

Boysen, Ole; Juretzka, Jan; Kimms, Alf

Working Paper — Digitized Version

Ameisen-Systeme zur kapitalwertmaximierenden Projektplanung

Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 499

Provided in Cooperation with:

Christian-Albrechts-University of Kiel, Institute of Business Administration

Suggested Citation: Boysen, Ole; Juretzka, Jan; Kimms, Alf (1999) : Ameisen-Systeme zur kapitalwertmaximierenden Projektplanung, Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel, No. 499, Universität Kiel, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Kiel

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/147588>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Manuskripte
aus den
Instituten für Betriebswirtschaftslehre
der Universität Kiel

Nr. 499

**Ameisen-Systeme zur
kapitalwertmaximierenden Projektplanung**

O. Boysen, J. Juretzka und A. Kimms



Manuskripte
aus den
Instituten für Betriebswirtschaftslehre
der Universität Kiel

Nr. 499

**Ameisen-Systeme zur
kapitalwertmaximierenden Projektplanung**

O. Boysen, J. Juretzka und A. Kimms

März 1999

Ole Boysen

Hofbrook 32, 24119 Kronshagen

Dipl.-Kfm. Jan Juretzka, MS

Graduiertenkolleg "Betriebswirtschaftslehre für Technologie und Innovation", Institut für betriebswirtschaftliche Innovationsforschung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Westring 425, 24118 Kiel

email: Juretzka@bwl.uni-kiel.de

Dr. Alf Kimms

Lehrstuhl für Produktion und Logistik, Institut für Betriebswirtschaftslehre, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Olshausenstr. 40, 24118 Kiel

email: Kimms@bwl.uni-kiel.de

URL: <http://www.wiso.uni-kiel.de/bwlinstitute/Prod>
<ftp://ftp.wiso.uni-kiel.de/pub/operations-research>

1 Problemstellung

Wir betrachten das Problem der Ablaufplanung von Projekten, also von einmaligen, zeitlich und sachlich begrenzten Vorhaben. Als Ergebnis der sogenannten Strukturplanung zerlegt sich ein Projekt in mehrere Aktivitäten (Vorgänge). Typischerweise existieren Vorrangbeziehungen zwischen einzelnen Aktivitäten, die z.B. wegen technologischer Gegebenheiten strikt einzuhalten sind. Kennt man die (geschätzte) Dauer der einzelnen Aktivitäten, so lassen sich mit den Standardmethoden der Netzplantechnik früheste Startzeitpunkte berechnen. Legt man, z.B. in Absprache mit einem Kunden, einen spätesten Termin für die Fertigstellung des Projekts fest, so lassen sich entsprechend späteste Endzeitpunkte für die Aktivitäten ermitteln. Häufig beanspruchen die Vorgänge knappe Ressourcen (z.B. Personal), so daß gewisse Vorgänge nicht gleichzeitig ausgeführt werden können. Gegenstand der Ablaufplanung ist es nun, die Ausführung der Aktivitäten zeitlich so einzuplanen, daß ein gegebenes Zielkriterium bestmöglich erfüllt wird.

Das in der Literatur am häufigsten verfolgte Ziel besteht in der Minimierung der Projektdauer.¹ Sind keine knappen Ressourcen zu berücksichtigen, so können alle Aktivitäten zu ihrem frühesten Startzeitpunkt eingeplant werden. Konkurrieren die Aktivitäten allerdings um knappe Ressourcen, so ist das Problem der Ablaufplanung nicht mehr trivial. Optimal können dann nur noch kleine Instanzen mit etwa 50 Vorgängen gelöst werden,² so daß für praxisrelevante Problemstellungen derzeit lediglich heuristische Lösungsverfahren in Betracht kommen.

In der Praxis zeigt sich allerdings,³ daß nicht nur eine möglichst kurze Projektdauer, sondern auch andere Ziele wie z.B. hohe Qualität oder geringes Risiko genannt werden, ohne daß dabei klar ist, wie diese Ziele zu operationalisieren sind.

In der Literatur hat sich vor allem ein weiteres Ziel als Gegenstand der Betrachtung durchgesetzt: Unterstellt wird zunächst, daß die Durchführung einzelner Aktivitäten mit Einzahlungen bzw. Auszahlungen verbunden ist. Motiviert durch die finanzwirtschaftliche Vorgehensweise, die Vorteilhaftigkeit eines Projekts an seinem Kapitalwert zu beurteilen, und die Erkenntnis, daß der Kapitalwert eines Projekts vom realisierten Ablaufplan abhängt, wurden Methoden untersucht, um einen kapitalwertmaximierenden Ablaufplan zu bestimmen. Im folgenden soll ein Überblick über den Stand der Forschung gegeben werden,⁴ bevor in den nächsten Abschnitten ein eigenes neues Verfahren entwickelt und getestet wird.

1.1 Projektplanung ohne Ressourcenbeschränkungen

Das Problem der kapitalwertmaximierenden Projektplanung wurde erstmals von *Russel* wissenschaftlich aufgegriffen.⁵ Er formulierte ein nicht-lineares Entscheidungsmodell und beschrieb ein Approximationsverfahren. *Grinold* gelang die Transformation des nicht-linearen Modells in ein lineares.⁶ Er machte dieses Problem damit der linearen Programmierung zugänglich. Durch Ausnutzung problemspezifischer Eigenschaften konnte er ein

¹ *Drexl et al.* (1997)

² Vgl. hierzu z.B. *Demeulemeester und Herroelen* (1992), *Demeulemeester und Herroelen* (1997) und *Sprecher* (1996).

³ *Icmeli Tükel und Rom* (1998)

⁴ Vgl. auch *Herroelen et al.* (1997) und *Kolisch* (1997).

⁵ *Russel* (1970)

⁶ *Grinold* (1972)

sehr effizientes Verfahren zur Bestimmung optimaler Lösungen entwickeln, das noch heute als Teilmodul zur Lösung von Instanzen mit Ressourcenbeschränkungen verwendet wird.⁷ *Elmaghraby* und *Herroelen* präsentierten ein weiteres Lösungsverfahren⁸ von dem *Sepil* jedoch zeigen konnte, daß es nicht notwendigerweise eine optimale Lösung findet.⁹ Erst vor kurzem gelang es *Demeulemeester* et al., ein optimales Verfahren zu entwickeln, das schneller arbeitet als *Grinold's* Verfahren.¹⁰ Zusammenfassend kann also festgestellt werden, daß das Problem der kapitalwertmaximierenden Projektplanung ohne Beschränkung der Ressourcen effizient und optimal gelöst werden kann. Heuristiken für dieses Problem müssen nicht entwickelt werden.

1.2 Projektplanung mit Ressourcenbeschränkungen

Wie schon unter der Zielsetzung der Minimierung des Fertigstellungszeitpunktes gilt auch bei der kapitalwertmaximierenden Projektplanung, daß ein knappes Ressourcenangebot das Problem ungleich schwieriger macht. So verwundert es nicht, daß effiziente exakte Verfahren kaum gefunden werden konnten. Auf der Basis von Branch-and-Bound Prinzipien basieren die Vorschläge von *Yang* et al.,¹¹ sowie *Icmeli* und *Erenguc*,¹² wobei letztgenanntes eindeutig überlegen ist.

Nicht zuletzt mit Blick auf praxisrelevante Problemgrößen beherrschen Heuristiken das Feld der Lösungsvorschläge. Besonderes Interesse galt hier den sogenannten Prioritätsregelverfahren.¹³ Hierzu gehört auch das von *Yang* et al. entwickelte, Simulated Annealing-basierte Konstruktionsverfahren.¹⁴ Moderne Metaheuristiken wurden erst in jüngster Zeit untersucht. So entwickelten *Icmeli* und *Erenguc* ein Tabu Search Verfahren,¹⁵ und *Mayer* diskutiert einen genetischen Algorithmus, ein weiteres Tabu Search Verfahren sowie eine Kombination der beiden Ansätze.¹⁶

2 Grundprinzipien eines Konstruktionsverfahrens

Bevor wir die Details eines neuen heuristischen Verfahrens darstellen, soll hier zunächst die grundlegende Idee zur Konstruktion einer (suboptimalen) Lösung an einem einfachen Beispiel illustriert werden. Projekte werden von uns durch knotenorientierte Netzpläne abgebildet, d.h. die Knoten des Netzplans stellen die Aktivitäten dar und die Pfeile des Netzplans repräsentieren Vorrangbeziehungen. Für ein Beispielprojekt mit 6 Aktivitäten sei der Vorranggraph in Abbildung 1 gegeben. Die Zahlen in den Knoten bezeichnen die jeweilige Aktivität, während unterhalb des Knotens eine Einzahlung bzw. Auszahlung abgetragen ist, die anfällt, sobald die entsprechende Aktivität beendet ist. Die Zahlen oberhalb der Knoten geben die Dauer der Aktivität und die pro Zeiteinheit benötigte Ressourceneinheiten an. Der Einfachheit halber unterstellen wir hier, daß lediglich eine

⁷ *Icmeli* und *Erenguc* (1996)

⁸ *Elmaghraby* und *Herroelen* (1990)

⁹ *Sepil* (1994)

¹⁰ *Demeulemeester* et al. (1995)

¹¹ *Yang* et al. (1992)

¹² *Icmeli* und *Erenguc* (1996)

¹³ Vgl. z.B. *Baroum* und *Patterson* (1996), *Padman* et al. (1997) sowie *Russel* (1986).

¹⁴ *Yang* et al. (1995)

¹⁵ *Icmeli* und *Erenguc* (1994)

¹⁶ *Mayer* (1998)

einzigste knappe Ressource mit einer Verfügbarkeit von 3 Einheiten pro Periode zu betrachten ist. Aktivität 3 dauert beispielsweise 4 Zeiteinheiten und benötigt 2 Einheiten der knappen Ressource. Nach Beendigung der Aktivität fällt eine Einzahlung von 75 Geldeinheiten an.

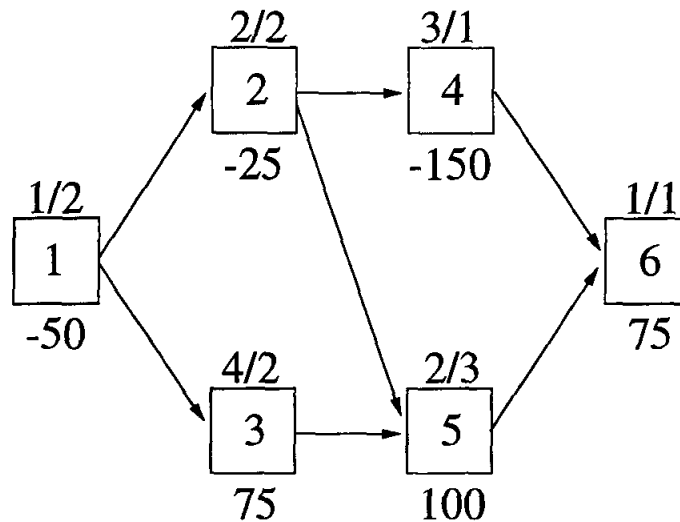


Abbildung 1: Netzplan des Beispiels

Der späteste Fertigstellungstermin des Projekts sei nach 12 Zeiteinheiten. Für die einzelnen Vorgänge ergeben sich damit die in Tabelle 1 angegebenen frühesten bzw. spätesten Start- bzw. Endzeitpunkte.

Nummer der Aktivität	frühester Startzeitpunkt	frühester Endzeitpunkt	spätester Startzeitpunkt	spätester Endzeitpunkt
1	0	1	4	5
2	1	3	6	8
3	1	5	5	9
4	3	6	8	11
5	5	7	9	11
6	7	8	11	12

Tabelle 1: Ergebnis der Zeitplanung

Die Entscheidung darüber, wann ein Vorgang eingeplant wird, ist äquivalent zu der Entscheidung, wann ein Vorgang beendet wird, da wir — wie in der Literatur üblich — unterstellen, daß die Aktivitäten nicht unterbrechbar sind. Im folgenden werden wir uns daher nur noch mit der Bestimmung der Endzeitpunkte der Aktivitäten beschäftigen.

2.1 Konstruktionsprinzip

Die Grundidee zur Konstruktion einer Lösung beruht nun darauf, die einzelnen Aktivitäten in einer zufällig gewählten Reihenfolge einzuplanen, wobei bereits eingeplante

Vorgänge die Einplanung weiterer Vorgänge beeinflussen. Da aber bereits das bloße Finden einer zulässigen Lösung ein schwieriges Problem ist, wird darauf verzichtet, die strikte Einhaltung von Vorrang- und Kapazitätsrestriktionen zu beachten. Vielmehr wird über Auswahlwahrscheinlichkeiten für die denkbaren Endzeitpunkte einer Aktivität versucht, einen zulässigen und guten Plan anzusteuern. Bei der Ermittlung der Wahrscheinlichkeiten zur Auswahl von Endzeitpunkten werden zweierlei Informationen verarbeitet. Zum einen führt die Einplanung von Vorgängen zur Modifikation der Prioritätswerte, aus denen wiederum die Auswahlwahrscheinlichkeiten für die nachfolgend einzuplanenden Aktivitäten abgeleitet werden. Zum anderen führt das Ergebnis einer Phase der Konstruktion von Projektplänen zur Anpassung der Prioritätswerte für einen nächsten Durchlauf der Konstruktionsphase, so daß sich nach mehreren Durchläufen des Verfahrens Lerneffekte einstellen und gute zulässige Lösungen gefunden werden.

Um die Grundidee an dem eingeführten Beispiel zu illustrieren, unterstellen wir innerhalb des ersten Durchlaufs der Konstruktionsphase, daß die Aktivitäten des Beispiels für die Konstruktion eines Projektplanes in der Reihenfolge 5–3–1–2–6–4 einzuplanen seien. Da Aktivität 5 mit einer Einzahlung verbunden ist, scheint es mit Blick auf einen hohen Kapitalwert sinnvoll zu sein, diese Aktivität so früh wie möglich einzuplanen. Wir unterstellen die in Abbildung 2 wiedergegebenen Prioritätswerte, welche zu den Wahrscheinlichkeiten für die zufällige Auswahl der Endzeitpunkte führen. Hierbei sind die Wahrscheinlichkeiten proportional zu den Prioritätswerten festgelegt worden. Für Aktivität 5, die zu einer Einzahlung führt, ist die Auswahlwahrscheinlichkeit früher Perioden sinnvollerweise größer als die Auswahlwahrscheinlichkeit später Perioden.

Nehmen wir nun an, daß Periode 9 als Endzeitpunkt für Aktivität 5 ausgewählt wird. Als nächstes ist dann Vorgang 3 einzuplanen. Da dieser Vorgang ebenfalls mit einer Einzahlung verbunden ist, sollten auch hier die Prioritäten für frühe Perioden höher sein als für späte Perioden (vgl. Abbildung 2). Da Vorgang 5 mit einer Dauer von 2 Zeiteinheiten in Periode 9 beendet wird, also auch noch in Periode 8 aktiv ist, sollte der Prioritätswert von Aktivität 3, die direkte Vorgängeraktivität von Vorgang 5 ist, in den Perioden 8 und 9 klein sein, um die Einhaltung dieser Vorrangbeziehung möglichst wahrscheinlich werden zu lassen (vgl. auch hier Abbildung 2). Nehmen wir nun an, daß das Ende der Aktivität 3 in Periode 5 eingeplant wird. Danach ist Aktivität 1 einzuplanen usw. bis alle Aktivitäten zeitlich fixiert sind. An dem in Abbildung 2 dargestellten Ablauf der Konstruktion eines Projektplanes ist hervorzuheben, daß die Konstruktion einer zulässigen Lösung nicht gewährleistet ist. So wird z.B. die Reihenfolgebeziehung zwischen den Aktivitäten 4 und 6 nicht eingehalten und die verfügbare Kapazität von 3 Ressourceneinheiten wird in Periode 9 überschritten (Aktivitäten 4 und 5 mit einem Ressourcenbedarf von insgesamt 4 Einheiten). Dieses Ergebnis kann nun benutzt werden, um eine Anpassung der Prioritätswerte innerhalb eines zweiten (und ggfs. weiterer) Durchlaufs der Konstruktionsphase durchzuführen, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist.

2.2 Umsetzung

Hinsichtlich der Implementierung des zuvor beschriebenen Konstruktionsprinzips zur Bestimmung einer Lösung bleibt festzulegen, wie die Ermittlung der Prioritätswerte im einzelnen zu erfolgen hat und auf welche Art und Weise die Auswahlwahrscheinlichkeiten der Endzeitpunkte aus den Prioritätswerten abzuleiten sind.

Die Ermittlung der Prioritätswerte für die möglichen Endzeitpunkte eines Vorganges j

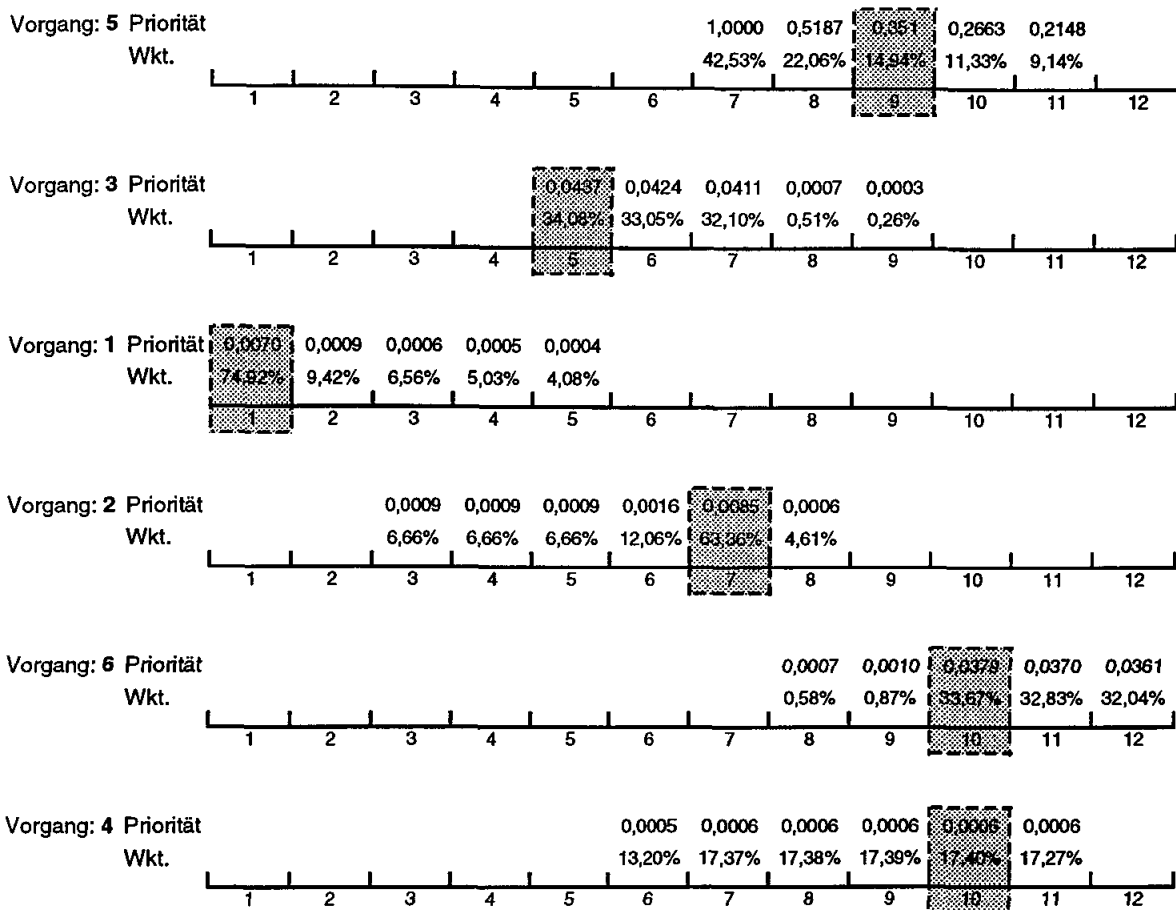


Abbildung 2: Konstruktion eines ersten Projektplanes

erfolgt im wesentlichen unter Heranziehung der zugehörigen Zahlung. Um ausschließlich positive Werte zu garantieren, ermitteln wir den Prioritätswert η_{jt} des Vorganges j für den Endzeitpunkt t mittels folgender Berechnungsvorschrift:

$$\eta_{jt} = \frac{1}{\text{maximale Erhöhung des Kapitalwerts} - \text{Barwert}_{jt} + 1} \quad (1)$$

Hierbei entspricht Barwert_{jt} dem Wert der auf den Zeitpunkt $t = 0$ abgezinsten Zahlung für Vorgang j . Die Aufnahme der *maximalen Erhöhung des Kapitalwerts* — errechnet als $\max_{j,t} \text{Barwert}_{jt}$ — stellt sicher, daß der Nenner nicht negativ werden kann. Letztlich erhalten wir auf das Intervall $(0,1]$ normierte Prioritätswerte. Im obigen Beispiel führt die Einplanung der Aktivität 5 in Periode 9 zu einer Erhöhung des Projektkapitalwerts um 91.39 GE. Da in unserem Fall eine einzelne Aktivität den Projektkapitalwert um maximal 93.24 GE erhöhen kann, ergibt sich der Prioritätswert $\eta_{59} = 0.351$ aus $1/(93.24 - 91.39 + 1)$.

Hinsichtlich der angegebenen Berechnungsvorschrift bleibt zweierlei anzumerken: Erstens führt die angegebene Berechnung bei mit Auszahlungen verbundenen Vorgängen, wie gewünscht, zu einer Bevorzugung späterer Perioden. Zweitens werden fiktive Auszahlungen bei der Ermittlung der Prioritätswerte in solchen Fällen verrechnet, in denen

die Auswahl von Endzeitpunkten zu Unzulässigkeiten im Projektplan führt. Derart ist beispielsweise für Aktivität 3 in den Perioden 8 bis 9 verfahren worden. So hätte eine Einplanung der Aktivität 3 für Periode 8 einerseits zu einer zeitlichen Überschneidung der Aktivitäten 3 und 5 in einer Periode, und andererseits zu einer Überschußnachfrage von 2 Ressourceneinheiten in Periode 8 geführt. Deshalb ist bei der Ermittlung von η_{38} im Rahmen des Barwert eine zusätzliche fiktive Auszahlung in Höhe von 3·Bestrafungswert berücksichtigt worden. Die Höhe der berücksichtigten fiktiven Auszahlung hängt somit vom Ausmaß der im Plan induzierten Unzulässigkeit ab.

Im angegebenen Beispiel sind die Auswahlwahrscheinlichkeiten proportional zu den Prioritätswerten gewählt worden. Falls jedoch eine stärkere Fokussierung der Lösungssuche gewünscht ist, wird oftmals eine Verzerrung der Auswahlwahrscheinlichkeiten in Richtung auf Endzeitpunkte mit relativ hohen Prioritätswerten hin vorgenommen. Hierzu ließen sich die Prioritätswerte η_{jt} beispielsweise potenzieren. Im Anschluß daran können die Auswahlwahrscheinlichkeiten dann wiederum proportional zu den so modifizierten Prioritätswerten festgelegt werden.

2.3 Verbessernde Maßnahmen

An dieser Stelle soll auf zwei problemspezifische Möglichkeiten zur nachträglichen Verbesserung eines konstruierten Projektplanes eingegangen werden. Im ersten Fall wird der Projektplan dahingehend untersucht, ob eine einzelne Aktivität gefunden werden kann, deren zeitliche Verschiebung zu einer Verbesserung führt. So stellt Abbildung 3 einen Fall dar, bei dem durch das zeitliche Vorziehen des Vorgangs 4 um 3 Perioden ein zulässiger Projektplan erreicht werden kann. Im zweiten Fall wird überprüft, ob es sich lohnt, eine Teilmenge der Aktivitäten des Projektplanes geschlossen zeitlich vorzuziehen oder zu verzögern. Beispielsweise zeigt Abbildung 4 einen Ablaufplan, bei dem die in Periode 2 zur Verfügung stehende Ressource ungenutzt bleibt. Da nun ein geschlossenes Vorziehen der Vorgänge 2 bis 6 um jeweils eine Periode mit einer Erhöhung des Projektkapitalwertes einhergeht, wird ein derartige nachträgliche Verbesserung des Projektplanes ebenfalls ausgeführt.

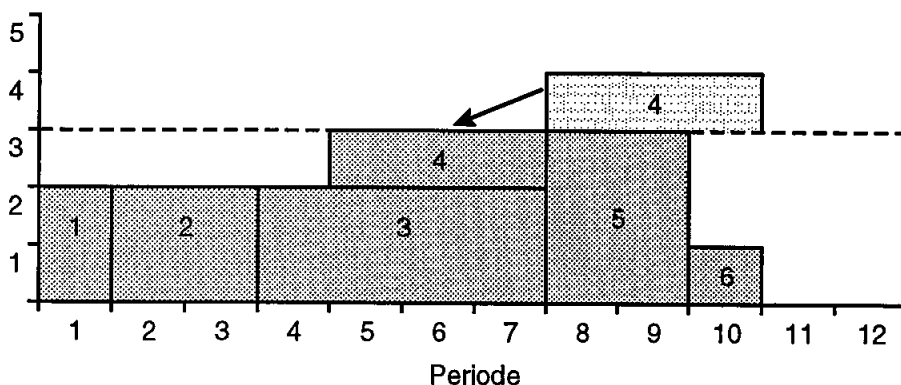


Abbildung 3: Verbesserung durch zeitliche Verschiebung einer Aktivität

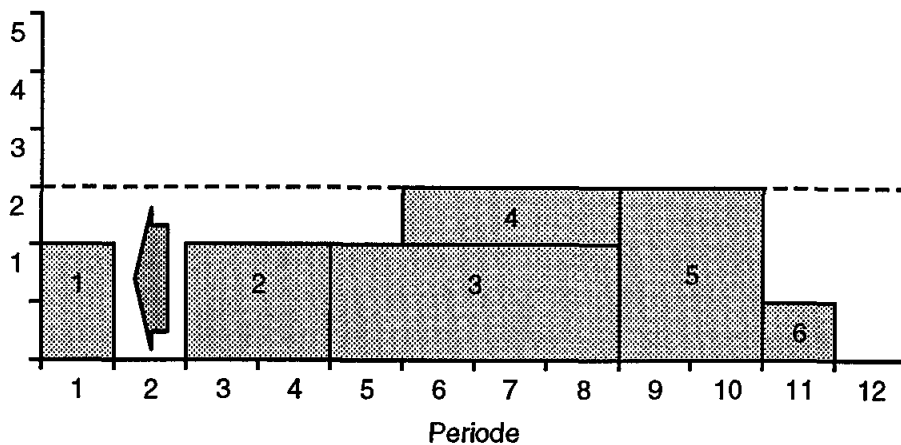


Abbildung 4: Verbesserung durch zeitliche Verschiebung einer Teilmenge der Aktivitäten

3 Lerneffekte

Während wir uns im vorangehenden Abschnitt mit der Konstruktion jeweils eines Projektplanes befaßt haben, geht es uns nun darum, Lerneffekte bei der wiederholten Konstruktion von Projektplänen auszunutzen. Zunächst stellen wir hierzu die prinzipielle Vorgehensweise, welche sich an das Verhalten natürlicher Ameisen bei der Nahrungssuche anlehnt, vor. Im Anschluß daran wird die Umsetzung dieser Vorgehensweise eingehender erläutert.

3.1 Prinzipielle Vorgehensweise

Wir verwenden die Idee sogenannter Ameisen-Systeme¹⁷: Ameisen sind zu Beginn ihrer Nahrungssuche aufgrund ihrer fast vollständigen Blindheit weitgehend ungeleitet, weshalb neue Nahrungsquellen mehr oder weniger zufällig durch einzelne Ameisen gefunden werden. Wenn eine Ameise zu einer (neuen) Nahrungsquelle gelangt, bewertet sie deren Güte, um auf ihrem Rückweg eine entsprechende Menge einer chemischen Substanz zu hinterlassen. Diese Spuren gestatten es nachfolgenden Ameisen, ihre Nahrungssuche zielorientierter durchzuführen. So entscheiden sie sich bei erneuter Nahrungssuche mit größerer Wahrscheinlichkeit zugunsten von Wegen mit intensiveren Spuren.

Zur Übertragung dieses Prinzip der Lösungssuche ist das vorliegende Optimierungsproblem genauer zu betrachten: Charakterisiert wird ein Projektplan dadurch, daß jeder Aktivität ein Endzeitpunkt zugeordnet ist. Endzeitpunkte, bei deren Verwendung häufig gute Projektpläne konstruiert werden konnten, sollten naheliegender Weise vermehrt Bestandteil neuer konstruierter Lösungen werden. Um derartige Informationen speichern zu können, weisen wir zu Beginn des Verfahrens allen Endzeitpunkten einer Aktivität initiale Gewichte zu. Wenn nun ein "guter" Projektplan konstruiert wird, so werden für die Aktivitäten die Gewichte der gewählten Endzeitpunkte verstärkt. Somit entsprechen

¹⁷Solche künstlichen Ameisen-Systeme sind unter anderem für Traveling Salesman-Probleme, vgl. z.B. *Dorigo und Gambardella* (1997), und quadratische Zuordnungsprobleme, vgl. z.B. *Maniezzo und Colormi* (1998), entwickelt worden.

die Gewichte, denen die Aufgabe zukommt, Lerneffekte überhaupt erst zu ermöglichen, im wesentlichen den Spuren.

Ausführlicher läßt sich die gewählte Vorgehensweise des hier vorgestellten künstlichen Ameisen-Systems zur kapitalwertmaximierenden Projektplanung wie folgt beschreiben: Anfänglich werden die Gewichte aller Aktivitäten zu den jeweiligen Endzeitpunkten initialisiert. Daraufhin wird eine vorgegebene Anzahl von Projektplänen konstruiert, wobei jeweils eine zufällige Einplanungsreihenfolge bestimmt wird. Da zu diesem Zeitpunkt noch keinerlei Informationen in den Gewichten verarbeitet sind, erfolgt die Einplanung der Aktivitäten ausschließlich anhand der Prioritätswerte (vgl. hierzu Abschnitt 2). Nach Erstellung der Projektpläne erfolgt eine Anpassung der Gewichte. Einerseits reduziert sich die bisherige Intensität der Gewichte fortwährend (Verflüchtigung), andererseits werden die Gewichte der Endzeitpunkte, welche zu guten Projektplänen geführt haben, verstärkt. In unserem Fall erfolgt die Anpassung der Gewichte unter Einbeziehung des bezogen auf den letzten Durchlauf besten Projektplans. Unter Verwendung der so angepaßten Gewichte konstruieren wir wiederum eine vorgegebene Anzahl Projektpläne. Anpassung der Gewichte und Konstruktion neuer Projektpläne wechseln sich solange ab, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erreicht ist.

Nachdem die prinzipielle Vorgehensweise vorgestellt wurde, führen wir jetzt das Beispiel aus Abschnitt 2.1 fort. Hierbei sei angenommen, daß die zuvor konstruierte Lösung die beste des ersten Durchlaufs der Konstruktionsphase ist. Aufgrund dessen sind die Gewichte für den zweiten Durchlauf, wie in Abbildung 5 angegeben, angepaßt worden. Dabei ist unterstellt worden, daß die Verflüchtigung der Gewichte 30% beträgt. Die Gewichte wurden mit 10 initialisiert. Somit ergibt sich für die im ersten Durchlauf nicht erfolgreichen Gewichte eine Intensität von nunmehr 7. Die zuvor gefundene Lösung habe die zugehörigen Endzeitpunkte um 8 Einheiten verstärkt. Festzulegen bleibt, auf welche Art und Weise die Gewichte in die Bestimmung der Auswahlwahrscheinlichkeiten mit einfließen sollen. Für unser Beispiel sei der Einfachheit halber unterstellt, daß die Auswahlwahrscheinlichkeiten proportional zu dem Produkt aus Prioritätswert und zugehörigem Gewicht bestimmt werden.

Abbildung 5 gibt die Konstruktion eines Projektplans für die Einplanungsreihenfolge 1-6-5-4-2-3 an. Für Aktivität 1 führt dies dazu, daß Periode 1 eine relativ hohe Auswahlwahrscheinlichkeit zugeteilt bekommt, obwohl diese Aktivität mit einer Auszahlung verbunden ist. Hingegen erhält für Aktivität 6 Periode 10 eine höhere Wahrscheinlichkeit als die vorangehenden Perioden. Ähnliches trifft für Aktivität 5 zu. Bei der Einplanung von Aktivität 4 hingegen ist eine Auswahl der Perioden 6 und 7 wahrscheinlich, da die übrigen Zuordnungen zu unzulässigen Projektplänen führen würden. Ein ähnliches Bild bietet sich bei den verbleibenden Vorgängen 2 und 3. Festzuhalten ist, daß der eben konstruierte Projektplan mit einem Kapitalwert von 14.16 GE verbunden ist.

3.2 Umsetzung

Die konkrete Ausgestaltung der prinzipiellen Vorgehensweise bietet mehrere Freiheitsgrade. Zum einen soll betrachtet werden, wie die Auswahl des Endzeitpunktes unter Verwendung von Lerneffekten umgesetzt wurde. Zum anderen soll die Anpassung der Gewichte skizziert werden.

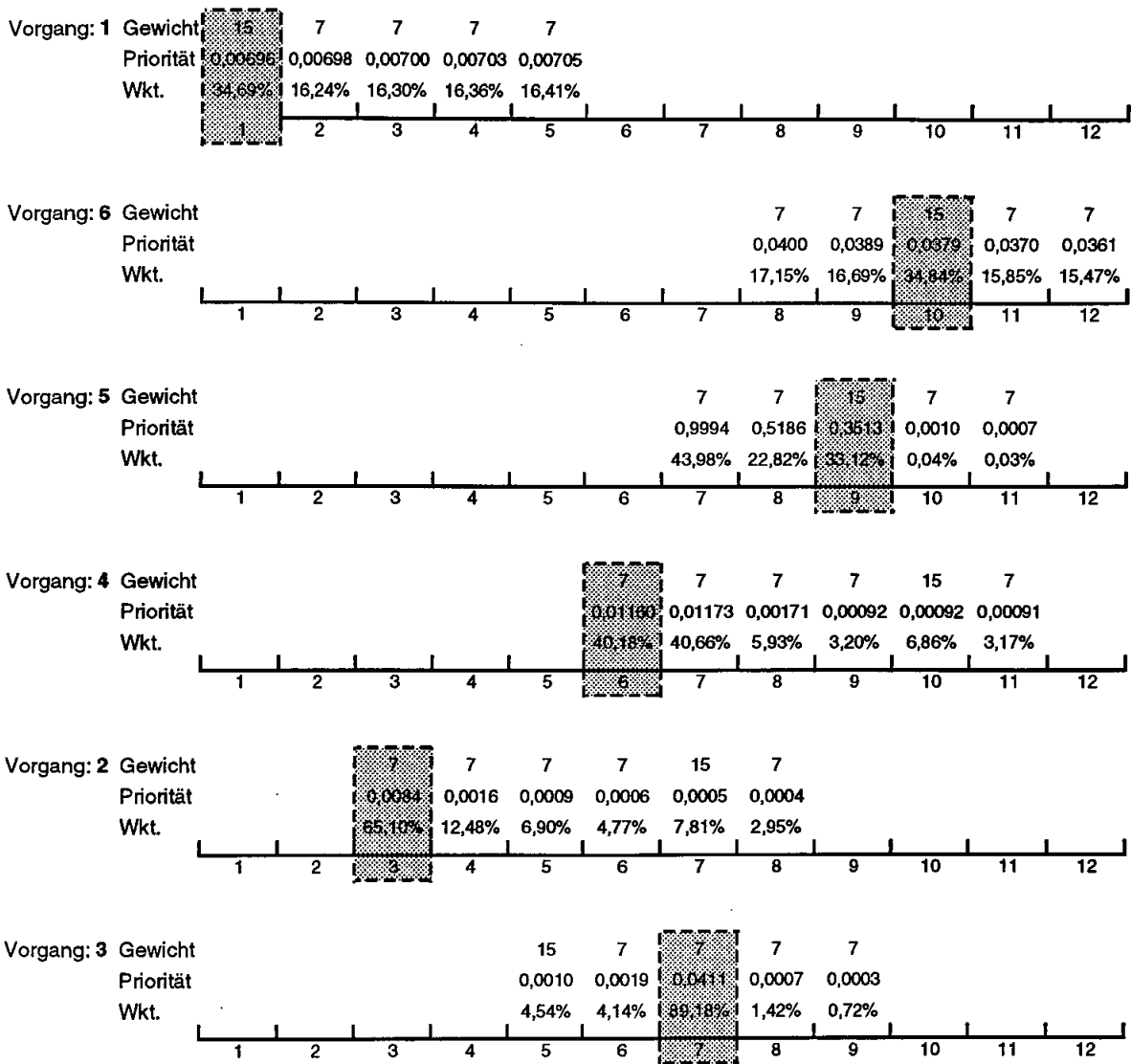


Abbildung 5: Konstruktion eines Projektplans mit Lerneffekten

3.2.1 Auswahl des Endzeitpunktes

Im angegebenen Beispiel erfolgte die Auswahl eines Endzeitpunktes proportional zu dem Produkt aus Gewicht und Prioritätswert. Alternativ lassen sich die Auswahlwahrscheinlichkeiten auch proportional zu $\tau_{jt}^\alpha \cdot \eta_{jt}^\beta$ bestimmen, wobei τ_{jt} das Gewicht des Endzeitpunktes t für die Aktivität j , α der Kontrollparameter der Gewichte, η_{jt} der Prioritätswert der Aktivität j für den Endzeitpunkt t und β der Kontrollparameter der Prioritätswerte ist. Mittels der Kontrollparameter ist es nun möglich, einem der Faktoren einen stärkeren Einfluß zu geben. In Fällen, in denen beispielsweise die Bedeutung der Gewichte hervorgehoben wird, erhofft man sich eine raschere Fokussierung der Lösungssuche dadurch, daß zur Konstruktion neuer Lösungen relativ häufig zuvor erfolgreich verwendete Endzeitpunkte herangezogen werden.¹⁸

¹⁸Zur Wirkungsweise der Exponenten vgl. z.B. Dorigo, Maniezzo und Colnari (1996).

Ebenfalls eine rasche Eingrenzung des untersuchten Lösungsraumes erhofft man sich dadurch, daß für eine Aktivität j der Endzeitpunkt mit dem höchsten Produkt $\tau_{jt}^\alpha \cdot \eta_{jt}^\beta$ von vornherein mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, der *Rate deterministisch eingeplanter Vorgänge* q_0 , gewählt wird. Lediglich mit einer Wahrscheinlichkeit von $(1 - q_0)$ erfolgt die Auswahl unter allen Endzeitpunkten des Vorganges wie zuvor beschrieben.

Die Relevanz der Kontrollparameter α und β sowie der *Rate deterministisch eingeplanter Vorgänge* q_0 wird in den Rechenstudien von Abschnitt 4 untersucht.

3.2.2 Anpassung der Gewichte

Im Rahmen der Ausgestaltung der Anpassung der Gewichte bieten sich mehrere Freiheitsgrade. So ist hinsichtlich der Gewichte selbst zu entscheiden, wie diese initialisiert, durch neue Projektpläne verstärkt und im Laufe des Verfahrens wieder verflüchtigt werden. Desweiteren ist auch zu bestimmen, welche Projektpläne überhaupt zu einer Verstärkung der Gewichte führen sollen und wie häufig eine derartige Anpassung vorgenommen werden soll.

Die gewählte Anpassung der Gewichte läßt sich wie folgt skizzieren: Nach der Konstruktion einer vorgegebenen Anzahl an Projektplänen, standardmäßig 25,¹⁹ erfolgt eine Anpassung der Gewichte. Hierbei verflüchtigen sich alte Gewichte standardmäßig zu 30%; eine Verstärkung der Gewichte erfolgt unter Heranziehung des besten bekannten und des im letzten Durchlauf besten gefundenen Projektplans. Konstruktion neuer Pläne und Anpassung der Gewichte wechseln sich solange ab, bis ein Abbruchkriterium — in unserem Falle ein Zeitlimit — erreicht ist.

Anzumerken bleibt, daß für den Fall sich zu schnell herausbildender Gewichte und der damit verbundenen Gefahr einer zu eingeschränkten Suche eine Glättung der Gewichte implementiert worden ist.²⁰ Hierdurch wird die Bedeutung der Initialisierung und des Ausmaßes der Verstärkung der Gewichte wesentlich herabgesetzt. So beschränken sich die nachfolgenden Rechenstudien bezüglich der Anpassung der Gewichte auf die Verflüchtigung und die Anzahl der vor einer erneuten Anpassung der Gewichte zu konstruierenden Projektpläne.

4 Rechenstudien

Einerseits soll untersucht werden, inwieweit das entwickelte künstliche Ameisen-System sensitiv auf die Wahl einzelner Verfahrensparameter reagiert. Andererseits wird das vorgestellte Ameisen-System mit einem Verfahren aus der Literatur verglichen. Zu diesem Zweck sind für die von *Kolisch, Sprecher* und *Drexel*²¹ vorgestellten Probleminstanzen, welche üblicherweise als Benchmarks beim Vergleich von Verfahren zur Minimierung der Projektdauer herangezogen werden, Zahlungsströme zu den einzelnen Vorgängen generiert worden.²² Hinsichtlich der nachfolgenden Untersuchungen bleibt anzumerken, daß für die Lösung der Projektplanungsprobleme mit 30, 60 bzw. 90 Vorgängen maximale Rechenzeiten von 8, 16 bzw. 32 Sekunden auf einem Pentium Pro mit 266Mhz vorgegeben wurden.

¹⁹Zu den Ausprägungen der untersuchten Verfahrensparameter vgl. Abschnitt 4.1.

²⁰Vgl. hierzu bspw. *Stütze* und *Hoos* (1997).

²¹Detaillierte Angaben hierzu finden sich in *Kolisch, Sprecher* und *Drexel* (1995).

²²Wie die Generierung der Zahlungsströme im einzelnen erfolgt, findet sich in *Juretzka* (1996).

4.1 Auswirkungen ausgewählter Parameter

Im Rahmen der nachfolgenden Untersuchungen wird jeweils partiell ein einzelner Parameter variiert. Soweit nichts anderes angegeben ist, gilt für die übrigen Parameter:

- Kontrollparameter des Gewichtes $\alpha = 3$,
- Kontrollparameter des Prioritätswertes $\beta = 1$,
- Rate deterministisch eingeplanter Vorgänge $q_0 = 90\%$,
- Verflüchtigung = 30% und
- Anzahl der in einem Durchlauf konstruierten Projektpläne = 25.

4.1.1 Auswahl des Endzeitpunktes

Zunächst wenden wir uns den Kontrollparametern zu, die es gestatten, die Auswahl der Endzeitpunkte zu beeinflussen. Für α , den Kontrollparameter des Gewichtes, ist Tabelle 2 zu entnehmen, daß relativ hohe Werte für α zu überlegenen Ergebnissen führen. D.h. eine größere Betonung der Gewichte sowie eine damit verbundene stärkere Differenzierung der Unterschiede zwischen den Gewichten führt zu besseren Resultaten. Klar erkennbar verschlechtern sich die Resultate, wenn eine Berücksichtigung der Lerneffekte vollständig unterbleibt ($\alpha = 0$).

Anzahl Aktivitäten	$\alpha = 0$	1	2	3
30	2498.91	2682.27	<u>2682.47</u>	2679.74
60	4240.35	4557.93	4579.58	<u>4588.23</u>
90	5810.82	6050.35	6101.02	<u>6144.53</u>

Tabelle 2: Mittlere Kapitalwerte in Abhängigkeit von α

Die hier verwendeten Prioritätswerte sind vor dem Potenzieren mit einer Konstanten multipliziert wurden, so daß alle Werte größer als 1 sind. Somit stärken hohe Werte für β die Bedeutung der Prioritätswerte bei der Auswahl der Endzeitpunkte. Im Zusammenhang mit β überrascht nicht, daß für $\beta = 0$ — kein Einfluß der Prioritätswerte — in allen Größenklassen die schlechtesten Resultate erzielt werden (vgl. Tabelle 3). Die insgesamt besten Resultate werden im Fall von $\beta = 2$ erzielt.

Anzahl Aktivitäten	$\beta = 0$	1	2	3
30	2661.02	2679.74	<u>2690.25</u>	2683.00
60	4486.68	4588.23	<u>4660.73</u>	4615.65
90	5862.63	6144.53	<u>6259.48</u>	6214.80

Tabelle 3: Mittlere Kapitalwerte in Abhängigkeit von β

Die Auswahl der Endzeitpunkte in Richtung auf den jeweils am besten bewerteten Endzeitpunkt hin zu verzerren erweist sich als nützlich. Hierfür sprechen die guten mittleren Kapitalwerte bei Raten von 90% und 100% für eine deterministische Auswahl der Endzeitpunkte. Erstaunlich erscheint, daß die großen Datensätze — für die in Tabelle 4 getesteten Werte von q_0 — am besten bei einer vollständig deterministischen Auswahl der Endzeitpunkte gelöst werden konnten. D.h. aber bei weitem nicht, daß die Projektpläne rein deterministisch erstellt wurden. Vielmehr ist zu beachten, daß bei jeder Konstruktion eines Projektplanes eine zufällige Einplanungsreihenfolge der Aktivitäten gewählt wird. Ebenso heißt dies nicht, daß keine Lerneffekte erzielt werden konnten.

Anzahl Aktivitäten	$q_0=50\%$	70%	90%	100%
30	2598.46	2649.35	<u>2679.74</u>	2647.45
60	4302.52	4413.80	<u>4588.23</u>	4529.36
90	5822.24	5879.90	6144.53	<u>6167.13</u>

Tabelle 4: Mittlere Kapitalwerte in Abhängigkeit von q_0

Bezüglich der Auswahl des Endzeitpunktes bleibt festzuhalten, daß die Wirksamkeit der Kontrollparameter α und β sowie der Rate deterministisch eingeplanter Vorgänge q_0 bestätigt werden konnte. Die Wahl geeigneter Werte erweist sich als unproblematisch.

4.1.2 Anpassung der Gewichte

Tabelle 5 verdeutlicht die Bedeutung der Verflüchtigung nachhaltig. Falls die Gewichte mit der Zeit nicht wieder abgesenkt werden, fällt es offenbar schwer, gute Projektpläne zu konstruieren. Erfolgversprechende Gewichte sind nicht in der Lage, die nötige Dominanz zu erzielen. Ist die Verflüchtigung jedoch zu groß, verschlechtern sich die Resultate. Zusammengenommen bestätigen diese Ergebnisse anschaulich die Bedeutung der Verflüchtigung der Gewichte im Kontext der kapitalwertmaximierenden Projektplanung.

Anzahl Aktivitäten	Verflüchtigung=0%	10%	30%	50%
30	2499.53	2671.71	<u>2679.74</u>	2674.17
60	4240.35	4503.01	<u>4588.23</u>	4576.80
90	5810.82	5992.07	<u>6144.53</u>	6102.40

Tabelle 5: Mittlere Kapitalwerte in Abhängigkeit der Verflüchtigung

Tabelle 6 zeigt, daß die Wahl einer geeigneten Anzahl zu konstruierender Projektpläne je Durchlauf nicht besonders schwierig ist. Vermieden werden sollte allerdings auf jeden Fall die Wahl einer derart hohen Zahl, so daß es innerhalb der vorgegeben Rechenzeiten kaum zu einer Anpassung der Gewichte kommt. Bei einer Anzahl von 1000 Projektplänen vor der ersten Anpassung der Gewichte besteht beispielsweise kaum die Möglichkeit des Erzielens von Lerneffekten. Aber selbst ein ständiges Anpassen der Gewichte führt zu akzeptablen Ergebnissen.

Anzahl Aktivitäten	Anzahl Projektpläne			
	1	25	100	1000
30	2677.42	<u>2679.74</u>	2623.75	2478.43
60	4562.78	<u>4588.23</u>	4457.96	4240.35
90	6051.35	<u>6144.53</u>	5992.35	5810.82

Tabelle 6: Mittlere Kapitalwerte in Abhängigkeit der Anzahl Projektpläne je Durchlauf

Festzuhalten ist, daß die Wirkungsweise der Parameter zur Anpassung der Gewichte — Verflüchtigung und Anzahl der in einem Durchlauf konstruierten Projektpläne — den Erwartungen entspricht. Wiederum erweist sich die Wahl geeigneter Parameter als unproblematisch.

4.2 Vergleich mit einem anderen Verfahren

Um die Güte des entwickelten Ameisen-Systems aufzuzeigen, soll dieses mit einem Verfahren von *Yang et al.*²³ verglichen werden. Das Verfahren von *Yang et al.* konstruiert Projektpläne, indem jeweils ein Vorgang, für den alle Vorgänger bereits eingeplant sind, zunächst ausgewählt und daraufhin zeitlich zugeordnet wird. Die Kernidee des Verfahrens besteht in der Auswahl des jeweils einzuplanenden Vorgangs. Hierzu wird die Einplanungsreihenfolge der Vorgänge betrachtet. Wenn aus mehreren Vorgängen einer zur Einplanung auszuwählen ist, betrachtet man den Absolutbetrag der Differenz aus aktueller Einplanungsposition und Einplanungsposition bei Erstellung der besten bisher gefundenen Lösung. Vorgänge mit kleinen absoluten Differenzen werden eher als andere ausgewählt. Zudem sinkt im Verlaufe des Verfahrens — in Anlehnung an Simulated Annealing — die Wahrscheinlichkeit, einen Vorgang mit einer relativ hohen absoluten Differenz gegenüber anderen Vorgängen vorzuziehen.

Eine Gegenüberstellung der Verfahren in Tabelle 7 verdeutlicht die Überlegenheit des entwickelten Ameisen-Systems. In allen drei betrachteten Größenklassen liefert das Ameisen-System²⁴ im Mittel bessere Kapitalwerte. Diese Mittelwertunterschiede sind signifikant bei einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 5%.

Anzahl Aktivitäten	<i>Yang et al.</i> (1995)	Ameisen-System
30	2603.20	<u>2690.25</u>
60	4530.88	<u>4660.73</u>
90	6218.39	<u>6259.48</u>

Tabelle 7: Mittlere Kapitalwerte der Lösungsverfahren

Bei Heranziehung der Ergebnisse aus Abschnitt 4.1 fällt für die Größenklassen mit 30 und 60 Aktivitäten auf, daß das Ameisen-System für nahezu beliebige Parameterwerte

²³ *Yang et al.* (1995)

²⁴ Im Gegensatz zum vorangehenden Abschnitt gilt $\beta = 2$, da mit diesem Wert die besten Resultate erzielt wurden.

besser ist als das Verfahren von *Yang et al.* Erst bei Betrachtung von Projektplänen mit 90 Aktivitäten bedürfen die Parameter des Ameisen-Systems einer umfangreicheren Anpassung, um weiterhin überlegene Resultate liefern zu können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ohne Zweifel handelt es sich bei der kapitalwertmaximierenden Projektplanung mit Ressourcenbeschränkungen sowohl um ein kombinatorisch schwierig zu lösendes als auch um ein praxisrelevantes Problem. Mittels einer modernen Heuristik — einem speziell angepaßten Ameisen-System — haben wir für dieses Problem kompetitive Resultate erzielen können. So lieferte das vorgestellte Ameisen-System für alle Größenklassen bessere Resultate als das Verfahren von *Yang et al.*²⁵ Offenbar stellt also die betriebswirtschaftliche Kenngröße *Barwert* eine geeignete Orientierungshilfe zur Erzeugung guter Projektpläne dar, ohne daß primär auf kombinatorische Aspekte (Reihenfolge, Kapazitäten) geachtet werden muß.

Zukünftig gilt es zunächst zu evaluieren, inwiefern für die erhaltenen Resultate noch Verbesserungsbedarf besteht, um im Anschluß daran das vorgestellte Ameisen-System ggfs. durch Kombination mit einem Verbesserungsverfahren zu verfeinern.

²⁵ *Yang et al.* (1995)

Literatur

- [1] BAROUM, S.M., PATTERSON, J.H. (1996), The Development of Cash Flow Weight Procedures for Maximizing the Net Present Value of a Project, *Journal of Operations Management*, Vol. 14, S. 209–227
- [2] DEMEULEMEESTER, E., HERROELEN, W. (1992), A Branch-and-Bound Procedure for the Multiple Resource-Constrained Project Scheduling Problem, *Management Science*, Vol. 38, S. 1803–1818
- [3] DEMEULEMEESTER, E., HERROELEN, W. (1997), New Benchmark Results for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem, *Management Science*, Vol. 43, S. 1485–1492
- [4] DEMEULEMEESTER, E., HERROELEN, W., VAN DOMMELEN, P. (1995), An Optimal Recursive Search Procedure for the Deterministic Unconstrained Max-NPV Project Scheduling Problem, *Arbeitspapier, Universität Leuven*
- [5] DORIGO, M., GAMBARDELLA, L.M. (1997), Ant Colonies for the Traveling Salesman Problem, *BioSystems*, Vol. 43, S. 73–81
- [6] DORIGO, M., MANIEZZO, V., COLORNI A. (1996), The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, Vol. 26, S. 1–13
- [7] DREXL, A., KOLISCH, R., SPRECHER, A. (1997), Neuere Entwicklungen in der Projektplanung, *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung*, 49. Jg., S. 95–120
- [8] ELMAGHRABY, S.E., HERROELEN, W.S. (1990), The Scheduling of Activities to Maximize the Net Present Value of Projects, *European Journal of Operational Research*, Vol. 49, S. 35–49
- [9] GRINOLD, R.C. (1972), The Payment Scheduling Problem, *Naval Research Logistics*, Vol. 19, S. 123–136
- [10] HERROELEN, W.S., VAN DOMMELEN, P., DEMEULEMEESTER, E. (1997), Project Network Models with Discounted Cash Flows a Guided Tour through Recent Developments, *European Journal of Operational Research*, Vol. 100, S. 97–121
- [11] ICMELI, O., ERENGUC, S.S. (1994), A Tabu Search Procedure for the Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows, *Computers & Operations Research*, Vol. 21, S. 841–853
- [12] ICMELI, O., ERENGUC, S.S. (1996), A Branch-and-Bound Procedure for the Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows, *Management Science*, Vol. 42, S. 1395–1408
- [13] ICMELI TUKEL, O., ROM, W.O. (1998), Analysis of the Characteristics of Projects in Diverse Industries, *Journal of Operations Management*, Vol. 16, S. 43–61

- [14] JURETZKA, J. (1996), Development of a Data Set for Testing Methods for Solving the Net Present Value Resource Constrained Project Scheduling Problem, Unpublished Master Thesis, Arizona State University
- [15] KOLISCH, R. (1997), Investitionsplanung in Netzwerken, *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 67. Jg., S. 1057–1072
- [16] KOLISCH, R., SPRECHER, A. (1996), PSPLIB - A project scheduling problem library, *European Journal of Operational Research*, Vol. 96, S. 205–216
- [17] KOLISCH, R., SPRECHER, A., DREXL, A. (1995), Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems, *Management Science*, Vol. 41, S. 1693–1703
- [18] MANIEZZO, V., COLORNI, A. (1998), The Ant System applied to the Quadratic Assignment Problem, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, to appear
- [19] MAYER, H. (1998), *Projektplanung bei beschränkten Ressourcen*, Frankfurt am Main, Lang
- [20] PADMAN, R., SMITH-DANIELS, D.E., SMITH-DANIELS, V.L. (1997), Heuristic Scheduling of Resource-Constrained Projects with Cash Flows, *Naval Research Logistics*, Vol. 44, S. 364–381
- [21] RUSSEL, A.H. (1970), Cash Flows in Networks, *Management Science*, Vol. 16, S. 357–373
- [22] RUSSEL, R.A. (1986), A Comparison of Heuristics for Scheduling Projects with Cash Flows and Resource Restrictions, *Management Science*, Vol. 32, S. 1291–1300
- [23] SEPIL, C. (1994), Comment on Elmaghraby and Herroelen's "The Scheduling of Activities to Maximize the Net Present Value of Projects", *European Journal of Operational Research*, Vol. 73, S. 185–187
- [24] SPRECHER, A. (1996), Solving the RCPSP efficiently at modest Memory Requirements, *Manuskripte aus den Instituten für Betriebswirtschaftslehre der Universität Kiel*, No. 425
- [25] STÜTZLE, T., HOOS, H. (1997), MAX-Min Ant System and Local Search for the Traveling Salesman Problem, *Proceedings of ICEC97 — 1997 IEEE 4th International Conference on Evolutionary Computation*, IEEE Press, S. 308–313
- [26] YANG, K.K., TALBOT, F.B., PATTERSON, J.H. (1992), Scheduling a Project to Maximize its Net Present Value: An Integer Programming Approach, *European Journal of Operational Research*, Vol. 64, S. 188–198
- [27] YANG, K.K., TAY, L.C., SUM, C.C. (1995), A Comparison of Stochastic Scheduling Rules for Maximizing Project Net Present Value, *European Journal of Operational Research*, Vol. 85, S. 327–339