

Reihe: Telekommunikation @ Mediendienste · Band 14

Herausgegeben von Prof. Dr. Dr. h. c. Norbert Szyperski, Köln, Prof. Dr. Udo Winand, Kassel, Prof. Dr. Dietrich Seibt, Köln, Prof. Dr. Rainer Kuhlen, Konstanz, Dr. Rudolf Pospischil, Brüssel, Prof. Dr. Claudia Löbbecke, Köln, und Prof. Dr. Christoph Zacharias, Köln

PD Dr.-Ing. habil. Martin Engelien
Dipl.-Inf. Jens Homann (Hrsg.)

Virtuelle Organisation und Neue Medien 2002

Workshop GeNeMe2002
Gemeinschaften in Neuen Medien

TU Dresden, 26. und 27. September 2002



JOSEF EUL VERLAG
Lohmar · Köln

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Virtuelle Organisation und Neue Medien 2002 / Workshop GeNeMe 2002 – Gemeinschaften in Neuen Medien – TU Dresden, 26. und 27. September 2002. Hrsg.: Martin Engeliens ; Jens Homann. – Lohmar ; Köln : Eul, 2002

(Reihe: Telekommunikation und Medienwirtschaft ; Bd. 14)

ISBN 3-89936-007-9

© 2002

Josef Eul Verlag GmbH

Brandsberg 6

53797 Lohmar

Tel.: 0 22 05 / 90 10 6-6

Fax: 0 22 05 / 90 10 6-88

<http://www.eul-verlag.de>

info@eul-verlag.de

Alle Rechte vorbehalten

Printed in Germany

Druck: RSP Köln

Bei der Herstellung unserer Bücher möchten wir die Umwelt schonen. Dieses Buch ist daher auf säurefreiem, 100% chlorfrei gebleichtem, alterungsbeständigem Papier nach DIN 6738 gedruckt.



Technische Universität Dresden
Fakultät Informatik • Institut für Angewandte Informatik
Privat-Dozentur Angewandte Informatik

PD Dr.-Ing. habil. Martin Engelen

Dipl.-Inf. Jens Homann

(Hrsg.)

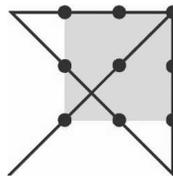


an der

Fakultät Informatik der Technischen Universität Dresden

in Zusammenarbeit mit der
Gesellschaft für Informatik e.V.,
GI-Regionalgruppe Dresden

gefördert von der Klaus Tschira Stiftung
gemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung



am 26. und 27. September 2002

in Dresden

<http://pdai.inf.tu-dresden.de/geneme>

Kontakt: Thomas Müller (geneme@pdai.inf.tu-dresden.de)

B.4. Auftragsbezogene Partnerselektion in Unternehmensnetzwerken unter Benutzung einer multi-kriteriellen Zielfunktion innerhalb einer Ant Colony Optimization

Dr. rer. pol. Tobias Teich

Marco Fischer

Hendrik Jähn

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Technische Universität Chemnitz

1. Motivation

Die stetige Entwicklung moderner Kommunikationstechnologien und die rasch voranschreitende Globalisierung zwingen Unternehmen, ihr wirtschaftliches Handeln zu überdenken. Das klassische Bild des Unternehmens stimmt mit der heutigen ökonomischen Realität in vielen Punkten nicht mehr überein. Spezialisierung und globales Handeln sind für die Wettbewerbsfähigkeit im 21. Jahrhundert von höchster Bedeutung. Die Konzentration auf Kernkompetenzen impliziert dabei die Zunahme von unternehmensübergreifenden Kooperationen mit dem Ziel Kostensenkungspotenziale freizusetzen und auf globalen Märkten präsent zu sein. Vor allem auf kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) wächst der Druck, sich diesen Herausforderungen zu stellen, um das eigene Überleben zu sichern. Dies ist auch die Hauptursache für das vermehrte Auftreten von Produktionsnetzwerken in der Praxis. In derartigen Verbänden sollen die Chancen einer intensiven Kooperation ausgenutzt und regional vorhandenes Potenzial möglichst effektiv und ohne administrativen Überbau gebündelt werden. Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches "Hierarchielose regionale Produktionsnetzwerke" an der Technischen Universität Chemnitz wird ein virtuelles Unternehmensmodell entwickelt, um die Wettbewerbsfähigkeit von KMU zu verbessern. Dieses basiert auf sehr kleinen Leistungseinheiten, den Kompetenzzellen (KPZ).

Durch die auftragsspezifische Auswahl dieser kleinen Einheiten ist es möglich, schnell und flexibel auf sich verändernde Marktanforderungen zu reagieren. Voraussetzung für das effiziente und damit konkurrenzfähige Betreiben dieser Netzwerke ist ein Netzwerkcontrolling zur objektiven Auswahl der Partner für jeden speziellen Auftrag. Außerdem ist die weitestgehende Automatisierung der Prozesse wichtig, um die

gewünschten Kostenvorteile nicht durch Transaktionskosten im Netzwerk zu kompensieren. Ziel ist die Minimierung von ex-ante bekannten nutzensenkenden Eigenschaften, die sich aus der Zusammensetzung bestimmter KPZ in einem Netzwerk schon im Vorfeld der Leistungserstellung ergeben.

Das Konstrukt der KPZ kann als Leistungserstellungseinheit, die hoch spezialisiert, kooperationsabhängig, aber autonom im rechtlichen und betriebswirtschaftlichen Sinn ist, verstanden werden. Die KPZ bilden sich aus bestehenden Unternehmen entsprechend ihrer Kernkompetenzen. Ein Unternehmen kann somit eine oder mehrere KPZ vereinen. Eine KPZ gehört notwendigerweise immer zu einem Unternehmen. Alle KPZ bilden einen Pool mit potenziellen Kernkompetenzen aus dem entsprechend der speziellen Auftragsanforderungen KPZ aktiviert werden.

Durch die Vielzahl von KPZ im Produktionsnetzwerk entsteht auf der einen Seite eine gewollte Konkurrenz zwischen KPZ mit gleichen Kernkompetenzen. Dies fördert die Marktfähigkeit des Netzwerkoutputs. Auf der anderen Seite ergibt sich für das Netzwerkmanagement die Aufgabe der Auswahl der am besten geeigneten KPZ für einen konkreten Auftrag. Dieses Problem gewinnt an Komplexität, weil die Herstellung eines Produktes über unterschiedliche Varianten erfolgen und die Teilleistungen innerhalb dieser wiederum durch mehrere KPZ erfüllt werden kann.

Aus den geschilderten Ausführungen treten zwei Probleme innerhalb der KPZ-Auswahl zu Tage. So sind einerseits die KPZ zu bewerten. Die Schwierigkeit besteht darin, dass mehrere inhaltlich unterschiedliche Kriterien in die Bewertung einfließen und es sich damit um eine multikriterielle Zielfunktion handelt. Andererseits ist die Menge der Alternativen ein Produkt herzustellen zu groß, als dass eine vollständige Enumeration möglich wäre.

Dieser Beitrag soll deshalb eine Möglichkeit aufzeigen, wie mit Hilfe einer Kombination aus Analytical Hierarchy Process (AHP)-Verfahren (zur Bildung eines Zielfunktionswertes) und Nutzung der Ant Colony Optimization (zur Auswahl der Variante mit entsprechenden KPZ) eine gute Lösung des aufgezeigten Problems, auch unter Performancegesichtspunkten, generiert werden kann. Neben der Betrachtung betriebswirtschaftlicher Größen erfolgt zusätzlich eine Untersuchung der sozialen Veträglichkeit der KPZ untereinander.

2. Exkurs: Produktionsnetzwerke

Die gesamte Wertschöpfung vom Rohstoff zum Endprodukt wird selten von einem einzelnen Unternehmen durchgeführt. In der Realität erfolgt die Herstellung eines Endproduktes in einer Vielzahl von Fertigungsstufen in verschiedenen Unternehmen. Das hohe technische Niveau und die hohe Qualität der Produkte wären heutzutage nicht umsetzbar, wenn keine Arbeitsteilung zwischen den Unternehmen, die sich in zunehmendem Maße auf ihre Kernkompetenzen spezialisieren, stattfinden würde. Verstärkt wird diese Tendenz durch Globalisierungseffekte, etwa höheren Konkurrenzdruck, der zu Verdrängungswettbewerb führt. Als Reaktion können beteiligte Unternehmen ihre Kooperationen verstärken, mit dem Ziel ihre Kernkompetenzen intensiv weiterzuentwickeln. Die globale Wirtschaft des 21. Jahrhunderts wird mehr durch konkurrierende Kooperationsnetzwerke, als durch konkurrierende Unternehmen charakterisiert sein [Logi02].

Aufgrund der sich verstärkenden Zusammenarbeit zwischen KMU in sog. Produktionsnetzwerken bedarf es der Entwicklung von neuen Konzepten für das Management von Wertschöpfungsketten. Neben dem bisher realisierten betrieblichen Einsatz der Informationstechnologie, der nur der Optimierung innerbetrieblicher Abläufe dient [Müld99], muss ein automatisiertes Supply Chain Management (SCM) die gesamte Wertschöpfungskette optimieren, damit alle Beteiligten erfolgreich am Markt agieren können.

Die enge Zusammenarbeit entlang des Leistungsprozesses bedeutet die Aktivierung bisher nicht nutzbarer Einsparpotenziale. Statt der lokalen Optimierung der einzelnen Kettenglieder ermöglicht die ganzheitliche Optimierung der Wertschöpfungskette die Erreichung eines globalen Optimums bzgl. Durchlaufzeit, Kosten und anderer Faktoren, wie bspw. den Soft-facts. Eine Möglichkeit dafür bietet die Minimierung der Bestände. Die Abstimmung der Produktion in den beteiligten Unternehmen führt zur Vermeidung des Bullwhip-Effektes, d.h. unbegründete und schwer prognostizierbare Bedarfsschwankungen, die einen Lagerbedarf implizieren. Weiterhin reduziert eine enge Kooperation Reibungsverluste an den Schnittstellen zwischen den Unternehmen. Der gesamte Leistungsprozess gestaltet sich dadurch effizienter, erkennbar in Lagerbestandsminderungen und Zeiteinsparungen. Mittels einer weitgehenden Automatisierung der Prozesse verringert sich das menschliche Fehlerpotenzial und die Antwortzeiten können verkürzt werden. Dies setzt die Verwendung kompatibler und leicht integrierbarer IT-Systeme und den regen Datenaustausch zwischen den Akteuren eines Produktionsnetzes voraus.

In einem hierarchielosen regionalen Produktionsnetz, dem Forschungsgegenstand des Sonderforschungsbereiches 457 an der TU Chemnitz, sollen die Vorteile einer intensiven Kooperation von Unternehmen optimal ausgenutzt werden [Teic01a]. Die Basis für die Bildung eines dynamischen Produktionsnetzwerkes stellt ein langfristig stabiles Unternehmensnetz dar, in welchem potenzielle Teilnehmer auf einer gegenseitigen Vertrauensbasis integriert sind. Dieses strategische Netzwerk kann als ein Ressourcenpool interpretiert werden, innerhalb dessen Rahmenverträge existieren. Zur Abwicklung eines Kundenauftrages bildet sich aus diesem Pool ein temporäres Produktionsnetz mit den notwendigen Kompetenzen heraus [Teic01b].

3. Problemstellung

Zentrale Aufgabe im Netzwerk ist das Sicherstellen der bestmöglichen Durchführung eines Auftrages. An erster Stelle steht dabei die Generierung eines Angebotes bei Kundenanfragen an das Kompetenzzellennetzwerk (KPZN) und die Auswahl der notwendigen KPZ zur Abwicklung der unterschiedlichen Teilleistungen innerhalb eines Auftrages. Dabei ergibt sich für das Netzwerkmanagement ein schwieriges betriebswirtschaftliches Entscheidungsproblem. Dies resultiert aus der Einbeziehung vieler unterschiedlicher Faktoren und Nebenbedingungen.

Ausgangspunkt der Genese eines KPZN für die Herstellung eines konkreten Produktes ist die Erstellung verschiedener Prozessvarianten innerhalb der Arbeitsplanung. Ergebnis ist ein *Prozessvariantenplan* (PVP), der alle technologisch sinnvollen Möglichkeiten zur Herstellung eines Produktes beinhaltet.

Für alle gefundenen Prozessvarianten werden im folgenden Schritt *kategorisierte PVP* gebildet, da die Erreichung eines gewünschten Zwischenproduktes bspw. über die Prozesskategorien Sägen, Drehen oder Bohren möglich ist. Eine weitere Detaillierung erfolgt mit der Zuordnung der Prozesskategorie in Form von Elementen zum *elementarisierten PVP*, d.h. es wird sich für ein konkretes Herstellverfahren entschieden, bspw. für ein bestimmte Art des Trennens, wie z.B. Wasserstrahlschneiden. Abbildung 1 zeigt die Hierarchie der einzelnen PVP.

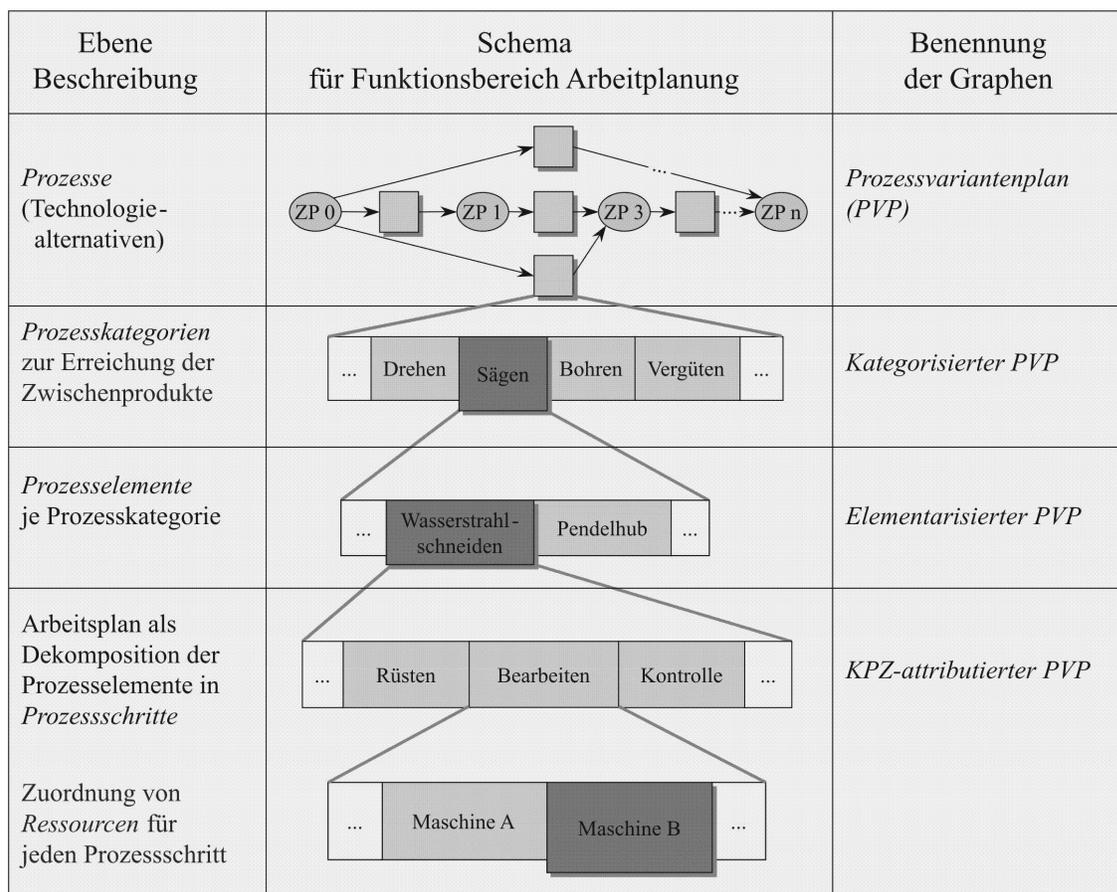


Abb. 1: Hierarchie der PVP

Die elementarisierten PVP sind durch die Nachfragevektoren (NV) genau beschrieben. Diese definieren die notwendigen Arbeitspläne, um ein Zwischenprodukt in ein anderes zu überführen. Für alle Elemente werden entsprechend dem zugehörigen NV entsprechende KPZ gesucht, die potenziell in der Lage sind, diese Leistung zu erfüllen. Das heißt, die Angebotsvektoren (AV) der KPZ müssen zu einem gewissen Grad mit dem NV übereinstimmen. Der nun mit KPZ besetzte elementarisierte PVP wird als *KPZ-attributierter PVP* bezeichnet. Der prinzipielle Aufbau eines KPZ-NV ist in Abbildung 2 dargestellt.

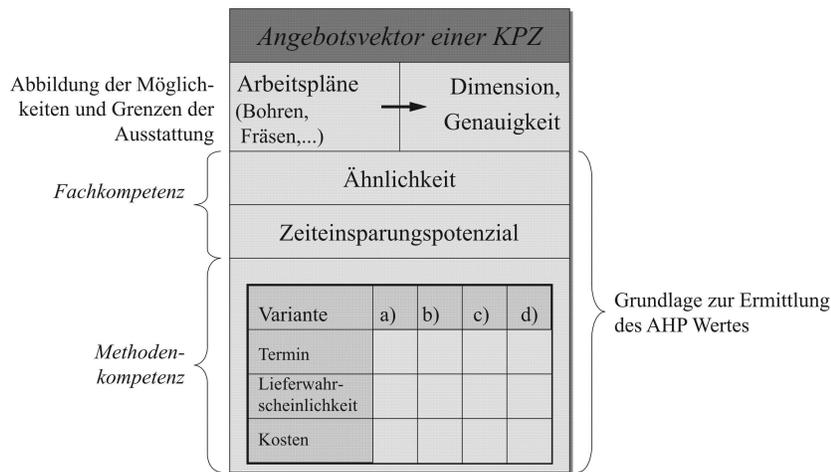


Abb. 2: Angebotsvektor einer KPZ

Der AV soll möglichst exakt die Möglichkeiten einer KPZ zum Ausdruck bringen und diese vergleichbar machen, um eine maschinelle Auswertung und Kombination zu ermöglichen. Berücksichtigt werden verschiedene Eigenschaften mit der Unterscheidung in auftragsabhängig und auftragsunabhängig. Der Kopf des AV beinhaltet die von der Ausstattung fest vorgegebenen Aktivitäten/Funktionen und Arbeitspläne. Es werden die Dimensionen, Genauigkeiten und Ressourcen genannt. Die beschriebenen Größen sind bei gleichbleibender Ausstattung der Ressourcen der KPZ unveränderlich und somit nicht von den Ausprägungen potenzieller Aufträge abhängig.

Die Fachkompetenz (FK) innerhalb des AV spiegelt sich in den beiden Größen Ähnlichkeit und Zeiteinsparung wider. Hinter der Ähnlichkeit verbirgt sich der prozentuale Wert der Übereinstimmung zwischen NV und AV. Dieser Wert ist vom Prozesselement abhängig und damit auftragsabhängig. Ein hoher Wert (max.100%) wird angestrebt, ist allerdings nicht zwingend notwendig. Unter Zeiteinsparungspotenzial ist die durch intensitätsmäßige Anpassung des Produktionssystems mögliche Zeiteinsparung zu verstehen, die bspw. durch Überlappen oder Splitten erzielt werden kann. Vorteilhaft ist die Auswahl einer KPZ mit hohem Zeiteinsparungspotenzial, um spätere Verzögerungen im Wertschöpfungsprozess abfangen zu können.

Im Rahmen der Methodenkompetenz (MK) enthält der AV eine Menge von Wertetriplets, bestehend aus Liefertermin, Lieferwahrscheinlichkeit und resultierenden Kosten [Teic02]. Ausgangspunkt dieser Betrachtung ist der gewünschte Endkundenliefertermin. Über die Ablauforganisation erfolgt die retrograde Terminierung und die Vorgabe eines Zeitfensters für jede KPZ. Innerhalb der KPZ wird

es wiederum verschiedene Alternativen (in Form der Wertetripel) geben, den Auftrag abzuarbeiten. Durch die Einbeziehung aller Wertetripel in die Optimierung bildet sich aus dem KPZ-attributierten PVP ein komplexeres „Unternetz“ - das KPZ-Angebotsnetz. Die Anzahl der Wertetripel (Angebote) einer KPZ bestimmt die Häufigkeit der KPZ in diesem Netz. So kann bspw. eine KPZ X mit den Wertetripeln a, b und c durch die drei Knoten KPZ Xa, KPZ Xb, KPZ Xc abgebildet werden.

Die Werte innerhalb der Fachkompetenz und Methodenkompetenz bilden die Grundlage zur Bewertung der KPZ, speziell der KPZ-Angebote. Die Aggregation zu einem Wert erfolgt mittels AHP-Verfahren [Saat80]. Bei der AHP-Methodologie handelt es sich um eine der bedeutendsten Weiterentwicklungen multikriterieller Entscheidungsverfahren. Es handelt sich dabei um eine Variante der Nutzwertanalyse, bei der endlich viele Alternativen mit Hilfe eines linearen Präferenzindex angeordnet werden. Die Besonderheit des AHP liegt in der Art der Bestimmung der Gewichte und Wertfunktionen durch ein hierarchisch additives Gewichtungsverfahren, innerhalb dessen die zu berücksichtigenden Attribute mehrstufig angeordnet werden können [Teic98, 214]. Mit diesem durch AHP ermittelten Wert wird dem KPZ-Angebot eine „Attraktivität“ zugewiesen, die Grundlage für den später beschriebenen Auswahlalgorithmus ist und die Eingangsgröße als sog. Heuristikwert darstellt.

Im Rahmen der Suche nach einem optimalen KPZ-attributierten PVP werden auch Soft-facts als Ausprägung der im Netzwerk vorhandenen Sozialkompetenz (SK) berücksichtigt. Es handelt sich hierbei um qualitative Größen zur Beschreibung der sozialen Eigenschaften von KPZ, wie bspw. Kooperations- und Kommunikationsfähigkeit, (soziale) Qualifikationen und Kompetenzen, Zuverlässigkeit, Netzwerkfähigkeit sowie Wertvorstellungen wie z.B. Vertrauen. Für die Analyse dieser Soft-facts wurde die Polyedrale Analyse [Walt02] entwickelt. Hierbei handelt es sich um eine mathematische Methode zur Auswertung von Daten, die z.B. durch die Repertory-Grid-Methodik erhoben wurden. Die mit Hilfe der Polyedralen Analyse errechneten Größen Exzentrizität und Konnektivität gehen in die soziale Bewertung einer Herstellvariante im KPZ-Angebotsnetz ein. Die Zugehörigkeit der Größen aus FK, MK und SK illustriert Abbildung 3 am Beispiel eines KPZ-attributierten PVP.

| | | <i>Angebotsvektor der KPZ X</i> | | <i>Angebotsvektor der KPZ Y</i> | | <i>Angebotsvektor der KPZ ...</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|------|---|---------------------|-------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|----|--|---|--|---|--|------|----|---|--|----|--|---|--|--|--|------|-----|---|--|----|--|---|--|
| | | Arbeits- pläne | → Dim., Genauig. | Arbeits- pläne | → Dim., Genauig. | Arbeits- pläne | → Dim., Genauig. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| FK | | Ähnlichkeit | | Ähnlichkeit | | Ähnlichkeit | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Zeiteinsparungs- potenzial | | Zeiteinsparungs- potenzial | | Zeiteinsparungs- potenzial | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MK | | <table border="1"> <tr><td>Var.</td><td>b)</td></tr> <tr><td>T</td><td></td></tr> <tr><td>LW</td><td></td></tr> <tr><td>K</td><td></td></tr> </table> | | Var. | b) | T | | LW | | K | | <table border="1"> <tr><td>Var.</td><td>d)</td></tr> <tr><td>T</td><td></td></tr> <tr><td>LW</td><td></td></tr> <tr><td>K</td><td></td></tr> </table> | | Var. | d) | T | | LW | | K | | <table border="1"> <tr><td>Var.</td><td>...</td></tr> <tr><td>T</td><td></td></tr> <tr><td>LW</td><td></td></tr> <tr><td>K</td><td></td></tr> </table> | | Var. | ... | T | | LW | | K | |
| | Var. | b) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | LW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Var. | d) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Var. | ... | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| T | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| K | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | <i>Exzentrizität KPZ X</i> | | <i>Exzentrizität KPZ Y</i> | | <i>Exzentrizität KPZ ...</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SK | | <i>Konnektivität</i> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Abb. 3: Exzentrizitäten und Konnektivität einer Lösungsvariante

Resultierend aus der Eigenschaft der Soft-facts, die die sozialen Beziehungen zwischen den KPZ im Netzwerk auszudrücken, ist die Berechnung der Exzentrizitäten und der Konnektivität unmittelbar abhängig von den beteiligten KPZ, d.h. die Exzentrizität einer KPZ kann erst bestimmt werden, wenn alle KPZ einer Herstellvariante definiert wurden. Anders gesagt: eine KPZ besitzt für jedes KPZ-Angebot (Wertetripel) eine andere Exzentrizität. Der Aufwand der Suche nach geeigneten KPZ für eine Teilleistung kann sich damit sehr umfangreich gestalten. Anhand der hinterlegten „Muss“-Eigenschaften einer KPZ scheiden jedoch einige KPZ des gesamten KPZN bereits zu Beginn der Suche aus technologischen oder ökonomischen Gründen aus. Sollten sich für gewisse Teilleistungen keine geeigneten KPZ innerhalb des KPZN finden, besteht die Möglichkeit, auch externe Partner in die Leistungserstellung einzubeziehen. Diese Möglichkeit wird zentral vom Informationstechnischen Modellkern (IMK) [Neub01] verwaltet und erfordert eventuell manuelles Eingreifen, da die Abläufe mit externen Partnern meist nicht standardisiert sind. Der IMK stellt dabei die zentrale Instanz im KPZN dar, die mit Mitteln der Informatik, insbesondere aus den Bereichen Datenbanken und Künstliche Intelligenz, die informationstechnischen Aspekte der Vernetzung von KPZ löst und die Steuerung des Informationsflusses zwischen den KPZ übernimmt [Neub01, 97].

4. Modellierung und Auswahl

Für die Optimierung mit Hilfe eines Algorithmus ist es notwendig, das oben beschriebene Problem entsprechend zu modellieren. Dafür werden alle Herstellvarianten im KPZ-Angebotsnetz in einem gerichteten Graph (*Digraph*) (von einem Digraph (directed graph) wird gesprochen, wenn die einer Kante zugeordneten Paare von Knoten (i, j) geordnet sind, wobei i der erste, der Anfangsknoten, und j der zweite, der Endknoten, der Paare (i, j) ist [Neum93, 177]) abgebildet. Dazu ist es notwendig, vor den Knoten der ersten Arbeitspläne in der Wertschöpfungskette, beschrieben durch den NV, einen für alle gültigen Startknoten einzufügen, eine sog. *Quelle*. Ausgehend von dieser werden die Alternativen im KPZ-Angebotsnetz auf ihre Lösungsqualität hin untersucht. Alle Alternativen enden nach dem letzten Bearbeitungsschritt in einem gemeinsamen Endknoten des Digraphen, dem Endprodukt. Dieser Punkt wird *Senke* genannt. Jede Herstellalternative beinhaltet somit eine Quelle, sich anschließende KPZ zur Durchführung der Teilleistungen und eine Senke. Die Zielfunktion des Algorithmus ist die Maximierung der kumulierten AHP-Werte der KPZ. Je größer der Wert einer Herstellvariante, desto vorteilhafter ist es, diese zu realisieren.

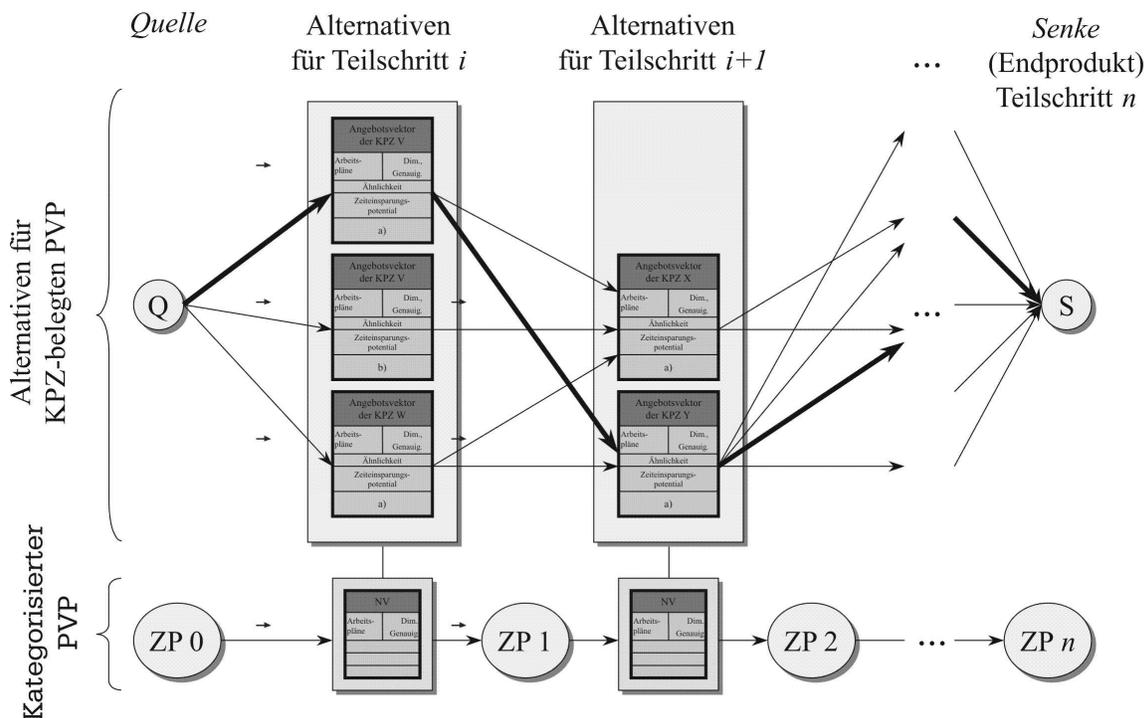


Abb. 4: Exemplarische Darstellung einer Problemstellung

Abbildung 4 veranschaulicht die Modellierung als Digraph. Für jeden Schritt der Bearbeitung auf dem Weg zum Endprodukt existieren verschiedene Herstellvarianten, aus denen die beste Variante mit Hilfe eines Algorithmus auszuwählen ist. Zu beachten ist, dass nicht alle potenziellen KPZ für den Bearbeitungsschritt $i+1$ von jeder KPZ im Bearbeitungsschritt i aus erreichbar sind. Der Grund dafür liegt u.a. in der Überlappung von Liefertermin der einen KPZ und dem spätesten Starttermin der folgenden KPZ. Ein Beispiel ist die fehlende Verbindung zwischen Angebot b) der KPZ V und Angebot a) der KPZ Y in Abbildung 4. Die stark hervorgehobenen Kanten zwischen konkreten KPZ-Angeboten stellen eine konkrete und auch durchführbare Herstellalternative dar. Die Menge der beteiligten KPZ-Angebote (KPZ Va, KPZ Ya, ...) einer Herstellvariante k wird in Ψ_k gespeichert. Ψ_k besitzt den Zielfunktionswert L_k . Die Attraktivität eines KPZ-Angebotes bestimmt sich aus dem zugehörigen AHP-Wert. Dieser Wert ist während der gesamten Lösungssuche unabhängig von Vor- bzw. Nachfolger konstant.

Zur Lösung dieser Problemrepräsentation in Form eines Graphen existieren vielfältige Optimierungsalgorithmen. Genannt seien hier Heuristiken (Verfahrensüberblick in [Doms97], wie z.B. *Branch- and Bound* oder naturanaloge Verfahren wie *Genetische Algorithmen* oder *Ant Colony Optimization*). In den 90er Jahren hat sich speziell auf den Gebieten der Optimierung von Graphen zwischen einem Start- und einem Endpunkt (kürzeste Wege-Probleme oder Traveling Salesman Probleme -TSP-) und Maschinenbelegungsproblemen (Job Shop Scheduling Problem -JSP-) die Ant Colony Optimization oder kurz *ACO* etabliert. Für den Einsatz eines solchen Algorithmus bei der KPZ-Auswahl in KPZN sprechen die bekannten guten Ergebnisse bei ähnlichen Graphenproblemen (signifikant vor allem bei Routing-Problemen). Bemühungen, eine Modellierung mit Genetischen Algorithmen zu realisieren, bewährten sich nicht, da Anzahl und Verschiedenheit der Nebenbedingungen zu Operatoren führte, die nicht mehr als performant für die zu lösenden Aufgaben unter starken zeitlichen Laufzeitanforderungen einzuschätzen waren.

Als Unterlegung der Leistungsfähigkeit von ACO sollen Untersuchungen an einer Benchmarkinstanz des JSP dienen, bei denen im Vergleich zu anderen modernen Algorithmen mittels ACO gute Ergebnisse erreicht wurden. Abbildung 5 zeigt zwei Pheromongebirge zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Lösungssuche. Die Höhe der Spitzen repräsentiert die Menge an Pheromon. Je höher die Menge, desto besser ist eine Lösung. Gut zu erkennen ist, dass im Rahmen der Lösungssuche mit Ant Algorithmen eine gezielte Verbesserung und eine sukzessive Verkleinerung des Lösungsraumes stattfindet. Zu Beginn der Suche (linkes Teilbild der Abbildung 5 nach ca. 500 Iterationen) wird noch der gesamte Lösungsraum in die Suche einbezogen. Mit

zunehmender Anzahl an Iterationen bilden sich qualitativ bessere Lösungen heraus und werden verstärkt. Schlechte Lösungen werden unattraktiver und in einem immer geringerem Maße berücksichtigt. Die Suche beschränkt sich mit fortschreitender Zeit auf bestimmte, erfolgversprechende Bereiche des Lösungsraumes und tendiert bei großen Laufzeiten zu einem stationären Zustand (rechtes Teilbild der Abbildung 5 nach ca. 1500 Iterationen). Die Geschwindigkeit der Entwicklung und die Richtung der Suche werden durch verschiedene Parameter beeinflusst.

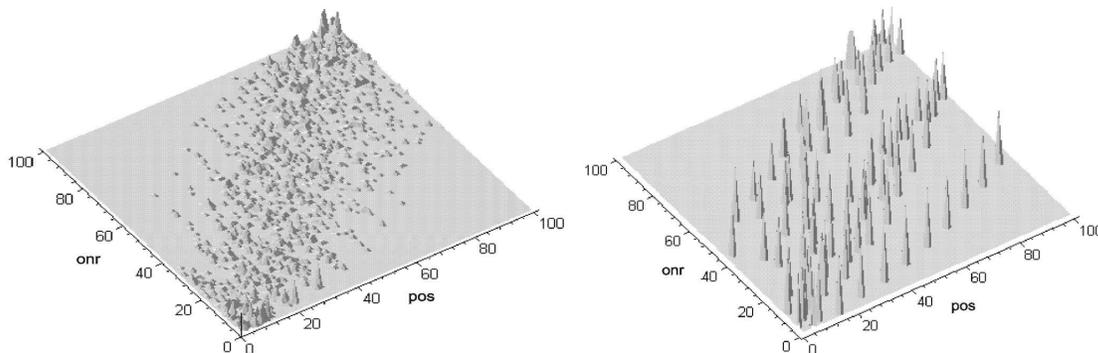


Abb. 5: Spektrum der Lösungssuche anhand des ft06-Problems

Im folgenden Abschnitt werden einleitende Ausführungen zur generellen Funktionsweise von Ant Algorithmen vollzogen, bevor später die notwendigen Anpassungen zum Auswahlproblem im KPZN erfolgen.

4.1 Ant Colony Optimization - Eine Einführung

Bei der Ant Colony Optimization handelt es sich um ein heuristisches Verfahren innerhalb eines relativ jungen Forschungsgebietes, der *Swarm Intelligence* [Bona99]. Dies ist eine Forschungsrichtung, welche Verhaltensweisen und Kommunikationsstrukturen der Natur untersucht, um diese auf andere praktische und theoretische Probleme erfolgreich anzuwenden. Innerhalb der Heuristiken ordnet sich die Swarm Intelligence in den Teilbereich der iterativen Verbesserungsverfahren ein. Untersuchungsgegenstand ist dabei nicht nur das Verhalten und die Kommunikation der Ameisen, sondern auch die Kommunikation innerhalb von Bienenstaaten [Cama98], [Seel91].

Grundlage des Verhaltens der Mitglieder eines Schwarms bzw. einer Kolonie ist die Tatsache, dass diese allein nicht in der Lage wären zu überleben bzw. gute Lösungen für auftretende Probleme zu erreichen. Innerhalb dieser Gemeinschaften herrscht eine

strenge Arbeitsteilung. So sind bei den Ameisen bspw. Bauarbeiter für die Instandhaltung und Erweiterung des Nests der Kolonie, Futtersucher und Krieger zu unterscheiden.

Die Ant Colony Optimization, die hier näher erläutert wird, entwickelte sich aus den Untersuchungen und Experimenten von *Goss* [Goss89]. Er erarbeitete die grundlegenden Erkenntnisse über das Verhalten und die Zusammenarbeit innerhalb von Ameisenkolonien. Ausgangspunkt seiner Untersuchungen waren die Verhaltensweisen realer Ameisen in der freien Natur. Er beobachtete, dass fast alle Ameisen einer Kolonie, welche mit der Futtersuche beschäftigt sind, den gleichen Weg von und zur Futterstelle nutzen. Wird es durch ein Hindernis, z.B. einen Stein, unmöglich, diesen Weg weiterhin zu verwenden, sind die Ameisen in der Lage, einen neuen kürzesten Weg zum Umgehen dieses Hindernisses zu finden. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 6 (Darstellung in Anlehnung an [Dori96a, 3]) dargestellt.

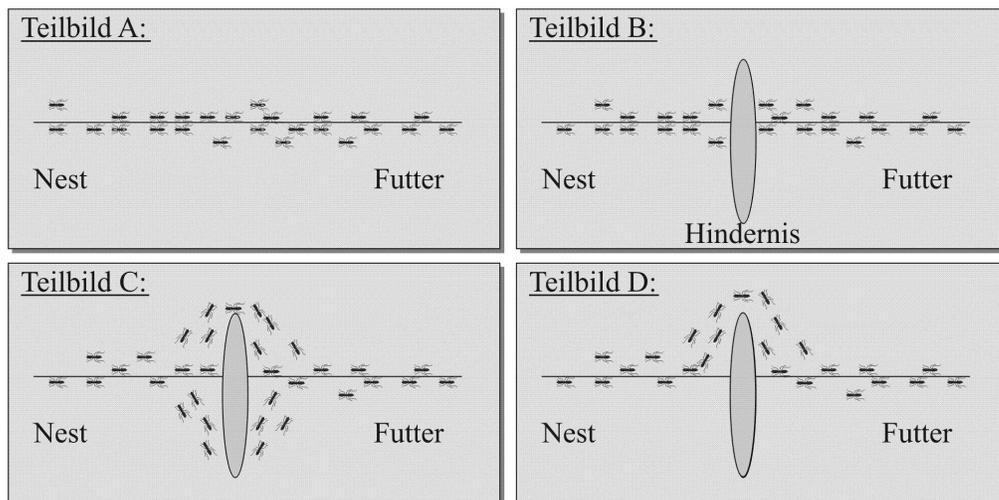


Abb. 6: Futtersuche mit Hindernissen

Die Beobachtungen bei realen Ameisenkolonien führten zum bekannten Brückenexperiment [Goss89]. Im Versuchsaufbau wurde einer Ameisenkolonie Zugang zu einer Futterquelle gewährt. Diese kann über zwei Wege erreicht werden, die sich lediglich in der Entfernung zwischen Nest und Futterquelle unterscheiden. Die Punkte *B-H* und *H-D* sind jeweils eine Längeneinheit voneinander entfernt. Der Abstand zwischen *B-C* und *C-D* beträgt hingegen nur eine halbe Längeneinheit. Der Versuchsaufbau ist exemplarisch in Abbildung 7 dargestellt.

Zu Beginn des Experimentes, im Zeitpunkt $t=0$, ist zu beobachten, dass die Suche der Ameisen zufällig verläuft und beide Wege gleich hoch frequentiert werden. Bei einer

angenommenen Anzahl von 30 Ameisen würden idealisiert jeweils 15 einen Weg benutzen. Im Zeitpunkt $t=1$ verschiebt sich das Verhältnis dann auf $\frac{2}{3}$ kurzer Weg und $\frac{1}{3}$ langer Weg. Im weiteren Zeitverlauf steigt der Anteil der Ameisen auf dem kurzen Weg weiter an. Der Unterschied zwischen der Anzahl der Ameisen auf kurzem und langem Weg fällt umso eindeutiger aus, je größer der Entfernungsunterschied zwischen beiden Varianten ist. Allerdings wird nie die gesamte Kolonie nur einen (den kurzen) Weg nutzen, um auf eventuelle Veränderungen der Umwelt, wie bspw. neue Wege, Hindernisse oder Futterquellen, reagieren zu können.

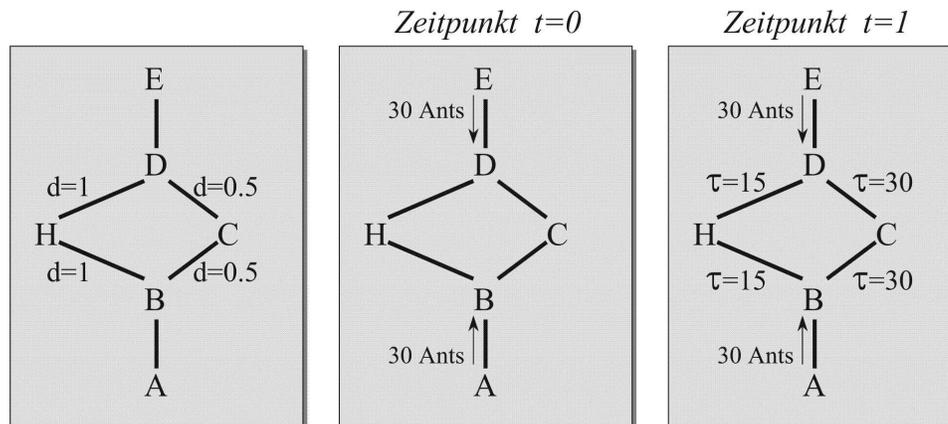


Abb. 7: Brückenexperiment

Der Schlüssel zur Erklärung dieses Phänomens liegt in der indirekten Kommunikation der Ameisen, der sog. Stigmergy [Gras59]. Jede Ameise kann einen Weg mit Geruchsstoffen - Pheromon genannt - markieren. Die Attraktivität eines Weges wird über die Menge des abgesonderten Pheromons reguliert. Einzelne Ameisen, die sich fast zufällig bewegen und auf eine solche Pheromonspur treffen, werden diese Spur mit einer umso höheren Wahrscheinlichkeit verfolgen, je stärker diese ist. Dabei kann diese Ameise die vorhandene Spur verstärken, indem sie selbst wiederum Pheromon absondert. Die Menge des ausgeschütteten Pheromons kann dabei variieren. Dadurch erhöht sich die Attraktivität eines bestimmten Weges mit jeder Ameise, die diesen benutzt. So ergibt sich eine positive Rückkopplung.

Die Menge des Pheromons wird im rechten Teilbild von Abbildung 7 als τ bezeichnet. Im Zeitpunkt $t=0$ erfolgt die Suche noch zufällig, keine der beiden Varianten ist mit einer Menge an Pheromon markiert. Da die Ameisen, die den kürzeren Weg wählen, eher zum Nest zurückkehren, erhöht sich der Pheromonwert der kurzen Variante schneller und die Attraktivität steigt. Die kürzere (30 Mengeneinheiten Pheromon) der beiden Varianten ist für eine Ameise im Zeitpunkt $t=1$ attraktiver, als die längere (15

Mengeneinheiten Pheromon). Eine gute Lösung des Problems kann also nur durch die gesamte Kolonie erfolgen, nicht aber durch eine einzelne Ameise.

4.1.1 Das Ant System

Nachdem das Verhalten und die Lösungssuche von Ant Colonies erklärt wurde, erfolgt nun die algorithmische Beschreibung dieses Prinzips mit dem Ant System (AS) [Colo91], [Dori96b]. Dabei handelt es sich um eine populationsorientierte, kooperative Metaheuristik, deren Zielsetzung nicht die Simulation des Verhaltens realer Ameisen, sondern die Lösung von Optimierungsproblemen ist.

Die ersten Untersuchungen diesbezüglich bezogen sich auf das bekannte und oft untersuchte TSP [Lawl85], [Rein95], einem der gängigsten kombinatorischen Optimierungsprobleme, bei dem es wie bei realen Ameisen auch um die Minimierung der Wegstrecken in einem Graphen geht. Dafür wird eine künstliche Ameisenkolonie geschaffen. Innerhalb dieser sind die Computerameisen einfache Agenten, die im Gegensatz zu ihren realen Verwandten zusätzliche Fähigkeiten wie ein Gedächtnis über die bereits besuchten Knoten ($tabu_k$) besitzen. Neben der Menge an Pheromon (τ_{ij}) wird weiteres problemspezifisches Wissen wie die Entfernung zwischen zwei Knoten genutzt und als Heuristikwert η_{ij} bezeichnet. Die künstlichen Ameisen sind dadurch nicht „blind“ gegenüber der Struktur des Problems. Abbildung 8 zeigt die Erweiterungen innerhalb des Algorithmus.

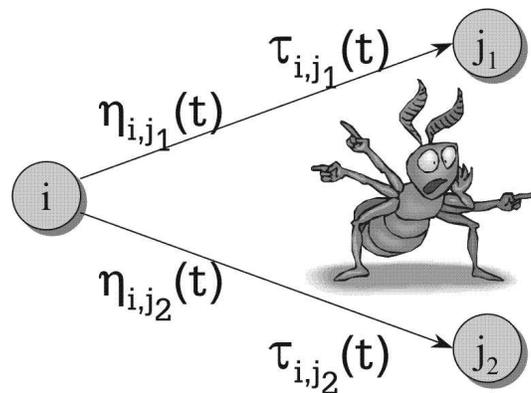


Abb. 8: Entscheidungssituation

Das spezifische Wissen resultiert dabei aus dem Problem selbst und bleibt im Rahmen der Lösungssuche bei dem hier betrachteten Problemtyp unverändert. Die Ameisen innerhalb einer Ameisenkolonie bewegen sich simultan und asynchron durch den Graph eines Problems. Jede Ameise bildet innerhalb des Graphen eine eigene Lösung unter

Einbeziehung der für die ganze Kolonie gültigen Pheromonwerte. Durch Verwendung dieser gemeinsamen Wissensbasis erfolgt die kollektive Zusammenarbeit und der Ausbau guter Lösungen. Wie oft die Bestandteile des Algorithmus durchlaufen werden hängt von der Problemgröße, vom Stagnationsverhalten der Suche und der definierten Abbruchbedingung ab.

Innerhalb des Ant Systems wird eine globale Datenstruktur zum Umgang mit den Pheromonwerten und den heuristischen Werten verwendet. In dieser *Trail-Matrix* wird für jede Kante (i, j) die Intensität der Pheromonspur gespeichert. Diese Daten werden während der Lösungssuche ständig verändert. Speicherort der heuristischen Informationen ist die *Visibility-Matrix*. Welche Informationen innerhalb dieser Matrix gespeichert werden, ist vom Optimierungsproblem abhängig. Würden zur Entscheidung über die nächste Kante lediglich die Daten der Visibility-Matrix verwendet, entspräche dies dem Anwenden eines *Greedy-Algorithmus* (Greedy-Algorithmen gehen bei der sukzessiven Lösungssuche „gierig“ vor, d.h. bei jedem Schritt wird die aufgrund der vorhandenen Information am günstigsten erscheinende Lösungserweiterung gewählt.).

Die Menge der Ameisen m innerhalb einer Kolonie generiert eine Lösung, indem sie sich beginnend in der Quelle von Knoten zu Knoten bis hin zur Senke vorarbeitet. Eine Ameise k , welche sich in einem Knoten i befindet und sich als Nächstes für einen Knoten aus der Menge der Nachbarknoten N_i^k entscheiden muss, verwendet bei ihrer Entscheidung die Übergangswahrscheinlichkeit (*transition probability*) $p_{ij}^k(t)$. In die Berechnung von $p_{ij}^k(t)$ für eine Kante (i,j) gehen die Heuristikwerte und Pheromonwerte der Kanten ein, die vom aktuellen Knoten i erreichbar sind (Nachbarknoten) und nicht in der Menge bereits besuchter Kanten $tabu_k$ gespeichert sind. Es gilt:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta} & \forall j \in N_i^k \\ 0 & \forall j \notin N_i^k \end{cases} \quad (1)$$

Über die Parameter α und β wird die Gewichtung der beiden Faktoren Pheromon und Heuristikwert geregelt. Bei hohem α gewinnt das gesammelte Wissen der Ameisen in Form des Pheromons an Bedeutung, bei hohem β hingegen das problemspezifische Wissen. Es gilt:

$$1 = \alpha + \beta \quad (2)$$

Nachdem ein Zyklus abgeschlossen wurde (Ameise befindet sich in Senke), kann anhand der Tabuliste $tabu_k$ der Zielfunktionswert L_k der generierten Lösung berechnet werden. Die Menge an Pheromon τ_{ij} , welches die Ameise auf einer Kante aus $tabu_k$ hinterlässt, berechnet sich gemäß der Gleichungen (3) und (4), wobei Q die Menge des gesamten zu verteilenden Pheromons angibt.

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{falls } (i,j) \in tabu_k \\ 0 & \text{falls } (i,j) \notin tabu_k \end{cases} \quad (4)$$

Ameisen mit besseren Lösungen schütten mehr Pheromon aus, da die Menge direkt abhängig von der Lösungsqualität (L_k) ist. Damit wird die Attraktivität der Kanten aus $tabu_k$ für Ameisen der nächsten Iteration erhöht.

Um eine frühzeitige Stagnation der Lösungssuche zu vermeiden, wird eine Verdunstungsrate ρ für das Pheromon festgelegt. Dies geschieht in Analogie zur Natur, da auch die von realen Ameisen hinterlegten Pheromone evaporieren. Dadurch kann die Attraktivität der Kanten gesenkt werden. Benachbarte Kanten besitzen eine höhere Wahrscheinlichkeit dafür, in die zukünftige Suche einbezogen zu werden. Die Berechnung erfolgt über die Vorschrift:

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (5)$$

Nachdem alle Ameisen einen Zyklus durchlaufen haben, ist eine Iteration abgeschlossen und die nächste beginnt solange die Abbruchbedingung noch nicht erfüllt ist. Mit dem Ant System in seiner ursprünglichen Form, welches auf das TSP angewendet wurde, konnten gute Ergebnisse für Probleme mit bis zu 50 Knoten gefunden werden. Daher wurden in den folgenden Jahren ständig Anpassungen und Erweiterungen vorgestellt, die die grundlegenden Ideen noch nutzen, sich aber besonders in den Aspekten der Intensivierung und/oder der Diversifikation der Suche unterscheiden. So wurden bspw. Begrenzungen der Pheromonwerte (*MAX-MIN*) [Stue96] oder rangbasierte Verfahren (*AS_{rank}*) [Bull99] eingeführt.

4.1.2 Das Ant Colony System

Das Ant Colony System oder kurz ACS [Dori97] ist eine der bedeutendsten Erweiterungen des ursprünglichen Ansatzes, welcher im Wesentlichen drei Veränderungen gegenüber der ursprünglichen Form beinhaltet. Als erste Veränderung wird ein zusätzlicher Parameter q eingeführt. Dieser kann Werte im Bereich $0 \leq q \leq 1$ annehmen. q wird in Kombination mit der Zufallszahl z ($0 \leq z \leq 1$) für die Entscheidung verwendet, ob die Ameise ihre Entscheidung mit Hilfe der Formel (6) oder der Übergangswahrscheinlichkeit aus Formel (1) trifft. Befindet sich eine Ameise k in einem Knoten i , wird die Zufallszahl z bestimmt. Diese wird mit dem Wert des Parameters q verglichen. Ist $z \leq q$, wird der nächste Knoten j besucht, welcher für Formel (6) den maximalen Wert besitzt.

$$p_{ij}^k(t) = [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta \quad (6)$$

Ist $z > q$ wird die Übergangswahrscheinlichkeit aus Formel (1) verwendet. Die zweite Veränderung bezieht sich auf das auszuschüttende Pheromon. Es wird innerhalb des ACS nur der Ameise mit der besten gefundenen Lösung L_k^* erlaubt, Pheromon auf die Kanten zu verteilen. Die dritte und wichtigste Änderung ist die Einführung einer *Local Updating Rule*. Die Local Updating Rule wurde eingeführt, um die Pheromonmengen der Kanten schon innerhalb eines Zyklus dynamisch zu gestalten. Die Attraktivität einer Kante wird reduziert durch Senkung der Pheromonmenge nach Formel (7), sobald eine Ameise sich für diese entschieden und „passiert“ hat. Damit wählen die nächsten Ameisen mit einer geringeren Wahrscheinlichkeit wieder diesen Weg aus und eine stärkere Diversifikation der Suche kann erreicht werden.

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho') \cdot \tau_{ij}(t) + \rho' \cdot \Delta\tau_{ij} \quad (7)$$

Für den Parameter ρ' gilt dabei $0 < \rho' < 1$. Zur Berechnung von $\Delta\tau_{ij}$ existieren zwei Möglichkeiten, dargestellt als Formel 8 und Formel 9.

$$\Delta\tau_{ij} = c \quad (8)$$

$$\Delta\tau_{ij} = \varsigma \cdot \max_{l \in N_1^k} \tau_{il} \quad (0 \leq \varsigma \leq 1) \quad (9)$$

Das ursprüngliche Ant Colony System verwendet Formel (8), c ist dabei der Ausgangswert der Pheromonmengen auf den Kanten. Bei Verwendung der Formel (9) wird dies mit *Ant-Q* [Gamb95] bezeichnet.

Diese Änderungen im Ant Colony System konnten die Lösungsqualität für bekannte kombinatorische Optimierungsprobleme im Vergleich zum Ant System erheblich verbessern.

4.1.3 Erweiterungen des Ant Colony Systems

Die erfolgreichsten Ant Algorithmen sind hybride Algorithmen. Bei diesen werden die von den Ameisen gefundenen Lösungen mit Hilfe von lokalen Suchverfahren (nach-) optimiert [Mani94], [Stue97]. Mit hybriden Algorithmen sind zum Teil neue beste Lösungen für bekannte Standardprobleme gefunden worden.

Den allgemeinen Rahmen für Ant Algorithmen stellt die Ant Colony Optimization (ACO) Meta-Heuristik [Dori99] dar. Durch Anpassung und Spezifikation kann diese auf viele unterschiedliche Probleme angewendet werden, die gewissen Bedingungen [Dori99, 14] genügen müssen. Abbildung 9 gibt die reine ACO-Meta-Heuristik in Pseudocode-Notation wieder. Entsprechend den Eigenschaften von Meta Heuristiken fehlen genaue Festlegungen und Berechnungsvorschriften.

```

begin Schedule-Activity
    Manage Ants Activity()
    Evaporate Pheromone()
    Daemon Activities()/ * optional * /
end

```

Abb. 9: ACO-Meta-Heuristik

Der Algorithmus setzt sich aus den Teilen Lösungskonstruktion und Aktualisierung der Pheromonmengen zusammen. Dies wird solange durchgeführt, bis eine definierte Abbruchbedingung erreicht wird (z.B. Anzahl Iterationen, Lösungsqualität etc.). Die Aktualisierung des Pheromons kann in der Meta-Heuristik auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Einerseits mit einem *Online Step-by-Step Pheromone Update*, womit die Aktualisierung des Pheromons Schritt für Schritt während der Lösungssuche gemeint ist, oder andererseits durch *Online Delayed Pheromone Update*. Dabei wird das Pheromon nach dem Generieren einer Lösung von der entsprechenden Ameise auf dem Rückweg (der Lösung) aktualisiert. Ein weiterer Teilprozess sorgt für die Verdunstung der Pheromone über die Zeit hinweg.

Optional können Daemon Activities eingesetzt werden, welche als Aktivitäten bzw. Eingriff von übergeordneter Stelle zu verstehen sind und nicht von den Ameisen selbst

ausgeführt werden, wie z.B. das Aufrufen einer lokalen Optimierungsprozedur (*2-opt*) oder das Positionieren von Pheromonen durch Dritte (*Offline Pheromone Update*). Das *Offline Pheromone Update* bietet die Möglichkeit, die Lösungssuche der Ameisen zu steuern und auf der bislang besten gefundenen Lösung zusätzlich Pheromon zu platzieren.

Als vorteilhaft für die Lösungssuche und die Qualität der erreichten Ergebnisse (L_k) hat sich eine Begrenzung der Pheromonwerte sowohl nach oben als auch nach unten erwiesen. Hierbei handelt es sich um das *MAX-MIN Ant System*, welches von *Stützle/Hoos* entwickelt wurde [Stue00]. Die Vorschrift (10) verdeutlicht den Zusammenhang.

$$\tau_{min} < \tau_{ij} < \tau_{max} \quad (10)$$

Über die Einführung der unteren Begrenzung τ_{min} des Pheromons wird verhindert, dass sich die Menge an Pheromon einer Kante (bspw. durch ständige Evaporation) 0 annähert, und damit in der Suche an Attraktivität einbüßt. Die obere Begrenzung τ_{max} hilft, die Dominanz bestimmter Kanten in der Lösungssuche zu senken und verhindert das Stagnieren in lokalen Optima.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Suche auf verschiedene Kolonien zu verteilen. Sinn einer solchen Unterteilung ist ebenfalls die Vermeidung von Stagnation. Ist die Lösungssuche hingegen auf verschiedene Kolonien verteilt, können andere Bereiche des Lösungsraums durch eine der anderen unabhängigen Kolonien durchsucht werden. Dafür sind in den einzelnen Kolonien auch unterschiedliche Pheromonmatrizen zu verwenden. Erst nachdem alle Kolonien Lösungen gefunden haben, werden die Ergebnisse zusammengeführt. Diese Möglichkeit benötigt allerdings zusätzlichen Rechen- und damit Zeitaufwand, der einer potenziell schnelleren Lösung des Problems entgegensteht. Dieses Argument verliert wegen der zunehmenden Leistungsfähigkeit der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) jedoch zunehmend an Bedeutung.

Ein grundsätzlicher Unterschied zwischen TSP und JSP besteht darin, dass beim TSP allein die Minimierung der Weglänge im Vordergrund steht, wohingegen beim JSP die Technologie mit ihren Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen ein wesentlicher Problembestandteil ist. Das heißt, dass die Position einer Operation in einer Lösung (Permutation) eine hohe Bedeutung und somit einen signifikanten Einfluss auf die Lösungsqualität besitzt. Es ist somit nicht entscheidend, welche Operation einer anderen Operation folgt, sondern vielmehr die Einordnung in der gesamten generierten Reihenfolge unter Beachtung der Technologie. Aus diesem Grund wird anstatt einer

Operation - Operation - Pheromon - Matrix eine *Position - Operation - Pheromon - Matrix* [Merk00] verwendet. Die Menge an Pheromon in einer Zelle gibt dann an, wie attraktiv es ist, eine Operation an dieser Position in der Lösung zu platzieren [Teic01c].

In der Theorie hat die Ant Colony Optimization an einer großen Bandbreite von Problemen ihre Eignung demonstriert. So wurden bspw. gute Ergebnisse für Quadratic Assignment, Vehicle Routing und Graph Coloring Probleme gefunden [Dori99, 30]. Auch in der Praxis werden Probleme mit Hilfe der Ant Colony Optimization gelöst. Bspw. werden sie bei British Telecom zum Load Balancing und bei InterNET zum Routing in Paket-Netzwerken und zum Routing in optischen Hochgeschwindigkeitsnetzwerken eingesetzt. Allen praktischen Problemstellungen ist gemein, dass die Probleme eine große Anzahl Knoten aufweisen, diese fluktuierend sind und sich anderen Lösungsverfahren wie Genetische Algorithmen durch schwer handhabbare Restriktionen einer effizienten Modellierung entziehen.

4.2 Umsetzung der KPZ-Auswahl mit ACO

Die Anpassung zur Lösung des hier zu diskutierenden Problems zur Auswahl der KPZ im KPZN beschränken sich auf wenige Punkte. Weitgehend wurden die Spezifikationen aus dem Ant Colony System übernommen, da die Problemstellung grundsätzlich ähnlich dem ursprünglichen TSP ist. Zwei wesentliche Unterschiede bestehen jedoch. Dies betrifft zum einen die wahrscheinliche Attribuierung jedes Knotens durch mehrere KPZ und zum anderen müssen nicht alle Knoten besucht werden. Es genügt, einen bezüglich mehrerer Zielkriterien optimalen Weg von der Quelle zur Senke zu finden.

Eine der wichtigsten Annahmen ist die Vernachlässigung der Wege zwischen den KPZ. In den Arbeiten zum TSP gehen diese als Heuristikwert η_{ij} in die Berechnung ein. Die auch als Transportkosten interpretierbaren Kantenlängen zwischen den Knoten sind im KPZN in den KPZ-Angeboten innerhalb der Kosten schon enthalten. Aus diesem Grund repräsentiert η_{ij} nicht die Weglänge von KPZ zu KPZ, sondern gibt die Eignung des am Ende der Kante liegenden KPZ-Angebots (Knoten) wieder. Dabei findet der für jedes KPZ-Angebot aus Zeiteinsparungspotenzial, Ähnlichkeit, Liefertermin, Lieferwahrscheinlichkeit und Kosten errechnete AHP-Wert Verwendung. Der Heuristikwert je KPZ bleibt über die gesamte Suche konstant. Wegen des Zieles der Maximierung der AHP-Werte wird der Heuristikwert nicht aus dem Kehrwert, wie beim TSP, sondern gleich dem AHP-Wert gesetzt.

Somit ergibt sich als Entscheidungssituation für jede Ameise zunächst nach den oben beschriebenen Kriterien eine Kante zu wählen. Im nächsten Schritt erfolgt die Auswahl der KPZ, falls der Knoten, zu dem die gewählte Kante führt, durch mehrere KPZ attribuiert ist. Nachdem über das AHP-Verfahren eine geeignete KPZ ermittelt wurde, muss ein Wertetripel gewählt werden. Dabei ergibt sich durch die implizite Rückwärtsterminierung des Suchvorgangs und die bereits bekannten Termine aus dem Auswahlvorgang der Bezug zur Zeitachse des Tripels. Entsprechend der Präferenz des Kunden nach Lieferwahrscheinlichkeit oder Kosten kann ein Lösungspunkt in der Tripelmenge markiert werden. Damit hat die Ameise den Knoten fixiert und kann iterieren.

Leitvariable der Suche bleibt der Pheromonwert τ_{ij} der Kanten ($i \rightarrow j$), der entsprechend den Aussagen in Abschnitt 4.1.2 ständig aktualisiert wird und letztendlich für die Verbesserung der Lösungen im Zeitverlauf verantwortlich ist. Ursache dafür ist die Abhängigkeit der Zielfunktionswerte L_k von den Lösungen Ψ_k . Ist eine Lösung qualitativ gut, d.h. L_k ist hoch, wird auf alle Kanten ($i \rightarrow j \in \Psi_k$) extra Pheromon ($\Delta\tau$) gegeben. Damit erhöht sich die Attraktivität der Kanten für nachfolgende Zyklen und Iterationen. Ist die Qualität der gefundenen Gesamtlösung hingegen schlecht (L_k ist niedriger), wird nur wenig oder kein Pheromon auf die beteiligten Kanten verteilt. In die Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeit nach Formel (1) gehen damit die Pheromonwerte τ_{ij} auf den Kanten (i, j) und die AHP-Werte der möglichen KPZ-Angebote $j \in N_i^k$ (Knoten) ein.

Den angepassten Programmablauf als Pseudo-Code gibt Abbildung 10 wieder. Nach dem Aufbau der Problemstruktur, d.h. dem Einlesen des konkreten gerichteten Graphen aus den Informationen des IMK, beginnt die Suche der Ants und wird so lange fortgeführt, bis die festgelegte Abbruchbedingung erreicht wird. Parameter m reguliert die Größe (Anzahl der Ameisen) einer Kolonie. Dieser ist in Abhängigkeit von der Problemgröße (bspw. Dispositionsstufen des Endprodukts) zu wählen.

Die Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeit $p_{ij}^k(t)$ für alle alternativen Knoten j erfolgt durch die beiden Formeln (1) und (6) analog zu den Ausführungen in Abschnitt 4.1.2. Nachdem sich eine Ameise k für einen Knoten j und eine KPZ der Attributierung entschieden hat, wird diese KPZ in die Lösung Ψ_k der aktuellen Ameise k übernommen. Nachdem eine Ameise in der Senke angekommen ist, kann anhand der Reihenfolge in Ψ_k der zugehörige temporäre Zielfunktionswert L_k , der aus Kosten, Zeiten und Lieferwahrscheinlichkeit aggregiert wird, berechnet werden.

Die Durchführung des lokalen Pheromonupdates folgt der in Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Formel (7). Ebenso erfolgt das globale Pheromonupdate mit Formel (3). Die Pheromonwerte werden durch Schranken nach oben und unten entsprechend Abschnitt 4.1.3 begrenzt. Liegt der Pheromonwert τ_{ij} einer Kante (i, j) über der Obergrenze τ_{\max} bzw. unter der Untergrenze τ_{\min} , wird der betroffene Wert entsprechend angepasst.

```

begin
  Initialisierung(Problemstruktur);
  i = Quelle;
  while Not(Abruchbedingung) do
    for k := 0 to m step 1 do
      while  $(\mathcal{N}_i^k \neq \emptyset) \cap (i \neq \text{Senke})$  do
        Random(z);
        if  $z \leq q$  then  $p_{ij}^k(t) = [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta$ ;
          else  $p_{ij}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in \mathcal{N}_i^k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta}$ ;
        fi
        bestimme(j);  $\Psi_k = \Psi_k \cup KPZ(\max(AHP(j)))$ ;
        /* localPheromonupdate */
         $\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho') \cdot \tau_{ij}(t) + \rho' \cdot \Delta\tau_{ij}; i := j$ 
      od
    od
    /* globalPheromonupdate */
     $\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \forall \tau_{ij};$ 
    Max - Min - Regel  $\tau_{ij}$ ;
    bestimme( $L_k$ );
  od
   $\Psi_k \in M : \forall \Psi_k \text{ mit } L_k > \kappa \cdot L_k^* \quad 0 \leq \kappa \leq 1;$ 
  berechne( $E_{\Psi_k, KPZ} \forall KPZ \in \Psi_k, K_{\Psi_k} \forall \Psi_k \in M$ );
  entscheide( $\Psi_k^{max} : \max(\text{Aggregation}(MK_k, SK_k))$ )
end

```

Abb. 10: Ablauf zur Suche einer optimalen Herstellvariante und zugehöriger KPZ

Nach Erreichen der Abbruchbedingung wird die Suche der Ameisen einer Kolonie beendet. Da der folgende Schritt (Bestimmung der Exzentrizitäten E_{KPZ} und Konnektivitäten K_{Ψ_k} weiteren Rechen- und Zeitaufwand erfordert, sollten nicht alle der gefundenen Lösungen untersucht werden. Anhand des Zielfunktionswertes L_k kann über die Qualität der Lösungen geurteilt werden. Dies geschieht in Abhängigkeit aller gefundenen Lösungen Ψ_k und deren Niveau des Zielfunktionswertes L_k durch Ranking. Aus den Lösungen sind anschließend die „x“-Besten auszuwählen. Für die Bestimmung

des Grenzwertes existieren verschiedene Möglichkeiten. Entweder kann eine feste Zahl festgelegt werden oder es wird ein Mindestniveau vom maximalen Zielfunktionswert verwendet. In diesem Beitrag wurde der zweite Ansatz gewählt. Es werden nur Lösungen $\Psi_k \in M$ weiter betrachtet, deren L_k mindestens $\kappa \cdot 100\%$ des maximalen Zielfunktionswertes L_k^* erreichen. Diesen Zusammenhang verdeutlicht Formel (11).

$$\Psi_k \in M : \forall \Psi_k \text{ mit } L_k > \kappa \cdot L_k^* \quad 0 \leq \kappa \leq 1 \quad (11)$$

Für die verbleibenden Lösungen werden im Anschluss jeweils die Exzentrizitätswerte ($E_{\Psi_k, KPZ}$) und der Konnektivitätswert (K_{Ψ_k}) mit Hilfe der Polyedralen Analyse errechnet. Ziel ist es, die gefundenen guten Lösungen hinsichtlich der Sozialkompetenz der beteiligten KPZ zu bewerten und Aussagen über die Qualität des „Zusammenspiels“ zu treffen. Die Größen der Methodenkompetenz (Zeiten, Kosten, Lieferwahrscheinlichkeit) und der Sozialkompetenz (Exzentrizität, Konnektivität) werden ebenfalls über AHP gewichtet ins Verhältnis gesetzt. Anhand dieser Bewertung erfolgt die endgültige Entscheidung für eine konkrete Herstellvariante und zugehöriger KPZ.

5. Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde eine Möglichkeit zur Auswahl einer endgültigen Prozessalternative bei gleichzeitiger Zuordnung von Partnern (KPZ) vorgestellt, die innerhalb des Controlling angesiedelt und den Entscheidungsunterstützungsinstrumenten innerhalb des Netzwerkes zuzuordnen ist. Der Ansatz integriert dabei durch die Anwendung der AHP-Methode sowohl betriebswirtschaftliche Größen als auch soziale Faktoren in Form von Soft-facts.

Nach der Beschreibung des Optimierungsproblems erfolgte die Auswahl der Methode. Hierbei standen neben klassischen Verfahren zahlreiche iterative Verbesserungsverfahren zur Auswahl, die in der Vergangenheit für ähnlich komplizierte, aber inhaltlich differente Sachverhalte eingesetzt wurden. Nach umfangreichen Analysen der Problemstellung und der resultierenden Implikationen für das Optimierungsmodell fiel die Entscheidung für die Ant Colony Optimization. Die folgende Modellierung, Implementierung und zahlreiche Tests bestätigten die erhoffte Effizienz des Verfahrens für die Festlegung des endgültigen KPZN.

6. Literatur

- [Bona99] Bonabeau, E.; Dorigo, M.; Theraulaz, G.: *Swarm Intelligence - From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, New York, N.J., 1999.
- [Bull99] Bullnheimer, B.; Hartl, R.F.; Strauss, C.: *A New Rank Based Version of the Ant System - A Computational Study*. In: *Central European Journal for Operations Research and Economics*, 1999.
- [Cama98] Camazine, S.; Deneubourg, J.L.; Franks, N.R.; Sneyd, J.; Theraulaz, G.; Bonabeau, E.: *Self-Organized Biological Superstructures*. Princeton University Press, Princeton, N.J., 1998.
- [Colo91] Coloni, A.; Dorigo, M.; Maniezzo, V.: *Distributed Optimization by Ant Colonies*. In: *Proceedings of ECAL91 - European Conference of Artificial Life*, Elsevier Publishing, Paris, 1991, S. 134-142.
- [Doms97] Domschke, W.: *Logistik: Rundreisen und Touren*. R. Oldenbourg Verlag, München, 1997.
- [Dori96a] Dorigo, M.; Gambardella, L.M.: *Ant Colonies for the traveling salesman problem*. In: *Technical Report, IRIDIA/96-3*, Universite Libre de Bruxelles, Belgium, 1996.
- [Dori96b] Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Coloni, A.: *The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents*. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part B*, 26(1), 1996, S. 29-42.
- [Dori97] Dorigo, M.; Gambardella, L.M.: *Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*. In: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 1997, S. 53-66.
- [Dori99] Dorigo, M.; DiCaro, G.: *The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic*. In: *New Ideas in Optimization*. Editors: Corne, D.; Dorigo, M.; Glover, F., McGraw-Hill, 1999, S. 11-32.
- [Gamb95] Gambardella, L.M.: *Ant-Q: Reinforcement Learning Approach to the Traveling Salesman Problem*. In: *Proceedings of ML-95, 12th Interntl. Conference on Machine Learning*, Morgan Kaufmann, 1995, S. 252-260.

-
- [Gras59] Grassé, P.P.: La Reconstruction du Nid et les Coordinations Interindividuelles chez *bellicositermes natalensis* et *cubitermes* sp. La Théorie de la Stigmergie: Essai d'interprétation du Comportement des Termites Constructeurs. In: *Insectes Sociaux*, 6, 1959, S. 41-81.
- [Goss89] Goss, S.; Aron, S.; Deneubourg, J.L.; Pateels, J.M.: Self-organized shortcuts in the Argentine Ant. In: *Naturwissenschaften*, Heft 76, 1989, S. 579-581.
- [Lawl85] Lawler, E.L.; Lenstra, J.K.; Rinnooy Kan, A.H.G.; Shmoys, D.B.: *The Traveling Salesman Problem*. John Wiley & Sons, 1985.
- [Logi02] LogIS - Arbeitskreis Logistische Informationssysteme. URL: <http://www.tu-chemnitz.de/wirtschaft/bwl7/logis>, Chemnitz, 2002.
- [Mani94] Maniezzo, V.; Dorigo, M.; Coloni, A.: The Ant System Applied to the Quadratic Assignment Problem. In: *Technical Report IRIDIA/94-28*, Université Libre de Bruxelles, Belgium, 1994.
- [Merk00] Merkle, D.; Middendorf, M.; Schneck, H.: Ant Colony Optimization for Resource-Constrained Project Scheduling. In: *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Las Vegas, Nevada, 2000, S. 697-701.
- [Müld99] Mülder, W.: Electronic Data Interchange - Standard mit neuen Perspektiven. In: *Office Management*, 1/1999, S. 20.
- [Neub01] Neubert, R.; Görlitz, O.; Mehnert, J.: IT Unterstützung der Genese von Fertigungsnetzen. In: *Hierarchielose Regionale Produktionsnetze*. Hrsg.: Teich, T., Chemnitz, 2001, S. 95-130.
- [Neum93] Neumann, K.; Morlock, M.: *Operations Research*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1993.
- [Rein94] Reinelt, G.: *The Traveling Salesman: Computational Solutions for TSP Applications*. In: *LNCS, Band 840*, Springer Verlag, 1994.
- [Saat80] Saaty, T.L.: *The Analytical Hierarchy Process*. McGraw Hill, New York, N.J., 1980.

-
- [Seel91] Seeley, T.D.; Camazine, S.; Sneyd, J.: Collective decision-making in honey bees: How colonies choose among nectar sources. In: Behavioural Ecology and Sociobiology, Vol. 28, 1991, S. 277-290.
- [Stue96] Stuetzle, T.; Hoos, H.H.: Improving the Ant System: A Detailed Report on the Max-Min Ant System. In: Technical Report AIDA-96-12, TH Darmstadt, FG Intellektik, 1996.
- [Stue97] Stuetzle, T.; Hoos, H.H.: The Max-Min Ant System and Local Search for the Traveling Salesman Problem. In: Proceedings of ICEC 1997, S. 309-314.
- [Stue00] Stuetzle, T.; Hoos, H.H.: MAX-MIN Ants System. In: FGCS - Future Generation Computer Systems, Volume 16, Number 8 - Special Issue: Ant Algorithms, Elsevier Science, Amsterdam, 2000, S. 889-914.
- [Teic98] Teich, T.: Optimierung von Maschinenbelegungsplänen unter Benutzung heuristischer Verfahren. Josef Eul Verlag, Lohmar, Köln, 1998
- [Teic01a] Teich, T. (Hrsg.): Hierarchielose Regionale Produktionsnetzwerke., GUV-Verlag, Chemnitz, 2001.
- [Teic01b] Teich, T.: Extended Value Chain Management (EVCM) als Betreibermodell hierarchieloser Produktionsnetzwerke. In: Virtuelle Organisation und Neue Medien 2001. Hrsg.: Engelen, M.; Homann, J., Josef Eul Verlag, Lohmar, Köln, 2001, S. 329-348.
- [Teic01c] Teich, T.; Fischer, M.; Vogel, A.; Fischer, J.: A new Ant Colony Algorithm for the Job Shop Scheduling Problem. In: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, San Francisco, California, 2001, S. 803.
- [Teic02] Teich, T.; Zschorn, L.; Jähn, H.: Management of production networks – A new approach to work with probabilities of delivery. In: Proceedings of the 12th International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing – FAIM 2002, Dresden, S. 762 – 771.
- [Walt02] Walter, A.; Teich, T.: Die Polyedrale Analyse als Instrument des Personalmanagements in Netzwerken. In: Kooperationsentwicklung in

zwischenbetrieblichen Netzwerken - Perspektiven für die Praxis. Hrsg.:
Freitag, M.; Winkler, I., DWV, Würzburg, Boston, 2002, S. 83-107.

