

Heuristische Optimierungsverfahren in der Wirtschaftsinformatik

Andreas Fink und Franz Rothlauf

Working Paper 10 / 2006

April 2006

Working Papers in Information Systems 1

University of Mannheim
Department of Information Systems 1
D-68131 Mannheim/Germany
Phone +49 621 1811691, Fax +49 621 1811692
E-Mail: wifol@uni-mannheim.de
Internet: <http://wiftol.bwl.uni-mannheim.de>

**Heuristische Optimierungsverfahren
in der Wirtschaftsinformatik**

Dr. Andreas Fink¹, Dr. Franz Rothlauf²

¹ Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg

Holstenhofweg 85
22043 Hamburg

andreas.fink@hsu-hamburg.de
Tel.: 040/6541-2857
Fax: 040/6541-2780

² Lehrstuhl für Allgemeine BWL und
Wirtschaftsinformatik
Universität Mannheim

Schloss
68131 Mannheim

rothlauf@uni-mannheim.de
Tel.: 0621/181-1689
Fax: 0621/181-1692

Kernpunkte: Der Beitrag gibt einen Überblick zu heuristischen Optimierungsverfahren und erläutert die prinzipiellen Konzepte von Heuristiken und Metaheuristiken. Weiterhin werden die zentralen Herausforderungen für die Wirtschaftsinformatik beim Einsatz heuristischer Optimierungsverfahren im Rahmen von betrieblichen Anwendungssystemen erörtert; diese sind

- die Auswahl heuristischer Optimierungsverfahren für jeweils zu lösende Planungsaufgaben,
- die anwendungsbezogene Gestaltung solcher Verfahren
- sowie die Implementierung und Integration der Verfahren im Rahmen betrieblicher Anwendungssysteme.

Stichworte: Betriebliche Planungssysteme, Heuristiken, Metaheuristiken, Planungsprobleme, Optimierungsverfahren

Kurzzusammenfassung: Heuristische Optimierungsverfahren sind universell einsetzbare Verfahren, welche mit realitätsverträglichem Rechenaufwand hochwertige Lösungen ermitteln und damit zur effektiven Bewältigung realer Entscheidungsprobleme beitragen können. In dem Beitrag werden Herausforderungen für die Wirtschaftsinformatik beim Einsatz von heuristischen Optimierungsverfahren zur Lenkung des betrieblichen Geschehens erörtert. Hierzu erfolgt zunächst ein Überblick über die entsprechenden grundlegenden Konzepte derartiger Verfahren. Daran anschließend werden die entscheidenden Fragestellungen beim Einsatz von heuristischen Optimierungsverfahren im Rahmen von betrieblichen Anwendungssystemen diskutiert. Diese sind die Auswahl geeigneter heuristischer Optimierungsverfahren für eine jeweils zu lösende Planungsaufgabe, deren anwendungsbezogene Gestaltung sowie deren Implementierung und Integration.

1 Einführung

Die Wirtschaftsinformatik (WI) befasst sich mit soziotechnischen Informationssystemen und entsprechenden Informationsverarbeitungsaufgaben in Wirtschaft und Verwaltung [WKWI94]. Hierunter nehmen Planungsaufgaben hinsichtlich der Lenkung des betrieblichen Geschehens einen großen Anteil ein [FeSi01; FiSV05]. Dabei sind sowohl personelle als auch maschinelle (informationstechnische) Aufgabenträger involviert und folglich kann eine Erfüllung entsprechender Aufgaben gar nicht, teilweise oder vollständig automatisiert erfolgen. Im Kontext der von Mertens propagierten Langfristzielsetzung der „sinnhaften Vollautomation“ [Mert95] ist für die WI die (Teil-)Automatisierung der Erfüllung von Planungsaufgaben im Rahmen softwaretechnischer Planungssysteme (Decision Support Systems) von großer Relevanz. Dies lässt sich im Zusammenhang mit integrierten betrieblichen Anwendungssystemen (so genannten ERP-Systemen, Enterprise Resource Planning) erläutern. Ursprünglich adressierte entsprechende ERP-Standardsoftware primär die integrierte Erfassung, Speicherung, Verarbeitung und Nutzung von Informationen im Zusammenhang mit der Abwicklung operativer betrieblicher Aufgaben. Dies wurde durch eine durchgängige Abbildung und (teil-)automatisierte Steuerung der Abwicklung betrieblicher Geschäftsprozessen ergänzt („Business Process Management“ [ScKi04]). Mittlerweile können mit der informationstechnischen Abbildung entsprechender Informationen und Prozesse betriebliche Anwendungssysteme in verstärktem Maße die effektive Lenkung der betrieblichen Leistungserstellung unterstützen. Dies setzt eine Ergänzung entsprechender Systeme durch eine zweckmäßige Planungsfunktionalität voraus (vgl. die so genannten „Advanced Planning Systems“ [Cham01] wie z. B. SAP APO [KaMa05]).

Eine wirksame Lenkung des betrieblichen Geschehens setzt eine realitätsnahe Erfassung von Planungsaufgaben voraus, wobei im Allgemeinen von einem ausgeprägten Trade-Off zwischen der Realitätsnähe des Planungsmodells und der Schwierigkeit der Lösung auszugehen ist. Die Anwendung klassischer exakter Optimierungsverfahren (wie etwa der linearen Optimierung) schränkt die mögliche Struktur der Planungsmodelle stark ein, was etwa das Treffen unrealistischer Annahmen hinsichtlich linearer Wirkungszusammenhänge und kontinuierlicher Entscheidungsvariablen mit sich bringen kann. Folglich ist bei Verwendung entsprechender Planungsmodelle eine „optimale“ Lösung des Ausgangsproblems in der Regel illusorisch. Andererseits führt eine realitätsnahe Modellierung von Planungsproblemen (etwa durch Einbezug nicht-linearer Wirkungszusammenhänge und diskreter Entscheidungsvariablen) zumeist zu komplexen (NP-schweren [GaJo79]) Planungsmodellen, welche einer praktikablen (d. h. laufzeiteffizienten) exakten (d. h. optimalen) Lösung in der Regel nicht zugänglich sind. Dies führt zum Einsatz *heuristischer Optimierungsverfahren* (so bezeichnet in Anlehnung an die gebräuchliche englische Bezeichnung „Heuristic Optimization Methods“, auch wenn „heuristisch“ und „Optimierung“ im strengen Sinne antagonistisch sind). Solche Verfahren können mit realitätsverträglichem Rechenaufwand hochwertige Lösungen ermitteln und damit zur effektiven Bewältigung realer Entscheidungsprobleme beitragen.

Mit der zunehmenden Integration heuristischer Optimierungsverfahren in betriebliche Anwendungssysteme ergeben sich für die WI erweiterte Aufgaben im Bereich der Modellierung betrieblicher Planungsprobleme, beim anwendungsgetriebenen Entwurf heuristischer Optimierungsverfahren und bei der softwaretechnischen Umsetzung und Gestaltung entsprechender Systeme. Dies erstreckt sich im Zusammenhang mit der klassischen dreistufigen Struktur von Anwendungssystemen generell auf die Datenverwaltung (vgl. z. B. die so genannte live-Cache-Technologie in SAP APO sowie die Verwendung von Data Warehouses), die Verarbeitung (vgl. z. B. aktuelle Ansätze zur Parallelisierung von Berechnungsaufgaben durch Grid Computing) sowie die Benutzerschnittstelle. Im Rahmen des Beitrags werden Aufgaben für die WI betrachtet, welche sich vornehmlich bei der taktisch-operativen Steuerung der betrieb-

lichen Leistungserstellung im Zusammenhang mit wohlstrukturierten Optimierungsproblemen ergeben. (Hiervon abzugrenzen sind schlecht strukturierte Entscheidungs- und Führungsprobleme, bei denen eine vollständige Automatisierung der Aufgabenerfüllung nicht möglich erscheint und die Wissensversorgung des Management im Mittelpunkt steht; vgl. z. B. unter dem Begriff Business Intelligence subsumierte Methoden wie etwa Data Mining und Case-Based Reasoning.)

Es ist Ziel des vorliegenden Beitrags, einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Forschung im Bereich heuristischer Optimierungsverfahren zu geben und entsprechende Herausforderungen für die WI bei der Anwendung derartiger Verfahren in betrieblichen Anwendungssystemen zu erörtern. Der Beitrag baut dabei auf früheren Arbeiten zu heuristischen Optimierungsverfahren auf, welche sich z. B. auf eine bestimmte Klasse von heuristischen Optimierungsverfahren fokussieren (vgl. z. B. [Niss97]), spezifische Eigenschaften von unterschiedlichen Verfahren untersuchen (vgl. z. B. [SiKu01]) oder Vergleiche zwischen unterschiedlichen Klassen von Verfahren für ein konkretes Planungsproblem durchführen (vgl. z. B. [ScMe00]). Im Vergleich zu anderen Beiträgen wird allerdings nicht nur der gegenwärtige Stand der Forschung aufgearbeitet, sondern ein Schwerpunkt auf die Herausarbeitung von Forschungsfragen und -aufgaben für die WI bei der Anwendung derartiger Verfahren gelegt. Wichtige Aufgaben hierbei sind die Auswahl geeigneter heuristischer Optimierungsverfahren für eine konkrete Planungsaufgabe, deren anwendungsbezogene Gestaltung sowie deren Implementierung und Integration im Rahmen betrieblicher Anwendungssysteme.

2 Heuristische Optimierungsverfahren

Eine effektive Lenkung betrieblichen Geschehens setzt eine Planung voraus, die geeignete Maßnahmen zur (möglichst weitgehenden) Erreichung eines angestrebten Zustands (Ziels) ermittelt (vgl. z. B. [KlSc04]). Ausgehend von einem Ausgangszustand sind hierzu mögliche Handlungsalternativen zu identifizieren, wobei in Abhängigkeit von unterstellten Wirkungszusammenhängen die Entscheidung für bestimmte Handlungsalternativen zu unterschiedlichen Zielerreichungsgraden hinsichtlich einer unterstellten Präferenzfunktion führt. (Bei komplexen und/oder stochastischen Wirkungszusammenhängen liegt unter Umständen keine analytische Berechnungsvorschrift zur Bestimmung von Zielerreichungsgraden vor, was den Einsatz von Simulationsrechnungen zur Bewertung von Handlungsalternativen notwendig machen kann.) Planung beinhaltet auf der Grundlage einer Problemabgrenzung damit die Bestimmung des Ausgangszustands (Daten), von Handlungsalternativen (Entscheidungsvariablen), von Wirkungszusammenhängen sowie der Zielsetzung. Gegebenenfalls kommen hierbei Prognosen zum Einsatz und es sind verschiedene Formen des Umgangs mit Unsicherheit sowie konkurrierenden Zielen zu berücksichtigen. In der betrieblichen Praxis spielen kombinatorische Probleme eine große Rolle, bei denen diskrete Handlungsalternativen (wie etwa Auswahl-, Zuordnungs- und Reihenfolgeentscheidungen) im Mittelpunkt stehen.

Ausgehend von einem entwickelten wohlstrukturierten Problemmodell sind Optimierungsverfahren erforderlich, welche die Auswahl aus der Menge der Handlungsalternativen (im Sinne von möglichen Lösungen/Plänen) automatisch vornehmen oder unterstützen. Als mögliche Methoden zur Auswahl optimaler Handlungsalternativen haben sich neben klassischen exakten Optimierungsansätzen (z. B. lineare Programmierung, ganzzahlige lineare Programmierung bzw. Branch&Bound-Verfahren) in den letzten Jahren auch zunehmend heuristische Optimierungsverfahren etabliert. Insbesondere für kombinatorische Optimierungsprobleme konnten derartige Verfahren mit Erfolg eingesetzt werden. Im Folgenden wird aufbauend auf einer groben Klassifizierung heuristischer Optimierungsverfahren deren prinzipielle Funktionsweise beschrieben.

2.1 Heuristiken

Heuristiken sind auf Erfahrung („Rules of Thumb“) beruhende Vorgehensweisen zur Suche nach guten, aber nicht notwendigerweise optimalen Lösungen (im Sinne der Auswahl von Handlungsalternativen) für bestimmte Planungsprobleme [Pear84]. Durch die Implementierung von Heuristiken werden problembezogenes Erfahrungswissen und plausible Vorgehensweisen formalisiert und als Software verfügbar gemacht. Dabei wird in der Regel ein – gemäß der obigen Diskussion ohnehin zumeist illusorisches – Optimalitätskriterium zugunsten eines geringen Rechenaufwands und einer einfachen Implementierung aufgegeben. Bei der Gestaltung entsprechender Verfahren liegt das Hauptproblem in der Identifikation einfacher heuristischer Vorgehensweisen, die möglichst gute Lösungen bezüglich vorgegebener Zielkriterien liefern. Heuristiken basieren häufig auf Greedy-Strategien. Im Rahmen solcher Verfahren werden Lösungen schrittweise konstruiert, wobei jeweils eine auf den Konstruktionsschritt bezogene Veränderung der Lösungsqualität bestmöglich gestaltet wird. (In diesem Zusammenhang wird auch die Bezeichnung „Single Pass Heuristic“ verwendet [FiRi88].) Konkrete Ausprägungen von Heuristiken sind problemspezifisch. Beispiele für Heuristiken sind Prioritätsregeln in der Produktionssteuerung [Fan94; Kurb99], welche für die Reihenfolgeplanung von Arbeitsgängen im Rahmen der Fertigungsauftragsplanung eingesetzt werden können.

2.2 Metaheuristiken

Metaheuristiken sind allgemeine, im Wesentlichen nicht problemspezifische und damit generische Prinzipien und Schemata zur Entwicklung und Steuerung heuristischer Verfahren. (Metaheuristiken werden im Englischen üblicherweise als „Metaheuristics“ oder „Modern Heuristic Search Methods“ bezeichnet und sind nicht mit der im deutschen Sprachraum eingeführten „Metaplanung“ [Krei97] identisch. Es ist außerdem darauf hinzuweisen, dass bei Metaheuristiken als *generischen* Modellen die „Meta-“Vorsilbe im Sinne der WI nicht gerechtfertigt erscheint [Stra99].) In der Literatur subsumiert man hierunter insbesondere Verfahren, die im Rahmen eines laufzeiteffizienten Suchprozesses auf die sukzessive Ermittlung verbesserter Lösungen durch eine iterative Anwendung bestimmter Suchoperatoren abzielen und hierbei auf dem Grundansatz der lokalen Suche und/oder auf dem evolutionären/rekombinationsbasierten Prinzip aufbauen. Während bei ersterem Ansatz die schrittweise Variation einer Lösung im Mittelpunkt steht, wird bei letzteren Verfahren die Generierung neuer Lösungskandidaten primär durch eine Kombination von Elementen von Lösungen betrieben. Für beide Vorgehensweisen gilt, dass die Grundzüge entsprechender Verfahren im Sinne einer generischen Schablone allgemein (d. h. unabhängig von einem bestimmten Problemtyp) beschrieben werden können (und dabei teilweise naturinspiert sind), während die eigentliche Anwendung einer Metaheuristik eine Anpassung bzw. Vervollständigung hinsichtlich problemspezifischer Eigenschaften des Planungs-/Entscheidungsproblems erfordert. Metaheuristiken sind in diesem Rahmen für wohlstrukturierte Planungsprobleme fast universell anwendbar. Beispielhaft sei hier hingewiesen auf den Einsatz bei der Produktionsfeinplanung [Kurb99; ScMe00], bei der Erstellung von Zeitplänen [RoHC03], in der Personaleinsatzplanung [Haas99], in der Produktentwicklung [BaJa96] sowie in diversen anderen Anwendungsbereichen [Alan95].

Aus Praxissicht ist die Robustheit von Verfahren ein wichtiges Qualitätskriterium. Robuste Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass resultierende Lösungsqualitäten (sowie anfallende Rechenzeiten) nur unwesentlich von der problembezogenen Verfahrensgestaltung und entsprechenden Adjustierungen der Verfahrensparameter abhängig sind. Grundlegende theoretische Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Metaheuristiken liegen nur sehr eingeschränkt vor (vgl. z. B. [Vose99; Wege03]). Dabei ist zu erwähnen, dass das so genannte „No Free Lunch (NFL)“-Theorem [WoMa97; Culb98] aus theoretischer Sicht eine generelle Überlegenheit bestimmter Verfahren ausschließt. Steigerungen der Leistungsfähigkeit durch Anpas-

sung an jeweilige Problemcharakteristika sind möglich, dies jedoch unter Inkaufnahme einer in der Regel schlechteren Performanz für andere Probleme (vgl. [ChOp01; DrJW02; IgTo05] und die dort angegebene Literatur). Im Rahmen der Komplexitätstheorie liegen umfangreiche Resultate zur Nicht-Approximierbarkeit von Problemen dergestalt vor, dass nicht nur die Bestimmung einer optimalen Lösung sondern auch die Ermittlung einer Lösung mit einem bestimmten Approximationsgrad gegebenenfalls nicht effizient möglich erscheint [ACG+99].

Ein entscheidender Erfolgsfaktor für die praktische Anwendung von Metaheuristiken ist die angemessene Gestaltung von intensivierenden und diversifizierenden Elementen im Suchprozess. Unter Intensivierung („*Exploitation*“) versteht man eine Fokussierung des Suchprozesses in einem bestimmten, als viel versprechend erachteten Bereich des Lösungsraums, während durch Diversifikation („*Exploration*“) eine Ausbreitung des Suchprozesses im Lösungsraum angestrebt wird (d.h., es werden in erheblichem Maße deutlich unterschiedliche Lösungen betrachtet); gerade letzteres erfolgt teilweise zufallsgesteuert. Hinsichtlich des Einsatzes dieser beiden komplementären Konzepte kann man grob unterscheiden in eine explizite Abfolge von Intensivierung und Diversifikation oder die Verschränkung intensivierender und diversifizierender Elemente bei der Anwendung entsprechender Suchoperatoren. Im Folgenden wird eine kurze Einordnung von lokalen und evolutionären/rekombinationsbasierten Suchverfahren sowie den hierbei wirkenden intensivierenden und diversifizierenden Verfahrenselementen gegeben. Hierbei wird weitgehend (abgesehen von selektiven Literaturangaben) auf detaillierte Erläuterungen zum Ablauf und zur Funktionsweise der entsprechenden Verfahren verzichtet; ergänzend sei auf [BlRo03; GIKo03; PaRe02; Voss01] verwiesen.

2.2.1 Lokale Suchverfahren

Lokale Suchverfahren basieren auf dem Verfahrensprinzip der sukzessiven Verbesserung durch wiederholte kleine Modifikationen einer Lösung. Hierbei ist von einer Abbildung der Menge möglicher Handlungsalternativen durch einen Lösungsraum auszugehen. Ein lokales Suchverfahren betrachtet im Verfahrensablauf im Allgemeinen jeweils genau eine Lösung als die aktuelle Lösung. Die in einer Iteration durchzuführenden Modifikationen an der aktuellen Lösung werden durch die Definition einer Nachbarschaftsrelation zwischen Lösungen im Lösungsraum bestimmt. In einem Suchschritt wird durch eine geringe Veränderung eine ähnliche Lösung aus der jeweiligen Nachbarschaft im Lösungsraum als die neue aktuelle Lösung bestimmt. Lokale Suchverfahren unterscheiden sich auf der Grundlage eines Lösungsraums und einer Nachbarschaftsrelation im Wesentlichen in der Art der Auswahl neuer Lösungen.

Ein hohes Ausmaß an Intensivierung im Suchprozess ergibt sich dann, wenn in jeder Iteration eine Lösung aus der jeweiligen Nachbarschaft mit bestmöglichem Zielfunktionswert ausgewählt wird (Greedy-Strategie). Sofern in der aktuellen Nachbarschaft keine Lösung mit besserem Zielfunktionswert vorliegt, stellt die aktuelle Lösung ein lokales Optimum dar, das aber nur in Ausnahmefällen auch das globale Optimum darstellt. In lokalen Suchverfahren kommen daher unterschiedliche Mechanismen zur Überwindung lokaler Optima im Sinne einer Diversifikation zum Einsatz. Typische Strategien hierfür sind der Neustart der Suche von unterschiedlichen Startlösungen (Multi Start Descent, Iterated Local Search [LoMS03]), die bedingte Akzeptanz auch verschlechternder Nachbarlösungen (Simulated Annealing [vLaa87], Threshold Accepting [DuSc90], Stochastic Local Search [HoSt04]), das Speichern und Auswerten von Informationen zum Suchpfad (Tabu Search / Adaptive Memory Programming [GILa97; TGGP01]), die Verwendung unterschiedlicher Nachbarschaftsrelationen (Variable Neighborhood Search [HaMI01], Rollout Algorithm [BeTW97], Pilot Method [DuVo99]) sowie die zielgerichtete Variation der Zielfunktion (Guided Local Search [BaVa98]).

2.2.2 Evolutionäre/rekombinationsbasierte Suchverfahren

Die Grundlagen von evolutionären/rekombinationsbasierten Optimierungsverfahren wurden Mitte der 1960er Jahre gelegt [Holl75; Rech73; Schw65; FoOW66; Glov63]. Darauf basierend entwickelten sich als bedeutende Vertreter dieser Klasse von Suchverfahren Genetische Algorithmen, Evolutionsstrategien, Genetische Programmierung und Scatter Search / Path Relinking. Deren gemeinsame Grundlagen liegen in der Kodierung möglicher Lösungen als Zeichenketten und der primären Anwendung von Rekombinationsoperatoren auf eine Menge (Population) von möglichen Lösungen (Individuen). Derartige Verfahren imitieren damit die Prinzipien der natürlichen Evolution, bei der die Eigenschaften eines Individuums durch Chromosome kodiert werden, mit Hilfe von Rekombinationsoperatoren neue Individuen erzeugt werden und das Überleben bzw. Fortpflanzen von Individuen durch Selektionsprozesse in Abhängigkeit von deren „Fitness“ gesteuert wird.

Auf eine Population von Lösungen werden Rekombinationsoperatoren so angewendet, dass aus jeweils zwei oder mehr Lösungen durch eine Kombination von Eigenschaften der ausgewählten Lösungen neue Lösungen erzeugt werden. Hiermit wird im Wesentlichen eine Diversifikation im Lösungsraum eröffnet. Neu erzeugte Lösungen werden bezüglich der vorgegebenen Zielfunktion bewertet und mit Hilfe von Selektionsoperatoren Lösungen mit einer hohen Lösungsgüte bevorzugt übernommen. Dieser Prozess wird etwa solange wiederholt, bis sich die in der Population befindlichen Individuen oder die entsprechende Lösungsgüte auf hochwertigem Niveau angleichen. Eine weitere Fortsetzung des Suchprozesses hätte dann eher einen intensivierenden Charakter. Gegebenenfalls werden einzelne Lösungen der Population auch zielgerichtet oder zufällig Modifikationen (Mutationen) unterzogen, was entsprechend einen intensivierenden bzw. diversifizierenden Effekt auf den Suchverlauf haben kann. Bezüglich des Konvergenzverhaltens konnte gezeigt werden, dass bei geeigneter Parametrisierung evolutionäre/rekombinationsbasierte Verfahren gegen das Optimum konvergieren [DaPr91; Rudo97]. Für weiterführende Informationen zur Funktionsweise sei auf die Arbeiten von [Gold89; Niss97] (Genetische Algorithmen), [Schw95] (Evolutionsstrategien), [LaPo02] (Genetische Programmierung) und [LaMa03] (Scatter Search) verwiesen.

2.3 Hybride und sonstige Suchverfahren

In der Literatur ist eine Vielzahl von Mischformen dokumentiert, bei denen unterschiedliche Elemente der beiden Verfahrensklassen (lokal sowie evolutionär/rekombinationsbasiert) zu leistungsfähigen hybriden Verfahren kombiniert werden, worauf an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird. Darüber hinaus wurden in den letzten Jahren eine Reihe weiterer Verfahren entwickelt, welche auf einer Koordination paralleler Suchprozesse basieren. Hierzu zählen Ameisensysteme sowie im Allgemeinen Multiagentensysteme.

Im Rahmen von Ameisensystemen („*Ant Colony Optimization*“ [DoSt04]) konstruieren einzelne Ameisen (Suchprozesse) schrittweise vollständige Lösungen für das zu lösende Planungsproblem und markieren dabei qualitativ hochwertige Lösungen oder Elemente entsprechender Lösungen (in Analogie zu Pheromonspuren in der Natur). Diese Informationen werden im weiteren Verlauf der Suche von anderen Ameisen verwendet, um neue Lösungen unter Bevorzugung markierter Lösungen bzw. entsprechender Lösungselemente zu erzeugen. Inzwischen sind erfolgreiche Anwendungen von Ameisensystemen für diverse Planungsprobleme dokumentiert, wobei der Erfolg entsprechender Verfahren allerdings teilweise auf die integrierte Verwendung von Elementen lokaler Suchverfahren zurückzuführen ist (vgl. z. B. [DoDG99; MeMi03]). In diesem Zusammenhang ist eine starke Modifikation der Ursprungsmetapher dahingehend zu beobachten, dass die wesentlichen Verfahrenselemente effektiver Ameisensysteme kaum noch etwas mit dem Verhalten natürlicher Ameisen zu tun haben.

Komplexe Planungsprobleme, die eine Koordination (partiell) autonomer (Teil-)Systeme umfassen, sind zentralistischen Planungsansätzen oft nicht zugänglich. Dies gilt insbesondere dann, wenn relevante Informationen nur dezentral vorliegen und konfliktäre Interessen zu berücksichtigen sind. In solchen Fällen ist gegebenenfalls eine verteilte/dezentrale Form der Problemlösung angebracht. Im Rahmen entsprechender Multiagentensysteme [Wool02] handeln (Software-)Agenten im Wesentlichen eigenständig, kooperieren dabei aber mit anderen Agenten des Systems, um eine Koordination in Systemen zu erreichen oder gemeinsam eine Aufgabe zu lösen. Je nachdem, ob die vorliegende Problemstellung an sich einer hierarchischen Planung zugänglich wäre oder eine Koordination zwischen autonomen Entscheidungsträgern mit unterschiedlichen Präferenzen und Informationsasymmetrie erforderlich ist, liegen Multiagentensysteme in unterschiedlichen Ausprägungen vor. Auf der einen Seite steht die Parallelisierung des Suchprozesses durch eine kooperative Interaktion verteilter Suchprozesse im Mittelpunkt; hier können auch Ameisensysteme eingeordnet werden. Auf der anderen Seite können Agenten tatsächlich Repräsentanten autonomer Entscheidungsträger darstellen. Bei solchen Interaktionen kann nicht per se kooperatives Verhalten unterstellt werden, sondern es sind zweckmäßige verifizierbare Ablaufregeln hinsichtlich angestrebter Koordinationsziele zu gestalten; dies führt zu verhandlungsbasierten Ausprägungen verteilter heuristischer Suchprozesse (vgl. z. B. [KFSB03; Fink04]).

3 Anwendung heuristischer Optimierungsverfahren

Vor der Betrachtung der erforderlichen Schritte bei der Anwendung heuristischer Optimierungsverfahren in betrieblichen Anwendungssystemen wird im Folgenden kurz auf die unterschiedliche Schwerpunktsetzung der WI versus dem Operations Research (OR) beim Umgang mit derartigen Optimierungsverfahren eingegangen. Im OR sind vereinfachend zwei Richtungen zu unterscheiden. Auf der einen Seite beschäftigt sich die *theoretische Richtung*, welche man im Wesentlichen auch unter der Angewandten Mathematik bzw. der Mathematischen Optimierung subsumieren kann, mit der „Ausarbeitung von insbesondere mathematischen Theorien zu einzelnen Fragestellungen“ (so [Gal91, S. 12] in Anlehnung an [MüMe79]). Im Gegensatz hierzu kann die *angewandte Richtung* dadurch charakterisiert werden, dass diese „hauptsächlich Verfahren für konkret vorliegende praxisrelevante Modelle entwickelt, Modelle für verschiedene aus der Praxis kommende Problemstellungen erarbeitet, Programme und Programmpakete entwickelt usw.“ [Gal91, S. 12]. Das heißt, es geht um die „modellgestützte Vorbereitung von Entscheidungen zur Gestaltung und Steuerung soziotechnischer Systeme“ [MüMe91, S. 20]. In einem weiten Verständnis heißt dies: „Operational Research (OR) involves the application of scientific methods to the management of complex systems of people, machinery, materials, monetary resources and information. It seeks to produce an understanding of managerial problems and to develop models, which will enable the consequences of decisions to be investigated.“ [EURO99]. Im Gegensatz zu dieser eigentlich ausgeprägt anwendungsbezogenen Zielsetzung ist allerdings im Wissenschaftsbetrieb des OR eine Tendenz zur theoretischen Richtung zu beobachten [Abot88; CoWa93], wobei die mathematische Betrachtung von Optimierungsverfahren im Mittelpunkt steht.

Wie in der Einführung beschrieben betrachtet die WI Informationsverarbeitungsaufgaben in soziotechnischen Systemen in Wirtschaft und Verwaltung. Hierbei geht es insbesondere auch um Lenkungsaufgaben und deren informationstechnisch (teil-)automatisierte Erfüllung. Dementsprechend stellt auch die Anwendung heuristischer Optimierungsverfahren in betrieblichen Anwendungssystemen einen Betrachtungsgegenstand der WI dar. Ohne hier das Verhältnis zwischen WI und OR und die teilweise kontroverse Diskussion in der Literatur aufarbeiten zu wollen (vgl. z. B. [MüMe92; Sinz91; Simo97]), kann die WI als Brücke [MüMe02] oder „Transmissionsriemen“ zwischen der problemgebenden Disziplin Betriebswirtschaftslehre und den primär methodenbezogenen Disziplinen OR und Informatik verstanden werden. Da-

bei sind zwar Fragen der Entwicklung und Analyse von Optimierungsverfahren primär als eine Aufgabe des OR zu betrachten; da jedoch bei der Gestaltung von Anwendungssystemen mit Lenkungscharakter die Anwendung heuristischer Optimierungsverfahren als methodische Instrumente in der Regel nicht im Sinne einer schlichten Werkzeugnutzung (in der Form einer Black Box, s. u.) erfolgen kann, sind Fragestellungen zur Anwendung heuristischer Optimierungsverfahren für die WI von zentraler Relevanz.

3.1 Auswahl geeigneter Verfahren

Im zweiten Abschnitt wurde beschrieben, dass heuristische Optimierungsverfahren sehr flexibel einsetzbar sind und bei der Anwendung derartiger Verfahren nur geringe grundsätzliche Anforderungen an die Struktur der zu lösenden Planungsprobleme zu berücksichtigen sind. Es ist lediglich notwendig, dass Lösungen des Planungsproblems (z. B. Maschinenbelegungspläne) so kodiert werden, dass geeignete Suchoperatoren (etwa eine lokale Veränderung oder eine Rekombination) auf das Problem angewandt werden können. Außerdem müssen Lösungen bezüglich ihrer Güte mithilfe einer Zielfunktion bewertet werden können. Auf dieser Grundlage können heuristische Optimierungsverfahren für viele Probleme eingesetzt werden, welche klassischen Verfahren des OR wie z. B. der linearen Programmierung nur eingeschränkt zugänglich sind (z. B. nicht-lineare, nicht-stetige und NP-schwere Probleme). Bei der Gestaltung von Anwendungssystemen mit Optimierungskomponenten ist es damit bei Verwendung heuristischer Optimierungsverfahren möglich, das zu lösende Planungsproblem relativ realitätsnah abzubilden. Der Einsatz derartiger Verfahren entspricht damit dem von Mertens [Mert98, S. 173] formulierten Kriterium der „Brauchbarkeit in der Wirklichkeit“: „Im Verhältnis zur (Kern-) Informatik fällt der WI (ähnlich wie in der Relation zum OR) auch die Aufgabe zu, die oft zu einfachen und für die Praxis nicht repräsentativen Beispiele (‘Toy Examples’), an denen die Informatiker die Methoden [...] zu erläutern pflegen, auf Brauchbarkeit in der Wirklichkeit zu prüfen.“ Mertens fordert weiter, dass „gegebenenfalls [...] exakte, aber letztlich nicht mit vernünftigen Implementierungsaufwand und erträglichen Antwortzeiten realisierbare Verfahren durch pragmatische Heuristiken ersetzt werden“.

Die Vielfalt und quasi universelle Anwendbarkeit heuristischer Optimierungsverfahren bringt ein Auswahlproblem mit sich. Für die Auswahlentscheidung kann oft nur sehr eingeschränkt auf in der Literatur publizierte Ergebnisse zurückgegriffen werden, da im Rahmen entsprechender Beiträge insbesondere untersucht wird, inwieweit ein bestimmtes Verfahren geeignet erscheint, ein vorgegebenes Problem zu lösen. Ausführliche und umfassende Vergleiche unterschiedlicher Verfahren (etwa hinsichtlich der erzielbaren Lösungsqualitäten und resultierender Rechenzeiten) liegen nur für eine geringe Menge von „Standardproblemen“ vor (z. B. für das klassische Traveling Salesman Problem [JoMG02] oder bestimmte Maschinenbelegungsprobleme [Teic98]) und fokussieren sich in der Regel auf wenige ausgewählte Verfahren und Standardparameter. Aussagekräftige Vergleichsstudien hinsichtlich der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Verfahren in Abhängigkeit von Merkmalen realistischer Planungsprobleme existieren nur in geringem Maße. Dies kann teilweise dadurch erklärt werden, dass die Verfahren in unterschiedlichen Forschungs-Communitys (weiter-)entwickelt wurden und werden, und Untersuchungen häufig implizit darauf abzielen, die Eignung (oder Überlegenheit) eines jeweils bevorzugt betrachteten Verfahrens für bestimmte Problemstellungen zu belegen. Dies kann beispielhaft an [KKS+04] erläutert werden; dort wird gezeigt, dass Genetische Programmierung (GP) in der Lage ist, für fünfzehn verschiedene Problemstellungen Lösungen zu finden, welche „*human-competitive*“ sind (d. h., die durch GP gefundenen Lösungen sind vergleichbar mit durch menschliche Experten entwickelten Lösungen). Die mit Hilfe von GP gefundenen Lösungen sind bemerkenswert, lassen jedoch keinerlei Aussagen darüber zu, ob andere Verfahren u. U. bessere Ergebnisse als die im Rahmen der Studien ein-

gesetzten Ansätze liefern, und ob die eingesetzten Verfahren damit tatsächlich für die betrachteten Probleme vorzugsweise anzuwenden sind.

Theoretisch fundierte Hilfestellungen für die Auswahl geeigneter heuristischer Optimierungsverfahren können in einem gewissen Maße aus den Grundprinzipien der jeweiligen Verfahren gewonnen werden. So wird z. B. in [ChOp01] gezeigt, dass lokale Suchverfahren dann relativ gute Ergebnisse liefern, wenn ähnliche Lösungen eine ähnliche Lösungsgüte aufweisen. Lösungen sind in diesem Zusammenhang ähnlich zueinander, wenn hinsichtlich einer verwendeten Nachbarschaftsrelation nur wenige Suchschritte zwischen entsprechenden Lösungen liegen. Rekombinationsbasierte/evolutionäre Verfahren sind im Allgemeinen dann leistungsfähig, wenn das zu lösende Planungsproblem in einzelne „Building Blocks“ zerlegt werden kann [Gold02, Abschnitt 5]. Gute Ergebnisse werden dadurch erklärt, dass entsprechende Probleme zerlegbar sind. Bei der Lösung werden hochwertige Teillösungen für einzelne Teilprobleme ermittelt und anschließend die Gesamtlösung aus Teillösungen zusammengesetzt. Im Rahmen von Scatter Search [LaMa03] wird dieser Lösungsansatz explizit verwendet; als hochwertige erachtete Teillösungen werden dort als „Consistent Chains“ bezeichnet. Die direkte praktische Anwendung solcher theoretischen Erkenntnisse ist allerdings oft schwierig, da für eine umfassende Untersuchung, inwieweit ähnliche Lösungen ähnliche Eigenschaften haben oder ob ein Problem zerlegbar ist, im Prinzip alle möglichen Lösungen (Handlungsalternativen) betrachtet werden müssten und damit der Einsatz von Optimierungsverfahren ad absurdum geführt würde.

In der Praxis haben Anwender bei der Auswahl geeigneter heuristischer Optimierungsverfahren für ein konkretes Planungsprobleme also entweder die Möglichkeit, auf erfolgreiche Anwendungen von Verfahren aus der Literatur zurückzugreifen, oder sie können erfahrungsbasiert abschätzen, ob ein gegebenes Problem die für den erfolgreichen Einsatz bestimmter heuristischer Optimierungsverfahren notwendigen Merkmale aufweist. Da generelle Aussagen zur Leistungsfähigkeit heuristischer Optimierungsverfahren für unterschiedliche Typen von Planungsproblemen bisher nur rudimentär existieren, ist der Anwender damit häufig auf persönliche Erfahrungen und Geschick angewiesen. Dementsprechend ist hier ein erheblicher Forschungsbedarf zu den Zusammenhängen zwischen Problemmerkmalen, Lösungsverfahren und erzielten Lösungsqualitäten und hierauf basierenden systematischen Auswahlkriterien zu konstatieren.

3.2 Verfahrensgestaltung

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert wurde, definieren Metaheuristiken generische Prinzipien und Schemata zur Steuerung heuristischer Verfahren, welche problemspezifisch angepasst werden müssen. In dieser Notwendigkeit liegt ein wesentlicher Unterschied zwischen der Anwendung heuristischer Optimierungsverfahren und den meisten klassischen Verfahren des OR. So können z. B. für lineare Planungsprobleme (LP: Linear Programming) oder in Grenzen auch für ganzzahlige Optimierungsprobleme (MIP: Mixed Integer Programming) beschränkter Größe, generische LP- bzw. MIP-Solver als Standardsoftware(-komponenten) verwendet werden (vgl. z. B. die Produkte von ILOG und etwa auch entsprechende „Solver“ als Bestandteil von Tabellenkalkulationssystemen). Das OR stellt hier also Optimierungsverfahren zur Verfügung, die im Sinne einer Black Box in der Form einer schlichten Werkzeugnutzung eine entsprechende Aufgabenerfüllung ermöglichen. Dies setzt jedoch gegebenenfalls eine starke Vereinfachung von Planungsproblemen und entsprechende Abstriche hinsichtlich Realitätsnähe voraus (vgl. z. B. die in SAP APO integrierten Verfahren zur betriebsstättenübergreifenden Grobplanung von Produktionsmengen im Rahmen des Supply Network Planning oder für die operative Fertigungsfeinplanung und Tourenplanung, die jeweils das Vorliegen bestimmter Merkmale des Planungsproblems voraussetzen [Zeie02]). Eine Vielzahl realer Planungsprobleme kann hingegen nicht in dem Maße sinnvoll vereinfacht und angepasst werden, dass

Standardverfahren verwendet werden könnten. Für die Bewerkstelligung einer effektiven Lösung entsprechender individueller Problemstellungen ist dann eine problemspezifische Verfahrensgestaltung erforderlich (vgl. z. B. [DrWi00; PuGo02]). Das heißt, der Einsatz von „Standardverfahren“ ist dann nicht angebracht, wenn dies eine zu weitgehende Vereinfachung der realen Planungsaufgabe erfordert und damit eventuell zur Lösung des „falschen“ Problems führt (vgl. [Acko73, S. 670f.]: „[...] accounts are given about how messes were murdered by reducing them to problems, how problems were murdered by reducing them to models, and how models were murdered by excessive exposure to the elements of mathematics.“).

Nach der grundsätzlichen Auswahl eines geeigneten heuristischen Optimierungsverfahrens ist dieses in einem zweiten Schritt also problemspezifisch zu gestalten. Die wichtigsten Designentscheidungen sind hierbei die Definition eines geeigneten Suchraums (im Sinne der Kodierung von Handlungsalternativen des Planungsproblems), die Festlegung von dazu passenden Suchoperatoren und/oder Nachbarschaftsrelationen, die Bestimmung von geeigneten Startlösungen für die heuristische Suche und die Ermittlung einer geeigneten Zielfunktion, welche den unterschiedlichen Handlungsalternativen (Lösungen) eine Lösungsgüte zuweist. Darüber hinaus müssen gegebenenfalls verfahrensspezifische Parameterwerte festgelegt werden.

Bei der Gestaltung von heuristischen Optimierungsverfahren ist es wichtig, dass charakteristische Eigenschaften des zu lösenden Planungsproblems berücksichtigt werden und dadurch die durch das resultierende heuristische Optimierungsverfahren erreichbare Lösungsqualität erhöht wird. Die Verwendung von problembezogenem Erfahrungswissen spielt z. B. bei der Gestaltung prioritätsregelbasierter Heuristiken (vgl. Abschnitt 2.1) im Rahmen „problemgebender“ Fachdisziplinen (etwa im Bereich Produktion und Logistik) eine große Rolle. Bei der Anwendung von Metaheuristiken ist die problemspezifische Gestaltung der Verfahren und die Berücksichtigung von problemspezifischem Vorwissen für das konkrete Design der Verfahren von Bedeutung [ChOp01; DrWi00]. Mittlerweile wird der Anwender durch einige anwendungsorientierte Arbeiten unterstützt, welche einen Zusammenhang zwischen der Verfahrensgestaltung und der erzielbaren Lösungsqualität herstellen. So wurde etwa untersucht, wie die Lösungsqualität von rekombinationsbasierten/evolutionären Verfahren von der verwendeten Problemkodierung [WiRa97; Roth02] oder von den eingesetzten Suchoperatoren [Reev99; RoVW02] abhängt. Ähnlich wie für die Auswahl geeigneter Verfahren beschränken sich jedoch die meisten Arbeiten auf einzelne Verfahren; praktisch verwendbare Aussagen zur problemspezifischen Gestaltung von unterschiedlichen heuristischen Optimierungsverfahren liegen nur sehr eingeschränkt vor.

3.3 Implementierung

Letztlich besteht in der Praxis die Aufgabe, ein ausgewähltes und konzeptionell gestaltetes Verfahren als Bestandteil eines Anwendungssystems, also als Software, verfügbar zu machen. Bei einfachen Heuristiken gibt es aufgrund der weitgehenden Problemabhängigkeit nur sehr eingeschränkte Optionen für Software-Wiederverwendung, allerdings ist der Aufwand für die Implementierung des eigentlichen Verfahrens in der Regel relativ geringfügig.

Die Generizität von Metaheuristiken bedeutet, dass bei einer problemspezifischen Anwendung entsprechender Verfahren für neuartige Problemstellungen ein gewisser Implementierungsaufwand in der Regel unvermeidbar ist. Hierbei ist der Einsatz von Anwendungs-Frameworks möglich, die allgemeingültige Verfahrensbestandteile zur Verfügung stellen und lediglich eine Implementierungsergänzung gemäß problemspezifischer Variationspunkte („Hot Spots“) im Rahmen einer definierten Architektur notwendig machen. Die entsprechenden Potenziale und Grenzen einer softwaretechnischen Unterstützung für die praktische Anwendung von Metaheuristiken zur Lösung betrieblicher Planungsprobleme werden in [FiVo03] erörtert.

Durch Verwendung eines Anwendungs-Frameworks kann auch den in den vorausgehenden Abschnitten diskutierten Problemen bei der Auswahl und der Gestaltung von Verfahren teilweise dadurch begegnet werden, dass mit relativ geringem Aufwand diverse Verfahren und unterschiedliche Gestaltungsalternativen umgesetzt und hinsichtlich ihrer Eignung für den eigentlichen Produktiveinsatz beurteilt werden können (vgl. auch [SiKu01]).

4 Fazit

Generell besteht „eine der wesentlichen Aufgaben der WI in der Wissenschaft in der Unterstützung des Modellgebrauchs sowie in der anwendungs- und problembezogenen Kombination existierender Modelle“ [Lehn95, S. 163]. Man denke etwa an das Strukturierte Entity-Relationship-Modell [Sinz88] oder Ereignisgesteuerte Prozessketten [KeNS92] als methodische Adaptionen und Erweiterungen von generischen Modellierungsansätzen bei der Daten- bzw. Prozessmodellierung zur Bewältigung von Komplexität in der Domäne Wirtschaft und Verwaltung. Bezogen auf die Anwendung von Metaheuristiken als generischen Modellen im Rahmen der automatisierten Erfüllung von Planungsaufgaben geht es darum, den Brückenschlag zwischen Optimierungsverfahren, abstrakten Optimierungsmodellen und realen Planungsproblemen durch geeignete „Pfeiler“ zu unterstützen. Ein solcher Brückenschlag stellt ein erhebliches Problem dar, da wie oben beschrieben eine direkte Verwendung heuristischer Optimierungsverfahren in der Form einer schlichten Werkzeugnutzung nicht möglich ist. Für die WI ergeben sich im Zusammenhang mit der Anwendung von heuristischen Optimierungsverfahren damit die folgenden Forschungsfragen:

- Auswahl: Ausgehend von einer unterschiedlichen Leistungsfähigkeit heuristischer Optimierungsverfahren für unterschiedliche Planungsprobleme ist zu untersuchen, welche Verfahren im Zusammenhang mit gewissen Problemcharakteristika effektiv eingesetzt werden können. Nur dann können Handlungsempfehlungen darüber getroffen werden, welche „pragmatischen Heuristiken“ für welche Klassen von Planungsproblemen vorzugsweise geeignet sind.
- Gestaltung: Heuristische Optimierungsverfahren liegen in der Regel nur in Form generischer Prinzipien vor und müssen problemspezifisch angepasst werden. Es ist herauszuarbeiten, welche „Stellgrößen“ für die einzelnen Verfahren existieren und wie diese entsprechend der Eigenschaften der zu lösenden Planungsaufgabe einzustellen sind.
- Implementierung: Es ist für die WI von Interesse, wie die Implementierung heuristischer Optimierungsverfahren durch geeignete Frameworks unterstützt werden kann, wie derartige Verfahren durch wiederverwendbare Komponenten gekapselt werden können und wie derartige Komponenten sinnvoll in ERP-Systemen integriert werden können. Weiterhin müssen Fragen zu geeigneten Benutzerschnittstellen adressiert werden (z. B. in welchem Ausmaß sollen betriebliche Anwender Zugriff auf verfahrensspezifische Parameter haben) und Diffusions- und Adaptionaspekte bei der Verwendung von heuristischen Optimierungsverfahren im Rahmen der betrieblichen Planung untersucht werden.

Die ausführliche Diskussion in Abschnitt 3 hat gezeigt, dass in diesen Bereichen noch erheblicher Forschungsbedarf besteht. Für die WI sind hierbei zunächst Fragestellungen zu Abhängigkeiten zwischen Verfahrensauswahl, Verfahrensgestaltung und Lösungsqualität im Zusammenhang mit Merkmalen realer Planungsprobleme zu untersuchen. Auf dieser Grundlage sind systematische Handlungsempfehlungen (einschließlich Vorgehensmodellen und Best Practices) und softwaretechnische Unterstützung für den problemgetriebenen Einsatz heuristischer Optimierungsverfahren zu entwickeln, um hiermit mittelfristig zu einem entsprechenden

Technologietransfer in praktische Anwendungssysteme mit Planungscharakter beizutragen („No systems, no impact“ [Niev94]).

Literaturverzeichnis

- [Abot88] *Abott, A.*: The System of Professions: An Essay on the Division of Expert Labor. The University of Chicago Press, Chicago 1988.
- [ACG+99] *Ausiello, G.; Crescenzi, P.; Gambosi, G.; Kann, V.; Marchetti-Spaccamela, A.; Protasi, M.*: Complexity and Approximation: Combinatorial Optimization Problems and Their Approximability Properties. Springer, Berlin Heidelberg 1999.
- [Acko73] *Ackoff, R.L.*: Science in the systems age: Beyond IE, OR and MS. In: Operations Research 21 (1973), S. 661–671.
- [Alan95] *Alander, J.T.*: Indexed bibliography of genetic algorithms in economics. Technischer Bericht 94-1-ECO, University of Vaasa, Department of Information Technology and Production Economics, 1995.
- [BaJa96] *Balakrishnan, P.V.; Jacob, V. S.*: Genetic algorithms for product design. In: Management Science 42 (1996), S. 1105–1118.
- [BaVa98] *Balas, E.; Vazacopoulos, A.*: Guided local search with shifting bottleneck for job shop scheduling. In: Management Science 44 (1998), S. 262–275.
- [BeTW97] *Bertsekas, D.; Tsitsiklis, J.; Wu, C.*: Rollout algorithms for combinatorial optimization. In: Journal of Heuristics 3 (1997), S. 245–262.
- [BlRo03] *Blum, C.; Roli, A.*: Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. ACM Computing Surveys 35 (2003), S. 268–308.
- [Cham01] *Chamoni, P.*: Advanced Planning Systems – Integration von Wirtschaftsinformatik und Operations Research. In: *Werners, B.; Gabriel, R.* (Hrsg.): Rechnungswesen und Planungssysteme – Entwicklung und Ausblick. Arbeitsbericht Nr. 86, Institut für Unternehmungsführung und Unternehmensforschung, Ruhr-Universität Bochum, 2001, S. 74–88.
- [ChOp01] *Christensen, S.; Oppacher, F.*: What can we learn from No Free Lunch? In: *Spector L. et al.* (Hrsg.): Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2001: Morgan Kaufmann Publisher, San Francisco 2001, S. 1219–1226.
- [CoWa93] *Corbett, C.J.; van Wassenhove, L.N.*: The natural drift: What happened to Operations Research? In: Operations Research 41 (1993), S. 625–640.
- [Culb98] *Culberson, J.C.*: On the futility of blind search: An algorithmic view of “no free lunch”. In: Evolutionary Computation 6 (1998), S. 109–127.
- [DaPr91] *Davis, T.E.; Principe, J.C.*: A simulated annealing like convergence theory for the simple genetic algorithm. In: *Belew R.; Booker, L.* (Hrsg.): Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, Morgan Kaufmann, San Francisco 1991, S. 174–182.
- [DoDG99] *Dorigo, M.; Di Caro, G.; Gambardella, L.M.*: Ant algorithms for discrete optimization. In: Artificial Life 5 (1999), S. 137–172.
- [DoSt04] *Dorigo, M.; Stützle, T.*: Ant Colony Optimization. MIT Press, Cambridge 2004
- [DrJW02] *Droste, S.; Jansen, T.; Wegener, I.*: Optimization with randomized search heuristics: The (A)NFL theorem, realistic scenarios, and difficult functions. Theoretical Computer Science 287 (2002), S. 131–144.
- [DrWi00] *Droste, S.; Wiesmann, D.*: On the design of problem-specific evolutionary algorithms. In: *Ashish, G.; Shigeyoshi, T.* (Hrsg.): Advances in Evolutionary Computing. Springer, Berlin Heidelberg 2002, S. 153–173.
- [DuSc90] *Dueck, G.; Scheuer, T.*: Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm appearing superior to simulated annealing. In: Journal of Computational Physics 90 (1990), S. 161–175.
- [DuVo99] *Duin, C.; Voß, S.*: The pilot method: A strategy for heuristic repetition with application to the Steiner problem in graphs. Networks 34 (1999), S. 181–191.
- [EURO99] *EURO (The Association of European Operational Research Societies)*: Special Bulletin Issue on “European Journal of Operational Research”, Vol. 8 (1999) 4.
- [Fan94] *Fandel, G.*: PPS-Systeme. Springer, Berlin Heidelberg 1994.
- [FeSi01] *Ferstl, O.K.; Sinz, E.J.*: Grundlagen der Wirtschaftsinformatik: Band 1. 4. Aufl., Oldenbourg, München Wien 2001.
- [Fink04] *Fink, A.*: Supply chain coordination by means of automated negotiations. In: Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE 2004.
- [FiRi88] *Fisher, M.L.; Rinnooy Kan, A.H.G.*: The design, analysis and implementation of heuristics. In: Management Science 34 (1988), S. 263–265.
- [FiSV05] *Fink, A.; Schneidereit, G.; Voß, S.*: Grundlagen der Wirtschaftsinformatik. 2. Aufl., Physica/Springer, Berlin Heidelberg 2005.
- [FiVo03] *Fink, A.; Voß, S.*: Anwendung von Metaheuristiken zur Lösung betrieblicher Planungsprobleme: Potenziale und Grenzen einer softwaretechnischen Unterstützung. In: Wirtschaftsinformatik 45 (2003), S. 395–407.

- [FoOW66] *Fogel, L.J.; Owens, A.J.; Walsh, M.J.*: Artificial Intelligence through Simulated Evolution. Wiley, New York 1966.
- [GaJo79] *Garey, M.R.; Johnson, D.S.*: Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness. Freeman, New York 1979.
- [Gal91] *Gal, T. (Hrsg.)*: Grundlagen des Operations Research, 1. Einführung, Lineare Optimierung, Nichtlineare Optimierung, Optimierung bei mehrfacher Zielsetzung. Springer, Berlin Heidelberg 1991.
- [GILKo03] *Glover, F.; Kochenberger, G.A. (Hrsg.)*: Handbook of Metaheuristics. Kluwer, Boston 2003.
- [GILa97] *Glover, F.; Laguna, M.*: Tabu Search. Kluwer, Boston 1997.
- [Glov63] *Glover, F.*: Parametric combinations of local job shop rules. Chapter IV, ONR Research Memorandum no. 117, GSIA, Carnegie Mellon University, Pittsburgh 1963.
- [Gold89] *Goldberg, D.E.*: Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading 1989.
- [Gold02] *Goldberg, D.E.*: The Design of Innovation. Kluwer, Dordrecht 2002.
- [Haas99] *Haase, K.*: Modellgestützte Personaleinsatzplanung im Einzelhandel. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaftslehre 69 (1999), S. 233–244.
- [HaMI01] *Hansen, P.; Mladenović, N.*: Variable neighborhood search – Principles and applications. In: European Journal of Operational Research 130 (2001), S. 449–467.
- [Holl75] *Holland, J.H.*: Adaptation in natural and artificial systems. University of Michigan Press, Ann Arbor 1975.
- [HoSt04] *Hoos, H.H.; Stuetzle, T.*: Stochastic Local Search – Foundations & Applications. Morgan Kaufmann, San Francisco 2004.
- [IgTo05] *Igel, C.; Toussaint, M.*: A No-Free-Lunch theorem for non-uniform distributions of target functions. In: Journal of Mathematical Modeling and Algorithms, im Druck, 2005.
- [JoMG02] *Johnson, D.; McGeoch, L.*: Experimental analysis of heuristics for the STSP. In: *Gutin, G.; Punnen, A.P. (Hrsg.)*: The Traveling Salesman Problem and Its Variations. Kluwer Academic, Boston 2002.
- [KaMa05] *Kallrath, J.; Maindl, T.I.*: Real Optimization with SAP APO. Springer, Berlin Heidelberg 2005, in Vorbereitung.
- [KeNS92] *Keller, G.; Nüttgens, M.; Scheer, A.-W.*: Semantische Prozeßmodellierung auf der Grundlage „Ereignisgesteuerter Prozeßketten (EPKs)“. In: *Scheer, A.-W. (Hrsg.)*: Veröffentlichungen des Instituts für Wirtschaftsinformatik, Universität des Saarlandes, Heft 89. Saarbrücken 1992.
- [KFSB03] *Klein, M.; Faratin, P.; Sayama, H.; Bar-Yam, Y.*: Negotiating complex contracts. In: Group Decision and Negotiation 12 (2003), S. 111–125.
- [KKS+04] *Koza, J.R.; Keane, M.A.; Streeter, M.J.; Mydlowec, W.; Yu, J.*: Genetic Programming IV: Routine Human-Competitive Machine Intelligence. Springer, Berlin Heidelberg 2004.
- [KISc04] *Klein, R.; Scholl, A.*: Planung und Entscheidung. Vahlen, München 2004.
- [Krei97] *Kreikebaum, H.*: Strategische Unternehmensplanung. Kohlhammer, Stuttgart 1997.
- [Kurb99] *Kurbel, K.*: Produktionsplanung und -steuerung – Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. Oldenbourg, München 1999.
- [LaMa03] *Laguna, M.; Marti, R.*: Scatter Search: Methodology and Implementations in C. Kluwer, Boston 2003.
- [LaPo02] *Langdon, W.B.; Poli, R.*: Foundations of Genetic Programming. Springer, Berlin Heidelberg 2002.
- [Lehn95] *Lehner, F.*: Modelle und Modellierung. In: *Lehner, F.; Hildebrand, K.; Maier, R. (Hrsg.)*: Wirtschaftsinformatik: Theoretische Grundlagen. Hanser, München 1995, S. 73–164.
- [LoMS03] *Lourenco, H.R.; Martin, O.; Stützle, T.*: Iterated Local Search. In: *Glover, F.; Kochenberger, G.A. (Hrsg.)*: Handbook of Metaheuristics. Kluwer, Boston 2003, S. 321–353.
- [MeMi03] *Merkle, D.; Middendorf, M.*: An ant algorithm with global pheromone evaluation for scheduling a single machine. In: Applied Intelligence 18 (2003), S. 105–111.
- [Mert95] *Mertens, P.*: Wirtschaftsinformatik: Von den Moden zum Trend. In: *König, W. (Hrsg.)*: Wirtschaftsinformatik '95, Physica, Heidelberg 1995, S. 25–64.
- [Mert98] *Mertens, P.*: Geschichte und ausgewählte Gegenwartsprobleme der Wirtschaftsinformatik. In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium (WiSt) 27 (1998), S. 170–175.
- [MüMe79] *Müller-Merbach, H.*: Operations Research – Mit oder ohne Zukunftschancen? In: Festschrift für Herrn Professor Rühl: Industrial Engineering und Organisations-Entwicklung. Hanser, München 1979, S. 291–311.
- [MüMe91] *Müller-Merbach, H.*: Operations Research als modellgestützte Entscheidungsvorbereitung. In: *Gal, T. (Hrsg.)*: Grundlagen des Operations Research, 1. Einführung, Lineare Optimierung, Nichtlineare Optimierung, Optimierung bei mehrfacher Zielsetzung. Springer, Berlin Heidelberg 1991, S. 18–55.
- [MüMe92] *Müller-Merbach, H.*: Die ungenutzte Synergie zwischen Operations Research und Wirtschaftsinformatik. Wirtschaftsinformatik 34 (1992), S. 334–339.

- [MüMe02] Müller-Merbach, H.: Die Brückenaufgabe der Wirtschaftsinformatik. In: Wirtschaftsinformatik 44 (2002), S. 300–301.
- [Niev94] Nievergelt, J.: Complexity, algorithms, programs, systems: The shifting focus. In: Journal of Symbolic Computation 17 (1994), S. 297–310.
- [Niss97] Nissen, V.: Evolutionäre Algorithmen. In: Wirtschaftsinformatik 37 (1995), S. 393–397.
- [PaRe02] Pardalos, P.P.; Resende, M.G.C. (Hrsg.): Handbook of Applied Optimization, Oxford University Press, New York 2002.
- [Pear84] Pearl, J.: Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving. Addison-Wesley, Reading 1984.
- [PuGo02] Puchta, M.; Gottlieb, J.: Solving car sequencing problems by local optimization. In: Cagnoni, S. et al. (Hrsg.): Applications of Evolutionary Computing, Lecture Notes in Computer Science 2279, Springer, Berlin Heidelberg 2002, S. 131–140.
- [Rech73] Rechenberg, I.: Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Friedrich Frommann, Stuttgart Bad-Cannstatt 1973.
- [Reev99] Reeves, C.R.: Landscapes, operators and heuristic search. In: Annals of Operations Research 86 (1999), S. 473–490.
- [RoHC03] Ross, P.; Hart, E.; Corne, D.: Genetic algorithms and timetabling. In: Advances in Evolutionary Computing: Theory and Applications. Springer New York, 2003, S. 755–771.
- [Roth02] Rothlauf, F.: Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms. Springer, Berlin Heidelberg 2002.
- [RoVW02] Rowe, J.E.; Vose, M.D.; Wright, A.H.: Group properties of crossover and mutation. In: Evolutionary Computation 10 (2002), S. 151–184.
- [Rudo97] Rudolph, G.: Convergence Properties of Evolutionary Algorithms. Schriftenreihe Forschungsergebnisse der Informatik, Bd. 35, Kovac, Hamburg 1997.
- [ScMe00] Schultz, J.; Mertens, P.: Untersuchung wissensbasierter und weiterer ausgewählter Ansätze zur Unterstützung der Produktionsfeinplanung – ein Methodenvergleich. In: Wirtschaftsinformatik 42 (2000), S. 56–65.
- [Schw65] Schwefel, H.-P.: Kybernetische Evolution als Strategie der experimentellen Forschung in der Strömungstechnik, Diplomarbeit, Technische Universität Berlin 1965.
- [Schw95] Schwefel, H.-P.: Evolution and Optimum Seeking. Wiley, New York 1995.
- [ScKi04] Scheer, A.-W.; Kirchner, M.: Business process excellence & OR. OR/MS Today, April 2004, S. 48–52.
- [SiKu01] Singh K.; Kurbel, K.: Ease-of-use, implementation and performance of heuristics for optimization – A comparison of evolutionary and iterative improvement methods. In: International Journal on Artificial Intelligence Tools 10 (2001), S. 407–419.
- [Simo97] Simon, H.A.: The future of information systems. In: Annals of Operations Research 71 (1997), S. 3–14.
- [Sinz88] Sinz, E.J.: Das Strukturierte Entity-Relationship-Modell (SER-Modell). In: Angewandte Informatik 30 (1988), S. 191–202.
- [Sinz91] Sinz, E.J.: Wieviel Operations Research braucht die Wirtschaftsinformatik? In: Wirtschaftsinformatik 33 (1991), S. 234–235.
- [Stra99] Strahringer, S.: Probleme und Gefahren im Umgang mit “Meta”-Begriffen: ein Plädoyer für eine sorgfältige Begriffsbildung. In: Proceedings of the International Knowledge Technology Forum (KnowTechForum) '99, Potsdam, 16. –18. September 1999.
- [Teic98] Teich, T.: Optimierung von Maschinenbelegungsplänen unter Benutzung heuristischer Verfahren. Josef Eul, Köln 1998.
- [TGGP01] Taillard, É.D.; Gambardella, L.-M.; Gendreau, M.; Potvin, J.-Y.: Adaptive memory programming: A unified view of metaheuristics. In: European Journal of Operational Research 135 (2001), S. 1–16.
- [vLAA87] Van Laarhoven, P.J.M.; Aarts, E.H.L.: Simulated Annealing: Theory and Applications. Reidel, Dordrecht 1987.
- [Vose99] Vose, M.: The Simple Genetic Algorithm: Foundations and Theory. MIT Press, Cambridge 1999.
- [Voss01] Voss, S.: Meta-heuristics: The state of the art. In: Nareyek, A. (Hrsg.): Local Search for Planning and Scheduling, Lecture Notes in Artificial Intelligence 2148, Springer, Berlin Heidelberg 2002, S. 1–23.
- [Wege03] Wegener, I.: Towards a theory of randomized search heuristics. In: Rován, B.; Vojtáš, P. (Hrsg.): Mathematical Foundations of Computer Science, Lecture Notes in Computer Science 2747, Springer, Berlin Heidelberg 2003, S. 125–141.
- [WiRa97] Whitley, D.; Rana, S.: Representation, Search and Genetic Algorithms. In: Proceedings of the 14th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-97), AAAI Press, Menlo Park 1997, S. 497–502.
- [WKW194] WKWI (Wissenschaftliche Kommission Wirtschaftsinformatik im Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft): Profil der Wirtschaftsinformatik. Wirtschaftsinformatik 36 (1994), S. 80–81.
- [WoMa97] Wolpert, D.H.; Macready, W.G.: No free lunch theorems for optimization. In: IEEE Transactions on Evolutionary Computation 1 (1997), S. 67–82.
- [Wool02] Wooldridge, M.J.: Introduction to Multi-Agent Systems. Wiley, Chichester 2002.

[Zeie02] *Zeier, A.:* Ausdifferenzierung von Supply-Chain-Management-Standardsoftware in Richtung auf Betriebstypen und Branchen unter besonderer Berücksichtigung des SAP APO. Röll, Dettelbach 2002.