

# Multi-Agenten-System zur Terminplanoptimierung im Bauwesen mit gemeinsam genutzten Ressourcen

A Multi-agent-system for project scheduling in construction with shared resources

Florian Wenzler  
Willibald A. Günthner

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik  
Fakultät Maschinenwesen  
Technische Universität München

**D**ie Qualität eines Projektplans ist essenziell für die erfolgreiche Durchführung eines Bauprojektes. Dies stellt jedoch eine große Herausforderung für die Planer dar, da eine Vielzahl unterschiedlicher Randbedingungen wie Ausführungsreihenfolgen, Ressourcenverfügbarkeit oder verschiedene Ausführungsmodi berücksichtigt werden müssen. Das entsprechende theoretische Problem ist als Multi-Mode Resource-Constrained Project Scheduling Problem (MRCPSP) bekannt. Dieses Paper präsentiert für die Lösung ein Multi-Agenten-System, bei dem die Prozesse und Ressourcen als kollaborative Agenten modelliert sind. Eigenständige Prozess- und Ressourcenagenten schreiben sich an einer zentralen Börse ein, wo die Verhandlungen über die Ressourcenzuweisung durchgeführt werden. Als Erweiterung zu bisherigen Arbeiten wird ein neuer Ressourcentyp vorgestellt, der von mehreren Prozessen gleichzeitig verwendet werden kann. Dadurch kann mit diesem System die Realität deutlich besser abgebildet werden. Der Einfluss dieser neuen Ressourcenart wird anschließend mithilfe eines ereignisdiskreten Simulationsmodells untersucht.

[Schlüsselwörter: Terminplanung, MRCPSP, Multi-Agenten-System, Ereignisdiskrete Simulation]

**T**he quality of a project plan created is essential for realizing a construction project properly. This is a big challenge for planners, because there are many constraints to be considered. The theoretical problem to be solved is known as the multi-mode resource-constrained project scheduling problem (MRCPSP). This paper presents a multi-agent approach in which resources and processes are represented as collaborative agents. Autonomous process and resource agents register themselves on a central blackboard where the resource allocation to activities is negotiated. As expansion to prior works, a new type of resource agent is integrated which can be used by more than one process at the same time. Using this agent, more realistic modelling is possible.

The influence of the new resource is evaluated by experiments in a discrete-event simulation.

[Keywords: project scheduling, MRCPSP, multi-agent system, discrete event simulation]

## 1 EINLEITUNG

Die Erstellung von Terminplänen im Bauwesen wird meist manuell und nicht sehr detailliert durchgeführt. Daher kann es leicht zu einem erhöhten Koordinationsaufwand und geringerer Produktivität während der Bauausführung oder zum Verzug der Fertigstellung führen. Dies hat als Ursache die hohe Anzahl an Abhängigkeiten und Randbedingungen in einem derartigen Projekt, aber auch die hohe Rate an Neuplanungen aufgrund unvorhersehbarer externer Einflüsse wie dem Wetter, von denen insbesondere Baustellen betroffen sind.

Aktuell verwenden die Planungstools zur Erstellung der Projektpläne vor allem Methoden wie „Program Evaluation and Review Technique (PERT)“ oder die Kritische-Pfad-Methode (CPM) [Mar-1994]. Diese haben jedoch den großen Nachteil, dass Ressourcenrestriktionen, wie sie auf Baustellen jedoch vorkommen, außer Acht gelassen werden.

Aus diesen Gründen wird angestrebt, eine Methodik für ein Planungswerkzeug bereitzustellen, welche eine schnellere, detailliertere und zugleich objektivere Planung ermöglicht. Zudem soll eine eventuell notwendige Neuplanung aufwandsarm durchführbar sein.

In diesem Beitrag wird nach einer theoretischen Beschreibung des Problems ein Multi-Agenten-System (MAS) für dessen Lösung vorgestellt. Der Aufbau und die Funktionsweise werden anschließend erläutert. Für eine realistische Modellierung der Restriktionen im Bauwesen wird das MAS um einen neuen Agententyp erweitert. Die daraus resultierenden Auswirkungen werden zum Abschluss simulativ untersucht.

## 2 PROBLEMSTELLUNG

Die Aufgabenstellung der möglichst optimalen Anordnung voneinander abhängiger und ressourcenbehafteter Prozesse zu einem Gesamtablauf kann zu dem in der Wissenschaft als „Resource-Constrained Project-Scheduling Problem“ (RCPSP) bekannten Optimierungsproblem abstrahiert werden. Können die enthaltenen Prozesse zusätzlich noch auf verschiedene Arten durchgeführt werden, erweitert sich das Problem zum „Multi-Mode Resource-Constrained Project-Scheduling Problem“ (MRCPSP). Beide Varianten gehören zur Klasse der np-schweren Probleme [Bla-1983] und sind im Allgemeinen nicht optimal in vertretbarer Zeit lösbar.

### 2.1 DEFINITION DES MRCPSP

Für ein Projekt mit den nachfolgenden Randbedingungen wird die Lösung mit der kürzesten Gesamtdauer gesucht.

$J$ :	Anzahl an Prozessen im Projekt
$j$ :	Prozessnummer mit $j \in J$
$S_j$ :	direkte Nachfolger von Prozess $j$
$P_j$ :	direkte Vorgänger von Prozess $j$
$M_j$ :	Anzahl Ausführungsmodi für Prozess $j$
$m$ :	Ausgewählter Modus mit $m \in M_j$
$d_{jm}$ :	Dauer von Prozess $j$ , ausgeführt im Modus $m$
$R$ :	Anzahl Pools für wiederverwendbare Ressourcen
$k$ :	Index des Ressourcenpools (wiederverwendbar)
$R_k$ :	Anzahl Ressourcen in Pool $k$
$r_{jmk}$ :	Anzahl benötigter Ressourcen aus dem Pool $k$ mit $r_{jmk} \leq R_k$
$N$ :	Anzahl Pools für nicht wiederverwendbare Ressourcen
$l$ :	Index des Ressourcenpools (nicht wiederverwendbar)
$N_l$ :	Anzahl Ressourcen in Pool $l$
$n_{jml}$ :	Anzahl benötigter Ressourcen aus dem Pool $l$

Ein Projekt besteht dabei aus  $J$  Prozessen mit zusätzlichen Dummy-Prozessen zu Beginn und am Ende ( $j = 0$  und  $j = J + 1$ ), die damit einen eindeutigen Start- bzw. Endpunkt darstellen. Sie besitzen jedoch keine Prozessdauer und Ressourcenbedarfe ( $d_0 = 0$ ,  $d_{J+1} = 0$ ,  $r_{0k} = 0$ ,  $r_{J+1k} = 0$ ,  $n_{0l} = 0$ ,  $n_{J+1l} = 0$ ) und haben keinen Einfluss auf den tatsächlichen Projektplan. Jeder andere Prozess besitzt eine vom Modus abhängige Prozessdauer  $d_{jm}$ .

Die Einhaltung der korrekten Reihenfolge der Prozesse wird dadurch sichergestellt, dass ein Prozess  $j$  erst dann gestartet werden darf, wenn alle seine unmittelbaren Vorgänger  $P_j$  abgeschlossen wurden.

Während der gesamten Projektdauer sind die zusätzlichen Ressourcenbeschränkungen einzuhalten. Dabei unterscheiden sich die zwei Ressourcentypen folgendermaßen:

- Wiederverwendbare Ressourcen werden einem Prozess zugewiesen. Nach dessen Beendigung kommen sie in den Pool zurück und können von anderen Prozessen verwendet werden.
- Nicht wiederverwendbare Ressourcen werden während der Prozessausführung verbraucht. Sie stehen somit späteren Prozessen nicht mehr zur Verfügung. Dementsprechend wird auch der Pool im Laufe der Zeit immer kleiner.

Zur Ausführung benötigt jeder Prozess eine gewisse Anzahl an Ressourcen, die mit  $r_{jmk}$  für die wiederverwendbaren Ressourcen, respektive  $n_{jml}$  für die nicht wiederverwendbaren Ressourcen definiert sind. Zu keinem Zeitpunkt während der Projektausführung dürfen mehr wiederverwendbare Ressourcen als durch die Poolgrößen  $R_k$  vorgegeben verwendet werden. Übersteigt der Ressourcenbedarf die vorhandenen Kapazitäten, müssen Prozesse so lange verschoben werden, bis wieder genug Ressourcen freigegeben wurden. Ebenso müssen die zu Beginn vorhandenen nicht wiederverwendbaren Ressourcen für die gesamte Projektlänge ausreichen. Andernfalls ist der erstellte Projektplan ungültig.

Einige Einschränkungen können getroffen werden, deren Abweichungen von der Realität sich noch in einem akzeptablen Rahmen bewegen:

- Begonnene Prozesse können nicht unterbrochen werden.
- Der ausgewählte Modus eines Prozesses kann nicht während der Ausführung verändert werden.
- Die Ressourcen bleiben einem Prozess solange eindeutig zugewiesen, bis dieser beendet ist.
- Die Größe der Ressourcenpools bleibt während der gesamten Projektdauer konstant.

Diese Restriktionen haben kaum Einfluss auf den geplanten Einsatz im Bereich des Bauwesens. Spezielle Randbedingungen können auch dadurch berücksichtigt werden, dass die Eingangsdaten gezielt angepasst werden (z. B. durch Aufteilen eines Prozesses, um eine Unterbrechung oder einen Mode-Wechsel zu ermöglichen).

### 2.2 LÖSUNGSANSÄTZE

Für das MRCPSP existieren diverse Lösungsansätze mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen.

Bei kleineren Problemgrößen besteht noch die Möglichkeit, die optimale Lösung in akzeptabler Zeit zu bestimmen. Dies kann über eine vollständige Enumeration des Lösungsraumes geschehen oder durch Verfahren wie Branch-and-Bound [Joh-1967] und Lower Bounds [Hei-1997].

Für größere Projekte wurden verschiedene Metaheuristiken gezielt auf das MRCPSP angepasst, wie Simulated Annealing [Kön-2009], Genetische Algorithmen [Van-2010], Partikel-Schwarm-Optimierung [Jar-2008] oder der Ant-Colony-Algorithm [Li-2013]. Diese bieten einen sehr guten Kompromiss zwischen Ergebnisqualität und benötigter Rechenzeit. Aufgrund der Komplexität lässt sich nicht mehr bestimmen, ob das Optimum tatsächlich gefunden wurde.

### 3 MULTI-AGENTEN-SYSTEM FÜR DIE LÖSUNG DES MRCPSP

Ein weiterer Ansatz besteht in der Verwendung von Multi-Agenten-Systemen. Dabei wird versucht, autonome Einheiten zu erstellen, die für bestimmte Aufgaben geeignet sind und begrenztes, darauf zugeschnittenes Wissen verfügen. Diese kommunizieren miteinander und versuchen so, das Gesamtproblem zu lösen.

Der Vorteil von Agentensystemen besteht in deren Robustheit und der größeren Flexibilität gegenüber herkömmlichen Lösungsansätzen [Dav-1994]. Durch Hinzufügen oder Entfernen einzelner Agenten kann das System leicht an geänderte Randbedingungen angepasst werden. Zudem lassen sich Informationen über den Ist-Zustand sehr leicht integrieren. Damit wird auch ein späterer Einsatz als nur bei der erstmaligen Planung ermöglicht.

#### 3.1 AUFBAU

In diesem Agentensystem sind Prozesse, wiederverwendbaren Ressourcen und nicht wiederverwendbare Ressourcen als eigenständige Agenten modelliert. Sie agieren unabhängig voneinander und versuchen dabei, eigene Ziele zu erreichen. Die Struktur mit den Kommunikationswegen ist in Abbildung 1 dargestellt.

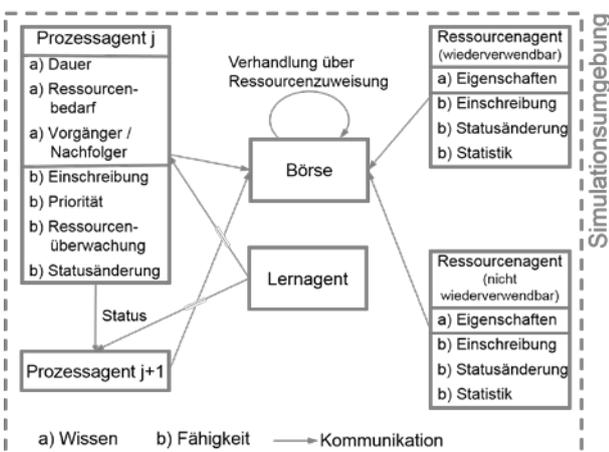


Abbildung 1. Struktur des Agentensystems

Zentrales Element des Systems ist die Börse. Dort wird entschieden, welche Prozesse die erforderlichen Res-

sourcen zugewiesen bekommen, falls ein Engpass vorliegt.

Die Prozessagenten besitzen lediglich das Wissen über ihre eigenen Eigenschaften wie Dauer, Ressourcenbedarf und Nachfolger. Die Kommunikation findet sowohl mit der Börse als auch mit anderen Prozessagenten statt. Für ihr eigenständiges Handeln besitzen sie Methoden zur Einschreibung an der Börse, Bestimmung ihrer Priorität sowie zur Statusänderung.

Ressourcenagenten sind sehr ähnlich zu den Prozessagenten. Sie schreiben sich eigenständig an der Börse ein und passen dementsprechend ihren Status an. Durch die Anpassung verschiedener Eigenschaften wie Kostensätze oder Leistungsdaten kann Einfluss auf die Ressourcenauswahl und die eigentliche Prozessausführung genommen werden.

Eine Sonderrolle nimmt der Lernagent ein. Dieser hat einen Überblick über das Gesamtsystem. Er kommuniziert mit allen Prozessagenten und kann deren Entscheidungen beeinflussen.

#### 3.2 FUNKTIONSWEISE

Der Projektplan wird chronologisch aus den erzeugten Prozessagenten aufgebaut. Wurde ein Prozess abgeschlossen, informiert er seine direkten Nachfolger darüber und gibt seine verwendeten Ressourcen wieder frei. Stellt nun ein Prozess fest, dass alle Vorgänger beendet sind, schreibt er sich an der Börse ein. Dazu übermittelt er für jeden seiner Modi den Ressourcenbedarf jeden Typs sowie den Prioritätswert, nach dem anschließend sortiert wird. Gleichzeitig schreiben sich alle freien Ressourcen ebenfalls an der Börse ein. Diese lassen sich bei Bedarf nach verschiedenen Kriterien sortieren, um beispielsweise eine gleichmäßige Auslastung zu erreichen.

Anschließend wird der Reihe nach für jeden Modus überprüft, ob genug Ressourcen vorhanden sind, um diesen zu starten. Bei erfolgreichem Vergleich werden die benötigten Ressourcen dem Prozess zugewiesen und die restlichen Modi aus der Liste gelöscht.

Der Prioritätswert der Prozesse kann mit unterschiedlichen heuristischen Regeln bestimmt werden [Wen-2015]. Diese greifen für die Berechnung auf alle zur Verfügung stehenden Informationen der Prozesse zurück. Dazu zählen Prozessdauer, Anzahl der Nachfolger, Ressourcenbedarf, Lage auf dem kritischen Pfad sowie Kombinationen daraus.

Nach Abschluss des letzten Prozesses wird der Lernagent aktiv. Er analysiert die bisher gefundene Lösung und versucht durch gezielte Manipulation der Prozessagenten das Ergebnis zu verbessern. Dies kann zunächst darin bestehen, einen gültigen Plan zu erstellen, falls die Ressourcengrenzen nicht eingehalten wurden. Die Haupt-

aufgabe ist jedoch die Verkürzung der Projektlaufzeit bei gültigen Projektplänen. Anschließend wird der Prozess mit den zusätzlich festgelegten Randbedingungen neu gestartet. Diese Prozedur wird solange durchgeführt, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird [Wen-2016].

## 4 GETEILTER RESSOURCENAGENT

### 4.1 GRÜNDE FÜR DIE ERWEITERUNG

Auf Baustellen können manche Ressourcen nicht eindeutig einem einzigen Prozess zugeordnet werden. Durch die gleichzeitige Inanspruchnahme der Ressourcen von mehreren Prozessen können jedoch weitere Auswirkungen auf die Ausführungsdauer der Prozesse und somit auch auf die gesamte Projektdauer entstehen. Ein Beispiel hierfür sind Kräne. Sie kommen nur in geringer Anzahl auf Baustellen vor und werden für eine Vielzahl an Aufgaben von verschiedenen Prozessen benötigt.

Durch die Erweiterung um einen neuen Agententyp kann dieser Aspekt der Realität in das Planungsvorgehen übernommen werden. Damit lässt sich auch eine erste Abschätzung treffen, wie stark die Ressourcen ausgelastet sind und mögliche Engpässe können identifiziert werden. Zudem lässt sich durch Simulationsexperimente der tatsächliche Einfluss dieses Ressourcentyps auf die Ausführungsdauer bestimmen.

### 4.2 MODELLIERUNG

Der gemeinsam genutzte Ressourcenagent kann einzelne Arbeitsaufträge abarbeiten, die er von den verschiedenen Prozessagenten erhält. Senden mehrere Prozesse (nahezu) gleichzeitig Aufträge, kann der Ressourcenagent diese nicht mehr unverzüglich bearbeiten und es kommt zu den erwarteten Abhängigkeiten.

Innerhalb des geteilten Ressourcenagenten werden die Arbeitsaufträge nach dem FIFO-Prinzip abgearbeitet und anschließend an die Prozesse zurückgemeldet. Der Einsatz von Alternativstrategien zur Priorisierung der wartenden Aufträge können problemlos implementiert werden. Die zugehörige schematische Darstellung ist in Abbildung 2 zu sehen.

Ein Prozess wird beendet, sobald zwei Bedingungen erfüllt sind:

1. Alle Arbeitsaufträge für diesen Prozess wurden von den geteilten Ressourcen abgearbeitet.
2. Die zu Beginn festgelegte Plandauer des Prozesses wurde erreicht.

Somit besitzt ein Prozess eine Mindestdauer, kann jedoch durch Verzögerungen der geteilten Ressourcen zusätzlich verlängert werden.

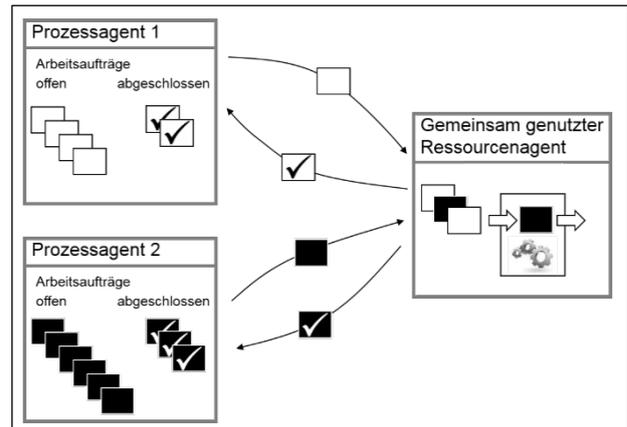


Abbildung 2. Konzept des geteilten Ressourcenagenten

## 5 SIMULATIONSEXPERIMENTE

Das vorgestellte Multi-Agenten-System wurde in der ereignisdiskreten Simulationsumgebung Plant Simulation erstellt. Die verschiedenen Agenten wurden als Netzwerke oder bewegliche Elemente (BE) erstellt, die alle notwendigen Methoden enthalten.

### 5.1 VERSUCHSPLAN

Für die Untersuchungen zum Einsatz von geteilten Ressourcenagenten ist der Einfluss verschiedener Parameter von Interesse:

1. Anzahl der eingesetzten geteilten Ressourcenagenten
2. Anteil der Gesamtdauer eines Prozesses, die in Form von Arbeitsaufträgen übergeben wird (Auftragslast)
3. Dauer der einzelnen Arbeitsaufträge bzw. alternativ die Anzahl der Arbeitsaufträge

Diese Variablen werden in Simulationsläufen entsprechend dem Versuchsplan in Tabelle 1 variiert und auf ihre Einflüsse hin untersucht.

Der erste Untersuchungsgegenstand ist der Einfluss der Anzahl der – zusätzlich zu den in den Projektplänen vorgesehenen herkömmlichen Ressourcen – verwendeten geteilten Ressourcen. Beispielhaft wurde die Anzahl zwischen einer und drei Ressourcen variiert, für die jeweils folgende Zuweisungsregeln gelten:

Bei einer vorhandenen geteilten Ressource wird diese von jedem Prozess (in jedem Modus) benötigt. Bei zwei Ressourcen werden zufällig 50% der Prozesse bestimmt, die Ressource Nr. 1 benötigen (in jedem Modus), die anderen 50% haben dementsprechend Bedarf an Ressource 2. Bei drei Ressourcen ist das Vorgehen entsprechend mit der Verteilung von jeweils 33%.

Tabelle 1. *Versuchsplan*

Variable	Minimum	Maximum	Schrittweite
Anzahl der geteilten Ressourcen	1	3	1
Anteil der übergebenen Prozessdauer (Auftragslast) [%]	10	100	10
Dauer der Aufträge [1/1000 ZE]	1	1000 (entspr. ca. einem Tag)	variabel

Der entscheidende Parameter für die Auslastung der geteilten Ressourcenagenten ist der Anteil der Prozesszeit, der in Arbeitsaufträge umgewandelt wird. Um den Bereich zu ermitteln, ab dem ein Einfluss der geteilten Ressource erkennbar ist, bis zu der Grenze, ab der dieser Einfluss zu groß wird, wird der in Arbeitsaufträge umzuwandelnde Anteil an der Prozesszeit von 10 % bis 100 % variiert.

Nachdem die Gesamtdauer der Arbeitsaufträge eines Prozesses feststeht, muss noch definiert werden, in wie viele Aufträge diese Zeit unterteilt wird, bzw. wie lange die einzelnen Aufträge dauern. Die Auswirkung von verschiedenen langen Einzelaufträgen tritt dann auf, wenn mehrere Prozesse gleichzeitig ausgeführt werden. Je kürzer die Arbeitsaufträge sind, desto ähnlicher sind die resultierenden Ausführungsdauern. In Abbildung 3 ist dies schematisch dargestellt. Für die Experimente variiert die Dauer zwischen 1 ZE (z. B. 1 Tag) und 1 % davon (entspricht z. B. einigen Sekunden).

Für die Experimente werden Projekte aus der Projektplanbibliothek PSPLIB [Kol-1996] verwendet. Darin enthalten sind Projektpläne mit 10-30 Prozessen mit jeweils 1 bis 5 Modi sowie 1 bis 5 Typen wiederverwendbarer Ressourcen und 0 bis 3 Typen nicht wiederverwendbarer Ressourcen. Die Eingangsparameter werden von einer Grundkonfiguration ausgehend einzeln variiert, so dass eine gezielte Untersuchung zu den Parametern möglich wird. Insgesamt stehen ca. 11 000 Projekte zur Verfü-

gung. Für die Experimente wurden stellvertretend aus der Projektklasse j30 ( $J = 30, M_j = 2, R = 2, N = 2$ ) acht Pläne zufällig ausgewählt. Gemessen werden die Veränderung der Gesamtprojektdauer, die Veränderung der einzelnen Prozesszeiten und die Auslastung der geteilten Ressourcenagenten. Für jede Konfiguration wurden 5 Beobachtungen durchgeführt, und aus deren Ergebnissen die Mittelwerte gebildet. Durch Zufall beeinflusst werden dabei die Zuweisung der geteilten Ressourcen zu den Prozessen und die exakte Dauer der Arbeitsaufträge.

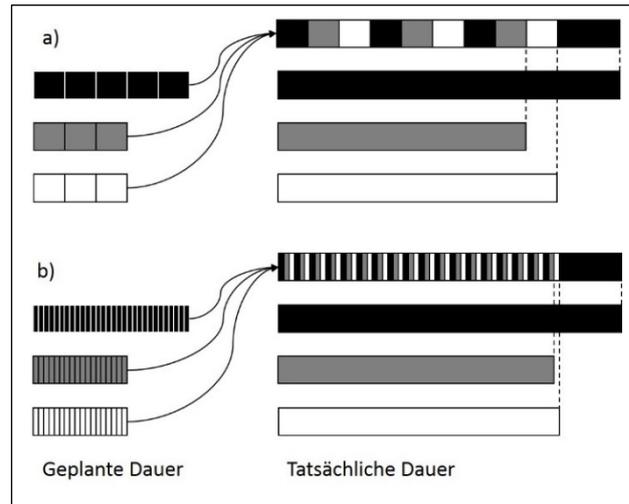


Abbildung 3. Auswirkung von a) langen und b) kurzen Dauern der Arbeitsaufträge

## 5.2 ERGEBNISSE

Die wichtigste Information aus den Versuchen ist der Einfluss des neuen Ressourcentyps auf die Projektlänge. In Abbildung 4 ist die Veränderung der Projektdauer im Vergleich zur Durchführung ohne geteilten Ressourcenagenten für einen repräsentativen Projektplan dargestellt.

Wie zu erwarten war, steigt die zusätzlich benötigte Zeit für die Projektbearbeitung mit zunehmender Gesamtdauer der Arbeitsaufträge stark an. Werden die kompletten Prozesszeiten in Arbeitsaufträge umgewandelt, beträgt der Zeitaufschlag im Vergleich zum Ausgangsplan zwischen 150 und 300%. Erste Beeinflussungen lassen sich ab einem Anteil von 30% in Arbeitsaufträge umgewandelter Prozesszeit feststellen. Ab diesem Punkt steigt die Veränderung linear an.

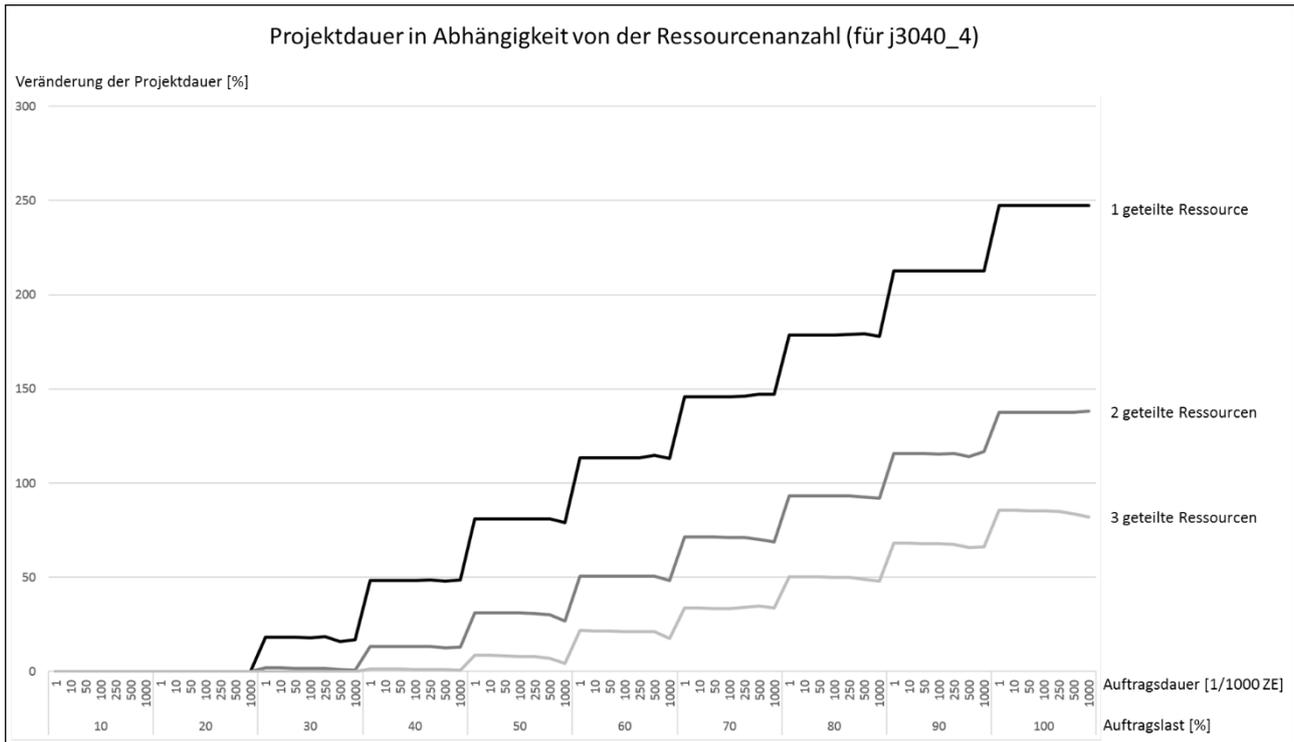


Abbildung 4. Veränderung der Gesamtdauer in Abhängigkeit von der Anzahl der geteilten Ressourcen

Werden 2 respektive 3 geteilte Ressourcenagenten eingesetzt, zeigt sich qualitativ ein sehr ähnliches Bild. Lediglich der Zuschlag auf die gesamte Projektdauer nimmt deutlich ab. Dieses Verhalten war auch zu erwarten, da die Bearbeitungszeit auf mehrere Ressourcen verteilt wurde. Die Ergebnisse der weiteren untersuchten Projektpläne zeigen ein identisches Verhalten mit den in Tabelle 2 angegebenen Werten bei einer gesamten Auftragsdauer, die der Summe aller Prozesszeiten entspricht.

Tabelle 2. Ergebnisbereich für die zusätzliche Projektdauer bei den untersuchten Plänen

	Minimaler Zuschlag	Maximaler Zuschlag
eine geteilte Ressource	150%	300%
zwei geteilte Ressourcen	80%	150%
drei geteilte Ressourcen	50%	110%

Wichtige Erkenntnis aus diesen Versuchen ist zudem der geringe Einfluss der Dauer der einzelnen Arbeitsauf-

träge. Nur in Einzelfällen kommt es vor allem bei langen Auftragsdauern zu Abweichungen vom Durchschnitt. Wird ein Prozess aufgrund der geteilten Ressource verlängert, geschieht dies um relativ große Werte. Dadurch finden die Bietvorgänge an der Börse mit anderen teilnehmenden Prozessen statt. Das Ergebnis des Bietvorgangs ist dann möglicherweise ein alternativer Modus für einen Prozess als im ursprünglichen Plan, der dann auch Auswirkungen auf die Gesamtdauer hat. Erkennbar wird dies in Abbildung 4 an den kleinen Spitzen am Ende der Stufen.

Ebenso interessant ist die Auslastung der geteilten Ressourcen. Das Ergebnis für einen repräsentativen Plan ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Schwankungen aufgrund der Dauer der Einzelaufträge ist hier geringer als bei der Gesamtdauer. Begründet ist dies dadurch, dass in allen Fällen die gleiche Zeit gearbeitet werden muss, lediglich die Unterteilung ist verschieden. Einzelne Ausschläge sind darauf zurückzuführen, dass einzelne Prozesse in einem anderen Modus ausgeführt wurden und sich somit die Prozesszeit verändert hat.

Die Auslastung der Ressourcen steigt mit zunehmendem Zeitanteil zu Beginn stark an und nähert sich anschließend einem Grenzwert. Bei einer geteilten Ressource liegt dieser noch bei 100% und sinkt mit steigender Anzahl teilweise sehr deutlich.

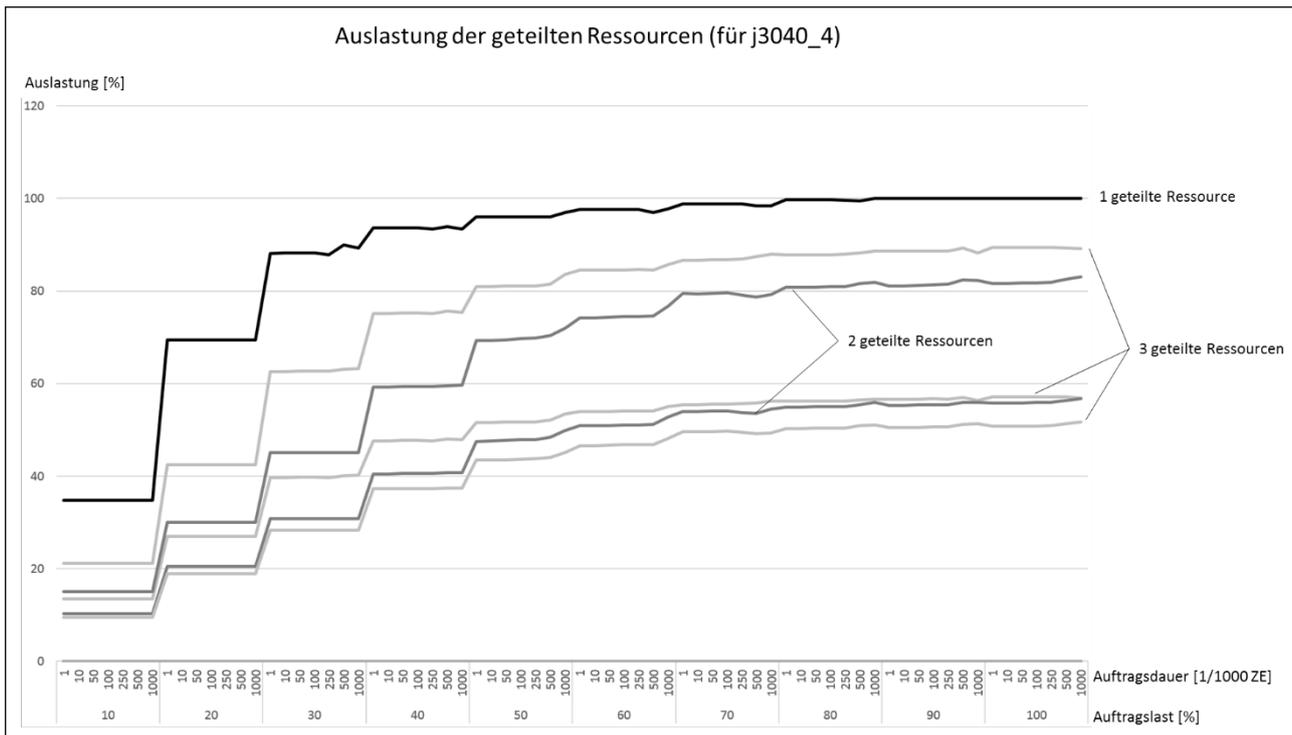


Abbildung 5. Auslastung der geteilten Ressourcenagenten

Jedoch kann dieser je nach Plan und Ressource stark variieren, da die Zuweisung der Ressourcen zu den Prozessen zufällig erfolgt und dabei nur die Anzahl der Prozesse gleichmäßig auf die Ressourcen verteilt wird. Die Dauern der einzelnen Prozesse bleiben dabei unberücksichtigt.

Aus einem Vergleich von Abbildung 4 und Abbildung 5 lässt sich ermitteln, dass eine Auslastung von ca. 70% des (einzigen) geteilten Ressourcenagenten noch keine Auswirkung auf die Gesamtprojektdauer hat. Erst bei höheren Werten führen zwischenzeitliche Engpässe zu Verzögerungen im Projektplan. Ab einer übergebenen Prozesszeit von 50% der Gesamtdauer ist der Ressourcenagent nahezu komplett ausgelastet, was dementsprechend auch zu einer Verlängerung der Projektdauer von 100% und mehr führt.

Die Kurven der restlichen untersuchten Pläne sind bei einer geteilten nahezu identisch mit der gezeigten. Bei zusätzlichen eingesetzten geteilten Ressourcenagenten variiert der Grenzwert der Auslastung deutlich stärker (vgl. Tabelle 3), wobei er tendenziell mit zunehmender Ressourcenanzahl sinkt.

Tabelle 3. Auslastung der geteilten Ressourcenagenten

	Minimale Auslastung	Maximale Auslastung
eine geteilte Ressource	100%	100%
zwei geteilte Ressourcen	55%	90%
drei geteilte Ressourcen	40%	85%

### 5.3 EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PARAMETRISIERUNG

Sind die erforderlichen Eingangsdaten für die geteilten Ressourcen vorhanden, also wie viele Aufträge für jeden Prozess ausgeführt werden müssen und wie lange diese dauern, kann dies direkt in den Prozessagenten hinterlegt werden, was den Idealfall darstellt.

Als Alternative dazu sollten diese Simulationsexperimente Aufschluss darüber geben, welche Parameterkonfigurationen sinnvoll sind. Die Dauer der einzelnen Arbeitsaufträge kann nahezu frei gewählt werden, ohne dass dies einen großen Einfluss auf das Endergebnis hat. Lediglich auf sinnvolle Werte ist hier zu achten. So sind die Extremwerte der Eingangsparameter aus den Simulationsexperimenten unrealistisch.

Entscheidend ist die Gesamtdauer der Aufträge, die die geteilten Ressourcenagenten abarbeiten müssen. Befindet sich diese in der Größenordnung von 50% der Prozessdauern, kann eine leichte Zunahme der Projektdauer festgestellt werden, die auf einzelne Engpässe zurückzuführen ist. Dies gilt auch für den Einsatz von mehreren geteilten Ressourcen.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

### 6.1 ZUSAMMENFASSUNG

In dem vorliegenden Beitrag wurde ein Multi-Agenten-System vorgestellt, das für die Lösung des MRCPSP verwendet werden kann. Darin sind sowohl die einzelnen Prozesse als auch jede Ressource als eigenständiger Agent modelliert. Die Zuweisung der Ressourcenagenten zu den Prozessen erfolgt über Verhandlungen an einer zentralen Börse. Die Priorität der einzelnen Prozesse kann über diverse Regeln gesteuert werden.

Zusätzlich wurde ein weiterer Ressourcenagent vorgestellt, der es ermöglicht, dass mehrere Prozesse gleichzeitig eine Ressource verwenden können. Dadurch sind weitere Beeinflussungen der Ressourcen auf die Projektdauer berücksichtigt, die in bisherigen Untersuchungen vernachlässigt wurden. In Abhängigkeit von der Konfiguration und Auslastung dieser Ressourcen ist ein signifikanter Einfluss auf die Prozessdauern und damit auf die Projektdauer feststellbar.

### 6.2 AUSBLICK UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

Nachdem die Funktionsfähigkeit an einer Vielzahl theoretischer Pläne nachgewiesen wurde, soll dieses System an Daten aus realen Bauvorhaben getestet werden. Vorhandene Projektpläne von Infrastrukturprojekten besitzen eine deutlich größere Anzahl an Prozessen und damit lassen sich dementsprechend Aussagen über die Skalierbarkeit treffen. Zudem können darin noch weitere Restriktionen berücksichtigt werden, die in den Standardbibliotheken nicht hinterlegt sind, wie etwa Flächen.

In vorherigen Arbeiten wurde die Grundstruktur für einen Lernagenten geschaffen. Dieser erlaubt nach im Anschluss an die Erstellung eines Projektplans, diesen gezielt zu manipulieren und somit zu verbessern. Dafür wird derzeit der Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen untersucht, um einen wirklichen Lerneffekt aus zuvor erstellten Plänen zu erhalten.

Die Arbeitsaufträge werden aktuell immer zum erstmöglichen Zeitpunkt erzeugt. In möglichen Untersuchungen wäre zu zeigen, ob auf diesem Detaillierungsgrad eine Vergabe der Arbeitsaufträge zu beliebigen Zeitpunkten möglich und sinnvoll ist. Bei der Abarbeitung der Aufträge ist derzeit die einfache FIFO-Strategie implementiert. An dieser Stelle könnten weitere Untersuchungen stattfinden,

bei denen die Wichtigkeit der Prozesse an diesem Punkt ebenfalls eine Rolle spielt und so einzelne Arbeitsaufträge priorisiert werden.

## 7 FÖRDERHINWEIS

Diese Arbeit ist Teil des Forschungsprojekts „Entwicklung einer agentenbasierten Methodik zur Terminplanoptimierung im Bauwesen unter Berücksichtigung ressourcenabhängiger Prozesslängen“ (GU 427/22-1), das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

### LITERATUR

- [Bla-1983] Blazewicz, J.; Lenstra, J.; Rinnooy Kann, A. H. G.: Scheduling subject to resource constraints: Classification and complexity. In: *Discrete Applied Mathematics* 5 (1983) 1, S. 11-24.
- [Dav-1994] Davidsson, P.; Astor, E.; Ekdahl, B.: A framework for autonomous agents based on the concept of anticipatory systems. In: *Proceedings of Cybernetics and Systems '94*. World Scientific, Singapore, 1994, S. 1427-1434.
- [Hei-1997] Heilmann, R.; Schwindt, C.: Lower Bounds for RCPSP/max. In: *Report WIOR-511*. Universität Karlsruhe, 1997.
- [Jar-2008] Jarboui, B.; Damak, N.; Siarry, P.; Rebai, A.: A combinatorial particle swarm optimization for solving multi-mode resource-constrained project scheduling problems. In: *Applied Mathematics and Computation* 195 (2008) 1, S. 299-308.
- [Joh-1967] Johnson, T. J. R.: An algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. Dissertation; MIT. Cambridge, MA, 1967.
- [Kol-1996] Kolisch, R.; Sprecher, A.: PSPLIB – a project scheduling problem library. In: *European Journal of Operational Research* 96 (1996) 1, S. 205-216.
- [Kön-2009] König M.; Beißert, U.: Construction Scheduling Optimization by Simulated Annealing. In: *Proceedings of the 26<sup>th</sup> Annual International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. International Association for Automation and Robotics in Construction, 2009, S. 183-190.

- [Li-2013] Li H.; Zhang, H.: Ant colony optimization-based multi-mode scheduling under renewable and nonrenewable resource constraints. In: Automation in Construction 35 (2013) , S. 431-438.
- [Mar-1994] Maroto, C.; Tormos, P.: Project Management: An Evaluation of Software Quality. In: International Transactions in Operational Research 1 (1994) 2, S. 209-221.
- [Van-2010] Van Peteghem, V.; Vanhoucke, M.: A genetic algorithm for the preemptive and non-preemptive multi-mode resource-constrained project scheduling problem. In: European Journal of Operational Research 201 (2010) 2, S. 409-418.
- [Wen-2015] Wenzler, F.; Günthner, W. A.: Ressourcenbeschränkte Terminplanung mit einem System kollaborativer Agenten. In: Rabe, M.; Clausen U. (Hrsg.): Simulation in Production and Logistics 2015. Fraunhofer, Stuttgart, 2015, S. 721-730.
- [Wen-2016] Wenzler, F.; Günthner, W. A.: A Learning Agent For A Multi-Agent System For Project Scheduling In Construction. In: Claus, T.; Herrmann, F.; Manitz, M.; Rose, O. (Hrsg.): Proceedings of the 30<sup>th</sup> European Conference on Modelling and Simulation , ECMS 2016. ECMS, Sbr-Dudweiler, 2016, S. 11-17.

---

**Dipl.-Ing. Florian Wenzler**, Research Assistant at the Institute for Materials Handling, Material Flow, Logistics at the Technical University Munich (TUM).

**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner**, Head of the Institute for Materials Handling, Material Flow, Logistics at the Technical University Munich (TUM).

Address:

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik,  
Technische Universität München, Boltzmannstraße 15,  
85748 Garching, Germany,  
Phone: +49 89 289-15975, Fax: +49 89 289-15922,  
E-Mail: wenzler@fml.mw.tum.de