Zeitschrift: IABSE journal = Journal AIPC = IVBH Journal
Band: 13 (1989)
Heft: J-39: Application of the Games Theory to construction technology

Artikel: Die Anwendung der Spieltheorie für die Technologie der Bauprozesse
Autor: Fiedler, Kurtz / Peldschus, Friedel
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-30919

Die Anwendung der Spieltheorie für die Technologie der Bauprozesse

Application of the Games Theory to Construction Technology

Utilisation de la théorie des jeux dans le processus de la construction

Kurt FIEDLER
Professor
Technische Hochschule
Leipzig, DDR

Kurt Fiedler, geboren 1933, diplomierte als Bauingenieur an der TH Dresden und erwarb den Dr.-Ing. und Dr. sc. techn. an der Hochschule für Bauwesen Leipzig. In der Bauindustrie arbeitete er auf dem Gebiet industrieller Montagebauweisen. Seit 1969 ist er Professor für Grundlagen der Bautechnologie an der TH Leipzig.

Friedel PELDSCHUS
Oberassistent
Technische Hochschule
Leipzig, DDR

Friedel Peldschus, geboren 1940, studierte an der Hochschule für Bauwesen in Leipzig, ist Bauingenieur, Schweissing. und Faching. für Informationsverarbeitung. Er arbeitete im Stahlbau als Konstrukteur, Statiker und Programmierer. Seit 1968 ist er wiss. Oberassistent an der TH Leipzig. Hier promovierte er zum Dr.-Ing. und Dr. sc. techn.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Theorie der Spiele dient der Abbildung von Konflikt- und Entscheidungssituationen. Sie ermöglicht, aus der Menge der Verhaltensweisen die günstigste auszuwählen. Bei Untersuchungen im Rahmen der Bautechnologie wurde die Theorie der Matrixspiele angewendet für: die Dimensionierung bautechnologischer Prozesse, wenn dabei mehrere Forderungen berücksichtigt werden müssen, die Ermittlung von Korrekturwerten für Planungs- und Dimensionierungsaufgaben und die komplexe Bewertung von Prozessen, wenn Einzelbewertungen bezüglich bestimmter Kriterien bekannt sind.

SUMMARY

The Games Theory serves for the modelling of conflict and decision situations. It enables to select the best out of possible behaviours. This paper presents some studies on the application of the Matrix Games Theory to the following problems of construction management: design of technological processes under the influence of several requirements; determining of correction figures for planning and design tasks respectively; and complex evaluation of production processes, if detailed evaluations concerning special criteria are given.

RÉSUMÉ

La théorie des jeux peut être appliquée pour résoudre des situations de conflit et de prise de décision. Elle permet de sélectionner le meilleur des comportements possibles. Lors d'études des processus de la construction, la théorie des jeux a été appliquée dans les cas suivants: dimensionnement de procédés technologiques de la construction – lorsque plusieurs exigences doivent être prises en compte – détermination de valeurs correctives dans des activités de planification et de dimensionnement, et évaluation complexe de procédés lorsque les résultats sont connus, individuellement, pour certains critères.

EINFÜHRUNG

In der Deutschen Demokratischen Republik hat sich mit der Entwicklung der Industrialisierung des Bauwesens das Wissenschaftsgebiet Technologie der Bauprozesse (auch "Bautechnologie") herausgebildet. Es umfaßt sowohl die Produktionstechnik der Baustellen- und Vorfertigungsprozesse als auch deren unmittelbare Produktionsorganisation. Sie vereinigt damit die in mehreren anderen Ländern getrennte Technik und Organisation der Bauprozesse wie z.B. "Bauverfahrenstechnik", "Baubetriebswesen", "Construction Management" u.ä..

Neben der Entwicklung und dem Einsatz von Verfahrenslösungen und Arbeitsmitteln und der technologischen Produktionsvorbereitung und Prozeßsteuerung (Ablaufplanung, Ressourceneinsatz u.s.w.) entwickelt die Bautechnologie zunehmend ein theoretisches Instrumentarium, die "Theorie der Bauprozesse", in der die Gesetzmäßigkeiten, Modelle und Algorithmen der Technik und Organisation der Bauprozesse ihren Platz finden.

Als einen Beitrag zu dieser Entwicklung stellen die Autoren eine neue Möglichkeit für entscheidungsunterstützende Systeme der Bautechnologie vor, in der die Theorie der Spiele als Modell genutzt wird.

Die Bautechnologie erfordert eine Reihe von Entscheidungen, die kompliziert sind, weil sie bei unvollständigen Informationen über Einflußgrößen, Zusammenhänge oder mögliche Ergebnisse zu fällen sind. Von diesen Entscheidungen wird erwartet, daß sie im Sinne der betriebswirtschaftlichen bzw. volkswirtschaftlichen Zielstellung optimal sind.

Betrachtet man die typischen Entscheidungen in der Bautechnologie genauer, dann läßt sich feststellen, daß diese Unvollständigkeit der Informationen oft übergangen wird. Die Lösung erfolgt mit einfachen deterministischen Modellen, die gegebenenfalls durch Erfahrungen korrigiert werden. Dieses Verhalten führt im allgemeinen zu einer zulässigen Lösung, die jedoch nur in wenigen Fällen optimal sein wird.

Mathematische Ansätze zur Lösung solcher Probleme führen zu Aufgaben der mehrkriteriellen Optimierung. Für Entscheidungsprobleme mit mehrfacher Zielsetzung wurden Ersatzziele formuliert, die auf Abstands- bzw. Abweichungsfunktionen basieren. Fandel /9/ kritisiert als Nachteil dieser Verfahren, daß sie oft implizit eine Zielgewichtung enthalten, die allen Zielkomponenten dasselbe Gewicht zuordnet. Modellansätze, die zur Lösung Nutzensfunktionen benutzen, bei denen die Zielgewichte und damit die Präferenzfunktion von vornherein vorgegeben werden, z.B. Zangemeister /12/ und Seelig /10/, bedürfen einer Rechtfertigung für die angesetzten Zielgewichte. Unter Ausnutzung der Äquivalenz von Vektormaximumproblemen und k-parametrischer Optimierung hat /9/ ein Konvergenz-

modell angegeben. Für praktische Anwendungen muß jedoch bemerkt werden, daß bereits für $k > 2$ die Menge der effizienten Lösungen so ansteigt, daß eine Auswahl ohne zusätzliche Regeln nicht mehr möglich ist.
Eine bisher wenig verbreitete Lösungsmöglichkeit bietet die Spieltheorie. Der wesentliche Unterschied zu den o.g. Lösungsansätzen besteht darin, daß hier eine zweiseitige Betrachtungsweise des Problems erfolgt. An der Lösung des Problems sind mindestens zwei Interessengruppen mit unterschiedlichen Zielvorstellungen beteiligt, wobei jede Interessengruppe bestrebt ist, die Lösung des Problems in ihrem Sinne positiv zu beeinflussen. Eine solche Erscheinung wird als Konflikt bezeichnet. Die Analyse solcher Konfliktsituationen, führte zur Entwicklung einer speziellen mathematischen Theorie, der Spieltheorie. Als Ergebnis der Analyse wurden Normen entwickelt, wie sich die am Konflikt Beteiligten zu verhalten haben und welcher Ausgang des Konfliktes erreicht werden kann. Bei der Analyse von Problemen der Technologie der Bauprozesse werden von den Autoren im Anfangsstadium Zweipersonen-Nullsummenspiele, d.h. Matrixspiele, untersucht. Damit wird eine im Bauingenieurwesen bisher nicht angewandte neue Denkweise vorgeschlagen und an einigen Beispielen aus der Baupraxis erprobt.

MATRIXSPIELE

Matrixspiele sind endliche Zweipersonen-Nullsummenspiele (ZNS). Ein ZNS in seiner Normalform ist durch zwei nichtleere Mengen S_1 und S_2, die Strategiemengen der Spieler I und II und eine auf das karthesische Produkt $S_1 \times S_2$ definierte Auszahlungsfunktion $a(s_1, s_2)$ gekennzeichnet. Man benutzt für das Spiel Γ i.a. die symbolische Schreibweise

$$\Gamma = (S_1, S_2. a) \qquad (1)$$

Da die Strategien endlich bzw. abzählbar vorausgesetzt wurden, d.h. $S_1 = \{s_{11}, s_{12}, \ldots, s_{1m}\}$ und $S_2 = \{s_{21}, s_{22}, \ldots, s_{2n}\}$ gilt, wird das gegebene ZNS bereits vollständig durch die Matrix

$$A = (a_{ij}) \qquad (2)$$

beschrieben. Für die Lösung orientieren sich die beiden Spieler an den Gewinnschranken:

$$\underline{a}(s_1) = \inf_{s_2 \in S_2} a(s_1, s_2) \quad \text{Garantieschranke für } s_1 \in S_1$$

$$\bar{a}(s_2) = \sup_{s_1 \in S_1} a(s_1, s_2) \quad \text{Garantieschranke für } s_2 \in S_2$$

Wählt man die besten Garantieschranken aus, dann gelangt man zum Begriff der Minimaxstrategie:

$$a_*(S_1, S_2) = \sup_{s_1 \in S_1} \inf_{s_2 \in S_2} a(s_1, s_2)$$
$$a^*(S_1\ S_2) = \inf_{s_2 \in S_2} \sup_{s_1 \in S_1} a(s_1, s_2) \qquad (3)$$

Dabei gilt

$$a_*(S_1, S_2) \leq a(s_1^*\ s_2^*) \leq a^*(S_1, S_2) \qquad (4)$$

für jedes Paar (s_1^*, s_2^*) von Minimaxstrategien. Im Fall der Gleichheit der beiden Spielwerte nennt man das Spiel definit und die Strategien sind optimal. Im trivialen Fall (einfaches Minimaxprinzip)werden als Lösung reine Strategie angegeben. Beim erweiterten Minimaxprinzip wird zur Berechnung der gemischten Strategie ein lineares Gleichungssystem gelöst. Auf die Darstellung der Überführung des Matrixspieles in eine lineare Optimierungsaufgabe und deren Lösung mit dem Simplex-Algorithmus kann hier verzichtet werden; Owen /1/ hat darüber ausführlich berichtet.

Ist diese Lösung nicht eindeutig, wird eine zusätzliche Untersuchung geführt. Lasen sich die Wahrscheinlichkeiten q_i für die Strategie des Gegenspielers angeben, dann wird als Kriterium der Optimalität /2/ der mathematische Erwartungswert benutzt.

$$S_1 = \left\{ S_{1i} / S_{1i} \in S_1 \cap \max \sum_{j=1}^{n} q_i \cdot a_{ij}) \cap \sum_{j=1}^{n} q_i = 1) \right\} \qquad (5)$$

ANWENDUNGEN

Die Anwendung dieser Theorie wurde an verschiedenen Beispielen untersucht. Es hat sich gezeigt, daß jede Konfliktsituation aus der Praxis durch das Vorhandensein von vielen Nebenbedingungen nur schwer analysierbar ist. Jede formale Beschreibung eines Matrixspieles weist Besonderheiten auf, die sowohl bei der Formulierung der Auszahlungsmatrix als auch bei der Lösung berücksichtigt werden müssen. Entscheidend ist der Verwendungszweck der Ergebnisse. Hier ist eine eindeutige und unmißverständliche Haltung des Technologen erforderlich. Diese Frage wird mit zunehmender Komplexität der bautechnologischen Vorbereitung immer wichtiger und die Notwendigkeit der Objektivierung der technologischen Entscheidung ererreicht neue Dimensionen. Zur zielgerichteten Anwendung wurde eine Klassifizierung der Probleme vorgeschlagen /3/.

Danach wird unterschieden in:

- die Dimensionierung bautechnologischer Prozesse
- die Berechnung von Korrekturwerten für Planungs- und Dimensionierungsaufgaben
- die komplexe Bewertung von Prozessen

Für die genannten Klassen soll die Anwendung an einigen praktischen Beispielen, die Ergebnisse von Forschungsarbeiten sind, diskutiert werden.

Die Dimensionierung bautechnologischer Prozesse

Die Dimensionierung bautechnologischer Prozesse erfolgt im Sinne der Auswahl der günstigsten Variante. Sie ist eine wichtige Aufgabe der bautechnologischen Vorbereitung und dient der Auswahl von Bauweisen, der Bewertung von Fertigungsverfahren, der rationellen Gestaltung der Baustelleneinrichtung, der Auswahl von Mechanisierungslösungen und der Standortauswahl.

Gesucht wird die günstigste Variante bezüglich eines Globalzieles. Dabei sollen einige Attribute möglichst große Werte und andere möglichst kleine Werte annehmen. Je nach Optimierungsziel hat der utopische Punkt als Koordinaten die eigennützigen Extrema $A_{i\ max}$ bzw. $A_{j\ min}$. Vorgeschlagen wird eine komponentenweise Nutzensfunktion /3/.

$$a_{ij} = \begin{cases} \left(\operatorname*{Min}_{i} \chi_{ij} / \chi_{ij}\right)^{3}, & \text{falls } \operatorname*{Min}_{i} \chi_{ij} \text{ günstig ist und} \\ \left(\chi_{ij} / \operatorname*{Max}_{i} \chi_{ij}\right)^{2}, & \text{falls } \operatorname*{Max}_{i} \chi_{ij} \text{ günstig ist} \end{cases} \qquad (6)$$

Diese Funktion bildet die Werte χ_{ij} monoton auf das Intervall $[0,1]$ ab. Damit wird auch für das Problem der Skalierung eine vertretbare Lösung gefunden, wobei die Probleme bei der gemeinsamen Berücksichtigung von Maximierung und Minimiemierung auftreten. Bei der Maximierung kann immer auf einen abgeschlossenen Bereich zurückgegriffen werden. Bei der Minimierung ist der Bereich scheinbar nach oben unbegrenzt. Diese Tatsache ist jedoch nur von theoretischer Bedeutung. In praktischen Fällen wird immer ein Größtwert vorhanden sein, der den Bereich abschließt. Leider ist dieser Größtwert nicht immer bekannt und kann deshalb nicht benutzt werden. Mit der vorgeschlagenen Funktion (6) wird auf einen solchen Größtwert verzichtet. Die Berechnung der Funktionswerte kann erfolgen, ohne daß dieser bekannt ist. Die Berücksichtigung des mehrfachen Minimalwertes, wie er bei der Forderung nach Minimierung auftritt, paßt sich den Werten des gesamten Intervalls an. Für eine symmetrische Matrix wird auch eine annähernd symmetrische Lösung berechnet.

Benutzt man die Ergebnisse nach (6) als Auszahlungsfunktion für ein ZNS, dann ist eine spieltheoretische Lösung möglich. Dabei können m-Varianten und n-Kriterien berücksichtigt werden. Für die praktische Anwendung wird zwischen der

Variantenbildung mit einer oder mehreren Veränderlichen unterschieden.

Variantenbildung mit einer Veränderlichen

Bezeichnet man die Variablen mit X, dann ergeben sich die Varianten VAR. 1 = VAR (X_1), VAR. 2 = VAR (X_2), ..., VAR. M = VAR (X_m).
Allgemein läßt sich schreiben VAR.i = VAR (X_i). Für diese Varianten werden die Ergebnisse $a_{ij} = a_j$ (X_i) bezüglich der Kriterien $Kj \in \{K_1, \ldots, K_n\}$ berechnet und in die Entscheidungsmatrix eingetragen.

	K_1	K_2	...	K_n
VAR. 1 = VAR (X_1)	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
VAR. 2 = VAR (X_2)	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
.	.	.		.
.	.	.		.
.	.	.		.
VAR.M = VAR (X_m)	a_{m1}	a_{m2}		$a_{m\,n}$

Diese Entscheidungsmatrix wird in ein Zweipersonennull-Summenspiel überführt. Die Varianten VAR.i = VAR (X_i) werden als Strategien des Spielers I und die Kriterien $K_j \in \{K_1, \ldots, K_n\}$ als Strategien des Spielers II aufgefaßt. Die Werte für die Auszahlungsfunktion erhält man durch Transformation in dimensionslose Werte (Formel 6). Mit diesem Konzept lassen sich Aufgaben lösen wie /4,5/:

- Berechnung von Parametern für die Fließfertigung
  . die Anzahl der Teiltaktstraßen für festgelegte Abschnittsgröße und Taktzeiten
  . die Abschnittsgröße für festgelegte Taktzeiten und Anzahl der Teiltaktstraßen
- Dimensionierung von Baustellenfertigteillagern unter der Bedingung der maximalen Auslastung
- Auswahl von Bauweisen bei Berücksichtigung mehrerer Kriterien

Beispiel: Die optimale Anzahl der Teiltaktstraßen für das Stabnetzfaltwerk Typ Berlin

Das Stabnetzfaltwerk Typ Berlin wurde für die Überdachung großflächiger Hallen entwickelt. Die Einzelteile werden in Kollis verpackt auf die Baustelle transportiert und dort zusammengebaut. Der Zusammenbau (die Vormontage) wird in rhythmischer Fließfertigung organisiert. Die Abschnittsgröße ist ein Segment. Für die Anzahl der Teiltaktstraßen (TTS) sind mehrere Varianten möglich. Als Kriterien werden die Taktdauer, die Kosten und die Arbeitsproduktivität (AP) berücksichtigt. Für ein Segment ergeben sich folgende Werte:

	Taktdauer [h]	Kosten [M]	AP [m^2/AK. h]
3 TTS	14	4000	0,77
4 TTS	12	4200	0,72
5 TTS	10	4400	0,86
6 TTS	9	4600	0,75
7 TTS	7	4800	0,73

AP : Arbeitsproduktivität

AK : Arbeitskraft

Diese Matrix wird mit der Formel (6) transformiert und als Zweipersonen-Nullsummenspiel geschrieben.

	S_{21}	S_{22}	S_{23}
S_{11}	0,125	1,000	0,802
S_{12}	0,198	0,864	0,701
S_{13}	0,342	0,751	1,000
S_{14}	0,471	0,658	0,761
S_{15}	1,000	0,578	0,721

Aus der Lösung mit einem linearen Gleichungssystem erhält man als Lösungsvektor für den Spieler I

(0,326; 0; 0; 0; 0;674)

Damit ergibt sich ein Verhältnis für die Variante mit 7 TTS zur Variante mit 3 TTS von 1 : 0,484.

Unter der Bedingung, daß die Wahrscheinlichkeiten für die Strategien des Gegenspielers gleich sind, erhält man nach Formel (5) für die Zeilensumme:

(1,937; 1,763; 2,093; 1,890; 2,299)

Damit wird die Variante mit 7 TTS als günstigste Lösung bestätigt.

Variantenbildung mit mehreren Veränderlichen

Läßt sich die Aufgabe durch Variantenbildung mit einer Veränderlichen nicht formulieren, dann besteht die Möglichkeit, mehrere Veränderliche in die Variantenbildung einzubeziehen. Es können ebenfalls m-Varianten und n-Kriterien berücksichtigt werden. Die Variantenbildung erfolgt für alle Kombinationen der betrachteten Veränderlichen.

Bezeichnet man die Variablen mit $X^1, \ldots, X^k$ und die möglichen Werte von X^1 durch $v_1 \in \{1, \ldots, Z_1\}$, dann erhält man folgende Varianten: VAR. 1 = VAR$\left(x^1_1, x^2_1, \ldots x^k_1\right)$, VAR.2 = VAR$\left(x^1_2, x^2_1, \ldots, x^k_1\right), \ldots,$ VAR. M = VAR$\left(x^1_{Z1}, x^2_{Z2}, \ldots, x^k_{Zk}\right)$.

Die Variante i ergibt sich aus

$$i = (\ldots ((v_k - 1)\, Z_{k-1} + v_{k-1} - 1)\, Z_{k-2} + \ldots + v_2 - 1)\, Z_1 + v_1$$

Insgesamt erhält man

$$M = \prod_{i=1}^{k} Z_i$$

Varianten. Für diese Varianten werden die Ergebnisse a_{ij} bezüglich der Kriterien $K_j \in \{K_1, \ldots, K_n\}$ berechnet und in die Entscheidungsmatrix eingetragen.

	K_1	K_2	. . .	K_n
VAR.1 = VAR $(X_1^1, X_1^2, \ldots, X_1^k)$	a_{11}	a_{12}	. . .	a_{1n}
VAR.2 = VAR $(X_2^1, X_1^2, \ldots, X_1^k)$	a_{21}	a_{22}	. . .	a_{2n}
.	.	.		.
.	.	.		.
.	.	.		.
VAR.M = VAR $(X_{Z1}^1, X_{Z2}^2, \ldots, X_{Zk}^k)$	a_{m1}	a_{m2}		a_{mn}

Diese Entscheidungsmatrix wird genauso wie bei der Variantenbildung mit einer Veränderlichen in ein Zweipersonen-Nullsummenspiel überführt.

Mit diesem Konzept lassen sich Aufgaben lösen wie

- die Ermittlung der günstigsten Variante für die Fließfertigung bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Abschnittsgröße und der Anzahl der Teiltaktstraßen
- die Dimensionierung von technologischen Linien der Betonelementefertigung

Beispiel: Die Dimensionierung für eine technologische Linie AC Außenwandfertigung der Wohnungsbauserie WBS 70

Bei der Dimensionierung von technologischen Linien in den Betonwerken der DDR wurde speziell für den Wohnungsbau von der Herstellung einer maximalen Anzahl möglichst gleichartiger Bauelemente ausgegangen. Für die Außenwandplatten, die als Dreischichtplatten produziert werden, ergeben sich folgende Variable:

$X^1 \in \{X_1^1, \ldots, X_4^1\}$ Schichtregime

X_1^1 -einschichtig, X_2^1 -zweischichtig

X_3^1 -dreischichtig, X_4^1 -vierschichtig

$X^2 \in \{X_1^2, X_2^2, X_3^2\}$ Taktdauer

X_1^2 - 11 Minuten, X_2^2 - 16,5 Minuten

X_3^2 - 22 Minuten

$X^3 \in \{X_1^3, \ldots, X_4^3$ Erhärtungsdauer

X_1^3 - 24 h Normalerhärtung X_2^3 - 6 h Schnellerhärtung

X_3^3 - 9 h Schnellerhärtung X_4^3 - 12 h Schnellerhärtung

Da die Schnellerhärtung an die Taktdauer gebunden ist, ergeben sich insgesamt nur

$$M = 4 \cdot 3 \cdot 4 - 16 = 32$$

Varianten. Für diese Varianten werden als Kriterien berücksichtigt:

K_1- Kosten $[M/m^3$ Fertigteil$]$

K_2- Arbeitsproduktivität $[m^3/AK \cdot a]$

K_3- Energieaufwand $[kWh/m^3$ Fertigteil$]$

Die Ergebnisse der einzelnen Varianten bezüglich der Kriterien $K_j \in \{K_1, K_2, K_3\}$, werden in die Ergebnismatrix eingetragen. (Tabelle 1)

Die Werte der Tabelle 1 werden mit der Formel (6) transformiert und als Zweipersonen-Nullsummenspiel geschrieben. (Tabelle 2)

Nach der Überführung in eine lineare Optimierungsaufgabe läßt sich die Minimaxstrategie für den Spieler I berechnen.

$S_{14} = 0{,}855$ und $S_{1\ \ 14} = 0{,}145$

Damit ergibt sich ein Verhältnis für die Variante 4 zur Variante 14 von 1: 0,170. Da die Variante 4 den entscheidenden Anteil an der Lösung bildet und aus technischen Möglichkeiten heraus nur eine Variante realisiert werden kann, wird die Variante 4 für die Ausführung empfohlen.

Soll die Herstellung verschiedener Typen von Bauelementen auf der gleichen technologischen Linie eines Betonfertigteilwerkes erfolgen, dann erhält man für jedes Element die Varianten

VAR. 1 = VAR $(X_1^1, X_1^2, \ldots, X_1^k)$, VAR. 2 = VAR $(X_2^1, X_1^2, \ldots, X_1^k,)$, ...,VAR. M = VAR $(X_{Z1}^1, \ldots, X_{Zk}^k)$. Für diese Varianten werden die Ergebnisse a_{ij} bezüglich der Kriterien $K_j \in \{K_1, \ldots, K_n\}$ berechnet. Mit $t \in \{1, \ldots, e\}$ Elementetypen erhält man A_t Matrizen. Jede Matrix A_t wird mit der Anzahl g_t des Elementetyps t multipliziert.

$$A_t' = g_t \cdot A_t \qquad \text{für } t = 1, \ldots, e$$

Die e Matrizen A_t werden addiert und durch die Summe aller Fertigteile dividiert.

$$A^* = \sum_{t=1}^{e} A_t' \Big/ \sum_{t=1}^{e} g_t$$

Mit A^* hat man eine gewichtete Matrix, die nach Transformation in dimensionslose Werte die Auszahlungsfunktion für ein Zweipersonennull-Summenspiel bildet. Als Ergebnis erhält man eine Variante, die für alle zu fertigenden Elemente unter Berücksichtigung der Stückzahl die günstigste ist.

	K_1	K_2	K_3
VAR. 1	388,-	475	30
VAR. 2	286,-	749	18
VAR. 3	276,-	866	14
VAR. 4	239,-	1237	14
VAR. 5	360,-	403	28
VAR. 6	293,-	639	17
VAR. 7	275,-	729	13
VAR. 8	247,-	1042	14
VAR. 9	390,-	441	26
VAR. 10	293,-	666	17
VAR. 11	277,-	751	13
VAR. 12	248,-	1075	13
VAR. 13	231,-	1023	83
VAR. 14	205,-	1044	82
VAR. 15	232,-	867	83
VAR. 16	216,-	1240	83
VAR. 17	254,-	857	84
VAR. 18	217,-	873	83
VAR. 19	220,-	729	84
VAR. 20	208,-	1046	84
VAR. 21	283,-	645	89
VAR. 22	218,-	879	83
VAR. 23	220,-	762	84
VAR. 24	208,-	1093	84
VAR. 25	311,-	519	94
VAR. 26	220,-	882	83
VAR. 27	230,-	756	84
VAR. 28	215,-	1082	84
VAR. 29	353,-	508	96
VAR. 30	231,-	893	84
VAR. 31	234,-	741	84
VAR. 32	218,-	1062	84

Tabelle 1

	S_{21}	S_{22}	S_{23}
S_{11}	0,147	0,136	0,080
S_{12}	0,368	0,365	0,376
S_{13}	0,453	0,487	0,800
S_{14}	0,631	0,995	0,800
S_{15}	0,185	0,106	0,100
S_{16}	0,342	0,269	0,447
S_{17}	0,414	0,345	1,000
S_{18}	0,571	0,706	0,800
S_{19}	0,145	0,126	0,125
$S_{1\ 10}$	0,342	0,288	0,447
$S_{1\ 11}$	0,405	0,366	1,000
$S_{1\ 12}$	0,565	0,751	1,000
$S_{1\ 13}$	0,698	0,680	0,004
$S_{1\ 14}$	1,000	0,708	0,004
$S_{1\ 15}$	0,689	0,488	0,004
$S_{1\ 16}$	0,854	1,000	0,004
$S_{1\ 17}$	0,525	0,477	0,004
$S_{1\ 18}$	0,843	0,495	0,004
$S_{1\ 19}$	0,809	0,346	0,004
$S_{1\ 20}$	0,957	0,711	0,004
$S_{1\ 21}$	0,380	0,270	0,003
$S_{1\ 22}$	0,831	0,502	0,004
$S_{1\ 23}$	0,809	0,377	0,004
$S_{1\ 24}$	0,957	0,777	0,004
$S_{1\ 25}$	0,286	0,175	0,003
$S_{1\ 26}$	0,809	0,506	0,004
$S_{1\ 27}$	0,708	0,372	0,004
$S_{1\ 28}$	0,866	0,761	0,004
$S_{1\ 29}$	0,195	0,167	0,003
$S_{1\ 30}$	0,698	0,518	0,004
$S_{1\ 31}$	0,672	0,357	0,004
$S_{1\ 32}$	0,831	0,733	0,004

Tabelle 2

Die Stückzahlen für die verschiedenen Elementetypen resultieren aus der Planauflage des Betriebes, d. h. aus dem Verhältnis der Wohngebäude zu den Kaufhallen, Kindereinrichtungen, Schulen, Sporthallen und Ambulatorien. Einflüsse aus den Planauflagen lassen sich beurteilen, wenn dieses spieltheoretische Modell für die Simulation genutzt wird. Die Änderung der Gebäudearten bewirkt eine Veränderung der Stückzahlen für die verschiedenen Elementetypen. Die Lösung des spieltheoretischen Modells mit simulierten Stückzahlen ermöglicht, Wirtschaftlichkeitsbereiche für die dimensionierte Linie anzugeben und somit Schlußfolgerungen für eine langfristige Produktionsplanung abzuleiten.

Die Berechnung von Korrekturwerten

Ein großes Problem in der Bautechnologie ist die Bereitstellung von aussagefähigen Werten für die Planung von Prozessen. Grundlage dafür bilden durchgeführte Analysen. Das Ergebnis dieser Analysen ist in vielen Fällen mit Unsicherheiten behaftet, die die Qualität der Planung beeinflussen und zu Differenzen zwischen geplanten und erforderlichen Aufwand führen. Sie können sich u.a. auf auf die Kapazitätsaufschlüsselung, Materialplanung und Strukturparameter auswirken. Sind durch Abweichungen mehr Leistungen zu erbringen, ist die Leistungsfähigkeit des dimensionierten Systems überfordert und es stehen weder ausreichend Arbeitskräfte noch Material zur Verfügung. Sind weniger Leistungen zu erbringen, kann die geforderte Arbeitsproduktivität nicht gewährleistet werden.

Zum Ausgleich der Differenzen zwischen erfaßten und erbrachten Leistungen werden von den Baubetrieben Reserven vorgesehen. Die Festlegung dieser Reserven erfolgte bisher durch Schätzungen, die jedoch nicht befriedigen können. Deshalb wurde versucht, die Größe der erforderlichen Reserve mathematisch zu bestimmen /6/. Die Reserven sollen möglichst gut die Abweichungen kompensieren. Somit wird die Größe der Reserve als Planungsstrategie aufgefaßt. Diese Festlegung entspricht sowohl den Forderungen, die an die bautechnologische Vorbereitung gestellt werden, als auch den Forderungen bezüglich der Jahresplanung. Demgegenüber stehen die Unsicherheiten z.B. bei Rekonstruktionsprozessen aus der Bauzustandsanalyse. Für beide muß eine Auszahlungsfunktion gefunden werden.

Sind die Planreserve und die Differenz zwischen projektierter und ausgeführter Leistung gleich, liegt der angestrebte Zustand vor. Für diesen Fall wird der Wert der Auszahlungsfunktion gleich 1 gesetzt. In allen anderen Fällen wird die Abminderung durch einen Quotienten, der kleiner als 1 ist ausgedrückt.

$$a_{ij} = \frac{1 + P_i}{1 + Z_j} \quad \text{für } P_i \leq Z_j \quad \text{und } i = 1, \ldots, m \quad j = 1, \ldots, n \qquad (7)$$

$$a_{ij} = \frac{1 + Z_j}{1 + P_i} \quad \text{für } P_i > Z_j$$

P_i - Planreserve gegenüber den projektierten Bauleistungen

Z_j - Differenz zwischen projektierten und ausgeführten Bauleistungen

m - Anzahl der Varianten (Planungsstrategie)

n - Anzahl der Differenzklassen bezüglich der projektierten und ausgeführten Bauleistungen

Man erhält eine Matrix vom Typ m x n. Diese Matrix wird mit der Häufigkeit des Auftretens für die Größen der Differenz Z_j gewichtet.
Die Lösung für das so definierte Matrixspiel erfolgt mit der Formel (5). Nach dieser Methode wurden Korrekturwerte für die Erzeugnislinie Dach bei der serienmäßigen Rekonstruktion von Wohngebäuden berechnet.

Beispiel: Korrekturwert für Dachklempnerarbeiten
Auf Grund der statistischen Auswertung wurde die Strategiemenge von einer Unterschreitung um 20 % bis zur Überschreitung um 50 % in Sprüngen von 10 % festgelegt. Damit ergibt sich nach Formel (7) folgende Matrix:

P_i \ Z_j	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0	-0,1	- 0,2
- o,2	0,53	0,57	0,62	0,67	0,73	0,80	0,89	1,00
- 0,1	0,60	0,64	0,69	0,75	0,82	0,90	1,00	0,89
0	0,67	0,71	0,77	0,83	0,91	1,00	0,90	0,80
0,1	0,73	0,79	0,85	0,92	1,00	0,91	0,82	0,73
0,2	0,80	0,86	0,92	1,00	0,92	0,83	0,75	0,67
0,3	0,87	0,93	1,00	0,92	0,85	0,77	0,69	0,62
0,4	0,93	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71	0,64	0,57
0,5	1,00	0,93	0,87	0,80	0,73	0,67	0,60	0,53

Diese Matrix wird mit der ermittelten Häufigkeitsverteilung multipliziert und als Zweipersonennull-Summenspiel geschrieben.

	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{25}	S_{26}	S_{27}	S_{28}
S_{11}	0,06	0,11	0,12	0,05	0,06	0,06	0,11	0,12
S_{12}	0,07	0,13	0,14	0,06	0,07	0,07	0,12	0,11
S_{13}	0,08	0,14	0,15	0,07	0,07	0,08	0,11	0,10
S_{14}	0,09	0,16	0,17	0,07	0,08	0,07	0,10	0,09
S_{15}	0,10	0,17	0,18	0,08	0,o7	0,07	0,09	0,08
S_{16}	0,11	0,19	0,20	0,07	0,07	0,06	0,08	0,07
S_{17}	0,11	0,20	0,19	0,07	0,06	0,06	0,08	0,07
S_{18}	0,12	0,19	0,17	0,06	0,06	0,05	0,07	0,06

Mit Formel (5) erhält man S_{16} als optimale Strategie, das bedeutet eine Planreserve von 30 %.

Um den Erkenntniszuwachs bei der Vorbereitung der Objekte und die Reduzierung der subjektiven Ursachen zu berücksichtigen, lassen sich die so ermittelten Werte noch umrechnen.

$$C` = \frac{DPK_i}{DPK_j} (1 + C) - 1$$

DPK_i - durchschnittlich geplanter Preis im ausgewerteten Zeitraum

DPK_j - durchschnittlich geplanter Preis im Folgezeitraum

C - Korrekturwert des ausgewerteten Zeitraumes

C` - Korrekturwert für den Folgezeitraum

Mit dem Wert C`kann die Größe der Reserve für den Planungszeitraum festgelegt werden.

Die komplexe Bewertung von Prozessen

Zur Sicherung der Effektivität von Baumaßnahmen sind in den Phasen der Investitionsvorbereitung und -durchführung Entscheidungen zu treffen, die eine komplexe Bewertung erfordern. Es sind Entscheidungen zu fällen, die für Schwierigkeitsstufen und Behinderungen auf Objekt- oder Komplexebene und für den gezielten Einsatz von Geräten und Mitteln getroffen werden müssen. Die komplexe Bewertung mit einem spieltheoretischen Modell ist möglich, wenn Einzelbewertungen bezüglich bestimmter Kriterien vorliegen. Die Bewertung für das Zusammenwirken kann jedoch nicht durch Summation oder Multiplikation erfolgen, da diese Ergebnisse keine Aussagefähigkeit besitzen.

Die komplexe Bewertung mit einem spieltheoretischen Modell ermöglicht die Wichtung von Varianten bzw. Teilprozessen im Sinne eines Globalzieles. Der Wert des Spieles wird als Grad der Wirksamkeit bezüglich dieses Globalzieles aufgefaßt und läßt sich in eine definierte Klasseneinteilung einstufen. Die optimalen Strategien werden im Sinne einer Rangordnung interpretiert. Die Qualität der Ergebnisse hängt von der Aussagefähigkeit der Auszahlungsfunktion ab. Sie kann in einfachen Fällen durch Bewertungsziffern (Punktsystem) oder bei genaueren Angaben durch objektive Größen definiert sein.
Nach dieser Methode wurde ein Objektbehinderungsgrad und die Bewertung von Bauarbeitenkomplexen für die Durchführung baulicher Rekonstruktionen in der chemischen Industrie berechnet /7/. Ebenfalls nach dieser Methode erfolgte eine komplexe Bewertung von Lärmschutzmaßnahmen unter Baustellenbedingungen und den Bedingungen der stationären Fertigung.

Beispiel: Die Behinderung von Bauarbeiten

Die typischen Behinderungen bei der baulichen Rekonstruktion in der chemischen Industrie werden durch Behinderungsfaktoren (BF_i) charakterisiert:

BF 1 - laufende Produktion

BF 2 - beengte Platzverhältnisse im Objekt

BF 3 - Werksverkehr

BF 4 - Ergonomische Bewertung

BF 5 - beengte Platzverhältnisse außerhalb des Objektes

BF 6 - Explosionsgefahr

BF 7 - Bauzustand

Diese Behinderungsfaktoren wirken auf die auszuführenden Bauarbeiten, die entsprechend der Struktur des Auftragnehmerbetriebes nach dem Kostenstellenprinzip zum Bauarbeitenkomplex (BA_j) zusammengefaßt sind:

BA 1 - Hochbau/Rohbau

BA 2 - Erd- und Schuttabtransport

BA 3 - Stahlbau

BA 4 - Maler

BA 5 - Säurebau

BA 6 - Zimmerer/Tischler

BA 7 - Gerüstbau

BA 8 - Technische Gebäudeausrüstung

BA 9 - Gleisbau

Zur Einschätzung der Wirksamkeit der Behinderungsfaktoren (BF_i) auf die Bauarbeitenkomplexe (BA_j) wurde aus Mangel an gesicherten Kennzahlen eine Punktskala $a_{ij} \in \{1, \ldots, 4\}$ mit 1 = "schwach oder nicht behindert" und 4 = "größte Behinderung" benutzt. Diese Punktskala soll dabei die Summe der zur Verfügung stehenden Informationen (Projektant, Berufserfahrung, Befragung usw.) über den zu beurteilenden Sachwert erhalten.

Mit den genannten Angaben läßt sich für ein Gebäude eine Bewertungsmatrix aufstellen:

	BA 1	BA 2	BA 3	BA 4	BA 5	BA 6	BA 7	BA 8	BA 9
BF 1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
BF 2	3	1	1	1	1	1	3	1	1
BF 3	2	1	1	1	1	1	1	1	3
BF 4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
BF 5	3	1	1	1	1	1	2	1	3
BF 6	2	1	1	1	1	1	1	1	1
BF 7	3	1	1	1	1	1	1	1	3

Damit man eine sinnvolle Lösung erhält, wird die Matrix auf die nützlichen Strategien reduziert, d.h. alle, die für die gesamte Strategie die Ziffer 1 als Bewertung erhalten haben, werden gestrichen. Für die Lösung werden Gleichgewichtsstrategien berechnet.

$$\nu = 2{,}33$$

$$S_1 = \begin{Bmatrix} BF1 & BF2 & BF3 & BF4 & BF5 & BF6 & BF7 \\ 0 & 0{,}33 & 0 & 0 & 0{,}67 & 0 & 0 \end{Bmatrix}$$

$$S_2 = \begin{Bmatrix} BA1 & BA7 & BA9 \\ 0 & 0{,}67 & 0{,}33 \end{Bmatrix}$$

Die optimale Strategie für den Spieler I ermöglicht, eine Wertung der Behinderungsfaktoren in Form einer Rangordnung ihres zu erwartenden Störeinflusses im Rahmen des Gesamtobjektes anzugeben. Dabei entspricht die größte Wahrscheinlichkeit dem höchsten Rang.

Rang 1	BF 5	(am stärksten wirksam)
Rang 2	BF 2	
Rang 3	BF 1, BF 3, BF 4, BF 6, BF 7	

Mit der optimalen Strategie für den Spieler II kann die Wirksamkeit der Behinderungen bezüglich der Bauarbeiten interpretiert werden.
Dabei entspricht die kleinste Wahrscheinlichkeit dem höchsten Rang. Alle Strategien des Spielers II, die als nicht nützlich klassifiziert wurden, werden von der Rangeinstufung ausgeschlossen.

Rang 1	BA 1	(größte Behinderung)
Rang 2	BA 9	
Rang 3	BA 7	

Die ermittelte Rangfolge kann Grundlage sein, um Prioritäten zur Absicherung der Bauproduktion zu setzen. Der Wert $\nu = 2{,}33$ drückt den mittleren Objektbehinderungsgrad aus.

WEITERFÜHRENDE ARBEITEN

Mit den diskutierten Anwendungen konnte gezeigt werden, daß Matrixspiele geeignet sind, Konfliktsituationen im Rahmen der bautechnologischen Vorbereitung zu lösen. Die Strategien der Theorie der Spiele ermöglichen, eine Theorie des technologischen Verhaltens zu entwickeln.
Bei der gemeinsamen Betrachtung von Problemen von Bau und Ausrüstung wurde festgestellt, daß die Verknüpfung der Parameter nicht eindeutig ist. Deshalb wurde versucht, die Theorie der fuzzy sets mit dem Lösungskonzept der Spieltheorie zu verbinden. Eine solche Modifizierung der Aufgabe führt zu fuzzy games /8/, bei denen nicht nur die Nutzensfunktion durch eine Zugehörigkeits-

funktion ersetzt wird, sondern auch die Unschärfe bei der Variantenbildung einbezogen wird. Die Zugehörigkeitsfunktion wird dabei entsprechend einem Vorschlag von Schwab /11/ mit der interpolierenden kubischen Splinefunktion berechnet. Die gegenwärtigen Untersuchungen mit diesem Lösungskonzept konzentrieren sich auf die Untersuchung von Varianten von Kabeltrassen in der chemischen Industrie und von Varianten von Trassen für die Trinkwasserversorgung.

Die Untersuchungen werden an der TH Leipzig weitergeführt, wobei einerseits das Modell weiter ausgebaut, andererseits weitere Anwendungsbeispiele erschlossen werden sollen. Es zeigt sich, daß das Instrumentarium der Spieltheorie auch über die Bautechnologie hinaus, für Aufgaben des Project Management interessante Lösungen bringt.

LITERATUR

/1/ Owen, G. "Game Theory", W.B. Saunders Company, Philadelphia 1968 Deutsche Übersetzung "Spieltheorie", Springer Verlag Berlin 1971

/2/ Arrow, K.J. "Bayes and Minimax Solution of Sequential Decision Problemes" Econometrica 1949, S. 213 - 243

/3/ Fiedler,K. Peldschus, F. "Matrixspiele für die bautechnologische Vorbereitung" X. IKM Weimar 1984, Berichte Heft 1, Seite 49 - 51

/4/ Peldschus, F. "Zur Anwendung der Spieltheorie für Aufgaben der Bautechnologie", Diss. B. Technische Hochschule Leipzig 1986

/5/ Zavadskas, E. K.; Peldschus, F. "Primenenie teorii igr podgotovke stroitel'nogo proizvodstva" Vilńusskij inzenerno-stroitelńyj institut 1986

/6/ Höher,G. "Ein Beitrag zur Verbesserung der Vorbereitung der Rekonstruktion von Wohngebäuden mit Hilfe eines spieltheoretischen Modells - dargestellt an der Erzeugnislinie Dach", Diss. A, Technische Hochschule Leipzig 1982

/7/ Simon, L. "Eine Methode zur Erfassung, Bewertung und Klassifikation von Einflüssen, die den Bauablauf der Rekonstruktion von Objekten der chemischen Industrie behindern" Diss. A, Technische Hochschule Leipzig 1982

/8/ Omran, J. "Entscheidungsunterstützende Methoden in der bautechnologischen Vorbereitung unter Berücksichtigung von unscharfen Spielen (Fuzzy Games) Diss. A, Technische Hochschule Leipzig 1988

/9/ Fandel, G. "Optimale Entscheidung bei mehrfacher Zielsetzung" Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York 1972

/10/ Seeling, R. "Die Nutzwertanalyse für die Entscheidungsfindung bei komplexen Handlungsalternativen im Bauwesen" in Aktuelle Fragen des Baubetriebes, Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr. W. Jurecka, Köln-Braunsfeld Verlagsgesellschaft Rudolf Müller 1980

/11/ Schwab, K.D. "Ein auf dem Konzept der unscharfen Mengen basierendes Entscheidngsmodell bei mehrfacher Zielsetzung" Dissertation TH Aachen, Europäische Hochschulschriften, Verlag Peter Lang, Band 431, 1983

/12/ Zargemeister,Ch. "Nutzerwertanalyse in der Systemtechnik" 3. Auflage München: Wittmann'sche Buchhandlung 1973