

February 2007

# Barwertorientierte Projektplanung mit mehreren Akteuren mittels eines verhandlungsbasierten Koordinationsmechanismus

Andreas Fink

*Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg*, [andreas.fink@hsu-hamburg.de](mailto:andreas.fink@hsu-hamburg.de)

Follow this and additional works at: <http://aisel.aisnet.org/wi2007>

---

## Recommended Citation

Fink, Andreas, "Barwertorientierte Projektplanung mit mehreren Akteuren mittels eines verhandlungsbasierten Koordinationsmechanismus" (2007). *Wirtschaftsinformatik Proceedings 2007*. 83.  
<http://aisel.aisnet.org/wi2007/83>

This material is brought to you by the Wirtschaftsinformatik at AIS Electronic Library (AISeL). It has been accepted for inclusion in Wirtschaftsinformatik Proceedings 2007 by an authorized administrator of AIS Electronic Library (AISeL). For more information, please contact [elibrary@aisnet.org](mailto:elibrary@aisnet.org).

In: Oberweis, Andreas, u.a. (Hg.) 2007. *eOrganisation: Service-, Prozess-, Market-Engineering*; 8. Internationale Tagung Wirtschaftsinformatik 2007. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe

ISBN: 978-3-86644-094-4 (Band 1)

ISBN: 978-3-86644-095-1 (Band 2)

ISBN: 978-3-86644-093-7 (set)

© Universitätsverlag Karlsruhe 2007

# **Barwertorientierte Projektplanung mit mehreren Akteuren mittels eines verhandlungsbasierten Koordinationsmechanismus**

Andreas Fink

Professur für BWL, insbes. Wirtschaftsinformatik  
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg  
andreas.fink@hsu-hamburg.de

## **Abstract**

In dem Beitrag werden Projektplanungsprobleme mit mehreren autonomen Entscheidungsträgern betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass die Aktivitäten eines hinsichtlich der Struktur bereits determinierten Projektes mit Ressourcenbeschränkungen durch eine Menge von Akteuren durchgeführt werden. Die Akteure verfolgen eigene Interessen hinsichtlich der zeitlichen Lage der ihnen zugeordneten Aktivitäten, die jeweils mit Zahlungen bei Aktivitätsabschluss verbunden sind. Jeder Akteur verfolgt eine individuelle Barwertmaximierung. Für das resultierende Koordinationsproblem mit autonomen Akteuren und Informationsasymmetrie wird ein generischer verhandlungsbasierter Koordinationsmechanismus ausgestaltet, angewendet und analysiert. Die beschriebenen Ergebnisse belegen die Effektivität des verwendeten Verfahrens hinsichtlich der Ermittlung hochwertiger gemeinsamer Projektpläne.

## 1 Einleitung

Die Wirtschaftsinformatik befasst sich mit soziotechnischen Informationssystemen und entsprechenden Informationsverarbeitungsaufgaben in Wirtschaft und Verwaltung [WKWI94]. Hinsichtlich der Lenkung des betrieblichen Geschehens nehmen hierunter Planungsaufgaben einen großen Anteil ein, deren Lösung primär Gegenstand der Operations Research ist. Im Kontext der von Mertens propagierten Langfristzielsetzung „sinnhafte Vollautomation“ [Mert95] ist für die Wirtschaftsinformatik die (Teil-)Automatisierung der Erfüllung von Planungsaufgaben im Rahmen softwaretechnischer Entscheidungsunterstützungssysteme ebenfalls von Relevanz. Damit ergeben sich deutliche Überschneidungen und fruchtbare Ergänzungen zwischen Erkenntnissen und Methoden von Wirtschaftsinformatik und Operations Research.

In diesem Beitrag werden Projektplanungsprobleme mit mehreren autonomen Entscheidungsträgern betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass die Aktivitäten eines hinsichtlich der Struktur bereits determinierten Projektes durch eine Menge von Akteuren durchgeführt werden (z.B. ein Bauprojekt, in dem verschiedene Gewerke bestimmten Bauunternehmen zugeordnet sind). Die Akteure verfolgen eigene Interessen hinsichtlich der zeitlichen Lage jeweiliger Aktivitäten. Demzufolge ist ein zentralistisches Entscheidungsmodell mit symmetrischer Informationsverfügbarkeit nicht unbedingt angemessen, da von Entscheidungsträgern mit konkurrierenden Zielen und asymmetrischer Informationsverteilung auszugehen ist. Klassische Verfahren der multikriteriellen Optimierung sind damit nicht direkt anwendbar, was unter Berücksichtigung der Randbedingungen autonomer Entscheidungsträger in diesem Beitrag zur Ausgestaltung, Anwendung und Analyse eines verhandlungsbasierten Koordinationsmechanismus führt.

Im Folgenden werden zunächst die Problemstellung und Anforderungen an entsprechende Lösungskonzepte diskutiert (Abschnitt 2). Anschließend wird ein generischer verhandlungsbasierter Koordinationsmechanismus beschrieben und für die betrachtete Problemstellung konkretisiert (Abschnitt 3). Das verfolgte Lösungskonzept wird mittels experimenteller Berechnungen analysiert, die in Abschnitt 4 dokumentiert sind. Die beschriebenen Ergebnisse belegen die Effektivität des verwendeten Verfahrens hinsichtlich der Ermittlung hochwertiger gemeinsamer Projektpläne, was abschließend in einem Fazit zusammengefasst wird (Abschnitt 5).

## 2 Problemstellung

### 2.1 Barwertorientierte Projektplanung mit mehreren Akteuren

Das in diesem Beitrag betrachtete Projektplanungsproblem ist folgendermaßen definiert: Das Projekt besteht aus einer endlichen Menge von zeit- und ressourcenbeanspruchenden Aktivitäten mit jeweils einem fixen Modus, der die Dauer und Ressourcenbeanspruchung einer Aktivität bestimmt. Jede Aktivität  $j \in A = \{1, \dots, J\}$  ist mit einer Ausführungsdauer  $d_j$  verbunden; die Ausführung einer Aktivität darf nicht unterbrochen werden. Aufgrund technischer oder organisatorischer Restriktionen bestehen zwischen bestimmten Aktivitäten zeitliche Zusammenhänge, wobei hier lediglich schlichte Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen angenommen werden derart, dass für eine Aktivität  $j$  alle Aktivitäten aus der jeweiligen Vorgängermenge  $v_j$  abgeschlossen sein müssen, bevor die Aktivität  $j$  durchgeführt werden kann. Der Projektbeginn und das Projektende werden durch zwei Sonderaktivitäten 1 bzw.  $J$  repräsentiert mit  $d_1 = d_J = 0$ ,  $v_1 = \emptyset$  und  $v_J = \{j \mid j = 1, \dots, J-1\}$ . Für den Projektbeginn wird eine untere Schranke von 0 angenommen, während gegebenenfalls eine obere Schranke das Projektende nach oben begrenzt.

Zur Durchführung von Aktivitäten werden Ressourcen bestimmter Ressourcentypen benötigt. Hier werden nur erneuerbare Ressourcen berücksichtigt, die für jeden Zeitpunkt im Planungshorizont in einer festen Menge zur Verfügung stehen (z.B. verschiedene Maschinen). Ausgehend von einer Menge  $R$  von Ressourcentypen und einer Verfügbarkeit  $K_m$  einer Ressource  $m \in R$  pro Zeiteinheit repräsentiert  $k_{j,m}$  den Ressourcenbedarf einer Aktivität  $j$  bezogen auf die Ressource  $m$  pro Zeiteinheit.

Ein zulässiger Projektplan weist jeder Aktivität einen Startzeitpunkt zu und berücksichtigt dabei die zeitlichen und ressourcenbezogenen Nebenbedingungen. Die Menge der zulässigen Projektpläne konstituiert den Lösungsraum, der im Zusammenhang mit mehreren beteiligten Akteuren im Folgenden auch als Vertragsraum bezeichnet wird.

Ziel der Projektplanung ist die Ermittlung eines zulässigen Projektplans im Hinblick auf eine von den Startzeitpunkten abhängige Zielsetzung. In der Literatur wird häufig die Minimierung der Projektdauer zugrunde gelegt (Resource Constrained Projekt Scheduling Problem (RCPSP); vgl. z.B. [BDM+99]), während bei einer ökonomischen Betrachtung insbesondere barwertorientierte Zielsetzungen relevant sind, wovon auch im Folgenden ausgegangen wird. Hierbei ist jede Aktivität  $j$  mit einem Zahlungswert  $z_j$  verbunden, wobei die jeweilige Ein- oder Auszahlung mit Abschluss der jeweiligen Aktivität anfällt. Unter Annahme eines Abzinsungsfaktors  $p$  werden

die Zahlungen in Abhängigkeit von der zeitlichen Einplanung auf den Zeitpunkt 0 abgezinst. Bei einer Gesamtplanung ist das Ziel die Maximierung der Summe der abgezinsten Zahlungen aller Aktivitäten (Resource Constrained Projekt Scheduling Problem with Discounted Cash Flows (RCPSP-DC), vgl. z.B. [HeDD97; Koli97; VaDH01]). Die entsprechende einkriterielle Problemstellung stellt als Verallgemeinerung des RCPSP ein *NP*-schweres Problem dar.

Das Projekt wird durch eine Menge  $P = \{ 1, \dots, n \}$  von Akteuren kooperativ durchgeführt. Die Aktivitäten sind eindeutig bestimmten Akteuren zugeordnet. Das heißt, ein Akteur  $i \in P$  ist für die Durchführung einer jeweiligen Menge  $A_i$  zugeordneter Aktivitäten zuständig, wobei die Aktivitätenmenge  $A$  vollständig und disjunkt auf die Akteure aufgeteilt ist. Jeder Akteur verfolgt im Rahmen zulässiger Projektpläne gewinnorientiert das Ziel, die Barwertsumme der ihm zugeordneten Aktivitäten zu maximieren.

## 2.2 Anforderungen an einen Koordinationsmechanismus

Im Zusammenhang mit überbetrieblichen Transaktionen ist im Allgemeinen von autonomen Akteuren mit konkurrierenden Zielen und gewissen Informationsasymmetrien auszugehen. So wird auch hier für die oben beschriebene Problemstellung angenommen, dass zwar die Projektstruktur einschließlich der zeitlichen und ressourcenbezogenen Bedingungen allen Projektbeteiligten bekannt ist, andererseits aber allein die einzelnen Akteure Informationen zu den Zahlungswerten der ihnen zugeordneten Aktivitäten besitzen. Hieraus ergibt sich im Sinne der Institutionenökonomie die Aufgabe, die Ausschöpfung möglicher, aber gefährdeter Kooperationsvorteile durch zweckmäßige Koordinationsmechanismen zu unterstützen. Das heißt, es stellt sich die Frage, inwieweit ein zu entwickelndes Verfahren, das den Eigensinn der Akteure und deren private Informationen berücksichtigt, das Ergebnis einer hypothetischen integrierten Projektplanung mit einer Maximierung des Gesamtbarwerts erreichen kann und wie Kooperationsvorteile auf die Akteure verteilt werden.

Die generellen Anforderungen an einen problemunabhängigen Mechanismus zur Koordination autonomer Akteure, deren Entscheidungsinterdependenzen im Rahmen einer operativen Planungsebene formal beschrieben werden können, sind in [Fink06, Abschnitt 2] näher beschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass die Akteure einen Koordinationsmechanismus dann akzeptieren, wenn eine hohe „Ergebnisqualität“ erreicht wird und das Verfahren durch eine gewisse „Fairness“ ausgezeichnet ist. Eine Konkretisierung dieser zunächst nur begrifflichen Krite-

rien kann unter Rückgriff auf entsprechende Erkenntnisse der Entscheidungstheorie bzw. kooperativen Spieltheorie [Fren88; Nash50; Nash53] erfolgen (vgl. bzgl. Fairness die ersten beiden folgenden Kriterien sowie das dritte Kriterium bzgl. Qualität):

- Das erzielte Ergebnis sollte invariant hinsichtlich positiv-affiner Transformationen der Nutzenfunktion sein; das heißt, ein Akteur sollte nicht durch eine hinsichtlich Ursprung und Skalierung willkürliche Veränderung seiner Nutzenfunktion im Rahmen seiner Präferenzen profitieren können.
- Das erzielte Ergebnis sollte unabhängig von der Nummerierung der Akteure sein (Symmetrie); das heißt, dass allein die Präferenzen der Akteure relevant sein sollten.
- Das erzielte Ergebnis sollte Pareto-optimal sein; das heißt, kein Akteur sollte besser gestellt werden können, ohne dabei einen anderen Akteur schlechter zu stellen.

Das dritte Kriterium kann als Optimierungsziel formuliert werden, indem die Minimierung einer zu definierenden Distanz von dem effizienten Rand (der Menge aller Pareto-optimalen Ergebnisse) angestrebt wird.

Neben diesen grundsätzlichen Anforderungen erscheinen als Verfahrensanforderungen außerdem von Relevanz (vgl. [Sand99]): Einfachheit und Universalität, effiziente Berechenbarkeit, geringe Ansprüche an die Offenlegung von Informationen der Akteure sowie hinsichtlich der Strategiewahl der Akteure das Vorhandensein eines eindeutigen Nash-Gleichgewichts und Anreizkompatibilität.

### **3 Verhandlungsbasierte Ermittlung von Projektplänen**

Zur Lösung klassischer multikriterieller Problemstellungen mit einem zentralen Entscheidungsträger und Informationssymmetrie wurden vielfältige Verfahren entwickelt (vgl. z.B. [Ehrg05]). Hierzu zählen Erweiterungen von Metaheuristiken, die sich im Kern als iterative Suchprozesse auffassen lassen (vgl. z.B. [GSST05]). Das Konzept der iterativen Suche wurde auch auf Koordinationsprobleme mit mehreren Entscheidungsträgern und Informationsasymmetrie erweitert, wobei jeder Schritt eines auf lokaler Suche basierenden Ablaufs auf einer Abstimmung zwischen den Akteuren basiert [KFSB03a; KFSB03b]. Dieses Konzept, welches als ein vollautomatischer Verhandlungsmechanismus mit komplexen Vertragsräumen aufgefasst werden kann, wurde erweitert und differenzierter ausgestaltet und dabei für Problemstellungen aus dem Supply Chain Management validiert [Fink04; Fink06]. In den folgenden beiden Unterabschnit-

ten werden der entsprechende Koordinationsmechanismus zunächst allgemein kurz rekapituliert und anschließend die Konkretisierung für die hier betrachtete barwertorientierte Projektplanung mit mehreren Akteuren beschrieben.

### 3.1 Generischer Koordinationsmechanismus

Der grundsätzliche Koordinationsmechanismus, welcher als ein Verhandlungsprotokoll aufgefasst werden kann, ist in Abb. 1 beschrieben. Dieser Mechanismus ist generisch, wobei neben einem problemspezifischen Vertragsraum  $C$  eine problemspezifische Nachbarschaftsrelation  $N$  vorausgesetzt wird, die für jeden Vertrag eine Menge als benachbart geltender weiterer Verträge bestimmt.

Eingabe: Akteure  $1, \dots, n$ ; Vertragsraum  $C$ ; Nachbarschaftsrelation  $N : C \rightarrow 2^C$

Zufallsbasierte Erzeugung eines ersten aktiven Vertrags  $c := c_0 \in C$ .

Wiederhole für eine festgelegte Anzahl von Verhandlungsrunden:

Zufallsbasierte Erzeugung eines Vertragsvorschlags  $c' \in N(c)$ .

Jeder Akteur  $i \in P$  beurteilt  $c'$  und äußert „Ja“ oder „Nein“.

Falls alle Akteure mit „Ja“ antworten:

Anpassung des aktiven Vertrags  $c := c'$ .

Ausgabe: Letzter aktiver Vertrag  $c$  als Ergebnis.

Abb. 1: Generischer Koordinationsmechanismus

In jedem Schritt wird ausgehend von dem jeweils vor diesem Schritt allseits vorläufig akzeptierten Vertrag (aktiver Vertrag) ein Vertragsvorschlag aus der jeweiligen Nachbarschaft zufallsbasiert ermittelt und den beteiligten Akteuren vorgelegt. Nur falls alle Akteure dem Wechsel vom bislang aktiven Vertrag zu dem Vertragsvorschlag zustimmen, wird aus dem Vertragsvorschlag der nun allseits vorläufig akzeptierte aktive Vertrag nach dem entsprechenden Schritt. Der nach dem letzten Schritt akzeptierte aktive Vertrag stellt als finale Übereinkunft das Ergebnis des Verfahrens dar.

Die Erzeugung von Vertragsvorschlägen hat in unparteiischer Form und unter Berücksichtigung der Privatheit von Informationen zur individuellen Qualität von Verträgen für die Akteure zu erfolgen. Demzufolge bietet sich die gleichverteilt zufällige Erzeugung sowohl von der Startlösung als auch von Nachbarlösungen (als jeweilige Vertragsvorschläge) an. Dies kann mittels

eines entsprechenden offen gelegten Algorithmus in Verbindung mit einem offen gelegten Zufallszahlengenerator erfolgen.

Sofern so genannte gierige Akteure vorgelegte Vertragsvorschläge eigensinnig nur dann akzeptieren, falls sich keine individuelle Verschlechterung des jeweiligen Barwerts ergibt, ist mit einem schnellen Stocken des Verfahrensablaufs und damit in der Regel einem relativ schlechten Endergebnis zu rechnen. Erfahrungen zu iterativen Suchprozessen für klassische ein- sowie multikriterielle Problemstellungen zeigen, dass im Verfahrensablauf die gelegentliche Inkaufnahme von Verschlechterungen vorteilhaft sein kann, um aus so genannten lokalen Optima und entsprechenden Regionen im Suchraum auszubrechen.

Dementsprechend wird das Verhandlungsprotokoll um eine Regel ergänzt, die die Akteure zwingt, in bestimmten Phasen des Verfahrensablaufs gewisse Mindestakzeptanzraten (bezüglich des Anteils der individuell akzeptierten Vertragsvorschläge) zu gewährleisten; diese Mindestakzeptanzraten nehmen zweckmäßigerweise im Verfahrensablauf ab. Da die Akzeptanzentscheidungen allseits beobachtbar sind, ist diese Regel verifizierbar und damit praktikabel. Akteure, die die gesetzten Mindestakzeptanzraten einhalten, werden als kooperativ bezeichnet.

Indessen stellt sich für die Akteure die Frage nach einer individuell vorteilhaften Entscheidungsstrategie, die einer vorgegebenen Mindestakzeptanzrate gerecht wird. Hierfür bietet sich der Rückgriff auf das probabilistische Akzeptanzkriterium der Metaheuristik Simulated Annealing an („Metropolis-Kriterium“), in dem die Wahrscheinlichkeit  $P_T(\Delta)$  für eine Akzeptanz einer Verschlechterung um den Wert  $\Delta$  exponentiell vom Ausmaß der Verschlechterung abhängt [KiGV83]:

$$P_T(\Delta) = e^{-\Delta/T}$$

Dieses Akzeptanzkriterium beinhaltet einen so genannten Temperaturparameterwert  $T$ . Mittels einer simulativen Verfahrensweise können die Akteure einen individuellen Temperaturparameterwert näherungsweise so bestimmen, dass eine entsprechende Anwendung zum Einhalten einer bestimmten Mindestakzeptanzrate führt. Für eine detaillierte Beschreibung und Diskussion des Verfahrens sei auf [Fink06] verwiesen.

Im Zusammenhang mit den in Abschnitt 2.2 formulierten Anforderungen ist hinsichtlich Fairness anzumerken, dass für alle Akteure die gleichen Mindestakzeptanzraten gelten und mögliche positiv-affine Transformationen der Nutzenfunktion durch das Akzeptanzkriterium in Verbindung mit dem ermittelten Temperaturparameter ausgeglichen werden. Die Ergebnisqualität ist Gegenstand der experimentellen Untersuchungen in Abschnitt 4.

### 3.2 Konkretisierung des Koordinationsmechanismus für die barwertorientierte Projektplanung mit mehreren Akteuren

Die Menge der zulässigen Projektpläne konstituiert den zugrunde gelegten Vertragsraum für die Projektplanung. Ein Vertrag kann grundsätzlich als ein Tupel zulässiger Startzeitpunkte für die einzelnen Aktivitäten aufgefasst werden. Da die direkte Ableitung zulässiger Vertragsvorschläge als Modifikationen des Startzeitpunkt-Tupels des aktiven Vertrags nicht einfach möglich ist, wird hier mit einer indirekten Repräsentation gearbeitet: Eine Permutation der Aktivitäten definiert eine Reihenfolge oder Priorisierung, die im Rahmen eines Generierungsschemas die Auswahl einplanbarer Aktivitäten bestimmt. Hierbei werden ein serielles und ein paralleles Generierungsschema verwendet (vgl. z.B. [Koli96; KoHa99]).

Bei dem seriellen Generierungsschema wird schrittweise eine einplanbare Aktivität (mit bereits eingeplanten direkten Vorgänger-Aktivitäten), zu einem für diese Aktivität frühesten zeit- und ressourcenzulässigen Zeitpunkt eingeplant. Hierbei wird in der Reihenfolge gemäß der indirekten Repräsentation mittels einer Permutation vorgegangen, wobei in der Permutation die vorliegenden Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen eingehalten sein müssen.

Beim parallelen Generierungsschema wird zeitlich aufsteigend geplant. Zu einem jeweils betrachteten Zeitpunkt wird aus allen Aktivitäten mit bereits abgeschlossenen direkten Vorgänger-Aktivitäten, die ressourcenzulässig einplanbar sind, ausgewählt. Die Auswahl aus einer gegebenenfalls nicht einelementigen Menge einplanbarer Aktivitäten erfolgt hierbei gemäß der Priorisierung entsprechend der Permutation der Aktivitäten als indirekter Repräsentation.

Die mit dem seriellen und parallelen Generierungsschema erzeugten Projektpläne gehören zur Menge der so genannten aktiven bzw. unverzögerten Pläne, wobei die Menge der unverzögerten Pläne eine Teilmenge der Menge der aktiven Pläne ist [SpKD95]. Damit ist der Suchraum, der beim parallelen Generierungsschema zugrunde gelegt wird, in der Regel kleiner als beim seriellen Generierungsschema. Es ist weiterhin zu anmerken, dass aus einer Permutation der Aktivitäten durch ein Generierungsschema zwar ein eindeutiger Projektplan abgeleitet wird, während durchaus verschiedene Permutationen der Aktivitäten zu einem identischen Projektplan führen können.

Im Zusammenhang mit der Vertragsrepräsentation durch eine Permutation der Aktivitäten werden auf Verschiebungen von Aktivitäten basierende Nachbarschaftsrelationen verwendet. Für das parallele Generierungsschema wird schlicht eine zufällige Verschiebung einer Aktivität an eine andere Stelle verwendet, wodurch sich die Priorisierung entsprechend verändert. Das se-

rielle Generierungsschema kann ohne Modifikation nur im Zusammenhang mit einer Permutation angewendet werden, in der Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen eingehalten werden. Deshalb wird hierfür nach einer zufälligen Verschiebung einer Aktivität an eine andere Stelle gegebenenfalls eine „Reparatur“ verletzter Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen gemäß [FlHi04] angewendet, wobei betroffene Vorgänger und Nachfolger der verschobenen Aktivität wieder vor bzw. hinter die verschobene Aktivität verschoben werden; sofern hierbei die Ausgangspermutation wieder hergestellt wird, wird eine andere zufällige Verschiebung verwendet (gegebenenfalls wiederholt).

## 4 Experimentelle Untersuchung

Die Implementierung und Untersuchung der oben beschriebenen Verfahren erfolgte mittels C++ und ist teilweise in [Mora05] beschrieben. Hierbei wurde auf dem Metaheuristik-Framework HotFrame [FiVo02] aufgebaut (etwa bezüglich Komponenten zur Repräsentation des Vertragsraums und Nachbarschaftsrelationen). Im Folgenden werden zunächst die verwendeten Probleminstanzen sowie dann die erzielten Rechenergebnisse dargestellt.

### 4.1 Probleminstanzen

Die Probleminstanzen bauen auf den RCPSP-Benchmark-Datensätzen der PSPLIB auf (für nähere Information sei auf [KoSp96] sowie <http://129.187.106.231/psplib/> verwiesen). Die hier verwendeten 36 Probleminstanzen zeichnen sich durch folgende Merkmale aus:

- Anzahl der Aktivitäten: 30, 60, 120
- Netzwerk-Komplexität (mittlere nicht-redundante Anzahl von Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen einer Aktivität): 1,5; 1,8; 2,1
- 4 Ressourcentypen
- Ressourcen-Faktor (mittlere Nachfrage nach Ressourcen durch eine Aktivität): 0,25; 0,5; 0,75; 1
- Ressourcen-Stärke (mittlere Ressourcenverfügbarkeit pro Zeiteinheit): 0,5

Die Probleminstanzen mussten um die Aufteilung von Aktivitäten auf mehrere Akteure sowie um Zahlungswerte je Aktivität ergänzt werden. Hierbei wurde von zwei Akteuren ausgegangen. Die Aktivitäten wurden zufällig auf die beiden Akteure aufgeteilt. Zahlungswerte wurden so

ermittelt, dass Auszahlungen eher am Anfang und Einzahlungen eher am Ende des Projekts anfallen sowie insgesamt je Akteur ein positiver Barwert resultiert. Hierzu wurden je Akteur die Aktivitäten nach ihrer Nummer, die die Position im Rahmen des Projekts grob widerspiegelt, sortiert und dann der ersten Hälfte negative sowie der zweiten Hälfte positive Zahlungswerte zugewiesen. Die Auszahlungen wurden zufällig gleichverteilt aus dem Intervall [-50; -100] ausgewählt. Der doppelte absolute Mittelwert der entsprechenden Auszahlungen wurde als untere Schranke für das Intervall für die zufällig gleichverteilte Auswahl der Einzahlungswerte verwendet; für die obere Schranke wurde 50 zu dieser unteren Schranke addiert. Der Abzinsungsfaktor wird auf 1% je Zeiteinheit festgelegt.

## 4.2 Ergebnisse

Im Folgenden wird die individuelle Qualität eines Vertrags (Projektplans) für einen Akteur durch die Abweichung von einem approximativ ermittelten Bestwert für einen Projektplan unter Berücksichtigung von allein den Zahlungswerten des entsprechenden Akteurs angegeben. Diese hypothetischen Referenzwerte wurden durch die Anwendung von Simulated Annealing in der in [JAMS89] beschriebenen Form auf die entsprechenden einkriteriellen Probleme ermittelt. Die auf dieser Grundlage angegebenen prozentualen Abweichungen stellen jeweils Mittelwerte einer zehnfach wiederholten Simulation entsprechender Verhandlungsprozesse (mit unterschiedlichen Zufallszahlenfolgen) je Konfiguration dar. Die Berechnungen nehmen jeweils wenige Sekunden auf einem Standard-PC in Anspruch, wobei die Verhandlungen sowohl für 5000 als auch für 15000 Runden simuliert wurden.

Um zu untersuchen, ob und gegebenenfalls in welchem Ausmaß die eingeführten Mindestakzeptanzraten (mit entsprechend kooperativen Spielern) zu besseren Ergebnissen führen als das Zusammentreffen von Spielern, die nur individuell jeweils nicht verschlechternde Vorschläge akzeptieren (gierige Spieler), wurden beide Spielstrategien in unterschiedlichen Kombinationen untersucht. Kooperative Strategien wurden mit Mindestakzeptanzraten von 20% und 4% für die anfängliche bzw. letzte Verhandlungsphase verbunden; diese Parameterwertkombination hat sich bereits für verschiedene Problemstellungen als vorteilhaft herausgestellt hat (vgl. [Fink04; Fink06]).

In Tabelle 1 wird die Anwendung der beiden verwendeten Generierungsschemas im Zusammenhang mit einer homogenen Strategiewahl der Akteure verglichen. Das serielle Generierungsschema führt hier zu besseren Ergebnissen als das parallele Generierungsschema, was sich

mit ähnlichen Erkenntnissen für das klassische RCPSP deckt [KoHa99]. Dementsprechend wird im Folgenden auf die Darstellung von Ergebnissen für das parallele Generierungsschema verzichtet.

		5000 Runden		15.000 Runden	
		Akteur 1	Akteur 2	Akteur 1	Akteur 2
Seriell- es Generie- rungsschema	gierig	6,11 %	5,50 %	5,71 %	5,16 %
	kooperativ	5,36 %	4,56 %	4,69 %	4,23 %
Paralleles Generie- rungsschema	gierig	7,51 %	7,40 %	7,11 %	7,07 %
	kooperativ	7,02 %	6,76 %	6,68 %	6,40 %

Tab. 1: Ergebnisse für unterschiedliche Generierungsschemas

Die Tabellen 2 und 3 zeigen die Ergebnisse beim Aufeinandertreffen zweier gieriger Akteure bzw. zweier kooperativer Akteure für die verschiedenen Problem-Instanzen. Die durchschnittlichen Verhandlungsergebnisse für die kooperative Strategie und die hiermit verbundene Mindestakzeptanzratenregel erscheinen signifikant besser als bei gierigen Agenten. Dies wird durch einen statistischen t-Test mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1% belegt.

Bei einem hypothetischen Zusammentreffen zweier Akteure mit unterschiedlichem Verhalten profitiert der gierige Akteur erwartungsgemäß deutlich vom kooperativen Verhalten des anderen Akteurs, wobei sich das Ungleichverhältnis mit steigender Rundenzahl verstärkt. Beispielsweise ergeben sich bei 5000 und 15.000 Runden durchschnittliche Abweichungen von 3,46% (gierig) vs. 8,08% (kooperativ) bzw. 2,58% (gierig) vs. 8,47% (kooperativ).

Die in [Fink04] dargestellte und auch hier zutreffende spieltheoretische Analyse würde bei einer freien Strategiewahl der Akteure zur Kombination zweier gieriger Akteure als eindeutiges Nash-Gleichgewicht führen. Damit würde in gleicher Weise wie beim so genannten „Gefangen-Dilemma“ die einzige dominierte Lösung als das Verhandlungsergebnis resultieren und sich keine effektive Kooperation eigennütziger Akteure herausbilden [Axel84]. Dieses Dilemma wurde durch die oben beschriebene Einführung von Mindestakzeptanzraten aufgelöst, was die Akteure zu einem in diesem Sinne kooperativen Verhalten zwingt und damit beiden Akteuren bessere Resultate erbringt. Die entsprechenden Ergebnisse sind hochwertig, wie ein Vergleich mit den Ergebnissen einer Anwendung von Simulated Annealing für das hypothetische integrierte Gesamtproblem zeigt; es ergeben sich im Mittel Abweichungen der Barwertsummen von weniger als einem Prozent.

Anzahl Aktivitäten	Netzwerk- Komplexität	Ressourcen- Faktor	5000 Runden		15.000 Runden	
			Akteur 1	Akteur 2	Akteur 1	Akteur 2
30	1,5	0,25	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
		0,50	4,28%	5,16%	4,28%	5,16%
		0,75	1,12%	5,63%	1,04%	5,63%
		1,00	1,33%	2,93%	1,33%	2,93%
	1,8	0,25	0,45%	1,61%	0,45%	1,61%
		0,50	0,87%	1,55%	0,81%	1,09%
		0,75	2,18%	4,68%	2,18%	4,68%
		1,00	5,08%	3,48%	5,08%	3,48%
	2,1	0,25	5,28%	1,12%	5,28%	1,12%
		0,50	2,21%	2,80%	2,21%	2,80%
		0,75	0,64%	0,92%	0,64%	0,92%
		1,00	2,60%	3,06%	2,52%	2,95%
60	1,5	0,25	3,26%	1,37%	3,26%	1,37%
		0,50	5,14%	7,25%	4,72%	6,47%
		0,75	12,15%	8,24%	10,98%	7,65%
		1,00	6,35%	6,25%	5,98%	6,04%
	1,8	0,25	2,37%	3,48%	2,37%	3,48%
		0,50	2,37%	5,13%	2,37%	5,13%
		0,75	8,51%	8,25%	8,48%	8,13%
		1,00	10,28%	4,52%	9,64%	4,35%
	2,1	0,25	2,56%	1,98%	2,56%	1,98%
		0,50	2,72%	4,63%	2,60%	4,38%
		0,75	5,15%	7,14%	5,12%	7,09%
		1,00	11,68%	6,48%	11,32%	6,37%
120	1,5	0,25	3,51%	1,74%	3,49%	1,69%
		0,50	9,35%	9,43%	8,13%	8,64%
		0,75	12,90%	8,55%	11,84%	7,86%
		1,00	18,35%	13,04%	17,46%	12,29%
	1,8	0,25	3,36%	1,10%	3,14%	1,06%
		0,50	8,82%	12,06%	6,83%	9,41%
		0,75	8,66%	7,03%	7,24%	6,18%
		1,00	11,07%	12,61%	10,27%	12,08%
	2,1	0,25	6,33%	3,83%	6,01%	3,66%
		0,50	2,94%	3,83%	2,81%	3,62%
		0,75	21,15%	10,10%	19,78%	8,75%
		1,00	14,76%	17,10%	13,51%	15,84%
Durchschnitt			6,11%	5,50%	5,71%	5,16%

Tab. 2: Ergebnisse bei beiderseitig gieriger Strategie

Anzahl Aktivitäten	Netzwerk- Komplexität	Ressourcen- Faktor	5000 Runden		15.000 Runden	
			Akteur 1	Akteur 2	Akteur 1	Akteur 2
30	1,5	0,25	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
		0,50	4,01%	4,49%	4,92%	3,72%
		0,75	1,69%	2,47%	1,68%	2,58%
		1,00	1,39%	2,20%	1,58%	1,77%
	1,8	0,25	1,05%	0,69%	1,49%	0,00%
		0,50	1,50%	0,66%	1,00%	0,75%
		0,75	2,04%	3,81%	1,92%	2,55%
		1,00	4,78%	4,02%	4,26%	3,46%
	2,1	0,25	1,82%	0,39%	1,82%	0,39%
		0,50	1,55%	3,35%	0,14%	4,34%
		0,75	0,62%	0,94%	0,62%	0,93%
		1,00	1,82%	3,34%	1,93%	3,12%
60	1,5	0,25	2,23%	1,83%	1,68%	1,85%
		0,50	6,23%	5,37%	6,33%	5,79%
		0,75	11,00%	7,51%	11,66%	5,13%
		1,00	6,32%	5,03%	4,43%	6,38%
	1,8	0,25	2,17%	2,49%	2,42%	2,20%
		0,50	2,55%	3,59%	2,64%	3,10%
		0,75	6,97%	8,14%	7,27%	6,98%
		1,00	7,85%	4,34%	8,50%	3,09%
	2,1	0,25	2,45%	0,92%	2,57%	0,95%
		0,50	3,23%	2,58%	2,72%	2,57%
		0,75	6,35%	6,04%	5,58%	6,55%
		1,00	11,93%	4,46%	8,49%	7,23%
120	1,5	0,25	3,01%	1,99%	2,54%	2,19%
		0,50	7,92%	10,74%	7,29%	7,25%
		0,75	11,43%	7,11%	8,44%	6,89%
		1,00	16,87%	11,29%	12,49%	12,10%
	1,8	0,25	1,64%	1,23%	1,45%	0,95%
		0,50	5,79%	8,40%	5,83%	5,77%
		0,75	6,74%	6,42%	4,74%	6,29%
		1,00	8,26%	11,44%	7,47%	10,10%
	2,1	0,25	5,32%	3,53%	4,05%	3,31%
		0,50	3,10%	2,92%	3,07%	2,67%
		0,75	16,22%	7,36%	14,25%	7,65%
		1,00	14,97%	12,93%	11,62%	11,57%
Durchschnitt			5,36%	4,56%	4,69%	4,23%

Tab. 3: Ergebnisse bei beiderseitig kooperativer Strategie

Im Folgenden werden die Verhandlungsergebnisse in Abhängigkeit vom Ressourcen-Faktor näher betrachtet. Es ist zu erwarten, dass bei einem höheren Ressourcen-Faktor, welcher mit der Nachfrage nach Ressourcen wächst, zwischen den Akteuren eine stärkere Konkurrenz um individuell günstige Einplanungszeiten im Projektplan entsteht und damit die Abweichungen insgesamt steigen. Dies wird durch die in den Tabellen 4 und 5 dargestellten Ergebnisse, die für den Fall einer beiderseitig kooperativen Strategie bei 5000 Verhandlungsrunden in Abb. 2 visualisiert sind, bestätigt.

Ressourcen-Faktor	5000 Runden		15.000 Runden	
	Akteur 1	Akteur 2	Akteur 1	Akteur 2
0,25	3,01 %	1,80 %	2,95 %	1,77 %
0,50	4,30 %	5,76 %	3,86 %	5,19 %
0,75	8,05 %	6,73 %	7,48 %	6,32 %
1,00	9,06 %	7,72 %	8,57 %	7,37 %

Tab. 4: Ergebnisse in Abhängigkeit vom Ressourcen-Faktor bei beiderseitig gieriger Strategie

Ressourcen-Faktor	5000 Runden		15.000 Runden	
	Akteur 1	Akteur 2	Akteur 1	Akteur 2
0,25	2,19 %	1,45 %	2,00 %	1,32 %
0,50	3,99 %	4,68 %	3,77 %	3,99 %
0,75	7,01 %	5,53 %	6,24 %	5,06 %
1,00	8,24 %	6,56 %	6,75 %	6,54 %

Tab. 5: Ergebnisse in Abhängigkeit vom Ressourcen-Faktor bei beiderseitig kooperativer Strategie

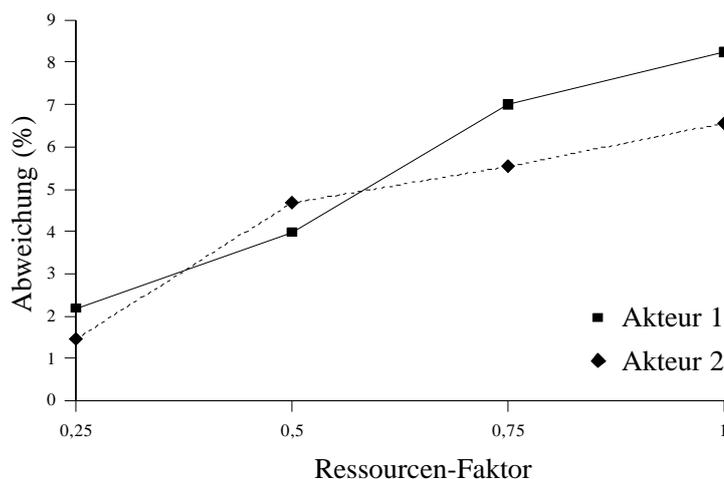


Abb. 2: Ergebnisse in Abhängigkeit vom Ressourcen-Faktor bei beiderseitig kooperativer Strategie

## 5 Fazit

In diesem Beitrag wurde für eine komplexe Projektplanungsproblemstellung mit eigensinnigen Akteuren und Informationsasymmetrie ein automatischer Koordinationsmechanismus beschrieben und angewendet. Dieser ermöglicht eine ertragsorientierte Ablaufgestaltung von Projekten mit mehreren beteiligten Akteuren. Die experimentellen Ergebnisse belegen die Effektivität des Verfahrens im betrachteten Kontext. Eine Anwendung und Validierung des Mechanismus für Problemstellungen aus dem Supply Chain Management mit auch mehr als zwei Akteuren ist in [Fink06] beschrieben.

Für die betrachtete Projektplanungsproblemstellung bietet es sich an, näher zu untersuchen, in welchem Maße der beschriebene und ausgestaltete Koordinationsmechanismus die vollständige Ausschöpfung theoretisch möglicher, aber gefährdeter Kooperationsvorteile leistet. Hierzu wäre einerseits etwa der effiziente Rand (die Menge aller Pareto-optimalen Ergebnisse) zu ermitteln und eine entsprechende Abweichung zu bewerten. Aufgrund der Tatsache, dass das zugrunde liegende einkriterielle Problem bereits *NP*-schwer ist, erscheinen hierfür nur approximative Vorgehensweisen anwendbar. Andererseits erscheint die Verbesserung der Generierungsschemas im Hinblick auf die Barwertmaximierungszielsetzung denkbar, insofern einzelne Aktivitäten mit unabhängigen Pufferzeiten verbunden sein können, was eine beschränkte individuelle Verschiebung einzelner Aktivitäten ermöglichen kann; allerdings sind hierbei die Wechselwirkungen mehrerer Verschiebungen unter Berücksichtigung der Ressourcenbeschränkung zu berücksichtigen.

Der beschriebene verhandlungsbasierte Koordinationsmechanismus ist prinzipiell für alle verteilten Entscheidungsprobleme anwendbar, bei denen der Verhandlungsgegenstand und damit der entsprechende Suchraum formal definierbar sind. Durch die vollautomatische Umsetzbarkeit des Verfahrens ist dann eine laufzeiteffiziente und damit praxistaugliche Anwendung möglich. Die individuelle Bewertung einzelner Verträge liegt allein bei den beteiligten Akteuren. Dabei erfolgt keine Offenlegung der individuellen Nutzenfunktionen und es wird kein interpersoneller Nutzenvergleich vorausgesetzt. Der Koordinationsmechanismus erzwingt damit unter Berücksichtigung praxisbezogener Randbedingungen nur in geringem Maße eine Offenlegung von Informationen.

## Literaturverzeichnis

- [Axel84] *Axelrod, R.*: The Evolution of Cooperation. Basic Books, New York 1984.
- [BDM+99] *Brucker, P.; Drexl, A.; Möhring, R.; Neumann, K.; Pesch, E.*: Ressource-constrained Project Scheduling: Notation, Classification, Models, and Methods. European Journal of Operational Research 112 (1999), S. 3–41.
- [Ehrg05] *Ehrgott, M.*: Multicriteria Optimization, 2. Auflage. Springer, Berlin 2005.
- [Fink04] *Fink, A.*: Supply Chain Coordination by Means of Automated Negotiations. Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-37). IEEE 2004.
- [Fink06] *Fink, A.*: Supply Chain Coordination by Means of Automated Negotiation Between Autonomous Agents. In: *Chaib-draa, B.; Müller, J.* (Hrsg.): Multiagent-Based Supply Chain Management, Studies in Computational Intelligence Vol. 28. Springer, Berlin 2006, S. 351–372.
- [FiVo02] *Fink, A.; Voß, S.*: HotFrame: A Heuristic Optimization Framework. In: *Voß, S.; Woodruff, D.L.* (Hrsg.): Optimization Software Class Libraries, Kluwer, Boston 2002, S. 81–154.
- [FlHi04] *Fleszar, K.; Hindi, K.S.*: Solving the Resource-constrained Project Scheduling Problem by a Variable Neighbourhood Search. European Journal of Operational Research 155 (2004), S. 402–413.
- [Fren88] *French, S.*: Decision Theory: An Introduction to the Mathematics of Rationality. Ellis Horwood, Chichester 1988.
- [GSST05] *Gandibleux, X.; Sevaux, M.; Sörensen, K.; T'kindt, V.* (Hrsg.): Metaheuristics for Multiobjective Optimisation. Springer, Berlin 2005.

- [HeDD97] *Herroelen, W.S.; Dommelen, P.V.; Demeulemeester, E.L.*: Project Network Models with Discounted Cash Flows – A Guided Tour Through Recent Developments. *European Journal of Operational Research* 100 (1997), S. 3–41.
- [JAMS89] *Johnson, D.S.; Aragon, C.R.; McGeoch, L.A.; and Schevon, C.*: Optimization by Simulated Annealing: An Experimental Evaluation; Part 1, Graph Partitioning. *Operations Research* 37 (1989), S. 865–892.
- [KiGV83] *Kirkpatrick, S.; Gelatt Jr., C.D.; Vecchi, M.P.*: Optimization by Simulated Annealing. *Science* 220 (1983), S. 671–680.
- [KFSB03a] *Klein, M.; Faratin, P.; Sayama, H.; Bar-Yam, Y.*: Negotiating Complex Contracts. *Group Decision and Negotiation* 12 (2003), S. 111–125.
- [KFSB03b] *Klein, M.; Faratin, P.; Sayama, H.; Bar-Yam, Y.*: Protocols for Negotiating Complex Contracts. *IEEE Intelligent Systems* 18 (6) (2003), S. 32–38.
- [Koli96] *Kolisch, R.*: Serial and Parallel Resource-constrained Project Scheduling Methods Revisited: Theory and Computation. *European Journal of Operational Research* 90 (1996), S. 320–333.
- [Koli97] *Kolisch, R.*: Investitionsplanung in Netzwerken. *Zeitschrift für Betriebswirtschaft* 67 (1997), S. 1057–1071.
- [KoHa99] *Kolisch, R.; Hartmann, S.*: Heuristic Algorithms for Solving the Resource-constrained Project Scheduling Problem: Classification and Computational Analyses. In: *Weglarz, J. (Hrsg.): Handbook on Recent Advances in Project Scheduling*. Kluwer, Boston 1999, S. 147–178.
- [KoSp96] *Kolisch, R.; Sprecher, A.*: PSPLIB – A Project Scheduling Library. *European Journal of Operational Research* 96 (1996), S. 205–216.
- [Mert95] *Mertens, P.*: Wirtschaftsinformatik: Von den Moden zum Trend. In: *König, W. (Hrsg.): Wirtschaftsinformatik '95*, Physica, Heidelberg 1995, S. 25–64.

- [Mora05] *Morales, M.*: Anwendung eines automatisierten Verhandlungsmechanismus zur Koordination der Projektplanung autonomer, gewinnmaximierender Beteiligter. Diplomarbeit, Universität Hamburg, 2005.
- [Nash50] *Nash, J.F.*: The Bargaining Problem. *Econometrica* 18 (1950), S. 155–162.
- [Nash53] *Nash, J.F.*: Two-person Cooperative Bargaining Games. *Econometrica* 21 (1953), S. 128–140.
- [Sand99] *Sandholm, T.W.*: Distributed and Rational Decision Making. In: Weiss, G. (Hrsg.): *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. MIT Press, Cambridge MA 1999, S. 201–258.
- [SpKD95] *Sprecher, A.; Kolisch, R.; Drexel, A.*: Semi-active, Active, and Non-delay Schedules for the Resource-constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research* 80 (1995), S. 94–102.
- [VaDH01] *Vanhoucke, M.; Demeulemeester, E.; Herroelen, W.*: On Maximizing the Net Present Value of a Project Under Renewable Resource Constraints. *Management Science* 47 (2001), S. 1113–1121.
- [WKWI94] *WKWI (Wissenschaftliche Kommission Wirtschaftsinformatik im Verband der Hochschullehrer für Betriebswirtschaft)*: Profil der Wirtschaftsinformatik. *Wirtschaftsinformatik* 36 (1994), S. 80–81.