats zu besuchen, in einem Hotel in unmittelbarer Nähe zu übernachten und am nächsten Morgen zu dem selben Kunden zu fahren. Dieses lohnt sich besonders bei denen, die weit vom Standort des Mitarbeiters entfernt liegen. Auch hier lieferte der Algorithmus ein optimales aber nicht gewolltes Ergebnis. Die Vorgabe der Form *Alle vier Wochen* führt auch zu Schwierigkeiten, da ein Jahr mehr als  $12 \times 4$  Wochen hat und Regeln für Feiertage definiert werden müssten. Jeweils alle vier Wochen ist ebenso unbrauchbar wie jeden ersten Montag im Monat. Ausweg ist auch hier eine weiche Formulierung der Art *Im Abstand von ungefähr vier Wochen*. Dieses kann dann mit den oben beschriebenen Litfaßsäulenaufträgen einfach umgesetzt werden. Bei einem gewünschten Abstand von vier Wochen kommen Aufträge nach drei Wochen an die Litfaßsäule und erhalten für jeden vergangenen Tag eine höhere Priorität. Ebenso kann mit Straffunktionen gearbeitet werden, die die Abweichungen von dem gewünschten Abstand sanktionieren. Mit dieser Methodik lassen sich auch beliebige Besuchshäufigkeiten abbilden. Eine Auswirkung dieses Verfahrens ist, dass nur mit hohem zusätzlichen Aufwand sichergestellt werden kann, dass jeder Kunde genau zwölf Mal im Jahr besucht wird. Es können am Ende eines Jahres Überhänge entstehen: Einige Kunden werden elf Mal und einige dreizehn Mal aufgesucht worden sein.

Ebenso kann bei diesem Vorgehen berücksichtigt werden, dass Besuchshäufigkeiten sich saisonabhängig, z. B. in der Urlaubs- oder in der Weihnachtszeit, ändern können. Hierzu muss dann aber auch noch zugelassen werden, dass die für die Besuche verfügbaren Zeiten nicht das ganze Jahr in jeder Woche exakt gleich sein müssen. Wird dieses ausgeschlossen, d. h. eine höhere Besuchshäufigkeit bei gleicher Arbeitszeit gefordert, werden beim Suchen optimaler Lösungen in Hochlastzeiten die gefunden, die vermehrt Kunden enthalten, die zu kurzen Fahrstrecken führen. Sollen auch noch Urlaubsvertretungen berücksichtigt werden und wird gefordert, dass jeder Kunde von maximal zwei verschiedenen Mitarbeitern betreut wird, müssen weitere Flexibilisierungen erfolgen. In Urlaubszeiten, d. h. mit weniger Ressourcen, die selbe Anzahl von Kunden zu besuchen wie in Normalzeiten, ist nur dann möglich, wenn die überflüssigen Zeiten, die Fahrzeiten reduziert werden. Dieses bedingt möglicherweise, dass Kunden, die zu langen Fahrzeiten führen, in Zeiträumen mit geringerer Mitarbeiterverfügbarkeit weniger aufgesucht werden.

- zu c : Diese Frage ist ganz einfach zu beantworten: Für die Gebiete, in denen die Kunden liegen, die den Mitarbeitern von der Routenplanung zugewiesen wurden. Die immer noch übliche zweistufige Planung verschenkt wertvolles Optimierungspotenzial. Gewöhnungsbedürftig bei dem einstufigen Planen ist es, dass die Gebiete nicht so *schön* aussehen. Optimierungsalgorithmen sind emotionslos und suchen gute Lösungen, keine für das menschliche Empfinden schöne Lösungen. Wird die Größe des geographischen Gebietes in die Zielfunktion übernommen, entstehen wieder ansprechendere Gebiete, zu Lasten der Kosten. Aber auch viele der heutzutage zu beobachtenden Gebiete sind nicht wegen ihrer Schönheit so entstanden, sondern als Relikt einer früheren Zeit, in denen es nur mit Aufwand möglich war, flexible Lösungen zu beschreiben. Im Zeitalter von Datenbanken kann einem Mitarbeiter eine Liste mit Namen zugestellt werden und es muss nicht mehr etwas wie „Alle Kunden links des Rheins“ gesagt werden. Die Aufteilung in Postleitzahlengebiete ist einfach, bedeutet aber Verschwendung.
- zu d : Hier wird nun eine Touren- und Gebietsplanung mit einer Standortplanung verknüpft. Bei einer Anzahl von 200 Mitarbeitern und mehreren tausend Besuchen im Jahr kann sich diesem Problem nur mit großem Rechenaufwand genähert werden. *Voronoi*-Polygone [Kle05] liefern schnelle Lösungen. Bei einem System, das über viele Monate oder gar Jahre gelebt werden muss, sollte auch eine Rechenzeit von einigen Stunden oder Tagen akzeptiert werden können. Wird nur die Ersparnis betrachtet, die dadurch entsteht, dass Mitarbeiter zehn Prozent weniger fahren, lohnt sich auch die Anschaffung oder Nutzung eines leistungsfähigen *number cruncher*. Wird zusätzlich berücksichtigt, dass bei guter Planung Kunden ohne Mehraufwand länger oder häufiger besucht werden können, weil sie *en passant* erreicht werden, entsteht ein weiterer Gewinn.
- zu e : Das Einfügen von Hotels eröffnet vollkommen neue Potenziale, da die Fahrten zwischen Wohnort und Zielgebiet teilweise entfallen können. Die bei gleicher Arbeitszeit bedienbaren Gebiete werden erheblich größer, die Produktivität steigt.
- zu f : Urlaubszeiten, krankheitsbedingte Ausfälle und saisonale Spitzen führen immer wieder zu erheblichen Problemen. Eine Alternative ist es, die Nutzung von Hotels abhängig vom Aufkommen zu planen, d. h. bei saisonalen Spitzen hierdurch die Produktivität zu steigern. Flexibel, zeitlich und räumlich, einsetzbare Mitarbeiter können einen entscheidenden Schritt zur Effizienzsteigerung bringen. Damit die Vorteile nicht unnützlich verpuffen, sind alternative Einsatzmöglichkeiten solide zu vergleichen. Simulationen und eine Formulierung von Zielen mittels des erwarteten Nutzens, vergleiche Gleichung (7.3a), und natürlich wieder eine solide prozessbezogene Kostenrechnung liefern hervorragende Hil-

fen für die Entscheidungsfindung und zur Kostensenkung.

Können nur 10 % der Mitarbeiter eingespart, die Anzahl der Kundenbesuche um 10 % gesteigert werden und wird eine Amortisationszeit von einem Jahr verlangt, können akzeptable Projektkosten leicht abgeschätzt werden.

Ein anders geartetes Problem, in dem die Ladung eine entscheidende Rolle spielt wird folgend beschrieben:

#### **Beispiel .45 Textilservice**

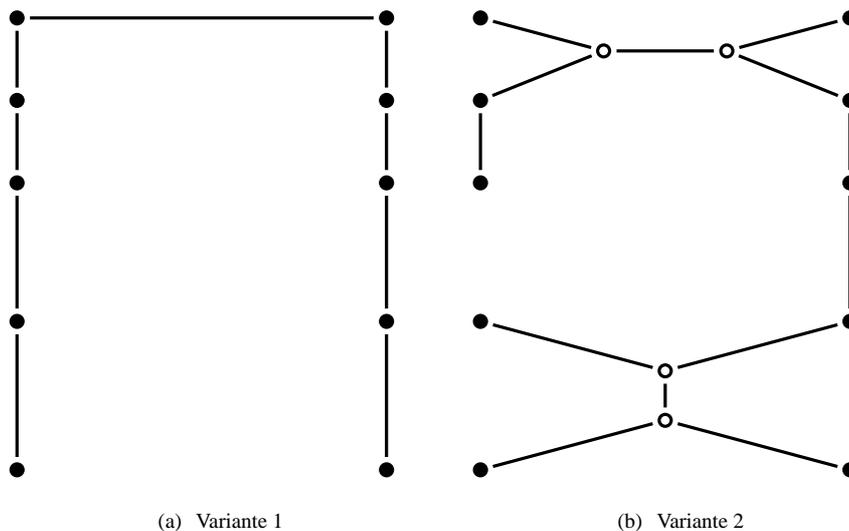
*Ein Textilservice-Unternehmen ist für die Versorgung von Hotels, Restaurants und Krankenhäusern mit sauberer Wäsche verantwortlich. Bei der An- und Abholung ist darauf zu achten, dass saubere Wäsche nie zusammen mit Schmutzwäsche auf einem Fahrzeug geladen ist.*

Dieses bringt eine neue Kategorie von Randbedingungen in die ursprüngliche Aufgabenstellung. Konnten bisher Randbedingungen, wie Zeitfenster oder zulässige Zuladungen stets dadurch überprüft werden, dass der aktuelle Ladevorgang betrachtet wurde, hängt hier eine Verletzung davon ab, was bereits auf dem Fahrzeug geladen ist. Dieses lässt sich auch über Straffunktionen berücksichtigen, jedoch würde es sehr lange dauern, eine Lösung zu finden. Lösungen sollten in diesem Fall nur dann als zulässig betrachtet werden, wenn die Trennung von sauberer und schmutziger Wäsche eingehalten ist. Es lassen sich wieder die üblichen Metarouten bilden, jedoch sollte hier bei dem Erzeugen neuer Lösungen so vorgegangen werden, dass sie wie gewohnt zulässig bleiben, d. h. die Trennung von sauberer und schmutziger Wäsche stets erhalten bleibt. Wird eine Route mit sauberer Wäsche an dem Betrieb begonnen, so darf keine schmutzige Wäsche geladen werden, bis der letzte Kunde erreicht wird, der saubere Wäsche erhält. Dieser Kunde ist der einzige Kunde, bei dem gleichzeitig saubere Wäsche abgeliefert und schmutzige mitgenommen werden darf. Die schmutzige kann, muss hier aber nicht mitgenommen werden. Da Wäsche in Rollcontainern ausgeliefert wird, sind bei der Zuladung scharfe Grenzen zu beachten. Es können 32 und nicht 32.001 Container geladen werden. Bei folgendem Beispiel sind wieder Gewichte und nicht Stückzahlen zu beachten.

#### **Beispiel .46 Zeitungslogistik**

*Eine lokale Tageszeitung wird in der Regel durch Zusteller zu den einzelnen Abonnenten gebracht. Wie soll die Belieferung der Zusteller durch den Verlag erfolgen? Wie sollen die Gebiete der Zusteller aufgeteilt sein?*

Diese Aufgabenstellung unterscheidet sich auch in der Berücksichtigung zeitlicher Aspekte von dem des Textilservice. Da die verfügbare Zeit von der Fertigstellung der Zeitung bis zum Moment, in dem diese auf dem Frühstückstisch liegen muss, recht kurz ist, müssen sämtliche Prozesse sehr schnell ablaufen. Kann Wäsche während des gesamten Tages lieferfertig bereitgestellt werden, so ist der entsprechende Zeitraum bei der Zeitung auf wenige Stunden beschränkt. In diesem kurzen Zeitraum müssen sämtliche Zeitungen aus dem Verlagshaus abgeholt und den Zustellern verfügbar gemacht werden. Ein zeitliches Vorziehen der Produktion ist bei der Verpflichtung einer Zeitung zur Aktualität nur in Teilen möglich. Das endgültige Zusammenstellen kann erst nach Druck der Titelseite erfolgen. Ein geringes Rampenangebot und Kosten machen es unmöglich, dass jeder Zusteller mit einem eigenen Fahrzeug bedient wird. Da auch Bezirke möglicherweise weit von dem Verlagshaus entfernt sind, müssen die Abfahrzeiten der hierfür zuständigen Fahrzeuge so früh sein, dass auch bei langen Fahrstrecken eine rechtzeitige Anlieferung sicher gestellt ist. Gibt es Konkurrenzprodukte in einem Gebiet, sollte die Zustellqualität mindestens gleichwertig sein.



**Abb. 10.5:** Einfügen neuer Standorte bzw. Knoten um kürzeste Verbindungen zu finden

Ein Kompromiss kann sein, dass größere Fahrzeuge die Zeitungen vom Verlagshaus abholen und diese an ausgewählten Stellen auf kleinere verteilen. Dieses *hub and spoke*-System verringert das Platzproblem an den Rampen, jedoch erfordert es eine zusätzliche Planung, für welche Zustellbezirke die Zeitung direkt und für welche sie über eine Zwischenverladung ausgeliefert werden. Hinzu kommt die interessante Eigenschaft, dass Zeitungen am Dienstag wesentlich leichter sind als an einem Mittwoch oder gar an einem Samstag. Wird also immer mit der gleichen Ladekapazität geplant, die für die Wochenendausgabe ausreichen muss, bleibt am Dienstag viel Luft. Auch hier bieten sich Potenziale, die mittels geeigneter Algorithmen und ausreichender Flexibilität genutzt werden können. Wie bei dem Problem der Außendienstmitarbeiter zeigt sich hier wieder eine Verbindung von Routen- und Standortplanung. Sind bei den Außendienstmitarbeitern nur die Standorte bzw. Wohnorte der Mitarbeiter variabel, so können bei der Auslieferung der Zeitung auch die Standorte der Kunden, der Zusteller, verändert werden. Möglicherweise ist es nicht nur für die Auslieferung durch den Verlag, sondern auch für den Zusteller besser, seine morgendliche Route an einem anderen Ort zu beginnen.

Die knapp bemessene Zeit bringt aber auch einen entscheidenden Vorteil mit sich. Die Routen werden so kurz werden, dass Arbeitszeitregelungen keine Rolle spielen.

### 10.3.3 Standortplanung

Für die bereits mehrfach angesprochene Standortplanung bieten sich eine Vielzahl von Verfahren an. Eines, das keine dynamischen Einflussgrößen, wie zu fahrende Touren berücksichtigt, aber immerhin den Aufwand ist der **Varignon'sche Apparat** [DD96]. Hier werden die einzelnen Bedienpunkte entsprechend ihrer Bedeutung bzw. ihres Aufwandes gewichtet und dann ein Schwerpunkt bzw. Standort berechnet. Dieses entspricht der Berechnung des Schwerpunktes  $\vec{r}_S$

von  $N$  Punkten mit Massen  $m_i$ , hier Anzahl der Kunden, an den Positionen  $\vec{r}_i$ :

$$\vec{r}_s = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \vec{r}_i}{M} \quad \text{mit} \quad M = \sum_{i=1}^N m_i \quad (10.15)$$

Manchmal kann es notwendig sein, mehr als einen Standort zu wählen. Oftmals, wie bei der Materialbereitstellung, ist es nicht einmal bekannt, wie viele Standorte benötigt werden. Die Abbildung 10.5 zeigt ein sehr einfaches Beispiel. Hier sind zehn Knoten gegeben, die so miteinander verbunden werden sollen, dass die Gesamtlänge der Verbindungslinien minimal wird. Es waren weder die Anzahl noch die Positionen möglicher Verbindungsknoten vorgegeben. Dieses Beispiel entstammt einer konkreten Anwendung, in der es darum ging, verschiedene Häuser mit Leitungen zur Wärmeversorgung zu verbinden. Abbildung 10.5(a) zeigt eine intuitiv schnell zu konstruierende Lösung, 10.5(b) eine, die mit einem genetischen Algorithmus, wie in Abschnitt 8.3.3 beschrieben, erzeugt wurde. In dem hier gezeigten Fall beträgt der Unterschied in den Längen ungefähr 20 %, bei einem Leitungspreis von mehreren 100 € je Meter durchaus lukrativ. Auch wenn diese Lösung möglicherweise händisch gefunden werden könnte, wird ein Mensch immer wieder einen hohen zeitlichen Aufwand investieren müssen, wenn Parameter oder Anordnungen der Häuser geändert werden. Es ist interessant zu beobachten, wann die Zusatzknoten von ihrer waagerechten Anordnung in die senkrechte kippen und umgekehrt. Zur Lösung wurde das betrachtete Gebiet mit einem Gitter unterlegt, und die Koordinaten jeweils durch ganzzahlige Indizes der Kreuzungspunkte in diesem Gitter dargestellt. Die Koordinaten jedes möglichen Knotens stellten ein Gen wie in Gleichung (8.22b) dar.

In der oben diskutierten Mitarbeiterereinsatzplanung schied diese Möglichkeit aufgrund der Größe des zu untersuchenden Gebietes und der nicht zur Verfügung stehenden ausreichenden Ressourcen aus. Hier wurde eine automatisierte Variante so genannter *add und drop*-Verfahren [DD96] angewendet. Bei diesen Verfahren wird ein Problem mit einem Standort gelöst und dann aus einer gegebenen Menge potenzieller Standorte sukzessive weitere hinzugefügt bis keine Verbesserung erzielt werden kann. Dieses ist die *add*-Komponente des Verfahrens. Dann werden wieder Standorte solange entfernt, die *drop*-Komponente, wie durch das Entfernen eine Verbesserung erreicht wird. Anschließend wurden Hinzufügen und Entfernen abwechselnd durchgeführt. Bei mehreren hundert Verkaufsstellen und ungefähr 200 denkbaren Standorten können sehr gute Lösungen bei diesem Vorgehen erst nach mehreren Stunden Rechenzeit erwartet werden.

Angesichts möglicher Potenziale zur Verbesserung der Kundenzufriedenheit und Senkung der Kosten ist hier eine Rechenzeit von einer Woche auf einem teuren aber leistungsfähigen Rechner zu rechtfertigen. Selbst das Betrachten mehrerer Alternativen, wozu zwei oder vielleicht vier Wochen benötigt werden könnten, ist mehr als lukrativ.

### 10.3.4 Transportplanung

Bisher wurde bei der Routenplanung stets davon ausgegangen, dass ein Kunde von einem Fahrzeug beliefert wird. Die Teilung einer Sendung derart, dass ein Kunde von mehreren Fahrzeugen beliefert wird, wurde nicht berücksichtigt. Es wurde ferner stets vorausgesetzt, dass Aufträge vorliegen und bekannt sind. Bei den in den Abbildungen 10.1 und 10.2 dargestellten Szenarien und in den Beispielen .42 und ?? sind diese Aufträge jedoch unbekannt. Mathematisch können die Probleme in folgender Form beschrieben werden:

**Problem 10.5 Transportproblem ohne Umladen, vgl. Abb. 10.1**

Gegeben sind  $N_D$  Nachfrage- bzw. Zielorte  $V_1^{(d)}, \dots, V_{N_D}^{(d)}$  und  $N_A$  Angebots- bzw. Quellorte  $V_1^{(a)}, \dots, V_{N_A}^{(a)}$  mit den Nachfragen  $d_1, \dots, d_{N_D}$  und den Angeboten  $a_1, \dots, a_{N_A}$ . Die Kosten  $k_{l,m}$  für den Transport einer Mengeneinheit von  $V_i^{(a)}$  nach  $V_j^{(d)}$  seien bekannt.

Gesucht sind die Transportmengen  $q_{i,j}$  oder der Transportplan  $\mathbf{Q} = (q_{i,j})$  derart, dass die Gesamtkosten

$$\mathbf{K} = \sum_{l=1}^{N_A} \sum_{m=1}^{N_D} k_{l,m} \cdot q_{l,m} \quad (10.16a)$$

minimal werden. Zu beachtende Nebenbedingungen sind:

$$q_{l,m} \geq 0 \quad \text{d. h. die Liefermengen sind positiv oder Null.} \quad (10.16b)$$

$$\sum_{l=1}^{N_A} q_{l,m} \leq d_m \quad \text{d. h. es darf nicht überliefert werden.} \quad (10.16c)$$

$$\sum_{m=1}^{N_D} q_{l,m} \leq a_l \quad \text{d. h. es kann nur die verfügbare Menge geliefert werden.} \quad (10.16d)$$

**Problem 10.6 Transportproblem mit Umladen, vgl. Abb. 10.2**

Wie Problem 10.5, jedoch erfolgt der Transport über  $N_H$  Zwischenebenen mit den Knoten oder Naben bzw. hubs  $H_{i,l}$ . Die Kosten  $k_{i,l,m}$  für den Transport einer Mengeneinheit zwischen zwei aufeinanderfolgender Schichten, also von  $H_{i,l}$  nach  $H_{i+1,m}$  seien bekannt.

Gesucht sind die Transportmengen  $q_{i,l,m}$  oder der Transportplan  $\mathbf{Q} = (q_{i,l,m})$  derart, dass die Gesamtkosten

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{l=1}^{N_A} \sum_{m=1}^{N_D} k_{i,l,m} \cdot q_{i,l,m} \quad (10.17a)$$

für sämtliche Transporte zwischen allen Schichten minimal werden. Zusätzlich zu den Nebenbedingungen für Angebot und Nachfrage kann es noch Kapazitätsbeschränkungen  $C_{i,l}^{(\max)}$  an den Naben und für jede einzelne Verbindung geben, d. h.

$$\sum_{j=1}^{N_H^i} q_{i,j,l} \leq C_{i,l}^{(\max)} \quad (10.17b)$$

$$q_{i,j,l} \leq q_{i,j,l}^{(\max)} \quad (10.17c)$$

Auch hier kann das Vorgehen zur Bestimmung einer optimalen Lösung wieder in zwei Schritte unterteilt werden: Es wird zunächst eine zulässige Lösung bestimmt, die anschließend verbessert wird. Das Bestimmen der zulässigen Lösung für ein Problem ohne Umladen kann mit der Nordwesteckenregel aus Algorithmus 10.1 erfolgen.

### Algorithmus 10.1 Nordwesteckenregel

#### Initialisierung

Setze  $l=m=1$

#### Iteration

Wiederhole folgende Schritte bis  $l = N_A$  und  $m = N_D$

$$\begin{aligned} q_{l,m} &= \min(a_l, d_m) \\ a_l &= a_l - q_{l,m} \\ d_m &= d_m - q_{l,m} \\ \text{Wenn } a_l &= 0 \text{ setze } l = l + 1, \text{ sonst } m = m + 1. \end{aligned}$$

### Beispiel .47 Transportproblem

Gegeben seien  $\vec{A} = (25, 40, 60, 23)$ ,  $\vec{D} = (30, 20, 26, 50, 22)$  und folgende Kostenmatrix.

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 2 & 4 & 5 \\ 4 & 3 & 4 & 6 & 9 \\ 1 & 8 & 1 & 2 & 5 \\ 6 & 4 & 3 & 5 & 4 \end{pmatrix}$$

Das Ergebnis des mit der Nordwesteckenregel ermittelten zulässigen Planes lautet:

$$Q = \left( \begin{array}{ccccc|c} 25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 25 \\ 5 & 20 & 15 & 0 & 0 & 40 \\ 0 & 0 & 11 & 49 & 0 & 60 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 22 & 23 \\ \hline 30 & 20 & 26 & 50 & 22 & \end{array} \right) \quad (10.18)$$

In jeder Spalte und Zeile der angegebenen Transportmatrix sind die durch die Angebote und Nachfragen gegebenen Randbedingungen eingehalten. Wie können nun Verbesserungen ermittelt werden? Das grundsätzliche Vorgehen zeigt Abbildung 10.6. Die hoch gestellten Zahlen geben jeweils die vorzunehmenden Veränderungen an. Zyklisches Tauschen, bei dem kein Eintrag negativ wird, garantiert, dass der Transportplan zulässig bleibt. Die Änderungen müssen jeweils so sein, dass die Summen der Änderungen in jeder Spalte und in jeder Zeile Null sind.

$$Q = \left( \begin{array}{ccccc|c} 25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 25 \\ 5 & 20 & 15^{-5} & 0 & 0^{+5} & 40 \\ 0 & 0 & 11 & 49 & 0 & 60 \\ 0 & 0 & 0^{+5} & 1 & 22^{-5} & 23 \\ \hline 30 & 20 & 26 & 50 & 22 & \end{array} \right) \Rightarrow \left( \begin{array}{ccccc|c} 25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 25 \\ 5 & 20 & 10 & 0 & 5 & 40 \\ 0 & 0 & 11 & 49 & 0 & 60 \\ 0 & 0 & 5 & 1 & 17 & 23 \\ \hline 30 & 20 & 26 & 50 & 22 & \end{array} \right)$$

Abb. 10.6: Modifizierter Transportplan, der aus Gleichung (10.18) durch zyklisches Vertauschen hervorgeht.

Sind die Kosten gegeben, können die *modified distribution method* (MODI) oder *stepping stone-Methode* zur Bestimmung der richtigen für den Tausch auszuwählenden Elemente herangezogen werden, um zu einer optimalen Lösung zu gelangen [Dom95].

Alternative Methoden, wie Spalten- oder Zeilenminimummethode, liefern Verbesserungen, aber keine optimalen Lösungen und selbst die Qualität einer Lösung kann nicht aus dem Verfahren heraus abgeschätzt werden [Dom95]. Sind keine Kapazitätsbeschränkungen gegeben, kann auch dynamische Programmierung [NM93] genutzt werden, da ein Transport stets zwischen benachbarten Schichten und auch nur in eine Richtung stattfindet.

Diese hier gegebene Form der Kostenmatrix ist in der Praxis eher selten anzutreffen, da die Kosten als unabhängig von der Auslastung eines Transportmittels betrachtet werden. Folgender Ausdruck zur Frachtberechnung je eingesetztem Fahrzeug ist realistischer:

$$\text{Fracht} = \min \left[ \text{Sockelbetrag} + \left[ \frac{\text{Gewicht in kg}}{100 \text{ kg}} \right] \times \frac{\text{Preis}}{100 \text{ kg}}, \text{Maximalbetrag} \right] \quad (10.19)$$

Dieses erschwert den Einsatz vieler Verfahren zur Transportplanung erheblich. Analog zu dem Vorgehen zur Bestimmung optimaler Routen können auch hier heuristische oder genetische Algorithmen genutzt werden. Anstelle der dort eingesetzten Operatoren werden neue Lösungen durch zyklisches Vertauschungen zufällig bestimmt und als Qualitätsfunktionen die Kosten benutzt. Die Elemente der Transportmatrix können wieder als Gene und jeder Transportplan als ein Chromosom aufgefasst werden. Dieses Vorgehen kann ohne große Probleme auch auf Transportprobleme mit Umladen und beliebigen Kapazitätsbeschränkungen erweitert werden.

Hierbei können zulässige Startlösungen mit der Nordwesteckenregel gebildet werden, indem diese jeweils zwischen benachbarten Schichten angewendet wird. Die Nachfragen in Algorithmus 10.1 werden für die *hubs* durch deren Kapazitäten ersetzt. Mit diesem Ansatz lassen sich auch noch Kapazitäten und Kosten auf den Transportwegen berücksichtigen.

### 10.3.5 Materialbereitstellung

Bei den bisher besprochenen Fragestellungen ist stets davon ausgegangen worden, dass ein Bedarf vorhanden und erkannt ist: Eine Routen- oder Transportplanung werden durchgeführt, weil Nachfragen und Angebote oder sogar Aufträge vorliegen und nur noch zu entscheiden ist, wie diese abgearbeitet werden. Sowohl im Supermarkt als auch an einer Produktionslinie ist diese Sicherheit nicht vorhanden. Bei der Materialbereitstellung an eine Produktionslinie ist nur bekannt, dass ein oder mehrere Teile im Laufe der Produktion benötigt werden. Aus dem Produktionsplan kann der erwartete Zeitpunkt abgelesen werden, der aber nicht zwingend eingehalten werden muss. Eine wichtige Information ist es, dass Störungen gewöhnlich zu Verzögerungen führen. Noch weniger Sicherheit gibt es in einem Supermarkt. Liegen für eine Produktion Aufträge vor, interne oder externe, ist in einem Supermarkt nur sicher bekannt, dass ein bestimmtes Produkt irgendwann höchstwahrscheinlich gekauft wird. Ob das Bereitstellen von Waren in einem Lager für auszuliefernde Aufträge, die **Kommissionierung**, mehr der Situation einer Produktion oder der eines Supermarktes ähnelt, hängt von Struktur und Organisation ab. In allen Fällen ist eine Entscheidung zu treffen, die sicherstellt, dass die richtige Ware zur richtigen Zeit mit der richtigen Information am richtigen Ort ist.

Mit der Definition .9 für die Bereitstellung wird festgelegt, dass über das Material verfügt werden kann. Es ist also keine Bestandsplanung durchzuführen. Ferner wird die Materialbereitstellung unabhängig von Lieferantenauswahl, Einkauf und Beschaffung betrachtet. Fehlmengen oder Schäden können nur noch durch den Bereitstellungsprozess selbst entstehen. Auch wenn entlang einer Lieferkette mehrere Positionen zu beobachten sind, an denen eine Materialbereitstellung erforderlich ist, so kann sie doch immer gleich beschrieben werden. Abbildung 10.7

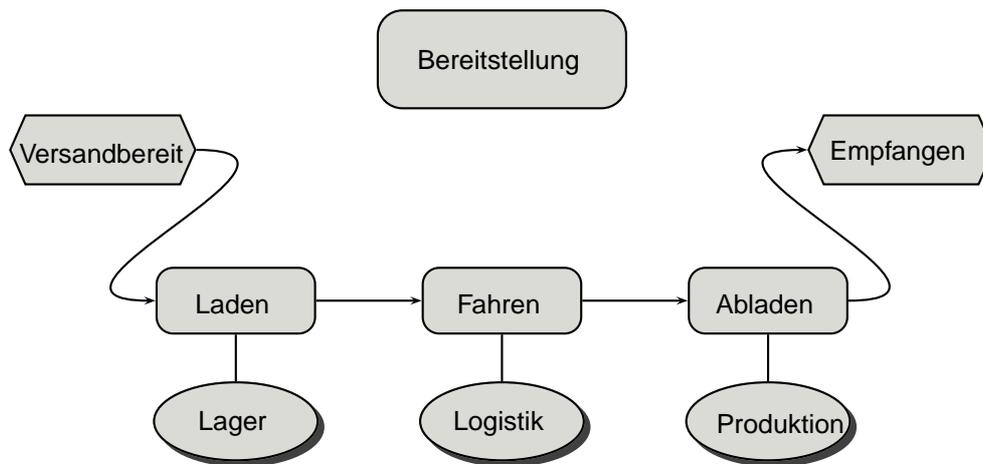


Abb. 10.7: Materialbereitstellung

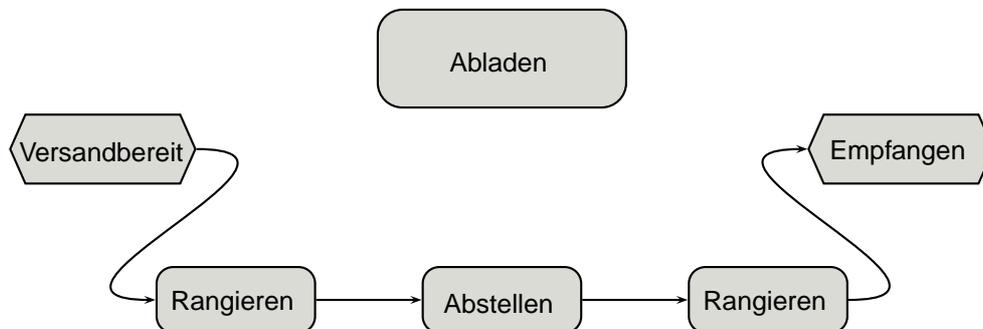
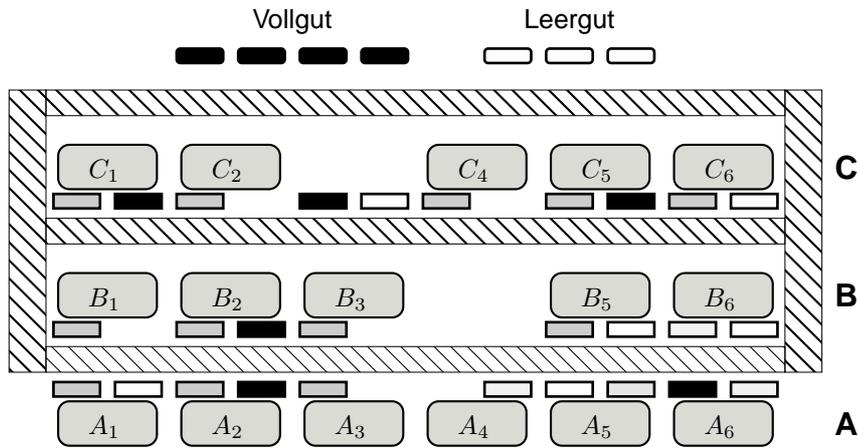


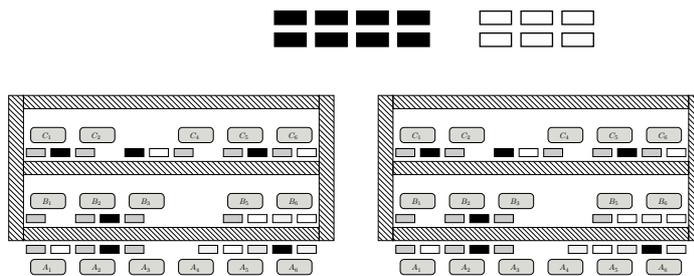
Abb. 10.8: Abladen

zeigt den Prozess, eine Darstellung, die der in 1.10 sehr ähnelt: Die Materialbereitstellung ist ein Transportprozess. *Empfangen* kann hier möglicherweise anders interpretiert werden als bei einer Paketzustellung. Wird bei einem Paket davon ausgegangen, dass es einen Empfänger gibt, der die Ware in Empfang nimmt und implizit erwartet, dass dieser dafür sorgt, dass die Ware abgestellt werden kann, d. h. dass sowohl Ressourcen als auch Platz in ausreichendem Umfang zur Verfügung stehen, so muss dieses bei einer Materialbereitstellung nicht der Fall sein. Die Abgabe an einem Nachbarplatz scheidet auch aus.

Lassen wir Unrat außer Betracht, so ist das Bereitstellen von Material immer damit verbunden, dass auch Verpackungsmaterial mitgebracht wird, das entsorgt werden muss. Diese Materialien können nach **Leergut**, Behälter oder Paletten, und Verpackungshilfsstoffen unterschieden werden. Wir wollen uns hier auf das Leergut beschränken und die Hilfsstoffe der Entsorgungslogistik überlassen. Da die Hilfsstoffe selten in unveränderter Form erhalten bleiben, müssen hier unabhängige Prozesse aufgebaut werden. Auch die Rücknahme des Leergutes soll als ein eigenständiger Prozess betrachtet werden. Die Darstellung ist identisch zu der der Bereitstellung,



**Abb. 10.9:** Beispiel für die Materialbereitstellung an eine Produktionslinie  
Die unterschiedlichen Färbungen sollen die Füllgrade einzelner Behälter verdeutlichen. Die schraffierten Flächen sind Fahrwege.

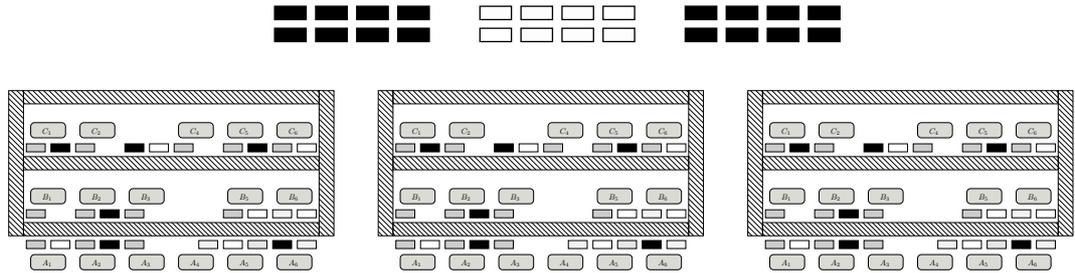


**Abb. 10.10a:** Beispiel für eine Staplersteuerung für mehrere Produktionslinien aus  
Abbildung 10.9 – Variante 1

nur dass Bereitstellung durch Rückführung ersetzt wird. Der Leergutprozess ist damit auf dieser Ebene funktional zu dem Vollgutprozess identisch, die konkrete Realisierung des Abladens mag durchaus abweichen. In beiden Fällen muss der Teilprozess *Abladen* weiter unterteilt werden, wie in Abbildung 10.8 zu sehen ist. Für die weitere Beschreibung der Materialbereitstellung sollen folgende Forderungen und Randbedingungen gelten:

- a. Es muss stets Material an jedem Montageort verfügbar sein, es darf also keine Versorgungslücke geben.
- b. Das bereit zu stellende Material steht an einer bekannten Stelle, einer Vollguttheke, zur Verfügung.
- c. Das Leergut kann an einer bekannten Position, der Leerguttheke, abgestellt werden.

Forderung a bedeutet, dass es keine Produktionsunterbrechungen aufgrund fehlenden Materials geben darf. Mit b und c wird sichergestellt, dass nicht auch noch bei Aufnahme und Abgabe gesucht, geräumt und rangiert werden muss. Ein Beispiel für die Materialbereitstellung an eine



**Abb. 10.10b:** Beispiel für eine Staplersteuerung für mehrere Produktionslinien aus Abbildung 10.9 – Variante 2

Produktionslinie zeigt Abbildung 10.9 und ist nachfolgend beschrieben.

#### Beispiel .48 Materialbereitstellung

Gegeben sind drei Produktionslinien *A*, *B* und *C* mit maximal je sechs Montageplätzen. An jedem Platz wird Material benötigt, das in Behältern angeliefert wird. Die geschätzte Reichweite  $t_i^{(R)}$  kann aus bekannten Produktionsraten  $\lambda_i$  eines jeden Montageortes ermittelt werden. Die Bereitstellung der Behälter soll mit Gabelstaplern erfolgen. Diese können die schraffiert eingezeichneten Fahrwege benutzen.

Das Material soll so bereit stehen, dass nie eine Versorgungslücke entsteht und die Bereitstellung möglichst effizient ist.

Die tatsächliche Reichweite  $t_i^{(R)}$  kann durch Produktionsstörungen verlängert und durch fehlende oder fehlerhafte Teile verkürzt werden. Der erste Effekt ist sehr leicht festzustellen, bei dem zweiten müssen zusätzliche Maßnahmen am Verbauort getroffen werden. Bei der Betrachtung dieser Fragestellung wird wieder deutlich, wie sehr in der Vergangenheit getroffene Entscheidungen, wie die Reichweite der Behälter und die Größe der verfügbaren Flächen, aktuelle Überlegungen und mögliche Ergebnisse beeinflussen. Für die folgende Diskussion sollen folgende zu berücksichtigenden Rahmenbedingungen angenommen werden:

- An jedem Montageort ist Platz für maximal zwei Behälter.
- Es kann freie Stellplätze an einigen Linien geben.
- Die Fahrwege bieten nebeneinander Platz für zwei sich entgegengerichtete Gabelstapler.

Die benötigte Fahrzeit vom Vollgutplatz zum jeweiligen Montageort soll kürzer sein als die Reichweite eines Behälters an diesem Ort. Dem in Abbildung 10.9 vorgelagerten Bereich gibt es einen Raum, in dem das benötigte Material zur Verfügung steht und aus dem heraus es abgerufen werden kann. Nachgelagert gibt es eine Fläche, auf die das entsorgte Leergut gebracht werden kann. Für das hier betrachtete System existieren zwei Übergabetheken, eine für Voll- und eine für Leergut. Es wird davon ausgegangen, dass das Vollgut bei rechtzeitigem Abruf an der Vollguttheke zur Verfügung steht, wenn der Gabelstapler es aufnehmen möchte und die Leergutfläche ausreichend Platz zum Abstellen bietet. Dieses entspricht dem Vorgehen, interne und externe Einrichtzeiten voneinander zu trennen [Shi93]. Für eine mögliche Umsetzung sind folgende Alternativen denkbar:

- |                 |              |
|-----------------|--------------|
| a. Druckprinzip | c. Steuerung |
| b. Sogprinzip   | d. Leitung   |

#### **Exkurs 10.4 KANBAN und das Toyota Production System**

*Da in vielen Unternehmen das Einführen von KANBAN-Karten als Wundermittel zur Lösung aller Probleme postuliert wird, sollen folgende zwei Zitate der beiden Väter des TPS etwas über deren Einstellung deutlich machen. Die beiden Säulen des Toyota production system sind [Ohn93]*

- *autonome Automation und*
- *just in time.*

*„just in time ist viel mehr als ein System zum Abbau des Lagerbestandes. Es ist viel mehr als eine Methode zur Verringerung der Umrüstzeiten, mehr als der Einsatz von kanban oder jidoka, mehr als eine Modernisierung der Fabrik. Es ist gewissermaßen, wie Ohno es ausdrückt, ein Mittel, damit die Fabrik für das Unternehmen arbeitet, wie der Körper für den Menschen. ... Der menschliche Körper funktioniert dann in guter Gesundheit, wenn er umsorgt wird, ausreichend zu essen und zu trinken erhält, häufig bewegt und mit Respekt behandelt wird. [Vorwort zu Ohn93, S. 17]“*

*„Das Toyota-Produktionssystem ist zu 80 Prozent auf die Vermeidung von Verschwendung ausgelegt, etwas 15 Prozent betreffen das Produktionssystem an sich und gerade einmal fünf Prozent läßt sich Kanban zuordnen. [Shi93, S.37]“*

*Nicht das Einführen von KANBAN ist entscheidend, sondern ein Umdenken in vielen Bereichen. Bei allen Diskussion, die heutzutage geführt werden, sollte immer bedacht werden, dass die Ideen Ohno's auf einen Besuch in den USA in den 50-er Jahren des letzten Jahrhunderts zurückgehen. Prinzipien und Techniken haben sich seit der Zeit mit unterschiedlicher Geschwindigkeit in allen Bereichen weiter entwickelt und verändert.*

#### **Vorgehen 10.1 Materialbereitstellung – Einfachspiel**

*Ver- und Entsorgung sind getrennt zu betrachten.*

##### **Versorgung**

##### **Entsorgung**

- |   |   |
|---|---|
| <i>a. Aufnahme Vollgut an Übergabepunkt</i> | <i>a. Fahrt von Übergabepunkt zu Verbauort – leer</i> |
| <i>b. Fahrt zu Verbauort – voll</i>         | <i>b. Aufnahme Leergut</i>                            |
| <i>c. Abstellen Vollgut</i>                 | <i>c. Fahrt zu Leergutplatz – voll</i>                |
| <i>d. Rückfahrt zu Übergabepunkt – leer</i> | <i>d. Weiterfahrt zu Übergabepunkt – leer</i>         |

zu a : Im vorgelagerten Bereich verfügbares Material wird an die Linie gebracht. Erfolgt dieses ohne eine Rückkopplung mit dem Montageort kann dieses ohne weitere Diskussion als unbrauchbar verworfen werden, da nicht akzeptable Bestände entstehen.

zu b : Auch ein Sogprinzip, bei dem vom Montageort ohne Rückkopplung oder Regeln Material angefordert wird, ist wenig geeignet, das Ziel *Vermeidung von Verschwendung* zu erreichen. Eine Alternative ist das Einführen eines KANBAN-Systems, durch das eine Rückkopplung erreicht wird. Hierbei wird jeder Behälter mit einer Karte versehen, auf der die

**Vorgehen 10.2 Materialbereitstellung – Doppelspiel**

- a. Aufnahme Vollgut
- b. Fahrt von Übergabepunkt zu Verbauort – voll
- c. **Austausch Vollgut gegen Leergut** – siehe 10.3
- d. Fahrt zu Leergutplatz – voll
- e. Weiterfahrt zu Übergabepunkt – leer

**Vorgehen 10.3 Austausch Voll- gegen Leergut aus Regel 10.2**

Es müssen zwei Plätze, Platz 1 und Platz 2 genannt, zur Verfügung stehen, an denen der volle bzw. der leere Behälter zwischengelagert werden können.

- |                                 |                          |
|---------------------------------|--------------------------|
| a. Absetzen Vollgut Platz 1     | g. Aufnahme Vollgut      |
| b. Leerfahrt zu Montageplatz    | h. Fahrt zu Montageplatz |
| c. Aufnahme Leergut             | i. Absetzen Vollgut      |
| d. Fahrt mit Leergut zu Platz 2 | j. Leerfahrt zu Platz 2  |
| e. Absetzen Leergut             | k. Aufnahme Leergut      |
| f. Leerfahrt zu Platz 1         |                          |

Materialart und der Verbauort angegeben sind. Ist ein Behälter leer, wird die Karte entnommen und zu einem Disponenten gebracht, der die Versorgung, besser Ent- und Versorgung, einleitet. Es gibt für jedes Material eine feste Anzahl von Karten und damit verbundenen Kartenkreisläufen, bei denen die Karten zwischen Montageorten und Produzenten des Materials hin und her laufen. Inwieweit dieses möglich und sinnvoll ist, hängt u. a. davon ab, wie weit Montage und Produktion räumlich auseinander liegen und ob für den Transport externe Dienstleister eingebunden werden.

Eine Alternative bietet das *CONWIP*-Prinzip, bei dem es nur einen einzigen Kartenkreislauf gibt [GT05]. Wenn im folgenden von *KANBAN* gesprochen wird, soll stets ein *klassisches* Vorgehen gemeint werden, bei dem mit Karten gearbeitet wird, auch wenn die Meldungen heutzutage elektronisch erfolgen könnten. In diesem Fall die *KANBAN*-typische Trennung unterschiedlicher Materialien aufrecht zu erhalten, erscheint aber wenig sinnvoll. Eine Erweiterung ist das Supermarktprinzip, bei dem Material wie in den Regalen eines Supermarktes bereitgestellt wird. Dieser Supermarkt kann wieder nach dem *KANBAN*-Prinzip aufgefüllt werden. Vorteil hierbei ist, dass immer nur dann Material angefordert wird, wenn es wirklich benötigt wird, d. h. ein Behälter tatsächlich leer ist.

zu c : Ein Nachteil des *KANBAN*-Prinzips ist es, dass keine Koordination der verschiedenen Materialien stattfindet. Erfolgen die Meldungen elektronisch an eine zentrale Leitstelle,

kann diese Auslagerungs- und Fahraufträge für die Gabelstapler erstellen. Werden Aufträge dann erstellt, wenn eine *KANBAN*-Karte eintrifft, kann dieses zu unnötiger Hektik führen, weil die Reaktion unabhängig von der tatsächlich verfügbaren Zeit erfolgt.

zu d : Liegen sämtliche Daten zentral vor, ist es noch ein kleiner, die Effizienz beträchtlich steigernder Schritt, diese mit den Produktionsdaten, insbesondere den Reichweiten der verschiedenen Materialien, zu verbinden. Falls diese Daten nicht verfügbar sind, können genäherte Werte aus den bereits erledigten Anstellaufträgen bestimmt werden. Die Einrichtung eines **Datenkreislaufes** ist nicht nur bei fehlenden Daten sinnvoll, sondern kann auch genutzt werden, um Kennzahlen zu ermitteln und Grundlagen für künftige Planungen zu liefern. Aus den hinterlegten oder berechneten Daten über die Reichweiten kann das System eine erste Planung bereits ohne Meldung von den Montageorten durchführen. Das System kann, lange bevor bei einem konventionellen Vorgehen die Meldung erscheinen würde, wissen, wann Material benötigt wird. Grundlage sollte sein, dass die Einplanung von Anlieferungen nicht auf einer Meldung beruht, dass ein Behälter leer ist, sondern so, dass Material rechtzeitig bereitgestellt wird. Im Falle einer Reichweite von sechs Stunden kann eine Anlieferung knapp sechs Stunden warten, bei dreißig Minuten muss sie sehr zeitnah zur Bedarfsmeldung erfolgen. Wird dieses mit einer Steuerung der Gabelstapler verknüpft, die mittels Ortung und Identifikation die tatsächlichen Materialbewegungen erfasst, können Effizienz und Sicherheit erheblich gesteigert werden. Dieses verlangt solides Datenmanagement mit zugehöriger Informationslogistik, die alle für Bereitstellung, Betrieb und Produktion, relevanten Regeln kennt. So kann ein derartiges System natürlich nicht funktionieren, wenn die Tauschzeiten für die Batterien der Gabelstapler unbekannt sind. Andererseits ergeben sich zusätzliche Potenziale, wenn das Tauschen nicht immer zum Schichtwechsel sondern in Schwachlastzeiten erfolgen könnte. Bei einem solchen Vorgehen entstehen zusätzliche Möglichkeiten dadurch, dass Mitarbeiter sehr viel effizienter eingeplant werden können. Springer können an verschiedenen Orten immer dann aktiv werden, wenn es notwendig ist. Planung muss sich nicht nach Spitzenlast einzelner Bereiche, sondern kann sich an der Grundlast ausrichten.

Bevor nun ein Vorgehen festgelegt werden kann, sind noch einige offene Fragen zu klären.

- a. Sollen die Fahrgassen in zwei Richtungen befahrbar oder Einbahnstraßen sein?
- b. Gibt es **Abbiegege-** oder **-verbote**?
- c. Erfolgt die Einlagerung als Einfach- oder Doppelspiel?

Die Punkte (a) und (b) beeinflussen einerseits die Planung, da die Fahrzeiten davon abhängen, andererseits auch die Realisierung, da Verkehre in zwei Richtungen und mögliche Rangiervorgänge Ursachen für Störfälle und Verzögerungen sind. Auch eine Festlegung auf Einfach- oder Doppelspielstrategie beeinflusst sowohl die Zeiten als auch die Prozesssicherheit. Lassen sich (b) und (c) jederzeit und sogar für verschiedene Bereiche unterschiedlich ändern, kann eine Entscheidung bei (a), die zu engen Gassen führte, das Verhalten auf Dauer bestimmen.

**Definition .65 Einfach- und Doppelspielstrategie**

*Bei einer Doppelspielstrategie werden Ein- und Auslagerungsprozesse miteinander verbunden. Ein Stapler bringt in einem Arbeitsgang einen vollen und nimmt einen leeren Behälter mit. Bei einem Einfachspiel bringt ein Gabelstapler entweder einen vollen zum Verbauort oder holt einen leeren von dort ab und kehrt danach jeweils zu seinem Ausgangsort zurück.*

Die Doppelspielstrategie sieht sehr viel kompakter aus und führt zu einer sehr hohen Auslastung der Fahrzeuge, wenn diese wie in Gleichung (3.10d) definiert wird. Bei Verwendung der Defi-

inition aus (3.10c) ist die Auslastung für beide Varianten gleich, was die Fragwürdigkeit dieser Definition noch einmal unterstreicht. Es erscheint plausibel, dass ein Fahrzeug, das auf Hin- und Rückfahrt beladen ist, besser ausgelastet ist.

Nicht zu vernachlässigen bei einem Doppelspiel ist der Austausch von Voll- und Leergut, für den zwei Abstellplätze und Rangiererraum benötigt werden. Das Vorgehen ist in den Vorgehen 10.2 und 10.3 beschrieben. Welche der Varianten die bessere ist, kann wieder nicht allgemein beantwortet werden, da die Antwort natürlich von der Fahrzeit zu dem Verbauort abhängen muss. Hier bietet sich hervorragend der Einsatz eines **Prozessgenerators** mit dem dazu passenden Simulationswerkzeug und einer realistischen Parametrisierung der Prozesse an. Als Ergebnis könnte sich zeigen, dass die Entscheidung zwischen den beiden Strategien von der Lage des Montageortes abhängt. So kann ein Einfachspiel für Montageorte nahe der Theken günstiger sein und ein Doppelspiel für weiter entfernt gelegene Arbeitsplätze. Eine frühzeitig stattfindende Planung der Produktionslinie kann durch Schaffung von Rangierplätzen dort wo Doppelspiel angebracht ist, dafür sorgen, dass die Effizienz steigt.

**Weisheit 10.10** Die Bereitstellung von Material an eine Produktionslinie ist analog zu der Anlieferung von Behältern in einem Werkgelände durch Lkws.

Da für die Leitung von Lkws in einem Werkgelände und denen von Gabelstaplern gleiche Regeln verwendet werden können, konnte auch dieses Problem exemplarisch mit konkreten Daten analysiert werden. Ein Unterschied liegt in der Anzahl der **Jobs** je Auftrag, eine Zahl, die lediglich ein Parameter ist. Routenplanung, Ortung und Navigation sind ohne Änderung übertragbar. Im Unterschied zu der Anlieferung mit Lkws ist die stets auch die Entsorgung zu betrachten, die hierfür die selben Fahrzeuge eingesetzt werden. Die zu bearbeitenden Aufträge sind nun Voll- und Leergut, die Lkw entsprechen den Gabelstapler, die Rampen den Montageorten.

Die Vergabe der Prioritäten muss modifiziert werden. Jedem bereitzustellenden oder abzuholenden Behälter wird eine Priorität  $P_O^{(V)}(t)$  zugeordnet. Diese kann in Abhängigkeit von der noch zur Verfügung stehenden Zeit  $\Delta t$  vergeben werden. Ist  $T$  die aktuelle Uhrzeit,  $T_d^{(V)}$  der spätest mögliche Anlieferungszeitpunkt für das Vollgut und  $t_w^{(V)}$  die Bearbeitungszeit, so ist

$$\Delta t^{(V)}(t) = T_d^{(V)} - t_w^{(V)} - T \quad (10.20a)$$

die noch verbleibende Zeit. Spätestens zum Zeitpunkt

$$T_\ell^{(V)} = T_d^{(V)} - t_w^{(V)} \quad (10.20b)$$

muss die Fahrt beginnen und für die Priorität kann

$$P_O^{(V)}(t) = \frac{1}{\Delta t^{(V)}(t)} \quad (10.20c)$$

gewählt werden. In der Praxis kommen einige Details hinzu, die ebenfalls zu beachten sind. Eines davon ist das Verhalten bei Schichtwechsel.

#### **Beispiel 49 Materialbereitstellung bei Schichtwechsel**

An einem Verbauort wird aus einem Behälter mit einer Reichweite von 1h20' um 20:55Uhr das letzte Teil entnommen. Dann ist der spätest mögliche Anlieferungszeitpunkt achtzig Minuten später, d. h. um 22:15Uhr. Beträgt die Bearbeitungszeit 20', so ist  $T_\ell^{(V)}$  gleich 21:55Uhr. Wird

aber im Zweischichtbetrieb von 6:00Uhr bis 22:00Uhr gearbeitet, muss die Anlieferung erst um 6:15Uhr erfolgen, die Fahrt kann aber nicht um 5:55Uhr sondern muss bereits um 21:40Uhr beginnen, damit sie rechtzeitig vor Schichtende und rechtzeitig zum Bedarfszeitpunkt abgeschlossen werden kann. Sind zum Schichtende auch noch die Batterien zu wechseln, ergeben sich andere Überlegungen. Auch hier gibt es viele Stellschrauben, wie z. B. unterschiedliche Anfangszeiten für Mitarbeiter.

#### **Vorgehen 10.4 Dynamische Materialbereitstellung**

*Ver- und Entsorgung werden gemeinsam betrachtet.*

- |   |  |
|---|--|
| <i>a. Aufnahme Vollgut an Übergabepunkt</i> | <i>d. Leerfahrt zu anderem Verbauort</i> |
| <i>b. Fahrt zu Verbauort – voll</i>         | <i>e. Aufnahme Leergut</i>               |
| <i>c. Abstellen Vollgut</i>                 | <i>f. Fahrt zu Leergutplatz – voll</i>   |
|   | <i>g. Leerfahrt zu Übergabepunkt</i>     |

Wie auch dieses Beispiel zeigt, sind zum Bestimmen der richtigen Zeitpunkte Rechenregeln der **Fahrplanarithmetik** erforderlich. Alternativ kann die Bereitstellung über getaktete Verkehre realisiert werden. Dieses ist in der Umsetzung einfacher, verlangt aber die Planung von Fahrplänen, die gleichzeitig effizient und robust gegen Störungen sind.

Wird die Bereitstellung mit einer Einfachspielstrategie realisiert, muss rechtzeitig das Leergut entsorgt werden und die Entsorgung des Leergutes muss so erfolgen, dass die Vollgutversorgung sichergestellt ist. Es ist vollkommen ausreichend, wenn das Leergut unmittelbar vor dem Eintreffen des Vollgutes entsorgt wird, aber nicht etwas später. Da hierfür ein Gabelstapler notwendig ist, muss die Einsatzplanung für diese fehlerfrei arbeiten. Die beiden Prozesse – Vollgut- und Leergutversorgung – können getrennt betrachtet und geplant werden, aber nicht unabhängig voneinander. Selbst für mittlere Produktionshallen übersteigt eine solche Planung schnell die menschlichen Möglichkeiten. Ergeben sich Änderungen, z. B. durch andere Behältergrößen mit daraus resultierenden anderen Reichweiten oder kommen Störeinflüsse hinzu, muss eine Disposition fehlschlagen. Ausweg in der Praxis sind Pufferzeiten, die Fehler verdecken. Diese führen einerseits dazu, dass mehr Material als notwendig bereitsteht, andererseits zu einer ineffizienten Nutzung der Ressourcen. Simulationen, wie die für die Lkw-Steuerung können hier sehr hilfreich sein. Auch wenn die konkreten Abläufe in der Praxis sehr schnell aussehen mögen, laufen sie für Rechner wie im Schnecken tempo. Bei Geschwindigkeiten eines Gabelstapler von ungefähr 3 m/s bzw. ungefähr 11 km/h dauert allein eine Fahrt von 100 m bereits eine halbe Minute. Mit dem Aufnehmen und Abstellen eines Behälters vergehen hier mindestens zwei Minuten. In dieser Zeit kann der Rechner Millionen von möglichen Alternativen ermitteln und bewerten.

Neben dem Einfach- und Doppelspiel kann die Bereitstellung auch als dynamisches Routenplanungsproblem aufgefasst werden. Jedesmal, wenn ein Behälter als leer gemeldet wird, werden zwei Aufträge, einer für die Entsorgung des Leergutes und einer für die Versorgung mit Vollgut, erzeugt und als **Litfaßsäulenauftrag** den bereits vorhandenen eines Routenplanungsprogrammes hinzugefügt. Allein durch die Vergabe der Zeitfenster, die sich aus der Reichweite ergeben, können die Fahrtrouten ermittelt werden. Die Ergebnisse der Routenplanung werden

als Bereitstellungsauftrag an die vorgelagerte Einheit übermittelt. Offen bleibt, wie weit im Voraus die Planung erfolgen soll. Auch hier sollte das *postponement*-Prinzip Anwendung finden, d. h. Ergebnisse sollten so spät wie möglich manifest werden, um Optimierungspotenziale nicht zu verschenken. Die Fahrer der Gabelstapler bekommen erst dann den nächsten Auftrag zugewiesen, wenn es erforderlich ist. Rechnungen an einem konkreten Beispiel zeigten, dass statt geplanter sieben fünf Gabelstapler ausreichend gewesen wären. Bestünde die Möglichkeit, Arbeitszeiten variabler zu gestalten, ergäben sich weitere Potenziale. Zusätzlich können auch die Einsatzorte von Gabelstaplern variabel werden. Die Verknüpfung von Lkw-Steuerung und Materialbereitstellung lässt Gabelstapler für beide Bereiche optimal einsetzbar werden. Hierzu muss eine bisherige unterschwellige Voraussetzung fallen gelassen werden. Es wurde bisher, wenn ein Gabelstapler frei war und ein Auftrag vorlag, ein Behälter transportiert. Dieses ist oftmals nicht nötig. Auch hier kann das *postponement*-Prinzip wieder zum Tragen kommen. Es ist möglich, Aufträge ruhen zu lassen. Dieses schafft freie Zeit für andere Aufgaben. Eine gute Planung muss dafür sorgen, dass die freien Zeiten so zusammengefasst werden, dass sie auch zu nutzen sind. Simulationen mit *goodSyncTraffic* zeigen Möglichkeiten, die in Verbindung mit einer *in-door*-Ortung oder *IPS* die Effizienz beträchtlich steigern können. Die hier skizzierte Lösung gewinnt neue Anwendungsmöglichkeiten, wenn mehrere Hallen oder Bereiche betrachtet werden, wie in den Abbildungen 10.10a und 10.10b zu sehen. Dann sind nicht mehr nur isolierte Abläufe, sondern deren Vernetzung von Bedeutung. Flächen, Ressourcen und Mitarbeiter sind gemeinsam zu betrachten, wenn eine gute Gesamtlösung angestrebt wird.

Zu bedenken ist stets, dass optimierte Lösungen Pufferzeiten und -bestände reduzieren. Optimierte Systeme sind anfälliger. Ein Funktionieren verlangt eine gute Datenerfassung verbunden mit Aufbereitung, Informationslogistik und einer Koordination durch eine Leitstelle.

Name	Symbol	Bedeutung
Bedienpunkte	$S_i$	Dieses sind alle Punkte, an denen eine beliebige Tätigkeit auszuführen ist.
Job	$J_i$	Eine zu erledigende spezifizierte Tätigkeit, wie z. B. eine Beladung oder eine Anlieferung. Ein Job kann aus mehreren Teiljobs bestehen und ist mit der Position auf einem Auftrag oder Lieferschein zu vergleichen.
Auftrag	$O_i$	Eine oder mehrere auf Grund einer Regel zusammenhängende auszuführende Tätigkeiten bzw. Jobs. Ein Fahrauftrag kann aus einem Belade- und mehreren Anlieferaufträgen bestehen, ein Anlieferauftrag aus mehreren anzufahrenden Entladestellen, den Jobs.
Betriebshof	$G_i$	Ort, an dem Fahrzeug und Fahrer gewechselt werden.
Garage	$G_i$	Wie ein Betriebshof, jedoch müssen die Fahrzeuge vollständig entleert sein.
Depot	$D_i$	Hier wird ein Fahrzeug beladen. Die hier benötigte Arbeitszeit wird nicht unbedingt der Lenkzeit hinzugerechnet.
Umlauf	$\mathcal{U}$	Fahrt, die an einem Betriebshof beginnt und an einem Betriebshof endet.
Deponie	$D_i$	Wie Depot, nur dass das Fahrzeug entladen wird.
Streckenführung	$S_i$	Dieses ist ein Kantenzug nach Definition .35.
Tour	$\mathcal{T}$	Die Menge aller Bedienpunkte, die zu einem Umlauf gehören [Dom90].
Route	$\mathcal{R}$	Jede Anordnung $\mathbf{S} = S_{i_1}, \dots, S_{i_n}$ , d. h. die Reihenfolge, in der die Bedienpunkte einer Tour anzufahren sind, heißt Route [Dom90]. Eine Route ist eine spezielle Form einer Lösung $\mathcal{L}$ eines Problems.
Gebiet	$\mathcal{G}$	Alle Bedienpunkte, die einer bestimmten Ressource, wie einem Fahrer oder einem Lkw zugeordnet sind.
<b>Bestellung</b>		Ein bei einem Lieferanten aufgebener Auftrag, d. h. eine erwartete eingehende Lieferung.
<b>Lieferung</b>		Ein von einem Kunden aufgebener Auftrag, d. h. eine erwartete ausgehende Lieferung.

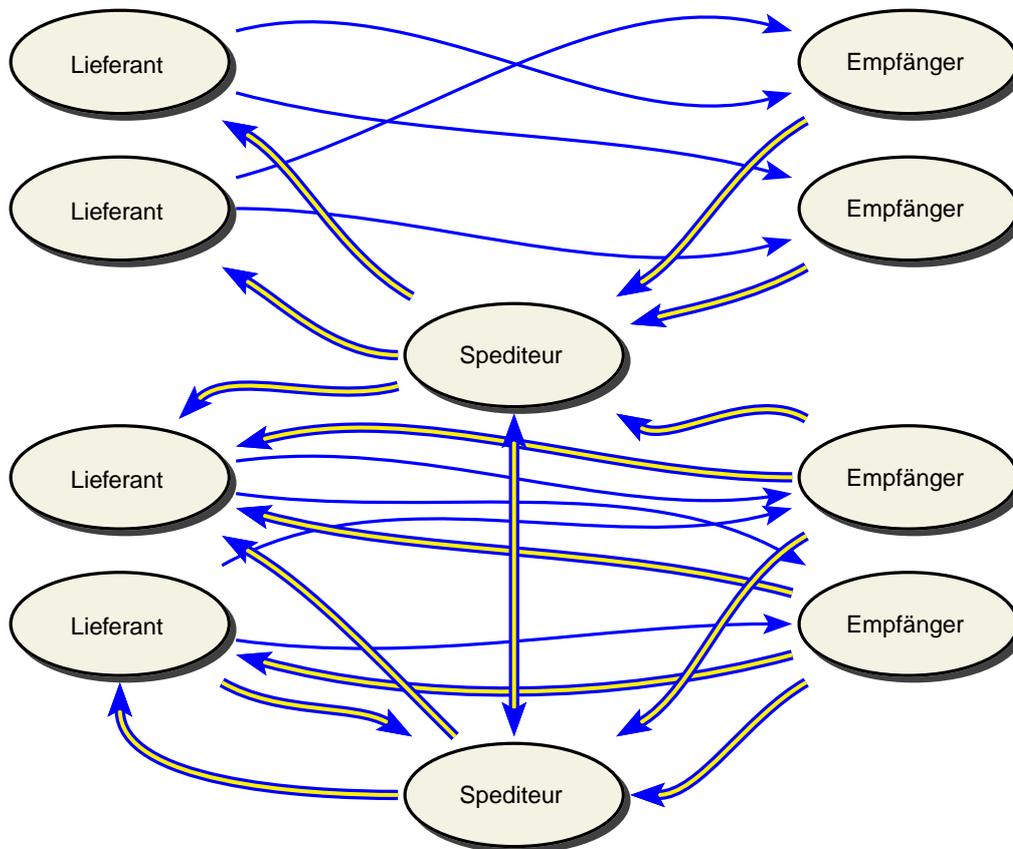
Tab. 10.3: Lexikon verwendeter Begriffe

Variable	Beschreibung
$k_T$	fixe Fahrzeugkosten je Umlauf
$k_S$	fixe Fahrzeugkosten je Schicht
$k_{i,j}^{(s)}$	variable Streckenkosten zwischen zwei Punkten $S_i$ und $S_j$
$k_i^{(l)}$	variable Streckenkosten je gefahrenem Kilometer
$k_i^{(t)}$	variable Arbeitskosten je gefahrene Stunde
$k_i^{(v)}$	variable Arbeitskosten an Knoten $S_i$

Tab. 10.4: Fahrzeugkostenarten

	richtig falls	Zeitfenster	Zuladung
<	kleiner	vor 12:00 h	weniger als 12t
∈	zwischen	zwischen 11:00 und 13:00h	-
∉	nicht zwischen	nicht zwischen 11:00 und 13:00h	
>	größer	nach 12:00 h	mindestens 12 t

**Tab. 10.6:** Klassen für Straffunktionen



**Abb. 10.11:** Behälterkreisläufe mit Voll- und Leergut

### 10.3.6 Stapler- und Behälterleitsystem

Mit den Informationen eines solchen Staplerleitsystems lässt sich dieses zu einem Behälterleitsystem ausbauen. Eine entscheidende Voraussetzung hierfür ist wieder eine geeignete Datengrundlage. Die erforderlichen Daten werden großteils aus der Steuerung der Gabelstapler und der Lkws bereit gestellt, fehlende müssen ergänzt werden.

Zur Ortung der Behälter werden diese, wie in Abbildung 9.3a zu sehen, beim Aufnehmen mit dem Gabelstapler verknüpft. Das Fahrzeug registriert diesen Behälter und über die Position des Gabelstaplers ist dann auch die des Behälters bekannt. Konkrete Anforderungen legen fest, ob die Ortung mittels Transpondern erfolgen kann oder ein *indoor positioning system* eingesetzt werden muss und ob die Behälter mittels Transpondern, Barcode oder Klarschrift zu kennzeichnen sind.

**Weisheit 10.11** Ein Stapler- und Behälterleitsystem ist eine dynamische Routenplanung in einem eng begrenzten Gebiet.

Die erfassten Daten bilden die Grundlage für ein internes **Behältermanagement**. Die Verknüpfung dieser Daten mit denen aus der Lkw-Steuerung ermöglichen eine werkübergreifende Optimierung des Waren- und Behälterstromes und somit ein übergreifendes Behältermanagement. Mit der Definition eines geeigneten Regelwerkes kann dieses vollautomatisiert erfolgen. Hier drängt sich der Einsatz von **Softwareagenten** nahezu auf, die nur noch in Ausnahmesituationen einen Disponenten anrufen müssen [JS07].

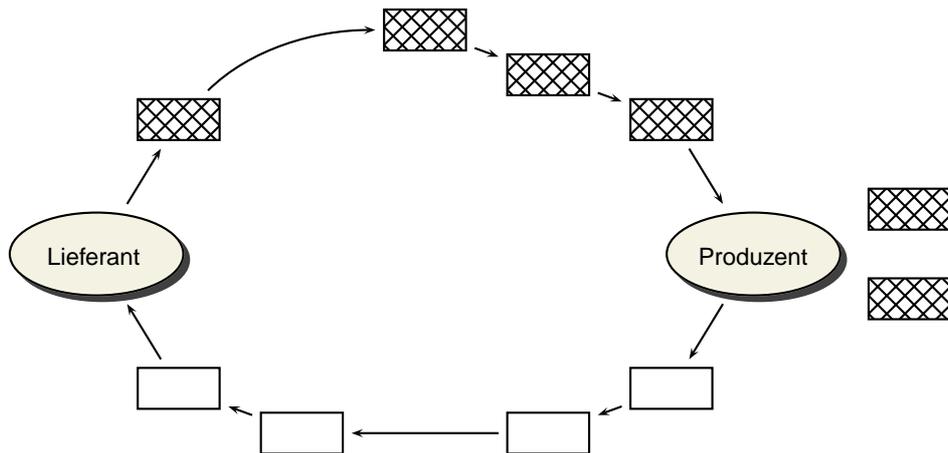


Abb. 10.12a: Behälterumläufe

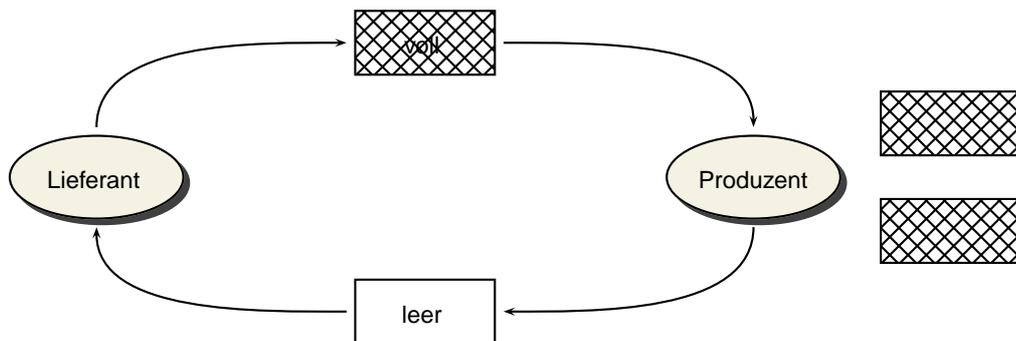


Abb. 10.12b: Behälterumläufe und Lagerung

### 10.3.7 Behältermanagement

Bei der Diskussion des Behältermanagements kommt die Bedeutung unterschiedlicher Zeithorizonte wieder voll zum Tragen. Im letzten Abschnitt ging es um die sehr zeitnahe Bereitstellung voller und Abholung leerer Behälter, deren Beschaffung möglicherweise bereits Jahre zurückliegt. Damals wurde entschieden, welche und wie viele Verpackungen heute zur Verfügung stehen. Im letzten Teil wurde auch deutlich, dass Leergut stets zu beachten ist. War ein leerer Behälter an dem Montageort *nur* aufzunehmen, so ist er beim Lieferanten zwingend erforderlich, um die dort produzierten Teile verpacken zu können. Ist das Bereitstellen leerer Verpackungen im Falle von Einwegverpackungen noch recht einfach, müssen Mehrwegverpackungen bzw. **Mehrwegtransportverpackungen** (MTV) stets als Objekte eines geschlossenen Systems betrachtet werden. Abbildung 10.11 zeigt, dass dieses nicht unbedingt Kreisläufe sind. Nennen wir sie einfach Rundläufe, in denen sich jeder Behälter bewegt. Diese müssen nicht unbedingt wieder zu ihren Ausgangspunkten zurückkehren, jedoch werden sie einige Punkte immer wieder erreichen. Sind Rundläufe für Spezialgestelle eines Automobilherstellers noch sehr überschaubar, stellen Rundläufe für Paletten in einem Poolsystem ein sehr komplexes System dar [KLZ05]. Beschädigungen, Verluste und Diebstähle führen dazu, dass das System ständig mit neuen Paletten versorgt werden muss. Die in Abbildung 6.3a gezeigten Verläufe sind auch auf Palettenbestände übertragbar. Wie in Abbildung 10.11 kann ein solches System in miteinander verbundene Teilsysteme zerfallen. So werden gleiche Paletten wie Europaletten sowohl im Baustoffhandel als auch im Lebensmitteleinzelhandel eingesetzt. Ein Lebensmittelhändler möchte dabei sicher eine höhere Qualität, bezogen auf Sauberkeit, als ein Bauunternehmer. Gleichzeitig leidet eine Palette auf einer Baustelle eher als im Regal eines Discounters, auf dem Außenlager eines Discounters genau so wie auf einer Baustelle. Der Einsatz von Spediteuren führt dazu, dass Paletten zwischen verschiedenen Branchen gemischt werden. Kann es sinnvoll sein, die verschiedenen Rundläufe zu trennen? Ein Nachteil hierbei ist eindeutig, dass durch die kleiner werdende Anzahl je einzeltem Rundlauf die durch die großen Zahlen möglichen Optimierungspotenziale von Poolbetreibern sinken. Aber wieso soll ein Unternehmen oder eine Branche Kosten übernehmen, die dadurch entstehen, dass andere für einen hohen Reparatur- oder Pflegeaufwand sorgen? Bei ungefähr 80 Millionen Holzpaletten, die in Deutschland im Umlauf sind und ungefähr 40 Millionen Neuanschaffungen jedes Jahr [KLZ05], können Änderungen viel Geld sparen oder kosten.

Ein Charakteristikum eines derartigen Poolsystem ist es, dass die einzelnen Behälter nicht einem Akteur im Rahmen einer logistischen Kette zugeordnet werden können. Anders sieht dieses bei Behältern aus, die nur für bestimmte Teile eines Autos geeignet sind und ausschließlich von Produzenten und deren Lieferanten und Logistikern angefasst und bewegt werden. Die Planung der Umläufe kann mit den hier vorgestellten Methoden zur Routen- und Transportplanung unterstützt werden. Allerdings sind Eigenschaften und Parameter der Produktion von Lieferant und Produzent zu berücksichtigen. So muss die Frage beantwortet werden können, wie reagiert werden soll, wenn aufgrund einer Betriebsversammlung Lkw nicht wie geplant entladen werden, bedingt dadurch die Produktion verzögert wird und die leeren Behälter entsprechend später beim Lieferanten wieder erscheinen. Ein solches Ereignis ist lange im Voraus bekannt und kann entsprechend vorausschauend geplant werden, den Ausfall einer Maschine oder den Unfall eines Fahrzeugs, die zu gleichen Konsequenzen führen, sicher nicht.

Wichtig für all diese Planungen ist es, wie viele Behälter dem System zur Verfügung stehen, eine Frage innerhalb des Bestandsmanagements für Behälter. Im Beispiel des Textilservices auf Seite 45 stellt sich die gleiche Frage: Wie viele Ausstattungen Bettwäsche und Handtücher benötigt eine Hotel. Im Regelfall Fragen, für die sämtliche Einflussgrößen bekannt und von den Betreibern selbst bestimmt werden können. Wovon hängt die Anzahl bei der Versorgung eines

Produzenten durch einen Lieferanten ab?

- Verbrauchsrate an der Senke
- Produktionsrate an der Quelle
- Arbeitszeiten an Quelle und Senke
- Fahrzeiten
- Wartezeiten an Quelle, Senke und zwischengelagerten Spediteuren
- Kapazität der Fahrzeuge
- Transporthäufigkeit

Der entscheidende Faktor ist die Anzahl der passiven Behälter, die transportiert werden, und die, die gelagert werden, wie in den Abbildungen 10.12a und 10.12b gezeigt und die Zeit, die sie bei einem dieser beiden Vorgänge auf einem Fahrzeug oder in einem Lager stehen.

In einem solch einfachen Fall, wie in den Abbildungen 10.12a und 10.12b mit einer Quelle und einer Senke kann eine erste Abschätzung mittels

$$\text{Anzahl benötigter Behälter} = \text{Umlaufdauer} \times \text{Anzahl Behälter je Umlauf} \quad (10.21)$$

erfolgen. Die Anzahl der benötigten Teile steckt implizit sowohl in der *Umlaufdauer* als auch in der *Anzahl der Behälter je Umlauf* [JW06].

Nehmen wir ein einfaches Beispiel, in dem ein Empfänger von einem einzigen Lieferanten Ware erhält und die Produktionsraten  $\lambda$  bei Lieferant und Empfänger mit zwölf Behälter je Tag gleich sind. Im einfachsten Fall liefert ein Spediteur zwölf volle Behälter beim Empfänger ab und nimmt im Gegenzug zwölf leere mit.

Am Verbaort werden in diesem Moment mindestens 24 Behälter benötigt. Mindestens, weil auch noch Behälter in der Produktion stehen, diejenigen, die mit der letzten Lieferung angekommen und nun leer sind.

Der Spediteur fährt mit diesen leeren Behältern zum Lieferanten und tauscht sie gegen zwölf volle. Es werden auch hier zwölf weitere Behälter benötigt, insgesamt also 36. In diesem idealisierten Fall ist die Gesamtanzahl der Behälter unabhängig von der Umlaufdauer. Die Anzahl ist gleich der dreifachen Menge, die in einem Transportvorgang geliefert wird. Es muss vorausgesetzt werden, dass der Transport so schnell ist, dass die Behälter immer rechtzeitig ankommen. Beträgt die Fahrzeit  $t_s$ , so kann eine minimale Anzahl  $N_{\min}^{(B)}$  berechnet werden:

$$N_{\min}^{(B)} = 2t_s \cdot \lambda \quad (10.22)$$

Bei einer Fahrzeit  $t_s$  einem Viertel Tag je Strecke beträgt für  $\lambda = 12$  Behälter je Tag die minimale Anzahl sechs Behälter. Die Anzahl der Fahrten wird hierbei maximal, hier zwei je Tag.

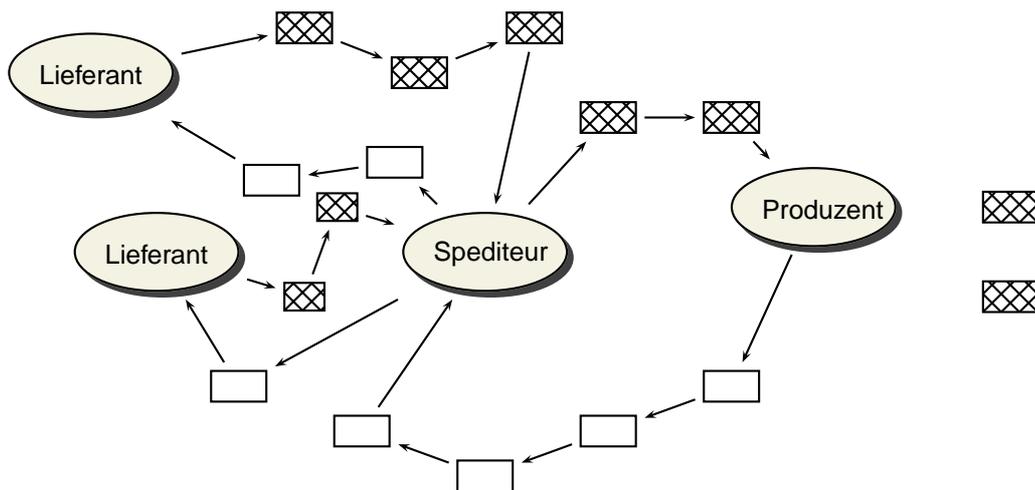
Dieser Vorgang verlangt weiter eine exakte zeitliche Synchronisation der Abläufe, da an beiden Orten ein unmittelbarer Austausch erfolgt, ein unrealistisches Szenario. Andernfalls muss das Fahrzeug warten oder ein zweites eingesetzt werden. Im ersten Fall entstehen Wartezeiten, im zweiten werden weitere Behälter benötigt, da zwischen Anliefern und Abholen volle und leere an dem Verbaort verbleiben müssen. Eine analoge Überlegung trifft auf den Lieferant zu. Ist die Transportzeit kürzer als die Reichweite an Quelle und Senke können die Behälter irgendwo auf dem Transportweg zwischengelagert werden, um jeweils zum richtigen Zeitpunkt anzukommen. Die Anzahl der benötigten Behälter bleibt gleich, es gibt einen zusätzlichen Bruch in der Transportkette verbunden mit einer Erhöhung von Aufwand und Fehlerwahrscheinlichkeit. Die Situation ändert sich, wenn für den Transport mehrere Tage benötigt werden. Zusätzlich zu den bereits erforderlichen Behältern werden weitere benötigt, die sich im Transit befinden, wie in

Abbildung 10.12a zeigt. Die Gesamtmenge ist direkt von der Transportdauer und den transportierten Einzelmengen abhängig. Abbildung 10.12b zeigt eine im Ergebnis gleiche Situation, bei der die im Transit befindliche Menge in ein Lager gebracht wird.

**Weisheit 10.12** *Bestandsmäßig sind Lagerhaltung und Transport gleich. Lagerung und Transport führen jeweils zu einer Verzögerung.*

Wie lassen sich die benötigten Mengen beeinflussen? Aus Gleichung 10.21 folgt, dass einer der beiden Faktoren kleiner werden muss. Die Umlaufdauer ist minimal, wenn die Orte von Sender und Empfänger zusammenfallen, d. h. die Maschine, die das benötigte Teil herstellt, direkt neben der steht, die das Teil verbaut. Würden beide synchron und mit gleicher Rate laufen, könnte jeweils ein Teil direkt vom Sender zum Empfänger gebracht werden. Sind die Orte, wie in den Abbildungen gezeigt, voneinander getrennt, kann die Anzahl der Behälter, maximal bis zur minimalen Anzahl aus Gleichung 10.22 bei kleineren Mengen je Transportvorgang reduziert werden. Diese kleiner werdende Anzahl ist gegen die Auslastung der Fahrzeuge abzuwägen.

Die Situation ändert sich nochmals, wenn Sender und Empfänger in unterschiedlichen Raten und Schichten produzieren. So kann vor vielen Werktoeren ein immer gleicher Effekt beobachtet werden: Morgens und insbesondere Montags stauen sich die Fahrzeuge vor den Toren. Langfristig festgelegte Anlieferstrategien, die bei Betrachtung durchschnittlichen Aufkommens gut geeignet sind, können abweichenden Ereignissen zu Engpasssituationen oder schlechten Auslastungen führen.



**Abb. 10.12c:** Behälterumläufe und Lagerung

Kommen weitere Lieferanten und weitere Produktionsstätten hinzu und erfolgt die Anlieferung über einen Dienstleister, der die Sendungen zwischenlagert und dann wieder für die Anlieferung geeignet kommissioniert, d. h. als *break bulk* und *consolidation point* bzw. **Auflöse-** oder **Konsolidierungspunkt**, arbeitet, ergibt sich eine Möglichkeit, eine fehlende Synchronisation auszugleichen, aber möglicherweise zu Lasten einer höheren Behälteranzahl. Die Teilbereiche

werden jeweils überschaubarer, wenn sie isoliert betrachtet werden, jedoch kann das Gesamtsystem ineffizienter werden. Es werden zusätzliche Bestände angelegt, die Fehler verdecken. Auch hier kann nur mittels geeigneter Simulationen und dem Einsatz entsprechender Leitstellen eine effiziente Lösung gefunden und betrieben werden.

### 10.3.8 Lagerplatzoptimierung

Werden die Positionen der Behälter erfasst und in einem zentralen System verwaltet, dann verhalten sich obiges Poolsystem oder eine Werkhalle wie ein *virtuelles Lager*, in dem nicht nur die Zuordnung von Ware zu Lagerplätzen dynamisch ist, sondern auch die Position und Größe der Lagerplätze. Die Bereitstellung von Behältern kann dann aber wieder in Analogie zur Bereitstellung in einem Lager betrachtet werden. In beiden Fällen, die nun zu einem geworden sind, gibt es mehrere sich teilweise widersprechende Ziele, die angestrebt werden. So wird ein hoher Bestand angestrebt, um eine hohe Materialverfügbarkeit zu gewährleisten und ein niedriger Bestand, um die Kapitalbindungskosten und den Platzbedarf niedrig zu halten. Wir werden uns hier auf die dynamischen Aspekte konzentrieren, die mit der Bereitstellung zusammen hängen.

- Die Bearbeitung eines Auftrags soll möglichst schnell erfolgen.
- Die Produktivität ermittelt über alle Aufträge soll möglichst hoch sein.

Aufgabenstellung und damit verbundene Ziele können analog zur Routenplanung formuliert werden. Die anzufahrenden Kunden  $C_i$  sind hier die anzufahrenden Lagerplätze der auszulagernden Artikel, die Betriebshöfe die Standorte der Bediengeräte  $B_i$  und die Depots die Auslagerungsplätze  $D_i$ . Als Ziel soll angestrebt werden, dass die Auslagerung möglichst schnell erfolgt. Folgende Funktion beschreibt die Güte einer Lösung:

$$\mathcal{G}(\mathcal{L}) = \sum_{l=1}^{N_C-1} p_{l,l+1} k_{l,l+1} \quad (10.23)$$

$k_{l,l+1}$  ist der Aufwand für die Strecke  $C_l \rightarrow C_{l+1}$ , Länge, Zeit oder Kosten. Für eine Optimierung im operativen Betrieb ist  $p_{l,l+1} = 1$  zu setzen, für die Bestimmung einer optimalen Lagerplatzvergabe kann  $p_{l,l+1}$  als Wahrscheinlichkeit dafür genommen werden, dass der entsprechende Weg zurückzulegen ist und  $\mathcal{G}(\mathcal{L})$  wird zu einem erwarteten Weg, analog dem erwarteten Nutzen aus Gleichung (7.3a). Mit der Funktion (10.23) lassen sich optimale räumliche Verteilungen der Lagerplätze ermitteln. Dieses gilt gleichermaßen für die Platzvergabe in realen Lagern wie auch für die Platzvergabe für Behältern in einem virtuellen Lager.

Wird jeweils in einem Vorgang genau ein Artikel ausgelagert, d. h.  $N_C = 1$ , dann ist  $S_1 = B_1$  die Position des Bediengerätes,  $S_4 = B_1$  die Position des Bediengerätes nach dem Auslagerungsprozess,  $C_1 = S_2$  der Lagerort des Artikels und  $S_3 = D_1$  die des Auslagerungsortes. Für die zurückzulegende bzw. erwartete Strecke gilt:

$$\mathcal{G}^{(i)} = p_i \cdot (k_{B_1, C_i} + k_{C_i, D_1} + k_{D_1, B_1}) \quad (10.24)$$

Mit den Ergebnissen einer Datenanalyse, wie in Kapitel 6.1 beschrieben, können die Wahrscheinlichkeiten für jeden einzelnen Artikel bestimmt und damit der erwartete Weg berechnet werden. Eine Lagerplatzvergabe ist dann optimal, wenn der insgesamt zu erwartende Aufwand minimal

wird, d. h. bei einem Sortiment mit  $N_C$ -Artikeln oder Behältern muss

$$\mathcal{G} = \sum_{i=1}^{N_C} \mathcal{G}^{(i)} \quad (10.25)$$

minimal werden. Auch hier wird es das Ergebnis sein, das die Artikel, auf die häufig zugegriffen wird, zusammen gelagert werden sollen, aber nicht mehr aufgrund einer Einteilung in einige wenige Klassen. Ein Programm kann in regelmäßigen Abständen überprüfen, ob die aktuelle Verteilung noch die beste ist. Eine starre ABC-Zonung kann somit einer dynamischen weichen [Koh05].

In dieser Betrachtung wird jeweils ein Artikel in einem Auslagerungsprozess betrachtet und die optimale Lösung ist konsequenterweise unabhängig von der relativen Lage der einzelnen Artikel zueinander. Werden mehrere Artikel gemeinsam ausgelagert, sind Wege zwischen diesen zurückzulegen. Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass jeweils nur zwei Artikel  $C_i$  und  $C_j$  gemeinsam transportiert werden können. Dann wird (10.24) zu

$$\mathcal{G}^{(i)} = p_i \cdot (k_{B_1, C_i} + p_{i,j} \cdot (k_{C_i, C_j} + k_{C_j, D_1}) + \cdot k_{D_1, B_1}) \quad (10.26)$$

Der Weg hängt nun nicht mehr nur von den Strecken zwischen Standort und Artikeln sondern auch von den Abständen zwischen den Artikeln und Wahrscheinlichkeiten ab, mit denen diese zurückgelegt werden müssen, also von den Ergebnissen einer Warenkorbanalyse.

Werden Datenanalysen und Optimierungsrechnungen während des Betriebs aktualisiert, kann beurteilt werden, ob es sich lohnt, Artikel zu verlagern. Dieses kann auf Leerfahrten zu einem Ort oder bei möglichen Stillstandzeiten geschehen. Insbesondere bei Lagern, in denen Einlagerungs- und Auslagerungsvorgänge zyklisch wechseln, kann dieses zu erheblichen Einsparpotenzialen führen.

Datenanalysen können auf einem Rechner ausgeführt werden, dem aktuelle Verkaufszahlen zur Verfügung stehen, Optimierungsverfahren dort, wo alle relevanten Daten zusammengeführt sind. Meldungen sind an die Orte, an denen die entscheidenden Personen – die Personen, die entscheiden – sitzen. Es entsteht **virtual spider**, eine *virtuelle dezentrale Leitzentrale*, bei der Intelligenz und Daten auf verschiedene Stellen verteilt sind, die einen effizienten Betrieb ermöglicht, bei dem frühzeitig Abweichungen vom geplanten Ablauf erkannt und entscheidungsunterstützende Vorschläge bereitgestellt werden.



*Some people see what they see and they say "Why?"  
I see what I dream and say "Why not?"*

Robert F. Kennedy



## ***Virtual Spider* - eine virtuelle dezentrale Leitzentrale**

### 11.1 Die 8 r der Logistik

In den letzten Kapiteln sind Möglichkeiten technischer und mathematischer Natur beschrieben worden. Probleme wurden angesprochen, aber keine einzige Lösung beschrieben, die unmittelbar und sofort in die Praxis übertragen werden kann. Oder doch? Prognosen auf der Grundlage vorliegender Daten, Routenplanung, Lkw-Steuerung, Analysemethoden oder Bestandsmanagement sind nur einige Beispiele, die unmittelbar genutzt werden können. Was fehlt sind einfache Formeln, in die nur noch Zahlen eingesetzt werden müssen. Können diese für komplexe logistische Systeme erwartet werden? Sollte die Andler'sche Losgrößenformel (8.3) wirklich genutzt werden? Wenn diese einfachen und brauchbaren Formeln nicht gefunden werden, ist dann der Wunsch nach Einfachheit unerfüllbar? Soll Einfachheit überhaupt angestrebt werden, oder ist Vielfalt anzustreben? Einfachheit und Vielfalt stellen keinen Widerspruch dar. Einfachheit muss sich nicht auf die Formeln beziehen, sondern auf die zu beachtenden Regeln und die einzusetzenden Methoden. Ein Bienenvolk oder ein Ameisenhaufen meistern alle Aufgaben, die zum Weiterleben erforderlich sind. Beim Betrachten wird nicht der Eindruck erweckt, als ob es sich um ein langweiliges triviales Gemeinwesen handeln würde. Kann dieses ein Vorbild für logistische Netzwerke sein und ist das ***Internet der Dinge*** [Hom06; BH07] eine entsprechende Lösung? Wird es Behälter geben, die ihren eigenen Weg zum Ziel finden? Wenn ja, wird es dann der optimale Weg sein? Wie viele Generationen wird es dauern, bis sich selbst organisierende Systeme erfolgreich sein werden? Oder wird es doch eine zentrale Instanz geben, die sich die Entscheidungskompetenz mit dezentralen Systemen teilt? Dieses würde nur dann Sinn machen, wenn diese Zentrale Fähigkeiten hat, die einzelne Individuen nicht haben können. Hier kommt das achte *r* bei den 8 *r* ins Spiel, das Wissen. Ameisen haben im Verlauf ihrer Entwicklung lernen können und diese Informationen an nachfolgende Generationen weitergegeben. Sie haben eine

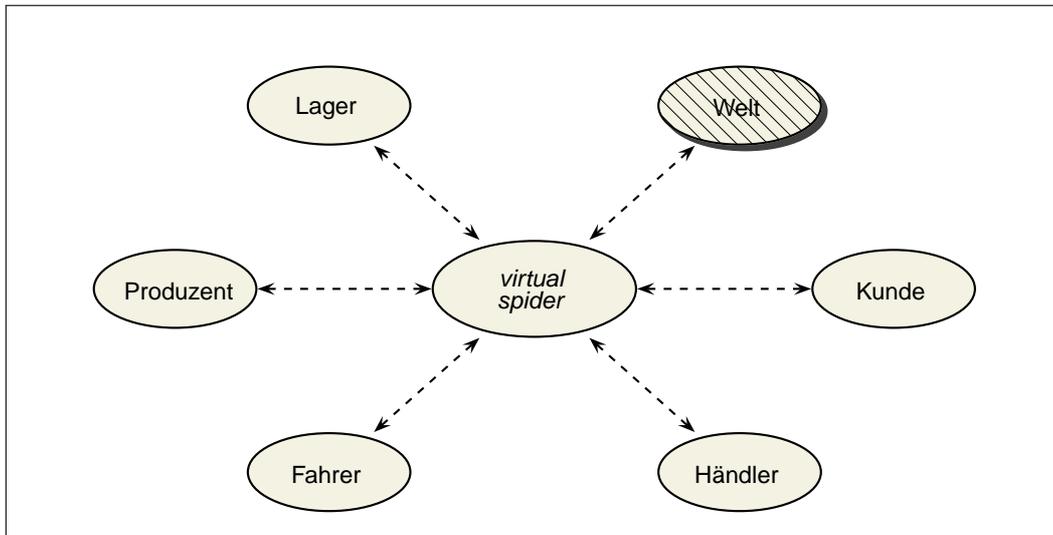
Gemeinschaft entwickelt, in der jedem Individuum eine klar definierte Rolle mit eng begrenzten individuellen Zielen zugewiesen wird. Sie haben sich in einer langsam ändernden Umgebung entwickeln können, ohne von außen ständig neu beplant zu werden. Es ist faszinierend zu beobachten, was diese kleinen Lebewesen mit ihren winzigen Gehirnen leisten. Kann dieses durch **Transponder** oder andere elektronische Bauteile mit eigener Intelligenz nachgeahmt werden? Bauteile, die an Objekten angebracht werden sollen, die Akteuren gehören, die vollkommen unterschiedliche Interessen verfolgen. Ich versuche mir eine Situation vorzustellen, in denen die Software von zwei auszuliefernden Behältern oder Neufahrzeugen mit der eines Lkw *sprechen*, um den letzten freien Stellplatz zu ergattern. Wird einer der beiden Behälter eine Strategie entwickeln, den anderen auszuschalten oder können wir von absoluter Friedfertigkeit in diesen sich selbst organisierenden Systemen ausgehen? Wird er seine Beobachtungen in dieser Situation weitergeben, so dass Erfahrungen gesammelt werden und sich Wissen bilden kann? Software schafft es in Spielen wie Schach, die nach klaren sehr einfachen Regeln ablaufen, besser zu sein als Menschen. Software schafft es auch, Routen zu planen, die denen eines Disponenten überlegen sind. Software schafft es noch nicht, den Gesichtsausdruck eines Kunden, bei dem ein Fahrer verspätet eintrifft, zu deuten und richtig zu reagieren. Es mag sein, dass dieses irgendwann möglich sein wird. Wie mag eine Gemeinschaft solcher elektronischer *Wesen* aussehen? Ob dieses ein theoretisches Konstrukt ist, wird sich zeigen. Würden sie miteinander kommunizieren? Und wenn ja wie? Jeder mit jedem, wie in Abbildung 11.1 zu sehen? Eine Vereinfachung auf einzelne logistische Objekte, wie Behälter, Lkw und Gabelstapler ist leicht vorstellbar – aber nur schwer darstellbar. Auch dieses ist ein Beispiel für eine sehr einfache Struktur – jeder redet mit einem jedem – mit einem schnell sehr **kompliziert** werdenden Aussehen. Oder würden sie wie die *Yrr* in dem Roman von Frank Schätzing miteinander *reden* [Sch05], und dabei nichts vergessen?

In diesem letzten Kapitel soll ein anderer Ansatz skizziert werden, in dem ein Miteinander von Menschen und Maschinen vorgesehen ist. Der Mensch soll in diesem System seine Fähigkeiten einsetzen und die Maschinen mit ihren Stärken nutzen. Eine Fähigkeit des Menschen ist es, zu lernen, d. h. Wissen zu erlangen und dieses einzusetzen. Maschinen sollen einige Entscheidungen eigenständig treffen und bei denen, die sie nicht treffen können, Menschen bei ihrer Entscheidungsfindung unterstützen. Dieses System soll so sein, dass es mit vorhandenen Möglichkeiten im Sinne des Miteinander von **theoretischer** und **experimenteller Logistik** mitwachsen kann. Das Aussehen einer individuellen Lösung kann sehr unterschiedlich sein, die zugrundeliegenden Strukturen jedoch möglichst einfach. Als Ziel wird angestrebt, in logistischen Netzwerken Verschwendung zu vermeiden und dabei die Interessen der einzelnen Akteure nicht zu ignorieren.

**Weisheit 11.1** *In einem logistischen Netzwerk sind alle Elemente gleich wichtig.*

Dieses ist die Konsequenz aus der Forderung nach der Vermeidung von Verschwendung. Gäbe es unwichtige Elemente, könnten sie gestrichen werden.

Beeindruckende Realisierungen von Netzen sind die von Spinnen gebauten. Dieses informiert den Eigentümer nur über das, was er wissen muss. Weder bei einem Windstoß noch bei einem Regentropfen verlässt die Spinne seinen Unterschlupf, aber bei Beute sofort. Bei Beschädigungen kann die Spinne das Netz ohne Schwierigkeiten reparieren, sogar bei Wind. Dieses Netz beobachtet die Spinne von geeigneter Warte aus. Von Spinnen können wir auch lernen, dass nicht jede Netzform geeignet ist. Wieso sollte es dann in logistischen Netzen so sein, dass jedes Netz unabhängig von Aufbau und Struktur nicht nur funktionsfähig sondern auch noch effizient



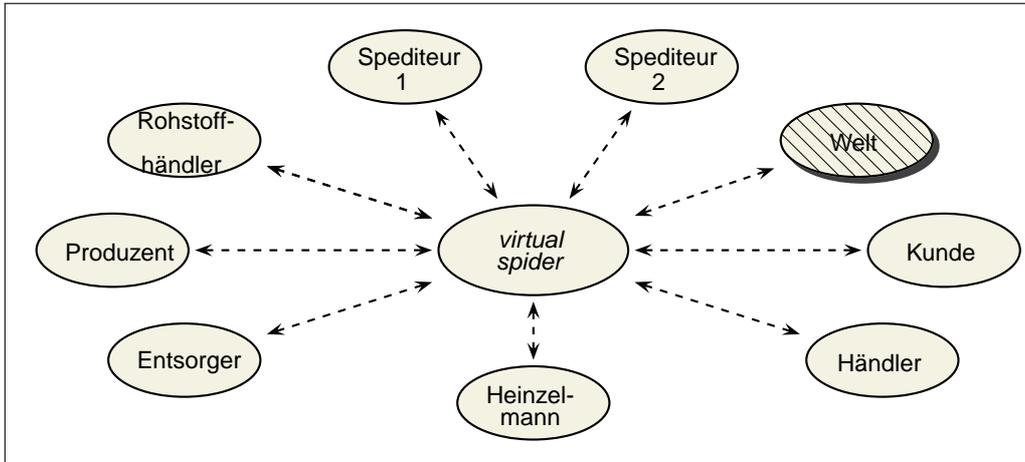
**Abb. 11.1:** Kommunikation in einem logistischen Netzwerk für die Produktion von Tomatenketchup – Variante I

ist. Ein Spinnennetz kann nicht allen äußeren Einflüssen widerstehen. Wird an ihm mit, für Spinnen, brachialer Gewalt gezerrt, bleiben nur unansehnliche Fetzen. Wann sind äußere Einflüsse auf logistische Netze von derart brachialer Gewalt, dass nur Fragmente bleiben?

Wenn Menschen nicht einmal in der Lage sind, simple Spinnennetze allein auf dem Papier zu konstruieren, können sie dann komplexe, lebende Netze, bestehend aus dummen, intelligenten und egoistischen Maschinen und intelligenten und egoistischen Menschen entwerfen oder so *erschaffen*, dass sie definierten Anforderungen genügen?

Da wir nicht tausende von Generationen Zeit zum Probieren haben und Verluste nicht ins Unendliche treiben können, sind Evolution und natürliche Auslese kaum brauchbar. Natürliche Auslese ist *learning by doing*, gezieltes Vorgehen *learning by training* [TLS02]. Das *Internet der Dinge* kann kaum durch ausschließliches *Tun* erfolgreich werden, *Training* ist unabdingbar, Trainer sind erforderlich. Ereignisse aus realisierten Prozessen müssen wahrgenommen und zu Erfahrungen verarbeitet werden. Realisierungen in der Wirklichkeit müssen genutzt werden, um Modelle zu verbessern, die dann genutzt werden können, um Prozesse zu verbessern, aber auch dazu, um beteiligte Akteure zu schulen.

Mit *virtual spider* – einer virtuellen dezentralen Leitzentrale wird ein Konzept vorgestellt, das helfen kann, dieses Dilemma aufzulösen. Wie der Name sagt und auch in Abbildung 11.2 zu erkennen, ist *virtual spider* eine Art Spinnennetz mit einer Zentrale. Die netzbildende Strukturen, nicht das Netz werden festgelegt, Entscheidungsregeln vorgegeben, nicht die Reaktionen auf bestimmte Ereignisse. Die Zentrale ist zu vergleichen mit der eines Kraftwerkes, die einen Überblick über alle wichtigen Parameter ermöglicht und in der Maschinen Menschen dabei unterstützen, Entscheidungen zu treffen. Hierzu müssen die Daten erfasst, aufbereitet und als Informationen weiter geleitet werden. Diese Aufgabe der **Informationslogistik** wird ergänzt um wichtige Funktionen, von denen einige in Abbildung 11.3 aufgeführt sind. Da all diese Funktionen, egal ob zentral oder dezentral realisiert, Softwarerealisationen sind, kommt hier dem Versionsma-



**Abb. 11.2:** Kommunikation in einem logistischen Netzwerk für die Produktion von Tomatenketchup – Variante II

nagement eine fundamentale Bedeutung zu. Die Natur hat sehr einfache und teilweise brutale Mechanismen entwickelt, mit Individuen umzugehen, die gravierende Fehler aufweisen. Diese sollten wir in der Logistik vermeiden.

Mehrere Kraftwerke sind in einem Netz miteinander verknüpft und müssen alle gemeinsam und jedes für sich die richtigen Entscheidungen treffen. Natürlich könnten in einem Stromnetz Erzeuger und Verbraucher mit verschiedenen Frequenzen und Spannungen arbeiten, jedoch nur mit zusätzlichem Aufwand und zum Unwohl der Kunden. Um dieses Sprachengewirr beherrschbar zu machen, kommt *virtual spider* auch die Funktion eines Übersetzers zu. Übersetzen bedeutet Aufbereiten in eine für jeden berechtigten Anwender verstehbare Form. Wichtig ist, dass auf allen Stufen die Konsistenz der Daten sichergestellt ist.

Ist die Leitzentrale eines Kraftwerkes noch überschaubar, gibt es in der Logistik Netze unterschiedlicher Art und auf verschiedenen Ebenen mit Akteuren, die ihre individuellen Ziele verfolgen. Es wird daher in der Logistik mehr als einen Kontrollraum geben, in dem alle entscheidenden Personen zusammen kommen und Daten und Intelligenz müssen von dieser Leitzentrale auf verschiedene Zentren verteilt werden, die Zentrale wird *virtuell*. So wie es mehrere Ameisenhaufen, Bienenvölker und weitere Gemeinwesen auf der Erde gibt, wird es mehrere Zentralen oder Netze geben. Solche, die koexistieren, solche die gegeneinander kämpfen und solche, die füreinander arbeiten. Auch in der Logistik kann es die in Abbildung 11.4 zu sehenden mehreren Zentralen geben, die wiederum selbst als Knoten in dem Netzwerk aufgefasst werden können. Diese großen und kleinen Zentralen können ähnlich, sie müssen nicht gleich sein. **Selbstständigkeit** und fraktale Strukturen sind in der Natur von zentraler Bedeutung und haben ihre Bewährungsprobe längst bestanden.

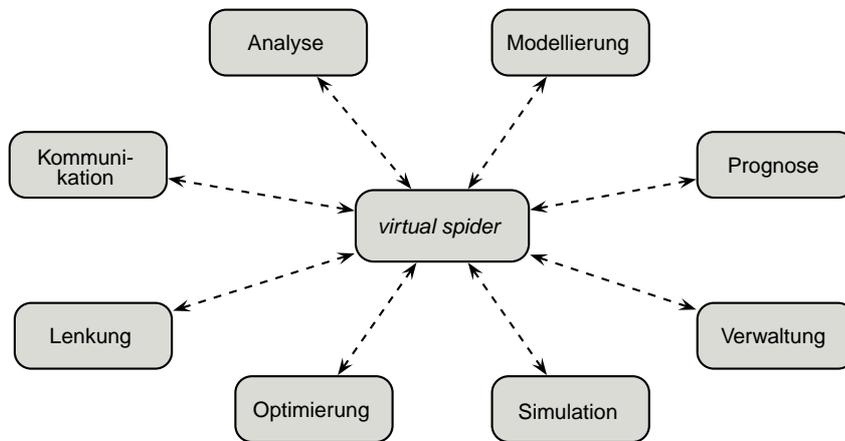


Abb. 11.3: Virtual spider – Funktionsansicht

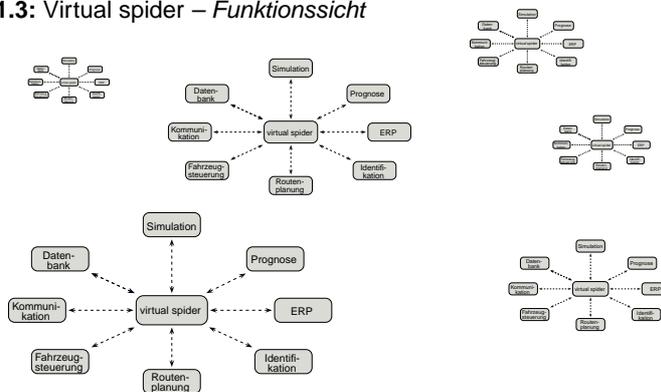


Abb. 11.4: Das Netz der Netze – little virtual spiders become one virtual spider

## 11.2 Supply net event management - *SNEM*

Wieso soll es schon wieder etwas Neues geben, wieso soll dann zu all dem, was bereits vorhanden ist, mit *SNEM* noch etwas hinzukommen? In nahezu jeder Veröffentlichung und jedem Vortrag über Logistik werden doch *supply chain management* und *supply chain event management*, **SCM** oder **SCEM**, als die logistischen Konzepte angepriesen. Eine Vielzahl anderer Begriffe wie *demand chain management*, *efficient consumer response* (ECR), *enterprise resource planning* (ERP) oder *customer relationship management* (CRM), verfolgen alle das selbe Ziel, Auftragsabwicklungen oder Lieferketten effizienter zu gestalten. Eine der grundlegenden Annahmen des *SCM*-Konzeptes ist es, dass alle Akteure ein und dasselbe Interesse verfolgen. Dieses wird durchaus kontrovers diskutiert [Bre06]. Wird der **Gelderhaltungssatz** ernst genommen, kann es bei Veränderungen insbesondere bei Optimierungen nicht nur glückliche Akteure geben, d. h. dass Interessen nicht nur divergieren sondern auch konkurrieren. Werden Transporte zentral

optimiert und gesteuert, verlieren die, die mit Durchführung der Transporte betraut sind, Geld. Zunächst geht es um die Bestandteile *C* und *E* in SCEM. Bei dem Wort Kette sind es die hiermit verbundenen Assoziationen, die zu Missverständnissen führen. Eine Kette ist linear und inelastisch. Die einfachen Beispiele im ersten Kapitel machten bereits deutlich, dass es keine Lieferketten gibt, sondern nur Netze, besser Bäume. Ein Liefernetz ist, vgl. Definition .36, mathematisch betrachtet ein Baum oder auch mehrschichtiges Netzwerk. Die Glieder einer Kette sind starr miteinander verbunden und nur von den Zustandsgrößen benachbarter Glieder abhängig. In einem Netz sind Zustände eines Knotens abhängig von allen benachbarten. Noch wichtiger ist die Elastizität, die mit einem Netz, wie mit einem Spinnennetz verbunden wird. Bäume sind fest und gleichzeitig beweglich. Logistische Strukturen sind nicht deterministisch, wie es von einfachen mechanischen Systemen, wie einer Kette bekannt ist, Chaotisches sollte vermieden werden. Auch wenn *event* sowohl in *SCEM* als auch *SNEM* enthalten ist und unmissverständlich Ereignis heißt, scheint es in der aktuellen Diskussion oftmals mit Störgröße gleichgesetzt zu werden.

**Weisheit 11.2** *Ereignisse können positiv oder negativ sein. Das Gleichsetzen von Ereignissen mit Störgrößen blendet die Hälfte aller Ereignisse aus.*

Im Rahmen von *SNEM* soll *event* als das genutzt werden, was es ist, ein Ereignis. Und ein Ereignis ist zunächst ein Datum, das zu einer Information werden kann. Auch hier ist keinerlei Wertung vorgenommen, die manchmal, weil voreilig, unzutreffend sein kann, wie folgendes Beispiel zeigt:

#### **Beispiel .50 Pünktlichkeit als Störgröße**

*Ein Unternehmen, das täglich 500 Lkw erwartet, vereinbart mit seinen Spediteuren Zeitfenster. Zwanzig Fahrzeuge bekommen als Zeitfenster zwischen 10:00Uhr und 11:00Uhr zugewiesen. Alle Fahrzeuge kommen zwischen 10:54Uhr und 10:58Uhr an und sind somit pünktlich.*

Ist dieses ein Ereignis, das als Störgröße angesehen werden muss? Dieses Ereignis stört den normalen Betrieb, ist jedoch so eingetreten wie vereinbart, und folglich ein geplantes Ereignis. Eine Eigenschaft von Ereignissen, dass beim Eintreten geplanter Ereignisse keine Kompensation erforderlich ist [Kla04], gilt nicht. Kann dieses durch eine sehr präzise Planung erreicht werden, z. B. dadurch, dass Zeitfenster noch feiner abgestimmt vorgegeben werden? Sollen Zeitfenster in der Art zwischen 10:56Uhr 10:58Uhr angegeben werden? Eine naive Idee. In einem System, von dem wir nur einen kleinen Ausschnitt betrachten und einen noch kleineren beeinflussen können, erscheint dieses undenkbar. Werden wir logistische Systeme so auslegen können, dass sie mit dem Klimawandel Schritt halten? Wenn sich die seit Jahren geäußerten Erwartungen bestätigen, werden Transporte und sich weltweit erstreckende Netze sicher anders bewertet werden müssen als es heute der Fall ist. Egal was passiert, das was wir entwickeln, muss **reaktionsfähig** und **lernfähig** sein.

Hierzu bedarf es eines guten Verständnisse der Systeme. Deskriptive und phänomenologische Beschreibungen sind für die Ausgestaltung komplexer Zusammenhänge nur bedingt geeignet, **strukturelle Informationen** unterstützt durch Metamodelle erleichtern das Vorgehen ungemein. Fehler in Metamodellen haben gravierendere Auswirkungen als in Einzellösungen, können aber sehr viel schneller eliminiert werden. Hier hilft die aus den Naturwissenschaften bekannte *gnadenlose Macht des Experimentes*: Eine Theorie wird erst dann akzeptiert, wenn es einen experimentellen Nachweis gibt. Natürlich konnte Einstein behaupten, dass sich Licht nicht geradlinig

ausbreitet, aber er wurde erst gefeiert, als der Nachweis gelang. Die *Entdecker* oder besser *Erfinder* der *kalten Kernfusion* sind nach kurzer Popularität in tiefster Versenkung verschwunden.

*SNEM stellt ein Konzept für Planung, Leitung und Prognose logistischer Netzwerke dar, in dem theoretische Vorhersagen mittels Simulationen überprüft und durch Experimente validiert werden.*

Dieses bezieht sich auf Material- und Informationsflüsse, die mit gleicher Wichtigkeit betrachtet werden müssen. Die hier vorgestellten Methoden und technischen Möglichkeiten bieten vielfältige Voraussetzungen, dieses zu realisieren.

**Abb. 11.5:** *Eine Bildschirmansicht zu virtual spider mit Steuer- und Eingabefeldern und verschiedenen Ausgaben.*

*Virtual spider* ist ein EDV-technisches Konzept, für das erste Prototypen mit ersten Funktionalitäten, wie z.B. *goodsynctrffic*, *goodsynCRoLo* oder *goodsynCFore* für Simulations-, Optimierungs-, Analyse- und Prognoseaufgaben bereits realisiert sind.

#### **Exkurs 11.1 SNEM und Nullemissionslogistik**

*Der Anspruch der Logistik ist ganzheitlich. Logistik reduziert sich jedoch vielfach darauf, Kosten in einem eng umgrenzten Raum senken zu wollen. Wird bei dem Essen in München zu dem Rinderfilet aus Argentinien, Wein aus Chile mit frischen Früchten aus Neuseeland serviert, kann Logistik nur noch Schlimmstes dämpfen, aber Verschwendung nicht wirklich vermeiden. Das Vermeiden von Verschwendung ist das zentrale Thema der Logistik. Verschwendung scheint sich in den letzten Jahren nur auf Geld zu beziehen, Betrachtungen zu knapper werden Ressourcen haben an Bedeutung verloren. Auch wenn es nicht dem aktuell modernen share holder value-Denken entspricht, bietet SNEM zusammen mit den verfügbaren technischen Möglichkeiten Chancen, Logistik auch ressourcenschonend einzusetzen. Die in diesem Buch vorgestellten Konzepte lassen sich hervorragend auch auf die Umwandlung und Bereitstellung von Energie anwenden. Die Steuerung von Blockheizkraftwerken zusammen mit anderen dezentralen Systemen ist der von logistischen Netzen durchaus ähnlich. Die Verknüpfung der dort denkbaren Strategien [ZLJ00] mit modernen Hybridmotoren eröffnet bisher unvorstellbare Möglichkeiten. So können Batterien außerhalb der Fahrzeuge aufgeladen werden, indem die Wärmeversorgung einer Halle mit einer Stromversorgung verknüpft wird. Dieses senkt die Energiekosten, schont die Umwelt und gestattet eine räumlich sehr flexible Planung von Logistikflächen. Gleichzeitig könnte der hier erzeugte Strom auch genutzt werden, um Verbrauchsspitzen abzufangen, die von den Energieversorgern mit hohen Preisen belegt sind. Jeder mit einem Hybridmotor ausgestattete Lkw wird zu einem kleinen Kraftwerk. Könnten die Absenkbewegungen von Gabelstaplern auch noch genutzt werden, gäbe es weitere Potenziale, die den Energieverbrauch senken würden. Routenplanungen und Konzepte zur Materialbereitstellung könnten überdacht werden. Die hier vorgestellten Methoden werden dadurch aber nicht überfordert. Ist dieses eine aktive Beeinflussung der Energieversorgung durch die Logistik, so ist eine hervorragende Logistik für eine effiziente Nutzung nachwachsender Rohstoffe zur Energieversorgung unverzichtbar. Sowohl Standortplanung für Felder und Lagerflächen, als auch die Routenplanung können die Gesamtenergie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz deutlich verbessern. Zu den bisher genannten Aufgaben kommen neue, spannende hinzu. Aufgaben, deren Lösungen auch für Regionen interessant sind, in denen Großkraftwerke nicht gebaut werden können.*

## 11.3 *goodSync* und *virtual spider*

Diese Verbindung zur Energieversorgung lieferte auch die Idee für *goodSync* und *virtual spider* – einer virtuellen dezentralen Leitzentrale. *GoodSync* stellt eine logische Umsetzung des *SNEM* Konzeptes dar, *virtual spider* eine technische. Dieses ist eine mögliche, die in naher durchaus anders aussehen kann. Die Bildschirmansicht einer aktuellen Version zeigt Abbildung 11.4.

Die Anforderungen sind wie folgt formuliert:

- Für Anwender muss *virtual spider* wie eine Leitzentrale erscheinen.
- Verschiedene Anwender müssen mit anderen Anwendern, gesteuert über Zugriffsrechte, Daten austauschen können. Anwender dürfen nur Zugang zu den Daten haben, die für sie sichtbar sein sollen.
- Alle Module, Daten und Informationen müssen konsistent sein.
- Module müssen dort funktionsfähig sein, wo sie benötigt werden.
- Für unterschiedliche Einsatzgebiete gibt es unterschiedliche Arbeitsumgebungen.
- Kein Knoten darf ein Sicherheitsrisiko darstellen.
- *Virtual spider* muss selbstlernend sein.

*Virtual spider* übernimmt Funktionalitäten sogenannter *information broker*. Hierzu muss *virtual spider* Daten von dezentralen Einheiten sammeln oder sie bei Bedarf abrufen, um sie dann richtig aufbereitet weiterleiten zu können. Dieses muss weit mehr sein als ein *data warehouse*, in dem Daten bereit gestellt werden und bei Bedarf von Menschen abgerufen werden können. Es soll entschieden werden können, ob ein Datum für einen bestimmten Nutzer eine Information ist und auch, wie wichtig diese ist, um hieraus abzuleiten, wie diese weitergeleitet werden soll. Dieses Weiterleiten muss mit der Möglichkeit verknüpft sein, abhängig von der Wichtigkeit, laufende Prozesse unterbrechen zu können. Für die Beurteilung der Wichtigkeit sind zuverlässige Prozessbeschreibungen mit einer Bewertung sämtlicher Alternativen erforderlich. Da diese oftmals erst in der Zukunft realisiert werden, müssen diese mit geeigneten Prognoseverfahren analysiert werden. Hier ist der Einsatz von Simulationen und Optimierungen unverzichtbar. Die Aufgaben klassischer *ERP*-System werden damit teilweise übernommen. Alle administrativen Tätigkeiten, wie Buchhaltung und Vertragswesen verbleiben in den vorhandenen Systemen und tauschen über geeignete Schnittstellen erforderliche Daten aus. Um dieses möglich zu machen, bedarf es eines Repositoriums, an dem sich alle Anwendungen orientieren. Werden in einem Auftrag von einem Vertriebsmitarbeiter mit einem Kunden Lieferzeiten und -termine vereinbart, muss der Logistiker mit diesen ohne den Einsatz eines Interpreters arbeiten können, um alle erforderlichen *richtigen* Zeitpunkte bzw. Zeiträume festzulegen. Dieses bedarf der Abstimmung oder zumindest Kommunikation mit externen und internen Akteuren – Partnern oder Kontrahenten. Unverzichtbare Akteure sind aber auch Maschinen. Was hilft es, die Wichtigkeit einer Information zu erkennen, den richtigen Empfänger ermittelt zu haben und diese dann per *SMS* an ein Mobiltelefon zu senden, dessen Akku leer ist? Was hilft es dem Empfänger, die *SMS* zu erhalten, durch einen Signalton über den Eingang informiert zu werden und dann auf dem Display nichts erkennen zu können, weil dieses wegen zu niedriger Temperatur den Dienst verweigert. *Virtual spider* muss zusätzlich die Funktion eines *modul managers* übernehmen, der alle notwendigen Daten aller erforderlichen Module kennt und auch diese zu Informationen aufbereitet. Im Falle der *SMS* sollte der Sendende vielleicht wissen, dass der Empfänger die *SMS* technisch empfangen hat, der Sendende sollte mit Sicherheit wissen, dass die Nachricht beim Empfänger angekommen und

dieser diese zur Kenntnis genommen hat. Es ist nicht ausreichend mitzuteilen, dass irgendein dem Empfänger zugeordnetes Gerät diese empfangen hat.

Technische Komponenten sind in ausreichendem Maße verfügbar. Bekannte Optimierungsalgorithmen bieten so hohe Einsparpotenziale, dass die Ausgaben für die Datenbeschaffung und -verarbeitung oftmals in wenigen Monaten oder manchmal gar Wochen amortisiert sind. Es macht keinen Sinn, noch Jahre auf perfekte Transponder zu warten, wenn mangelnde Datenqualität durch Plausibilitätsüberlegungen sofort und kostengünstig kompensiert werden kann. Immer wieder neue Lagerplatzanordnungen, neue Supermärkte für die Materialbereitstellung zu realisieren, mit weiteren Finanzierungsvarianten zu spielen, neue Versionen eines Programmes zum Schreiben von Briefen zu installieren oder all die Aktivitäten, die tagtäglich beobachtet werden können, helfen nur selten, Verschwendung nachhaltig zu vermeiden. Es müssen gute Lösungen gefunden werden, gleichgültig ob alte, neue oder eine Vermischung von beiden. Logistik ist eine Herausforderung für ein ganzheitliches Vorgehen. Weder Physiker, Betriebswirte, Ingenieure oder gar Juristen können es allein schaffen. Logistische Systeme können nicht wie Maschinen frei konstruiert werden, auch funktionieren sie nicht gemäß rechtsfester Verordnungen. Logistische Systeme sind lebende Systeme, für die die Gesetze der Natur nicht außer Kraft gesetzt werden können. Um diese effizient verändern zu können, müssen diese systematisch beobachtet werden, die Aufgabe der Experimentatoren. Voraussetzung für eine erfolgreiche Gestaltung ist ein Team, bestehend aus Praktikern, die praktische Probleme auf die wirklich wichtigen Elemente reduzieren, Mathematikern und Technikern, die bereit sind, sich mit solch bodenständigen Problemen zu beschäftigen, und Kaufleute, die konkrete und quantitative Methoden entwickeln und nutzen möchten. Ein Team, das den Vergleich der tatsächlichen Ergebnisse seiner Arbeit mit den erwarteten und den Wettbewerb mit anderen nicht scheut. Auf der Grundlage guter Modelle, theoretischer Beschreibungen, kann zielgerichtetes Experimentieren Prozesse verstehen helfen und in effiziente Realisierungen münden. Der Aufbau logistischer Netze ohne Theorie und Experiment wird ein kostspieliges Unterfangen. Kurzfristig brauchbare Lösungen und schnellen Erfolg zu finden, ist ein Kinderspiel, der nachhaltig richtige Einsatz verfügbarer Ressourcen muss das Ziel sein. Der Aufbau und Betrieb logistischer Netze mit Theorie und Experiment macht Spaß, weil es viel Neues zu entdecken und zu entwickeln gibt – und echte Probleme zu lösen sind.

Das *Rad* muss nicht neu erfunden werden, aber es werden auch neue Räder gebraucht.

**Weisheit 11.3** *Die Logistik braucht Vordenker, Umdenker und Querdenker  
– aber auch Nachdenker.*

Aus *Großkopf – Spedition und Logistik* wird *Großkopf – Logistik mit Grips*.

# Literatur

- [ACN06] ACNielsen. *Consumer-centric category Management*. John Wiley& Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2006.
- [AF74] Marcello Alonso und Edward J. Finn. *Fundamental University Physics Volume III*. Addison Wesley Massachusetts, 1974.
- [Alp+05] Paul Alpar u. a. *Anwendungsorientierte Wirtschaftsinformatik*. 4. überarbeitete Auflage. Friedrich Vieweg & Sohn, Wiesbaden, 2005.
- [BG93] Immanuel M. Bomze und Wilfried Grossmann. *Optimierung – Theorie und Algorithmen*. Mannheim u. a.: BI Wissenschaftsverlag, 1993.
- [BH07] Hans-Jörg Bullinger und Michael ten Hompel, Hrsg. *Internet der Dinge*. Berlin Heidelberg: Springer, 2007.
- [BJS95] Achim Bachem, Michael Jünger und Rainer Schrader. *Mathematik in der Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1995.
- [BK06] Christoph Beierle und Gabriele Kern-Isberner. *Methoden wissensbasierter Systeme*. 3. Auflage. Friedrich Vieweg & Sohn, 2006.
- [BL98] Roman Boutellier und Alwin Locker. *Beschaffungslogistik : mit praxiserprobten Konzepten zum Erfolg*. München: Carl Hanser Verlag, 1998.
- [Bra93] Johannes Garrelt Braker. *Algorithms and Applications in Timed Discrete Event Systems*. Delft: Delft University of Technology, 1993.
- [Bre06] Wolf-Rüdiger Bretzke. „SCM:Sieben Thesen zur zukünftigen Entwicklung logistischer Netzwerke“. In: *SupplyChainManagement* 3 (2006), S. 7–15.
- [Cha06] Gregory Chaitin. „Die Grenzen der Gewissheit“. In: *Spektrum der Wissenschaft* (2006), S. 54–61.
- [Dah06] Markus Dahm. *Grundlagen der Mensch-Computer-Interaktion*. München u.a.: Pearson Studium, 2006.
- [DD96] Wolfgang Domschke und Andreas Drexl. *Logistik:Standorte*. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1996.
- [Dol00] Ralph Dolmetsch. *eProcurement – Sparpotential im Einkauf*. München: Addison Wesley, 2000.
- [Dom90] Wolfgang Domschke. *Logistik:Rundreisen und Touren*. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1990.
- [Dom95] Wolfgang Domschke. *Logistik:Transport*. München: R. Oldenbourg Verlag GmbH, 1995.

- [DSW93] Gunter Dueck, Tobias Scheuer und Hans-Martin Wallmeier. „Toleranzschwelle und Sintflut: neue Ideen zur Optimierung“. In: *Spektrum der Wissenschaft* 3 (1993), S. 42–51.
- [EW93] Franz Eisenführ und Martin Weber. *Rationales Entscheiden*. Berlin: Springer Verlag, 1993.
- [Fin02] Klaus Finkenzeller. *RFID-Handbuch*. Carl Hanser Verlag, München, 2002.
- [FMW00] Bernhard Fleischmann, Herbert Meyr und Michael Wagner. „Advanced Planning“. In: *Supply Chain Management and Advanced Planning*. 2000, S. 57–71.
- [Gad03] Andreas Gaddatsch. *Grundkurs Geschäftsprozessmanagement*. 3. Auflage. Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn, 2003.
- [Ger06] Harald Gerking. „Die letzten 20 Meter sind der Knackpunkt“. In: *log*. 2 (2006).
- [GJ99] Jonathan Gross und Jay Jellen. *Graph Theory and its Applications*. Boca Raton: CRC Press, 1999.
- [Gru02] Wolfgang Grundmann. *Operations Research – Formeln und Methoden*. Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2002.
- [GS89] Solomon Garfunkel und Lynn A. Steen. *Mathematik in der Praxis*. Heidelberg: Spektrum-der-Wissenschaft-Verlagsgesellschaft, 1989.
- [GT05] Hans-Otto Günther und Horst Tempelmeier. *Produktion und Logistik*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- [Gud99] Tim Gudehus. *Logistik*. Berlin u. a.: Springer, 1999.
- [Hin+00] Peter Hines u. a. *Value Stream Management*. 1. Aufl. Pearson Education Limited, 2000.
- [Hol92] John H. Holland. „Genetic Algorithms“. In: *Scientific American* 4 (1992), S. 44–50.
- [Hom06] Michael ten Hompel. „Wenn die Waren selber denken“. In: *ideas* 3 (2006), S. 6–9.
- [HTW97] Alain Hertz, Eric Taillard und Dominique de Werra. „Tabu search“. In: *Local search in Combinatorial Optimization*. Hrsg. von Emile Aarts und Jan Karel Lenstra. Chichester et al.: John Wiley & Sons, 1997, S. 121–136.
- [JB91] Siegfried Jetzke und John T. Broad. „Evaluation of higher order matrix elements in atomic physics using convergence acceleration methods“. In: *Int. J. Mod. Phys. C* 2 (1991), S. 377–382.
- [JS07] Siegfried Jetzke und André Schneider. „Real time location System: Integriertes Transport- und Behältermanagement“. In: *SupplyChainManagement* 2 (2007), S. 43–48.
- [JS99] Reinhardt Jünemann und Thorsten Schmidt. *Materialflusssysteme*. Springer, Berlin u.a., 1999.
- [JW06] Siegfried Jetzke und Hanns-Christian Wüstner. „Transport- und Behältermanagement in der Supply Chain“. In: *SupplyChainManagement* 3 (2006), S. 41–47.
- [Kal06] Josef Kallrath. „TriMatrix - ein hochflexibles Framework zur Optimierung von Real-World-Problemen mittels MILP“. In: *OR News* 27 (2006), S. 6–8.
- [Kin94] Werner Kinnebrock. *Optimierung mit genetischen und selektiven Algorithmen*. München: Oldenbourg Verlag GmbH, 1994.

- [Kla04] Oliver Klaus. „Geschäftsregeln im Supply Chain Event Management“. In: *SupplyChain Management 2* (2004).
- [Kle05] Rolf Klein. *Algorithmische Geometrie*. 2. Auflage. Berlin: Springer, 2005.
- [KLZ05] Ekart Kuhn, Volker Lange und Peter Zimmermann. *Palettenmanagement*. 1. Auflage. München: Verlag Heinrich Vogel, 2005.
- [Koh05] Jens Kohagen. „Das Ende vom ABC“. In: *logpunkt 4* (2005), S. 52–53.
- [Lau06] Ulrich Lauther. „An extremely fast, exact algorithm for finding shortest paths in static networks with geographical background“. In: *preprint* (2006).
- [Leh06] Franz Lehner. *Wissensmanagement*. München: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [Mat05] The MathWorks. *MATLAB, The Language of Technical Computing*. Version 7. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2005.
- [Mer93] Peter Mertens. *Prognoserechnung*. Würzburg: Physica-Verlag, 1993.
- [Mer97] Peter Mertens. *Lexikon der Wirtschaftsinformatik*. Berlin: Springer, 1997.
- [Mic92] Zbigniew Michalewicz. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. Berlin Heidelberg New York: Springer Verlag, 1992.
- [Mül85] Wolfgang Müller, Hrsg. *Duden „Bedeutungswörterbuch“*. Mannheim: Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG, 1985.
- [MWH98] Spyros Makridakis, Stephen C. Wheelwright und Rob J. Hyndman. *Forecasting – Methods and Applications*. 3. Aufl. John Wiley & Sons Inc, 1998.
- [Neu06] Klaus Neusser. *Zeitreihenanalyse in den Wirtschaftswissenschaften*. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2006.
- [Nie92] Harald Niederreiter. *Random Number Generation and Quasi-Monte Carlo Methods*. Montpellier: Capital City Press, 1992.
- [NM93] Claus Neumann und Martin Morlock. *Operations Research*. München: Carl Hanser Verlag, 1993.
- [NW70] John Needleman und Albert Wunsch. „A general method applicable to the search for similarities in the amino acid sequence of two proteins“. In: *Journal of Molecular Biology* 43.3 (1970), S. 443–453.
- [Ohn93] Taiichi Ohno. *Das Toyota Produktionssystem*. Frankfurt am Main: Campus Verlag, 1993.
- [Pen89] Roger Penrose. *Computerdenken – Die Debatte um künstliche Intelligenz, Bewußtsein und die Gesetze der Physik*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1989.
- [Pfo95] Hans-Christian Pfohl. *Logistiksysteme*. 5. Auflage. Berlin u. a.: Springer, 1995.
- [Pöp05] Christoph Pöppe. „Beglücke die Welt, aber übernehm dich nicht“. In: *Spektrum der Wissenschaft* 1 (2005), S. 102–105.
- [Pre+92] William H. Press u. a. *Numerical Recipes in FORTRAN – The Art of Scientific Computing*. New York: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1992.
- [PS96] Jörg Pirron und Richard Spieß. „Simulationsgestützte Planung zur Wartung von ICE-Zügen“. In: *Spektrum der Wissenschaft* (1996), S. 120.
- [RCB06] Alan Rushton, Phil Croucher und Peter Baker. *The handbook of Logistics and Distribution Management*. 3<sup>rd</sup> edition. London und Philedelphia: Kogan Page, 2006.

- [Rec73] Ingo Rechenberg. *Evolutionsstrategie*. Stuttgart: Friedrich Frommann Verlag, 1973.
- [RN04] Stuart Russel und Peter Norvig. *Künstliche Intelligenz – Ein moderner Ansatz*. 2. Auflage. München et al.: Pearson Studium, 2004.
- [Run00] Thomas A. Runkler. *Information Mining*. Braunschweig/Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn, 2000.
- [SCB97] David Simchi-Levi, Xin Chen und Julien Bramel. *The Logic of logistics*. New York: Springer, 1997.
- [Sch02] Paul Schönsleben. *Integrales Logistikmanagement*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2002.
- [Sch05] Frank Schätzing. *Der Schwarm*. Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuchverlag, 2005.
- [Sch07] Frank Schlichting. *chirp spread spectrum*. private Mitteilung. 2007.
- [Sch95] Christof Schulte. *Logistik*. München: Verlag Franz Vahlen, 1995.
- [Sch96] Bart de Schutter. *Max-algebraic system theory for discrete event systems*. Katholieke Universiteit Leuven, 1996.
- [Sch98] August-Wilhelm Scheer. *Wirtschaftsinformatik*. 2. Auflage. Berlin: Springer, 1998.
- [Sei87] Walter Seifritz. *Wachstum, Rückkopplung und Chaos*. München: Carl Hanser Verlag, 1987.
- [Sha48] C.E. Shannon. „A Mathematical Theory of Communication“. In: *The Bell System Technical Journal* (1948).
- [SHF94] Eberhard Schöneberg, Frank Heinzmann und Sven Feddersen. *Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien*. 1. Auflage. Bonn, Paris: Addison-Wesley, 1994.
- [Shi93] Shingeo Shingo. *Das Erfolgsgeheimnis der Toyota - Produktion*. Landsberg/Lech: Moderne Industrie, 1993.
- [Swe06] Patrick J. Sweeney. *RFID für Dummies*. Wiley-VCH Verlag Weinheim, 2006.
- [TLS02] Dan Tapping, Tom Luyster und Tom Shuker. *Value stream management*. Productivity Press, 2002.
- [Voß06] Herbert Voß. *PSTricks*. Lehmanns Fachbuchhandlung, 2006.
- [Wei07] Harald Weiss. „RFID - Auf dem Prüfstand“. In: *Der Handel* 3 (2007).
- [Wöh96] Günter Wöhe. *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. München: Verlag Franz Vahlen, 1996.
- [Wol97] Stephen Wolfram. *Das Mathematica Buch - Mathematica Version 3*. Bonn: Addison Wesley, 1997.
- [ZB05] Günther Zäpfel und Roland Braune. *Moderne Heuristiken der Produktionsplanung*. München: Verlag Franz Vahlen GmbH, 2005.
- [Zec01] Ulrike Zechbauer. „Sicherungsetiketten“. In: *Spektrum der Wissenschaft* 1 (2001), S. 116.
- [Zim92] Hans-Jürgen Zimmermann. *Methoden und Modelle des Operations Research*. Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn, 1992.
- [ZLJ00] Henning Zindler, Benno Lendt und Siegfried Jetzke. „Simulierter Betrieb“. In: *Brennstoff, Wärme, Kraft* 3 (2000), S. 52.

+1