

# Bauproduktionstheorie – Struktur des Bauproduktionsprozesses

G. Girmscheid

404

**Zusammenfassung** Aufbauend auf den phänomenologischen holistischen Hypothesen der Bauproduktionstheorie soll nun eine konsistente, holistische, aktionale, generisch-mathematische Bauproduktionstheorie formuliert werden. Die aktionale Bauproduktionstheorie vereinigt die Kunden- und Produzentensicht durch die Darstellung des holistischen Wertgenerierungs- und des technologischen Transformationsprozesses des Produzenten sowie der intendierten Wertschöpfung für den Kunden. Dabei wird besonders der technologische Transformationsprozess bezüglich top-down-Produktionsplanung und bottom-up-Produktionssteuerung mit kontinuierlichem Verbesserungsprozess (KVP) dargestellt. Es erfolgt eine generische Systemgliederung des Bauwerks und die Zuordnung der Produktionsmittel, der Verbrauchsfaktoren und der Informationen zu den Bauproduktionsprozessfunktionen mit ihren Leistungs- und Kostenfunktionen. Zur kontinuierlichen Verbesserung werden dann bottom-up die Prozesse, Ressourcen, Leistungen und Kosten zur Zielerreichung gesteuert. In einem weiteren Folgebeitrag werden explikative Handlungsempfehlungen für die Praxis zur Planung und Steuerung der Bauproduktion dargelegt.

## Construction Production Theory – Framework of Construction Production Process

**Abstract** Based on the phenomenological holistic hypotheses of the construction production theory, this paper focuses on developing a consistent, holistic, generic-mathematical construction production theory. The construction production theory combines customer and manufacturer perspectives by mapping the manufacturer's holistic value generation and technological transformation processes and the intended added value for the customer. The technological transformation process, in particular, is illustrated in terms of top-down production planning and bottom-up production control within the framework of a continuous improvement process (CIP). The structure is divided into generic systems, and the resources and production materials, consumption factors and information on the construction production process functions with their performance and cost functions are assigned to these. In a bottom-up approach, the processes, resources, performance and costs needed to reach the targets are managed within a continuous improvement process. A subsequent paper will

outline explicative recommendations for practical action to plan and manage construction production.

## 1 Einleitung

In diesem Beitrag wird, aufbauend auf den phänomenologischen holistischen Hypothesen für eine Bauproduktionstheorie [1], die aktionale Bauproduktionstheorie mit generisch-mathematischem Bezugsrahmen dargestellt. Der Stand der Praxis und Forschung zur Bauproduktionstheorie wurde in [1] umfassend vorgestellt. In einem Folgebeitrag werden von der mathematisch formulierten Bauproduktionstheorie abgeleiteten explikativen Handlungsempfehlungen für den Planungs- und Steuerungsprozess dargelegt.

## 2 Forschungsmethodik

Wie bereits in [1] dargelegt, bildet die Bauproduktionstheorie eine Untermenge der Managementwissenschaften. Daher wird die Bauproduktionstheorie der 3. Welt [2] der „Erzeugnisse des menschlichen Geistes“ zugeordnet. Somit wird das hermeneutische Forschungsparadigma (Wissenschaftsphilosophie) angewendet [3]. Die Bauproduktionstheorie wird, aufbauend auf den phänomenologischen Hypothesen [1], generisch denklologisch-deduktiv entwickelt und mittels mathematischen Ansätzen funktional strukturiert.

Der mathematische Strukturrahmen sowie die explikativen Handlungsempfehlungen (werden in einem Folgebeitrag veröffentlicht) dienen zur Güteprüfung der aktionalen, generisch-deduktiven Bauproduktionstheorie (Triangulation).

## 3 Bauproduktionsprozess

Die Bauproduktionsplanung (**Bild 1**) erfolgt vor Beginn der Bauproduktion, um ein intendiertes, zielorientiertes Handeln zu ermöglichen. Aufgrund der vorausgehenden Planung der baulichen Anlage von der Konzept- bis zur Genehmigungs- und Ausführungsplanung liegt der Nutzen bzw. Wert für den Kunden, den die Bauproduktion erzielen soll, fest. Dieser Wert bzw. Nutzen für den Kunden ist in Plänen und Leistungsverzeichnissen (LV) definiert, in denen, ausgehend von Systemstandard, das Raumprogramm und die Bauelemente in Qualität, Dimensionen, Mengen und Baustoffen definiert sind. Diese immateriellen Grundlagen müssen nun während der Bauproduktion vom Bauunternehmer materialisiert werden [4], [5]. Die Bauproduktion ist der technologische Transformationsprozess, der den immateriellen Input an Informationen des Vertrags mit Plänen und LV unter Nutzung der Potenzial- und Verbrauchsfaktoren zu Prozessfunktionen zusammenführt. Die Prozessfunktionen werden mit Leistungen und Ressourcen für die einzelnen Bauverfahren hinterlegt.

**Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid**

M.ASCE, John O. Bickel Award 2004 und 2005  
Professor für Bauprozess- und Bauunternehmensmanagement

Vorsteher Institut für Bauplanung und Baubetrieb  
ETH Zürich

CH-8093 Zürich

girmscheid@ibb.baug.ethz.ch

Tel. (+41) 44 633 3787

Fax (+41) 44 633 1088

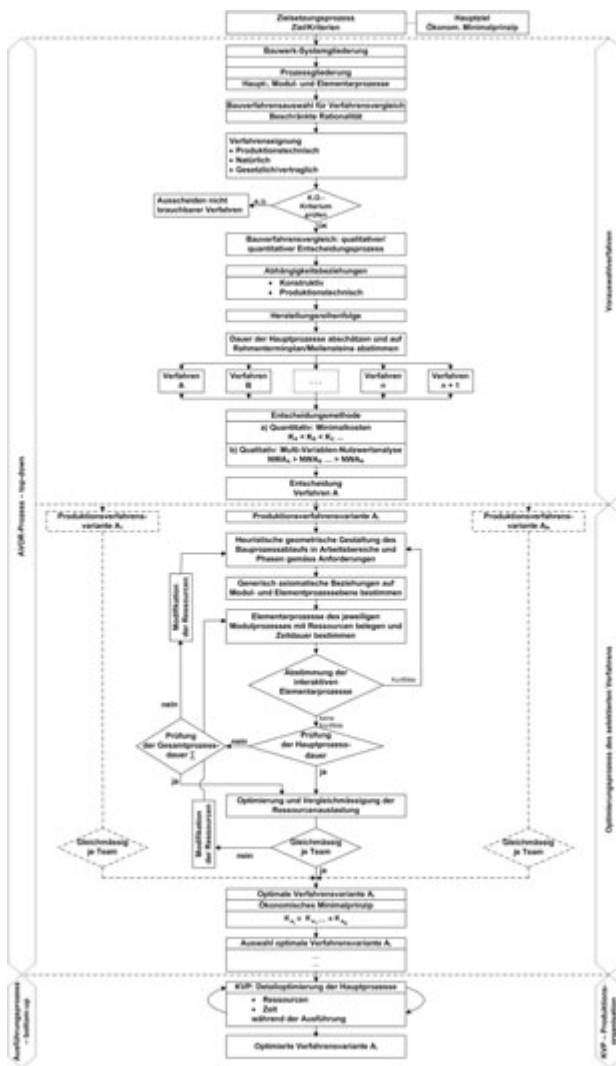


Bild 1. AVOR-Planungsprozess der Bauproduktion  
Fig. 1. Planning process of Construction Production

Im Rahmen dieses Wertschöpfungs- bzw. Bauproduktionsprozesses wird der immaterielle Input zu einem materiellen Output transformiert. Dadurch entstehen für den Unternehmer Kosten aufgrund des Ressourcenverbrauchs (Lohn-, Material-, Inventar-, Subunternehmer- sowie allgemeine Geschäftskosten) [6].

Die Wertgenerierung für den Unternehmer entsteht aus der Differenz aus vereinbartem Preis und den Kosten des Transformationsprozesses. Der Wert für den Kunden, der für ihn zu den Kosten des vereinbarten Preises entsteht, besteht aus der Materialisierung des immateriellen Inputs zu dem intendierten Nutzen.

Um diese Materialisierung des immateriellen Inputs zu erreichen, ist eine zielorientierte Bauproduktionsplanung unumgänglich, die

1. den Wert bzw. den intendierten Nutzen für den Kunden generiert,
2. die Wertgenerierung für den Unternehmer aufgrund des ökonomischen Minimalprinzips sicherstellt.

Dies kann nur erreicht werden, wenn, ausgehend von den Nutzen- und Systemanforderungen für das Gesamtsystem und die Bauelemente, eine generische systematische Bauverfahrenselektion stattfindet, mit einer Optimierung der generischen Prozessabhängigkeiten und Ressourcenallo-

kation unter Einhaltung der zeitlichen Meilensteine und der Gesamtprozessdauer.

Die Wert- und Nutzenanforderungen einer baulichen Anlage können durch den Systemstandard, das Raumprogramm und die Bauelemente bzw. Bauelementgruppen ausgedrückt werden.

Der Bauproduktionsprozess wird im Rahmen der Bauproduktionstheorie (Bild 1) gegliedert in:

- Top-down-Basisproduktionsplanung mit
  - Vorauswahlverfahren der Produktionssysteme
  - Optimierung der selektierten Bauverfahren und des Produktionsprozesses
- Bottom-up-Produktionsorganisation zur kontinuierlichen Verbesserung und Steuerung des Ausführungsproduktionsprozesses.

#### 4 Bauwerkssystemgliederung

Der Systemstandard der baulichen Anlage (System) wird in der folgenden Matrix definiert:

$$\{S^i\}^{Syst} = \left\{ (S^{Rohbau}); (S^{Ausbau}); (S^{M+E}); (S^{Fass}); (S^{Aussen}) \right\}$$

$$\{S^i\}^{Syst} = f_1(\text{Funktionsanforderung}; \text{Qualitätsanforderung})$$

Aus dem Systemstandard wird das Basisraumprogramm mit den Elementgruppenanforderungen wie folgt entwickelt:

$$\{R^k\}_\chi^{Syst} \Big|_{k=1}^n = F \{S^i\}_\chi^{Syst}$$

$k$  = Raumindex  
 $i$  = Gewerke

$$\{R_A^k\}_\chi^{Syst} = \left\{ R_A^{Infra}; R_A^{Allgem}; R_A^{Nutz}; \dots \right\}_\chi^{Syst}$$

Aus dem detaillierten Systemstandard  $\{S^i\}$  und Basisraumprogramm  $\{R^k\}_\chi$  der Entwurfsvarianten  $\chi = A$  wird das System der baulichen Anlage in der Planungsphase entwickelt. Die bauliche Anlage als System kann generisch in die Elementgruppen der Gewerke Rohbau, HKL, Elektro, Ausbau etc. sowie in die Bauelemente (z.B. Decken, Stützen, Kern) nach Qualität und Hauptmengen (Grobmengengerüst) gegliedert werden (Bild 1).

Elementgruppenanforderungen aus Systemanforderungen und Raumprogramm können für die Entwurfsvariante  $\chi = A$  wie folgt formuliert werden:

$$\{\Phi^{Elementgr}\}_A^{Syst} = f_2 \left( S^{Rohbau}; S^{Ausbau}; S^{M+E}; S^{Fass}; S^{Aussen}; \dots \right)_A^{Syst}$$

In den definierten Elementen (Leistungspositionen im LV) sind alle vertraglich vereinbarten Nutzenfunktionen (Material, Qualität etc.) in Form von Informationen (Vertrag, Pläne, LV etc.) enthalten.

Die Informationsfunktion stellt die Information aus den Systemanforderungen des baulichen Systems bereit:

$$\{\underline{I}\}_A^{Syst} = f_3 \{\underline{S}^i\}_A^{Syst}$$

$$\{\underline{I}\}_A^{Syst} = f_5 (Vertrag; Pläne; LV)_A^{Syst}$$

$$\{\underline{I}\}_A^{Syst} = \left\{ \{\underline{I}\}^{Baugr}; \{\underline{I}\}^{Rohbau}; \{\underline{I}\}^{Ausbau}; \{\underline{I}\}^{M+E}; \{\underline{I}\}^{Fass}; \dots \right\}_A^{Syst}$$

Die Informationen für die Elemente sind z.B. für den Rohbau:

$$\{\underline{I}\}_A^{Rohbau} = \left\{ \left( \underline{I}^{Fundament} \right); \left( \underline{I}^{Decke} \right); \left( \underline{I}^{Wände} \right); \left( \underline{I}^{Kern} \right); \left( \underline{I}^{Stützen} \right) \right\}_A^{Syst}$$

Elementgruppen der baulichen Anlage (System A):

Die Bauelementgruppen und Bauelemente sind mit den Informationen  $\{\underline{I}\}$  hinterlegt und können wie folgt in ihrer funktionalen Abhängigkeit dargestellt werden:

$$\{\underline{\Phi}^{Elementgr}\}_A^{Syst} = f_4 \{\underline{I}\}_A^{Syst}$$

$$\{\underline{\Phi}^{Elementgr}\}_A^{Syst} = \left\{ \left( \underline{\Phi}\{\underline{I}\} \right)^{Baugr}; \left( \underline{\Phi}\{\underline{I}\} \right)^{Rohbau}; \left( \underline{\Phi}\{\underline{I}\} \right)^{M+E}; \dots \right\}_A$$

mit den Elementen der Elementgruppen der baulichen Anlage (System A):

$$\left( \underline{\Phi}\{\underline{I}\} \right)^{Baugr} = \left\{ \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{Spundw}; \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{Anker+Gurt}; \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{Aushub}; \dots \right\}$$

$$\left( \underline{\Phi}\{\underline{I}\} \right)^{Rohbau} = \left\{ \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{Fund}; \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{Wände}; \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{Decken}; \dots \right\}$$

$$\left( \underline{\Phi}\{\underline{I}\} \right)^{Ausbau} = \left\{ \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{Fussb}; \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{Putz}; \dots \right\}$$

$$\left( \underline{\Phi}\{\underline{I}\} \right)^{M+E} = \left\{ \left( \underline{\Phi}\{\underline{I}\} \right)^{HKL}; \left( \underline{\Phi}\{\underline{I}\} \right)^{Elektro}; \dots \right\}$$

$$\left( \underline{\Phi}\{\underline{I}\} \right)^{HKL} = \left\{ \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{Heizant}; \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{HKL-Steuer}; \left( \underline{\varphi}(t) \right)^{HKL-Verteil}; \dots \right\}$$

## 5 Top-down-AVOR-Vorauswahlverfahren der Produktionssysteme

### 5.1 Potenzial- und Verbrauchsfaktoren des Unternehmens

Zum Erreichen des intendierten Nutzens für den Kunden im Rahmen des Bauproduktionsprozesses muss jedes Unternehmen Potenzial- und Verbrauchsfaktoren vorhalten bzw. zeitgerecht bereitstellen können. Zu den Potenzialfaktoren gehören

- Arbeitskräfte
- Produktionsmittel
- Know-how

Zu den Verbrauchsfaktoren gehören

- Baumaterial
- Verbrauchsmaterial



Bild 2. Inventarclusterbildung  $\Omega^{Unter}$  nach strategischen Geschäftsfeldern (SGF)  $\Omega^{SGF}$  und strategischen Geschäftseinheiten (SGE)  $\Omega^{SGE}$

Fig. 2. Clustering of Production inventory  $\Omega^{Unter}$  in strategic business segments  $\Omega^{SGF}$  and strategic business units  $\Omega^{SGE}$

Diese Faktoren werden über das kodifizierte und implizierte Wissen der Mitarbeiter und Organisation in die Prozessfunktion zur Materialisierung der Bauaufgabe umgesetzt.

Die Produktionsmittelfunktion repräsentiert die menschlichen (Know-how, Arbeit) und die technologischen Potenzialfaktoren sowie die Verbrauchsfaktoren und Informationen (Bild 2). Die Produktionsmittelfunktion kann durch die Produktionsfaktormatrix, die sich aus den Produktionsmitteln  $\Omega^i$  zusammensetzt, wie folgt ausgedrückt werden:

$$\left[ \underline{\Omega} \right] = \left[ \left( \underline{\Omega} \right)^{AK}; \left( \underline{\Omega} \right)^{Inv}; \left( \underline{\Omega} \right)^{Verb} \right]$$

$$\left( \underline{\Omega} \right)^{AK} = \text{Arbeitskraft} \quad \left( \underline{\Omega} \right)^{Inv} = \text{Inventar}$$

$$\left( \underline{\Omega} \right)^{Verb} = \text{Material, Verbrauch}$$

$$\left[ \underline{\Omega} \right] = \begin{bmatrix} \left( \underline{\Omega} \right)^{Baustellein} \\ \left( \underline{\Omega} \right)^{Hochbau} \\ \left( \underline{\Omega} \right)^{Tiefbau} \\ \left( \underline{\Omega} \right)^{Spezialtief} \\ \left( \underline{\Omega} \right)^{Brückent} \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \underline{\Omega} \right)^{disposAK}; \left( \underline{\Omega} \right)^{projAK} & \left( \underline{\Omega} \right)^{Contain}; \left( \underline{\Omega} \right)^{Sicherh}; \dots & \left( \underline{\Omega} \right)^{B-EinVerb} \\ \left( \underline{\Omega} \right)^{disposAK}; \left( \underline{\Omega} \right)^{projAK} & \left( \underline{\Omega} \right)^{Kräne}; \left( \underline{\Omega} \right)^{Schalung}; \left( \underline{\Omega} \right)^{Betonant}; \dots & \left( \underline{\Omega} \right)^{Hoch-Mat}; \left( \underline{\Omega} \right)^{Hoch-Verb} \\ \left( \underline{\Omega} \right)^{disposAK}; \left( \underline{\Omega} \right)^{projAK} & \left( \underline{\Omega} \right)^{Bagger}; \left( \underline{\Omega} \right)^{Lader}; \left( \underline{\Omega} \right)^{LKW}; \dots & \left( \underline{\Omega} \right)^{Tief-Mat}; \left( \underline{\Omega} \right)^{Tief-Verb} \\ \left( \underline{\Omega} \right); \left( \underline{\Omega} \right) & \left( \underline{\Omega} \right); \left( \underline{\Omega} \right); \left( \underline{\Omega} \right) & \left( \underline{\Omega} \right)^{Spez-Mat}; \left( \underline{\Omega} \right)^{Spez-Verb} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Die Produktionsmittel werden in die Projektartencluster Hochbau, Tief- und Erdbau, Spezialtiefbau etc. sowie in das Cluster Baustelleneinrichtung untergliedert (Bild 2).

Limitationale Produktionsmittel beschränken sich auf die Ausrüstung des Unternehmens (Bild 2):

$$\left( \underline{\Omega} \right) = \left( \underline{\Omega} \right)^{Unter}$$

Unlimitationale Produktionsmittel nutzen die Ressourcen des Unternehmens und des Marktangebots:

$$\left( \underline{\Omega} \right) = \left[ \left( \underline{\Omega} \right)^{Unter} + \left( \underline{\Omega} \right)^{Sub} \right]$$

Für ein spezifisches Projekt wird ein Teil der Produktionsmittelfaktoren des Unternehmens oder der strategischen Geschäftseinheit (SGE) bzw. des Unternehmens/der SGE des Marktes gewählt. Ziel muss es sein, für ein vordefiniertes Leistungsziel (fester Nutzen definiert durch Pläne und Leistungsbeschreibung) die optimalen Arbeitskräfte, Produktionseinrichtungen und Know-how bereitzustellen, die im

Produktionsprozess unter den vorgegebenen Bedingungsgrößen zu einem relativen Minimum an Kosten führen. Für die Wahl der möglichen, aber geeigneten Produktionsmittel in einem Projekt gilt:

$$(\underline{\Omega})^{Proj} = \left\{ \begin{array}{l} (\underline{\Omega})^{Proj} | (\underline{\Omega})^{Proj} = \{ (\underline{\Omega})^{AK}; (\underline{\Omega})^{Inv}; (\underline{\Omega})^{Verb} \}^{Proj} \\ \text{mit } \{ E((I_{Verb}); (I_{Umw}); (I_{Prod}) \dots) \} \subset \{ E(\underline{\Omega})^{Proj} \} \\ \text{- vertraglich, umwelt- und produktionstechnisch} \\ \text{geeignet} \end{array} \right\}$$

$(\underline{\Omega})^{Proj} \subset (\underline{\Omega})$  – Projektproduktionsmittel; Teilmenge der verfügbaren Produktionsmittel

$(\underline{\Omega}) = (\underline{\Omega})^{Unter} \wedge (\underline{\Omega})^{Sub}$  – mögliche Produktionsmittel des Unternehmens bzw. der SGE und/oder des Marktes

Die projektspezifischen Produktionsmittel werden limitational aus den Ressourcen zusammengestellt oder quasi unlimitational aus dem Markt beschafft.

Für die einzelnen System-Elementgruppen bzw. Bauelemente lassen sich projektspezifisch die Produktionsmittel wie folgt zusammenstellen (Bild 1).

$$(\underline{\Omega})^{Proj} = \{ (\underline{\Omega})^{Baugr}; (\underline{\Omega})^{Rohbau}; (\underline{\Omega})^{Ausbau}; \dots \}$$

Für einzelne Elementgruppen:

$$(\underline{\Omega})^{Baugr} = \left\{ n_{\tau} \cdot \omega_{\tau}^{Bagger} \Big|_{\tau=xm^3}^{ym^3}; n_{\tau} \cdot \omega_{\tau}^{LKW} \Big|_{\tau=xm^3}^{ym^3}; \dots \right. \\ \left. \dots n_{\tau} \cdot \omega_{\tau}^i \Big|_{\tau} ; \dots n_m \cdot \omega_m^{Spund} \Big|_{\tau} ; \dots \right\}^{Baugr}$$

$$(\underline{\Omega})^{Rohbau} = \{ n_1 \cdot \omega_1^{Systemchalung}; n_2 \cdot \omega_2^{Rahmschalung}; \dots n_{\tau} \cdot \omega_{\tau}^i \dots \}^{Rohbau}$$

Die Betriebsmittel bzw. Produktionsmittel sind z.B. definiert durch:

$\omega_{\tau}^{Bagger} = f_5 (CAT 902, Werkzeug, Ersatzteile, Grundleistung, etc.)$

$n_{\tau}$  = Anzahl der Produktionsfaktoren

$i$  = Geräteart (Bagger, LKW, ...)

$\tau$  = Gerätetyp (Größe, Leistung, ...)

### Bauverfahrensauswahl für die jeweiligen Bauprozesse

Für das bauliche System mit seinen Bauelementgruppen (Gewerken) und den zugeordneten Bauelementen (Wände, Decken etc.) sind für die Bauprozesse der verschiedenen Elemente die potenziellen Bauverfahren bzw. Elementarprozesse der Bauproduktion zu finden (Bild 1). Diese elementspezifischen Bauverfahren müssen die Vorgaben und Anforderungen und Kriterien der Verfahrenseignung erfüllen. Jedem Bauprozess mit dem jeweiligen Bauverfahren werden produktionstechnische Ressourcen (Potenzialfaktoren) hinterlegt. Die Potenzialfaktoren eines Bauprozesses (Modul- oder Elementarprozess) ergeben sich

- qualitativ, technisch, fähigkeitsbedingt aus dem Bauverfahren
- quantitativ aus den Mengen und zeitlichen Vorgaben

Eignungsanforderungen	Bauverfahren					
	$\beta(\omega)_1$	$\beta(\omega)_2$	...	$\beta(\omega)$	...	$\beta(\omega)_n$
A <sub>1</sub>	$\epsilon_1$	OK	OK		OK	-
A <sub>2</sub>	$\epsilon_2$	OK	OK		OK	OK
⋮	⋮					
A <sub>n</sub>	$\epsilon_n$	-	OK		OK	-
Resultat		N	N		OK	N

Bild 3. Bauverfahren für ein Bauelement  $\varphi$  oder Bauelementgruppe  $\Phi$  – qualitative Selektionsmatrix

Fig. 3. Construction Method of a Construction Element  $\varphi$  or an Element Group  $\Phi$  – qualitative selection matrix

### 5.2 Bauprozesskonfiguration und Verfahrenseignung

Die Gesamtverfahrenskombination setzt sich aus den Bauprozessen mit den jeweiligen Bauverfahren für die Bauelementgruppen  $\{\Phi\}$  zusammen. Diese sind für die Bauprozess-/Bauverfahrenskombination wie folgt:

$$\{B\}_{\chi} = F \left\{ \{B\}_{\chi_B}^{Baugr}; \{B\}_{\chi_R}^{Rohbau}; \dots \right\}_{\chi}$$

$\chi$  = Bauverfahrenskombinationsvariante

Die Bauprozesskombination/Bauverfahrenskombination für Hauptprozesse der Elementgruppen (Gewerke) setzt sich aus den Modulprozessen mit den Bauverfahren für die Bauelemente zusammen:

$$\{B\}_{\chi_B}^{Baugr} = f_6 \left\{ (\beta)_{\chi_B}^{Baugr-Wand}; (\beta)_{\chi_B}^{Anker+Gurt}; (\beta)_{\chi_B}^{Aushub}; \dots \right\}$$

$$\{B\}_{\chi_R}^{Rohbau} = f_7 \left\{ (\beta)_{\chi_R}^{Wände}; (\beta)_{\chi_R}^{Kern}; (\beta)_{\chi_R}^{Stütze}; (\beta)_{\chi_R}^{Decke}; \dots \right\}$$

$$\{B\}_{\chi_A}^{Ausbau} = f_8 \left\{ (\beta)_{\chi_A}^{Fussb}; (\beta)_{\chi_A}^{Putz}; \dots \right\}$$

$$\{B\}_{\chi_H}^{HKL} = f_9 \left\{ (\beta)_{\chi_H}^{Heizantl}; \dots \right\}$$

Jeder Bauprozess mit dem jeweiligen Bauverfahren ist mit den limitationalen Produktionsmitteln des Unternehmens bzw. den unlimitationalen des Unternehmens und des Marktes projektspezifisch hinterlegt:

$$\left\{ B(\underline{\Omega})_{Tiefbau} \right\}_{\chi_B}^{Baugr} = f \left\{ (\beta(\omega))_{\chi_B}^{Baugr-Wand}; (\beta(\omega))_{\chi_B}^{Anker+Gurt}; (\beta(\omega))_{\chi_B}^{Aushub}; \dots \right\}$$

$$\left\{ B(\underline{\Omega})_{Hochbau} \right\}_{\chi_B}^{Rohbau} = f \left\{ (\beta(\omega))_{\chi_B}^{Decke}; (\beta(\omega))_{\chi_B}^{Wände}; \dots \right\}$$

⋮

Die Bauproduktion für ein definiertes, invariantes Leistungsergebnis/Produkt (Nutzen/Wert) lässt sich durch je-

weils m mögliche Bauverfahren bzw. Elementarprozesse der Bauproduktion erreichen.  
Für den Bauprozess eines jeden Bauelementes  $\vartheta$  ergeben sich somit  $m_i$  mögliche Bauverfahren:

$$\begin{aligned} \left\{ \underline{B(\Phi; \Omega)} \right\}_{\chi_B} \Big|_{\chi_B=1}^{m_1} &= \\ &= F \left\{ \left( \underline{\beta(\varphi; \omega)} \right)_{\chi_{BW}} \Big|_{\chi_{BW}=1}^{m_{BW}} ; \left( \underline{\beta(\varphi; \omega)} \right)_{\chi_{BA}} \Big|_{\chi_{BA}=1}^{m_{BA}} ; \right. \\ &\quad \left. \left( \underline{\beta(\varphi; \omega)} \right)_{\chi_{BAus}} \Big|_{\chi_{BAus}=1}^{m_{BAus}} ; \dots \right\} \\ \left\{ \underline{B(\Phi; \Omega)} \right\}_{\chi_R} \Big|_{\chi_R=1}^{m_2} &= \\ &= F \left\{ \left( \underline{\beta(\varphi; \omega)} \right)_{\chi_{RD}} \Big|_{\chi_{RD}=1}^{m_{RD}} ; \left( \underline{\beta(\varphi; \omega)} \right)_{\chi_{RW}} \Big|_{\chi_{RW}=1}^{m_{RW}} ; \right. \\ &\quad \left. \left( \underline{\beta(\varphi; \omega)} \right)_{\chi_{RS}} \Big|_{\chi_{RS}=1}^{m_{RS}} ; \left( \underline{\beta(\varphi; \omega)} \right)_{\chi_{RK}} \Big|_{\chi_{RK}=1}^{m_{RK}} ; \dots \right\} \\ \left\{ \underline{B(\Phi; \Omega)} \right\}_{\chi_A} \Big|_{\chi_A=1}^{m_5} &= \dots \\ &\vdots \end{aligned}$$

Die Bauverfahrensauswahl (Bild 1) für das Projekt erfolgt nach qualitativen Eignungskriterien. Die Eignungskriterien enthalten

- vertragliche Vorgaben
- Umweltvorgaben
- konstruktive und statische Eignungskriterien
- produktionstechnische Eignungskriterien

Die projektspezifischen Anforderungs- und Eignungskriterien ( $Proj = System A$ ) werden in folgender Matrix zusammengefasst:

$$\{E\}_{Proj} = \left\{ \{E\}_{Proj}^{Baugr} ; \{E\}_{Proj}^{Rohbau} ; \{E\}_{Proj}^{Ausbau} ; \dots \right\}$$

Für die Bauelemente in den Elementgruppen:

$$\begin{aligned} \{E\}_{Proj}^{Baugr} &= \left\{ \{E\}_{Proj}^{Baugr-W} ; \{E\}_{Proj}^{Aushub} ; \dots \right\} \\ \{E\}_{Proj}^{Rohbau} &= \left\{ \{E\}_{Proj}^{Decken} ; \{E\}_{Proj}^{Kern} ; \{E\}_{Proj}^{Wände} ; \{E\}_{Proj}^{Stützen} ; \dots \right\} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Jedes Bauverfahren ( $\beta$ ) auf Elementebene hat verfahrensspezifische Eignungskriterien ( $\varepsilon(\beta)$ ):

$$\left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{x_{\vartheta, v}}^{\vartheta} \Rightarrow \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{x_{\vartheta, v}}$$

$\vartheta = \{\vartheta | \vartheta = Baugrubenwand \vee \vartheta = Aushub \vee \dots\}$  – Elemente  
 $v = \{v | v = Spundwand \vee v = Schlitzwand \vee \dots\}$  – Bauverfahren

Die Vorselektion der Bauverfahren muss auf Elementebene erfolgen, denn bereits bei der Produktion der kleinen Einheiten (Elemente) müssen die Elementarprozesse der Bauverfahren mit ihren konjugierten Produktionsmitteln die jeweiligen Eignungskriterien erfüllen (Bild 3). Somit

muss für die brauchbaren Bauverfahren gelten, dass die projektspezifischen Eignungskriterien  $\left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{Proj}^{\vartheta}$  Teilmenge der verfahrensspezifischen Eignungskriterien  $\left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{x_{\vartheta, v}}^v$  des jeweiligen potenziellen Bauverfahrens sind. Somit gilt:

$$\left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{Proj, j}^{\vartheta} \Big|_{j=1}^{m_j} = \left\{ \begin{aligned} \left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{Proj, j}^{\vartheta} \Big|_{j=1}^{m_j} &= \left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{x_{\vartheta, v}}^{\vartheta} \text{ wenn } \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{Proj}^{\vartheta} \subset \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{x_{\vartheta, v}}^v \Big|_{x_{\vartheta, v}=1}^{m_{\vartheta, v}} \\ \vee \left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{Proj, j}^{\vartheta} &= 0 \text{ wenn } \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{Proj}^{\vartheta} \not\subset \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{x_{\vartheta, v}}^v \Big|_{x_{\vartheta, v}=1}^{m_{\vartheta, v}} \end{aligned} \right\}_{j=1}^{m_j}$$

Damit erhält man für die Elemente  $\vartheta$  nur noch  $n_v$  mögliche Bauverfahren  $v$  aus den jeweilig vom Unternehmen ausführbaren Bauverfahren  $m_{\vartheta, v}$ .

Folgende Bauverfahren für den Herstellungsprozess z.B. der Decke erfüllen die projektspezifischen Anforderungen und Eignungskriterien:

$$\left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{Proj, RD}^{Decke} = \left[ \begin{array}{l} \beta(\varphi, \omega)^{Schaltische} \\ \beta(\varphi, \omega)^{Fallkopfschalung} \\ \beta(\varphi, \omega)^{Systemchalung} \end{array} \right]_{Proj, RD}^{Decke}$$

$$\text{mit } \left[ \begin{array}{l} \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{RD}^{Schaltische} \\ \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{RD}^{Fallkopfschalung} \\ \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{RD}^{Systemchalung} \end{array} \right]_{RD}^{Decke} \text{ erfüllen } \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{Proj}^{Decke}$$

Die folgenden Bauverfahren erfüllen die Anforderungen z.B. für die Herstellung der Decke nicht:

$$\beta(\varphi, \omega)^{Holzschalung} \text{ mit } \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{RD}^{Holzschalung} \not\subset \left( \underline{\varepsilon(\beta)} \right)_{Proj}^{Decke}$$

Somit stehen nach dem Eignungstest für die Herstellungsprozesse des Projekts nur noch folgende projektspezifische Bauverfahrensvarianten  $\{j\} = \{j_1; j_2; \dots\} \subset \{\chi\} = \{\chi_1; \chi_2; \dots\}$  zur Verfügung:

$$\left\{ \underline{B(\Phi, \Omega)} \right\}_{Proj} = \left\{ \left\{ \underline{B} \right\}_{Proj}^{Baugr} + \left\{ \underline{B} \right\}_{Proj}^{Rohbau} + \left\{ \underline{B} \right\}_{Proj}^{\dots} \dots \right\}$$

mit den Modul- und ihren Elementarprozessen

$$\left\{ \underline{B} \right\}_{Proj}^{Baugr} = \left\{ \left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{Proj, j} \Big|_{j=1}^{n_{BW}} ; \left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{Proj, j} \Big|_{j=1}^{n_{BA}} ; \left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{Proj, j} \Big|_{j=1}^{n_{BAush}} ; \dots \right\}$$

$$\begin{aligned} \left\{ \underline{B} \right\}_{Proj}^{Rohb} &= \\ &= \left\{ \left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{Proj, j} \Big|_{j=1}^{n_{RD}} ; \left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{Proj, j} \Big|_{j=1}^{n_{RW}} ; \left( \underline{\beta(\varphi, \omega)} \right)_{Proj, j} \Big|_{j=1}^{n_{RS}} ; \dots \right\} \\ &\vdots \\ &\vdots \end{aligned}$$

### 5.3 Logisch-generische Herstellungsreihenfolge und Dauer der Prozesse

Die Herstellungsreihenfolge (Bild 1) der baulichen Anlage (System) ergibt sich durch konstruktive und produktionstechnische Abhängigkeitsbeziehungen. Die logisch-generische Gliederung der Abhängigkeitsbeziehungen der Elementar-, Modul- und Hauptprozesse ergibt sich

- aufgrund von konstruktiven, statischen Aspekten
- bei „abtragenden, abbauenden“ Aufgaben, z.B. beim Aushub, top-down
- bei „lagenweise aufbauenden“ Aufgaben, z.B. beim Ausbau, bottom-up

Die Abhängigkeiten der Teilprozesse ergeben sich durch die generisch-axiomatischen Beziehungen aus den logisch-generischen Gliederungsaspekten [7]. Dabei sind die Entwicklung der Vorgängerfertigstellung und die Nachfolgerbedarfsanforderung axiomatisch in Relation zu setzen. Der Gesamtproduktionsprozess setzt sich meist aus verschiedenen Verfahrensvarianten  $j$  der Teilprozesse (Bild 1) zusammen. Jedoch müssen die Verfahrensvarianten  $j$  der Teilprozesse die folgenden Verfahrenseignungen als K.O.-Kriterien erfüllen:

- technische und produktionstechnische Anforderungen
- gesetzliche und vertragliche Vorgaben
- umweltbedingte Anforderungen

Die Prozess- und Bauverfahrensfunktion der Bauproduktion bildet schematisch den technologisch getriebenen Transformationsprozess ab, der die Materialisierung der Bauherrenidee, die durch Pläne und Leistungsverzeichnisse immateriell abgebildet ist, realisiert. Dabei bildet sich der Fließprozess durch

- Informationsflüsse und
- Materialverarbeitungsflüsse

ab, die wertgenerierend von einem Teilprozess zum anderen Teilprozess sequenziell bzw. parallel verlaufen.

Die Verknüpfung der Elementar-, Modul- und Hauptprozesse erfolgt aufgrund der generischen Abhängigkeitsbeziehungen (Bild 1) nach dem GAAM-Modell [7] wie folgt:

$$\left(\beta(\varphi, \omega)\right)_{Proj,j}^{\xi} = \left(A_{\xi, \xi-1}^{\beta}\right) \cdot \left(\beta(\varphi, \omega)\right)_{Proj,j}^{\xi-1}$$

mit  $\xi = \{\xi | \xi \in N^+ \text{ mit } 1 \leq \xi \leq n_j\}$

$\beta_j^{\vartheta}$  ≙ Elementar-/Modulprozess für das Bauelement  $\vartheta$  der Bauverfahrensvariante  $j$

$\xi$  ≙ Laufindex für den Element-/Modulprozess  $\beta$

$j$  ≙ Bauverfahrensvariante

$A_{\xi, \xi-1}^{\beta}$  ≙ Zeitliche Abhängigkeitsmatrix des Teilprozesses  $(\beta^{\vartheta})^{\xi}$  vom Vorgängerprozess  $(\beta^{\vartheta})^{\xi-1}$

$n_j$  ≙ Anzahl der Elementarprozesse  $\beta$  der Verfahrensvariante  $j$

In dieser Vorauswahlphase werden die Informationsflussabhängigkeiten noch nicht berücksichtigt. In der Optimierungsphase wird der im Vorauswahlverfahren selektierte Bauprozess mit den dazugehörigen Bauverfahren und Ressourcen unter Berücksichtigung der Informationsflüsse mittels GAAM-Modell zeit- und ressourcenmässig optimiert (Bild 3).

Im nächsten Schritt erfolgt die Ressourcenbelegung  $(\Omega_j^v)$  der Elementarbauprozesse  $\{\beta_j^v\}$  bzw. der Modulprozesse  $\{B_j^v\}$ , des Bauverfahrens  $v$  innerhalb der Verfahrensvariante  $j$ , um die Modulprozesse innerhalb der festzulegenden Zeitdauer zu realisieren. Dazu wird die Gesamtprozessdauer, die durch den Bauvertrag in den meisten Fällen

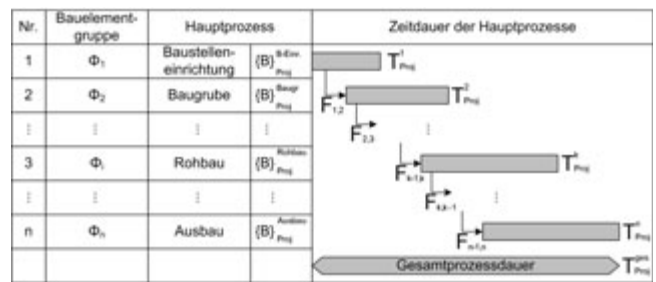


Bild 4. Gesamtherstellungsdauer und interagierende Hauptprozesse k  
Fig. 4. Total Production Duration and interacting main processes k

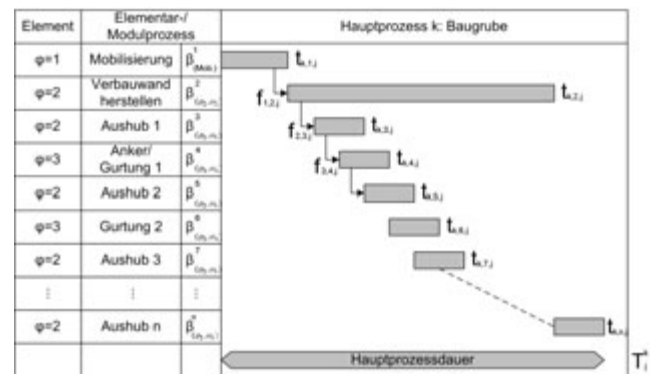


Bild 5. Dauer  $T_j^k$  des Hauptprozesses  $k$  mit den Elementar-/Modulprozessen  $\beta$  der Bauverfahren  $v$   
Fig. 5. Duration  $T_j^k$  of main process  $k$  consisting of elementary/module processes  $\beta$  of construction methods  $v$

vorgegeben wird, generisch untergliedert in die Dauer der Hauptprozesse als Meilensteine sowie, daraus abgeleitet, in die Dauer der Modulprozesse.

Gesamtprozessdauer (Bild 4):

$$T_{Proj,j}^{ges} = \sum_{k=1}^{n-1} T_{Proj,j}^k \cdot F_{k,k+1} + T_{Proj,j}^n$$

$$k = \left\{ \begin{array}{l} k | k = \text{Baustelleneinrichtung} \vee k = \text{Baugrube} \vee \\ k = \text{Rohbau} \vee k = \text{Ausbau} \end{array} \right\}$$

mit  $k = k \in N^+ \text{ mit } 1 \leq k \leq m$

Die Hauptprozesse  $k$  setzen sich aus Elementar-/Modulprozessen  $\beta(\varphi, \omega)_v^{\vartheta}$  mit den Bauverfahren  $v$  für die Bauelemente  $\varphi$  zusammen (Bild 5).

Die Dauer  $T_j^k$  des Hauptprozesses  $k$  ergibt sich aus den Elementar-/Modulprozessen  $\beta$  der Bauverfahren  $v$  wie folgt:

$$T_{Proj,j}^k = \sum_{\beta=1}^{n-1} t_{k,\beta,j} \cdot f_{\beta,\beta+1,j} + t_{k,n,j}$$

Die Dauern der Elementar-/Modulprozesse ergeben sich aus der Leistungsmenge und der Leistung der verwendeten Gerätegruppen und Teams des Bauverfahrens  $v$  wie folgt:

$$t_{k,\beta,j} = \frac{M_{\beta,k}}{n_v \cdot Q_N(\omega)_{Proj,j}^{v,k}}$$

- $M_{\beta,k}$   $\equiv$  Leistungsmenge des Elementarprozesses  $\beta$  im Hauptprozess  $k$
- $Q_N(\omega)^{v,k}$   $\equiv$  Nutzleistung der Gerätegruppe oder des Teams des Bauverfahrens  $v$  im Elementarprozess  $\beta$  des Hauptprozesses  $k$
- $(F, f)$   $\equiv$  Zeitliche Abhängigkeitsfaktoren der Haupt- bzw. Modul-/Elementarprozesse
- $n_v$   $\equiv$  Anzahl von parallel arbeitenden Gerätegruppen oder Teams beim Bauverfahren  $v$  im Elementarprozess  $\beta$  des Hauptprozesses  $k$
- $j$   $\equiv$  Bauverfahrensvariante (projektspezifisch)

410

Daraus ergibt sich die Hauptprozessdauer  $T^k$  zu

$$T_{Proj,j}^k(\Phi_{k,j}; \Omega_{k,j}) = \sum_{\beta=1}^{n-1} \frac{M_{\beta,k}}{\beta \cdot n_v \cdot Q_N(\omega)^{v,k}_{Proj,j}} \cdot f_{\beta,\beta+1,j} + t_{k,n,j}$$

Folgende 1. Bedingung muss von jeder Bauverfahrensvariante  $j$  im Hauptprozess  $k$  erfüllt werden:

$$T_{Proj,j}^k(\Phi_{k,j}; \Omega_{k,j}) \leq T_{Proj}^k: \text{Die eingesetzten projektspezifischen Produktionsmittel (Ressourcen) sind ausreichend.}$$

Wenn aber  $T_{Proj,j}^k(\Phi_{k,j}; \Omega_{k,j}) > T_{Proj}^k$  dann müssen die projektspezifischen Produktionsmittel (Ressourcen) in ihrer Leistungsfähigkeit erhöht werden (leistungsfähigere Geräte, mehr Geräte und Teams etc.)

Ferner muss die vorgegebene Gesamtbauzeit als 2. Bedingung eingehalten werden:

$$T_{Proj,j}^{ges} \leq T_{Proj}^{ges}$$

Dies wird jedoch bereits durch die Erfüllung der 1. Bedingung im Regelfall eingehalten.

Die Dauern einzelner Hauptprozesse  $k$  können überschritten werden, solange die Gesamtprozessdauer  $T_{Proj}^{ges}$  nicht überschritten wird. Dieses Ziel wird erreicht, wenn es möglich ist,

- die Parallelisierung  $f_{\beta,\beta+1,j}$  so zu verändern, dass die Gesamtbauzeit noch eingehalten wird,
- andere Hauptprozesse  $T_{Proj,j}^k$  durch leistungsfähigere Ressourcen zu verkürzen.

Damit ergeben sich für jeden Modul- bzw. Elementarprozess  $\beta$  des Bauverfahrens  $v$  folgende Ressourcen im Hauptprozess  $k$ :

$$\left\{ n_\tau \cdot \omega_\tau^i(\varphi_v^\beta, Q_N) \right\}_{Proj,j}^{k,v} = \left( \omega_{i,\tau}^{k,v} \right)_{Proj,j}$$

$n_\tau$   $\equiv$  Anzahl der Produktionsfaktoren vom Typ  $\tau$  für den Modul- oder Elementarprozess  $\beta$  des Bauverfahrens  $v$

$\omega_\tau^i$   $\equiv$  Produktionsfaktoren der Ressourcenart  $i$  und des Ressourcentyps  $\tau$

$\varphi_v^\beta$   $\equiv$  Bauelement, das mittels Bauverfahren  $v$  hergestellt wird

$Q_N$   $\equiv$  Nutzleistung des Produktionsfaktors

Damit ergeben sich die folgenden Ressourcen  $\Omega_v^k$  und die Dauer  $T^k$  für den Hauptprozess  $k$  mit den Modulprozessen  $\beta$  des Bauverfahrens  $v$ :

$$\left\{ \Omega_v \right\}_{Proj,j}^k = \begin{bmatrix} \omega_{i,\tau}^{k,1} \\ \omega_{i,\tau}^{k,2} \\ \vdots \\ \omega_{i,\tau}^{k,m} \end{bmatrix}_{Proj,j} \Rightarrow [T]^k = \begin{bmatrix} t_{1,k} \\ t_{2,k} \\ \vdots \\ t_{m,k} \end{bmatrix}_{Proj,j}$$

$t_{\beta,k}$  = Dauer des Elementar-/Modulprozesses  $\beta$  im Hauptprozess  $k$

Die projektspezifische Ressourcen- bzw. Produktionsmatrix für den Gesamtproduktionsprozess der Bauverfahrenskombination  $j$  für die Hauptprozesse  $k$  mit den Modulprozessen  $\beta$  der Bauverfahren  $v$  lautet somit:

$$\left\{ \Omega \right\}_{Proj,j}^k = \left\{ \left\{ \Omega_v \right\}_{Proj,j}^k \right\}_{j=1}^m$$

$$\left\{ \Omega \right\}_{Proj,j}^k = \begin{bmatrix} k=1 & k=2 & \dots & k=m \\ B-Einricht & Baugrube & \dots & Ausbau \\ \omega_{i,\tau}^{1,1} & \omega_{i,\tau}^{2,1} & & \omega_{i,\tau}^{m,1} \\ \omega_{i,\tau}^{1,2} & \omega_{i,\tau}^{2,2} & & \omega_{i,\tau}^{m,2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \omega_{i,\tau}^{1,m_1} & \omega_{i,\tau}^{2,m_2} & & \omega_{i,\tau}^{m,m_m} \end{bmatrix}_{Proj,j}$$

Die dazugehörige Zeitdauermatrix für die einzelnen Hauptprozesse  $k$  mit den Modul- bzw. Elementarprozessen  $\beta$  lautet:

$$\left[ T \right]_{Proj,j}^k = \begin{bmatrix} 1=B-Einricht & 2=Baugrube & \dots & m=Ausbau \\ t_{1,1} & t_{1,2} & t_{1,5} & t_{1,m} \\ t_{2,1} & t_{2,2} & t_{2,5} & t_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ t_{m_1,1} & t_{m_2,2} & t_{m_3,5} & t_{m_m,m} \end{bmatrix}_{Proj,j}$$

### 5.4 Verfahrensvergleich – Bauprozess- und Verfahrenswahl

Die verschiedenen Verfahrensvarianten  $j$  der Herstellung mit den einzelnen Modul- und Elementarprozessen werden nun mittels quantitativen und qualitativen Methoden beurteilt. Zur quantitativen Beurteilung zur Auswahl der Bauverfahren wendet das Unternehmen das ökonomische Minimalprinzip an, da alle Verfahrensvarianten, die den Eignungstest erfüllten, den gleichen Nutzen bzw. Wert für den Kunden erzeugen.

Zur Systematisierung des Verfahrensvergleichs (Bild 1) und der Verfahrensauswahl [8] wird das Entscheidungsbaumverfahren herangezogen, in dem der gesamte Bauproduktionsprozess  $\{B\}$  jeder Verfahrensvariante  $j$  mit den jeweiligen Modulbauprozessen  $\beta(\varphi, \omega)_j^\beta$  in Bezug zu den Bauelementen  $\varphi$  und den dazugehörigen Produktionsressourcen  $\omega$  (Potenzialfaktoren: Arbeitskräfte/Know-how, Geräte, Material) dargestellt wird.

$$\{B\}_{Proj} \Big|_{j=1}^{n_j} = \begin{bmatrix} \{B\}_{Proj,1} = F(\beta(\varphi, \omega)_1^1; \beta(\varphi, \omega)_1^2; \beta(\varphi, \omega)_1^5; \dots; \beta(\varphi, \omega)_1^{n_1}) \\ \{B\}_{Proj,2} = F(\beta(\varphi, \omega)_2^1; \beta(\varphi, \omega)_2^2; \beta(\varphi, \omega)_2^5; \dots; \beta(\varphi, \omega)_2^{n_2}) \\ \vdots \\ \{B\}_{Proj,j} = F(\beta(\varphi, \omega)_j^1; \beta(\varphi, \omega)_j^2; \beta(\varphi, \omega)_j^5; \dots; \beta(\varphi, \omega)_j^{n_j}) \\ \vdots \\ \{B\}_{Proj,n_j} = F(\beta(\varphi, \omega)_{n_j}^1; \beta(\varphi, \omega)_{n_j}^2; \beta(\varphi, \omega)_{n_j}^5; \dots; \beta(\varphi, \omega)_{n_j}^{n_{n_j}}) \end{bmatrix}$$

Aufbauend auf der systematisierten Darstellung des Entscheidungsbaums erfolgt die Entscheidung zur Verfahrensauswahl:

- quantitativ – nach dem ökonomischen Minimalprinzip
- qualitativ – nach der Nutzwertanalyse

Zur Beurteilung des Gesamtbauprozesses, der mit den eingesetzten Bauverfahren das Kostenminimalprinzip erfüllt (Bild 1), müssen zuerst die Kosten der Elementar-, Modul- und Hauptprozesse ermittelt und zu den Gesamtkosten des jeweiligen Gesamtbauproduktionsprozesses mit der jeweiligen Verfahrenskombination zusammengefasst werden. Diese ergeben sich aus dem Ressourcenverbrauch IR und den Einheitskosten  $k$ .

Projektkostenermittlung der jeweiligen Bauverfahrenskombination:

Kosten der Baustelleneinrichtung bei der Bauverfahrenskombination  $j$ .

$$K_j^{B-Ein}(t_{B-Ein}) = K_{Allgem,j}^{B-Ein} + \int_{t_{B-Ein}^a}^{t_{B-Ein}^e} F(\text{IR}^{B-Ein,AK}(B)_j \cdot k_j^{B-Ein,AK}; \text{IR}^{B-Ein,Inv}(B)_j \cdot k_j^{B-Ein,Inv}) dt + \text{IR}^{B-Ein,Mat}(B)_j \cdot k_j^{B-Ein,Mat}$$

Kosten der Baugrube bei der Bauverfahrenskombination  $j$ :

$$K_j^{Baugr}(t_{Baugr}) = \int_{t_{BG}^a}^{t_{BG}^e} F(\text{IR}^{BG,AK}(B)_j \cdot k_j^{BG,AK}; \text{IR}^{BG,Inv}(B)_j \cdot k_j^{BG,Inv}) dt + K^{BG,Sub}(B)_j + \text{IR}^{BG,Mat}(B)_j \cdot k_j^{BG,Mat}$$

Kosten des Rohbaus bei der Bauverfahrenskombination  $j$ :

$$K_j^{Rohb}(t_{Rohb}) = \int_{t_{RB}^a}^{t_{RB}^e} F(\text{IR}^{RB,AK}(B)_j \cdot k_j^{RB,AK}; \text{IR}^{RB,Inv}(B)_j \cdot k_j^{RB,Inv}) dt + K^{RB,Sub}(B)_j + \text{IR}^{RB,Mat}(B)_j \cdot k_j^{RB,Mat}$$

Kosten des Ausbaus bei der Bauverfahrenskombination  $j$ :

$$K_j^{Ausb}(t_{Ausb}) = \int_{t_{AB}^a}^{t_{AB}^e} F(\text{IR}^{AB,AK}(B)_j \cdot k_j^{AB,AK}; \text{IR}^{AB,Inv}(B)_j \cdot k_j^{AB,Inv}) dt + K^{AB,Sub}(B)_j + \text{IR}^{AB,Mat}(B)_j \cdot k_j^{AB,Mat}$$

Damit ergeben sich die Gesamtkosten der Bauproduktion in der Bauverfahrenskombination  $j$  zu:

$$K_{Proj,j} = K_j^{B-Ein}(t_{B-Ein}) + K_j^{Baugr}(t_{Baugr}) + K_j^{Rohb}(t_{Rohb}) + K_j^{Ausb}(t_{Ausb})$$

Damit erhält man mittels des Entscheidungsbaums den Kostenvektor der Bauproduktion mit allen betrachteten Verfahrenskombinationen  $j$  für das Projekt:

$$\{K\}_{Proj} = \left\{ K_{Proj,j} \right\}_{j=1}^{n_j}$$

Nach dem ökonomischen Minimalprinzip bei gleichem Nutzen aller Verfahren  $j$  erhält man den wirtschaftlichsten Bauproduktionsprozess wie folgt:

$$\{K\}_{Proj,A} = \text{Min} \left\{ K_{Proj,j} \right\}_{j=1}^{n_j}$$

für den Bauprozess  $\{B\}_A$  mit den Produktionsmitteln  $\{\Omega\}_A^{Proj}$ .

## 6 Top-down-AVOR-Optimierungsprozess

Die zum Bauproduktionsprozess selektierte Verfahrensvariante wird in der AVOR-Optimierungsphase hinsichtlich (Bild 1)

- der erweiterten generischen Abhängigkeit unter Beachtung der Informationsflüsse und der Bereitstellung des Materials und Materialflüsse,
- der heuristisch geometrischen Gestaltung der Arbeitsräume und Arbeitsprozesse und
- der Optimierung und Vergleichsmässigung der Ressourcen, um das relative Kostenminimum weiter zu verbessern, detailliert untersucht.

### 6.1 Prozessabhängigkeiten

Die Herstellungsreihenfolge wird jetzt einer vertieften Betrachtung unterzogen, um die Informationsflüsse in Form von Planbereitstellung sowie die Materialflüsse bezüglich „in time“-Bereitstellung von Ressourcen wie Plänen, Arbeitskräften, Produktionsgeräten, Material etc. zu steuern (Bild 1).

Die Gliederung der Herstellungsreihenfolge der Bauelemente/Bauteile erfolgt in physikalisch bedingte und lagenbedingte generische Folgeebenen nach folgenden Kriterien:

- Baugrube von oben nach unten
- Tragkonstruktion von unten nach oben
- Ausbau lagenweise, sequenziell von der Konstruktions- zur Oberflächenebene
- Befestigungselemente vor Elementmontage
- konstruktive, stabilitätsbedingte Reihenfolge
- Vorgabe von zeitlichen Meilensteinen für Modulprozesse und Gewerkegruppen, die innerhalb der Hauptprozesse hergestellt werden, aufgrund der vorgegebenen Gesamtproduktionsdauer (Rahmenplan des Bauherrn/Investors)
- Bestimmung der Ressourcen und Zeitdauer der Elementarprozesse innerhalb der Modulprozessvorgaben
- Erstellung von Risikoübersichten und Identifizieren von Unsicherheiten innerhalb der Elementarprozesse sowie Abschätzung der Auswirkungen



Im nächsten Schritt müssen die Prozessabhängigkeiten der Modul- und Elementarprozesse sowie Tätigkeiten in den Beziehungen aus konstruktiven, statischen und fertigungstechnischen Gründen aufgedeckt und zusammengeführt werden:

- upstream – Vorgänger- bzw. Überordnungsabhängigkeit
- downstream – Nachfolger- bzw. Unterordnungsabhängigkeit
- lateral – Nachbarabhängigkeit auf gleicher Hierarchiestufe

412

Die Verknüpfung der Teilprozesse  $\beta$  erfolgt mittels des GAAM-Modells [7] wie folgt:

$$\left(\beta(\varphi, \omega)^\vartheta\right)_{Proj}^\xi = \left(A_{\xi, \xi-1} \mid C_{\xi, k}\right) \cdot \left(\frac{\beta(\varphi, \omega)^\vartheta}{I_k}\right)_{Proj}^{\xi-1}$$

mit  $\xi = \{\xi \mid \xi \in N^+ \text{ mit } 1 \leq \xi \leq n\}$

$$\left(\beta(\varphi, \omega)^\vartheta\right)_{Proj}^\xi = f\left(A_{\xi, \xi-1}; C_{\xi, k}; I_k; M^\xi\right) \cdot \left(\beta(\varphi, \omega)^\vartheta\right)_{Proj}^{\xi-1}$$

- $\left(A_{\xi, \xi-1}\right)$  Zeitliche Abhängigkeitskoeffizientenmatrix des Teilprozesses  $(\beta^\vartheta)^\xi$  vom Vorgängerteilprozess  $(\beta^\vartheta)^{\xi-1}$
- $\left(C_{\xi, k}\right)$  Zeitliche Abhängigkeitskoeffizientenmatrix des Teilprozesses  $(\beta^\vartheta)^\xi$  von dem Informationsparameter  $k$
- $\left(I_k\right)$  Vektor der Informationsparameter für den Teilprozess  $(\beta^\vartheta)^\xi$

### 6.2 Heuristisch-geometrische Gestaltung und Prüfung der Arbeitsräume

In den Arbeitsräumen für die einzelnen Bauprozesse sowie für die zeitlich parallelen Bauprozesse muss der Wirkungsbereich der eingesetzten Geräte und Arbeitsabläufe behinderungsfrei und ergonomisch optimal gestaltet werden, um die maximale Leistungsfähigkeit der Geräte, Teams und Prozesse zu nutzen (Bild 1).

Bei allen Prozessen  $\beta(\varphi, \omega)^\vartheta$  für die Herstellung des Bauelements  $\varphi^\vartheta$  muss folgende Arbeitsflächenbedingung  $A$  für die Baugeräte  $\omega$  erfüllt werden, um die maximale projektspezifische Leistung  $Q$  auch zu erzielen:

$$A(\beta(\varphi, \omega)^\vartheta)_{op}^v = \begin{cases} A(\beta(\varphi, \omega)^\vartheta)_{op}^v \mid A(\beta(\varphi, \omega)^\vartheta)_{op}^v \leq A_{vorh}^\vartheta(\varphi, \omega) & \Rightarrow Q(\beta(\varphi, \omega)^\vartheta) = Q_{max}(\varphi, \omega)^v \\ \vee A(\beta(\varphi, \omega)^\vartheta)_{op}^v > A_{vorh}^\vartheta(\varphi, \omega) & \Rightarrow Q(\beta(\varphi, \omega)^\vartheta) < Q_{max}(\varphi, \omega)^v \\ \vee \text{andere Produktionsgeräte } \tilde{\omega} \text{ mit } A(\tilde{\beta}(\varphi, \omega)^\vartheta)_{op}^v < A_{vorh}^\vartheta(\varphi, \omega) & \Rightarrow Q(\beta(\varphi, \omega)^\vartheta) = \tilde{Q}_{max}(\varphi, \omega)^v \end{cases}$$

- $v = \text{Bauverfahren}$
- $\vartheta = \text{Bauelement/Bauprozess}$

### 6.3 Vergleichmäßigung der Ressourcenauslastung

Jeder einzelne Prozess wird nochmals überprüft, ob keine Leerzeiten für Geräte und Teams entstehen. Zudem muss geprüft werden, ob kurzfristige Ressourcenspitzen unter Einhaltung der zeitlichen vertraglichen Rahmenbedingungen vergleichmäßig werden können (Bild 1). In die-

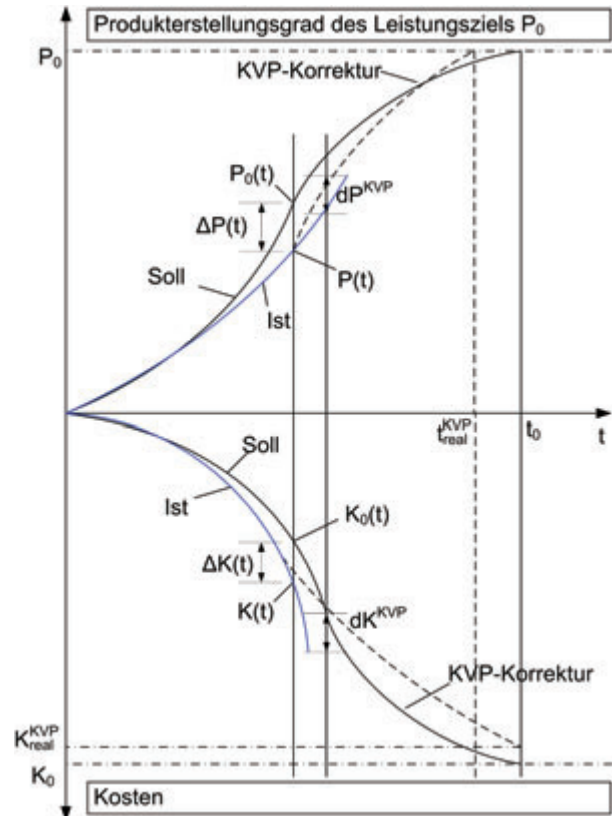


Bild 6. Leistungs- und Kostenentwicklung sowie KVP-Maßnahmen zur bottom-up-Bauproduktionssteuerung  
Fig. 6. Developing of performance and costs and CIP-measures for bottom-up-construction-production-steering

sem Zusammenhang muss geprüft werden, ob externe Ressourcen zur Abdeckung der Spitzenleistung herangezogen werden müssen.

### Kostenminimum

Im Anschluss an diese detaillierte Bauprozessplanung muss für die Optimierte Verfahrenskombination nochmals das Kostenminimum, wie bereits vorher gezeigt, überprüft werden (Bild 1).

## 7 Bottom-up Bauproduktionssteuerung – Controlling und KVP während der Bauproduktion

Nach dem top-down-Bauproduktionsplanungsprozess erfolgt die Ausführung (Bild 1). Im Rahmen der Ausführung müssen die prognostizierten Vorgaben für den gewählten Produktionsprozess in einem bottom-up-Prozess periodisch umgesetzt und fortlaufend gesteuert werden.

Die Produktionssteuerung der Ausführung erfolgt mittels des kybernetischen Regelkreises. Dabei wird die top-down-Produktionsplanung von unten kontinuierlich organisiert und gesteuert (bottom-up-Prozess (KVP)).

Das Controlling des Unternehmers dient zur Steuerung der intendierten Gewinn- bzw. Wertgenerierung. Ergeben sich bei den Leistungs- und Kostenzielen Abweichungen (Bild 6) aus der Differenz von top-down-Sollvorgaben und bottom-up-Istergebnis

$$\Delta P(t) = P(t) - P_0(t)$$

$$\Delta K(t) = K(t) - K_0(t)$$

so sind Steuerungsmaßnahmen notwendig. Zudem erfolgen im Rahmen des KVP permanente Verbesserungen in der Produktion und Reduzierungen der Kosten, die mit ihrer inkrementellen Wirkung über die Zeit spürbar zur Zielerreichung oder Zielverbesserung führen.

Zur Korrektur der Abweichung und generellen Organisation der Arbeiten bzw. Teilprozesse werden wöchentliche, detaillierte Produktionsprogramme mit vier- bis sechswöchigem Vorausblick entwickelt. Ziel ist es, die Leistungs- und Kostenvorgaben zu erreichen bzw. zu unterschreiten. Zur Erzielung der prognostizierten Leistungen bzw. zur Verbesserung der Istleistungen im Rahmen eines KVP stehen folgende unabhängige Variablen zur Verfügung:

- Produktionsmittel
- Verbesserung der Abläufe bzw. Grundleistung
- Verringerung bzw. Eliminierung der nicht wertschöpfenden Aktivitäten

Somit lassen sich die Abweichungen von den Leistungszielen der Produktion mittels kybernetischem Regelkreis wie folgt anpassen (Bild 6):

$$dP = \sum_v \frac{dP_v(\omega^{..bau}; Q_0; t_v = t^{prod} + t^{unprod})}{d\Omega^{..bau}} dt + \sum_v \frac{dP_v(\omega^{..bau}; Q_0; t_v = t^{prod} + t^{unprod})}{dQ_0} dt + \sum_v \frac{dP_v(\omega^{..bau}; Q_0; t_v = t^{prod} + t^{unprod})}{dt^{prod}} dt + \sum_v \frac{dP_v(\omega^{..bau}; Q_0; t_v = t^{prod} + t^{unprod})}{dt^{unprod}} dt$$

$Q_0$  = Basis- bzw. Grundleistung  
 $v$  = Bauprozess/Bauverfahren

Die Kostenfunktion lässt sich

- aufgrund der Produktionsmittel und Leistungen der Einzelgeräte bzw. Leistung der Prozesskette
- sowie durch einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess mit der Zielvorgabe, die Leistung zu erhöhen und die nicht wertschöpfenden Aktivitäten und Stillstandszeiten zu minimieren bzw. zu eliminieren, beeinflussen. Die Kostenfunktion lässt sich differenziell wie folgt innerhalb des kybernetischen Controllingprozesses bei Abweichungen anpassen bzw. durch KVP verbessern (Bild 6):

$$dK = \sum_v \frac{dK_v(\omega^{..bau}; M_v; Q_v; t_v = t_v^{prod} + t_v^{unprod})}{d\Omega^{..bau}} dt + \sum_v \frac{dK_v(\omega^{..bau}; M_v; Q_v; t_v = t_v^{prod} + t_v^{unprod})}{dQ_v} dt + \sum_v \frac{dK_v(\omega^{..bau}; M_v; Q_v; t_v = t_v^{prod} + t_v^{unprod})}{dt_v^{prod}} dt + \sum_v \frac{dK_v(\omega^{..bau}; M_v; Q_v; t_v = t_v^{prod} + t_v^{unprod})}{dt_v^{unprod}} dt$$

Damit stehen im Rahmen des KVP grundsätzlich vier Stellenschrauben zur Verfügung, um die Leistungs- und Kostenziele zu erreichen (Bild 6). Damit werden die nicht wertschöpfenden Aktivitäten und Verluste minimalisiert.

Als weiteres Axiom muss nachgewiesen werden, dass für den Unternehmer/Produzenten die Wertschöpfung den Wertverzehr übersteigt, d.h., es muss ein ausreichender Gewinn (Wertgenerierung) erzielt werden. Das ist das Grundparadigma der ökonomischen Motivation, als Unternehmen Leistungen für den Kunden zu erbringen bzw. Produkte für den Käufer herzustellen.

Somit gilt für den Gewinn:

$$G^{Proj} = \text{Wertschöpfung} - \text{Wertverzehr}$$

$$G^{Proj} = \text{Preis} - \text{Kosten}$$

$$G^{Proj} = P(\Phi) - K(\Phi) > 0 \text{ bzw. } G^{Grenz}$$

## 8 Fazit

Die phänomenologischen Axiome der holistischen aktionalen Bauproduktionstheorie mit Produktionsplanung (top down) und Produktionssteuerung (bottom up) konnte deduktiv-theoretisch mittels generisch-mathematisch konsistenten Strukturen auf

- Widerspruchsfreiheit

- hinreichende und notwendige Bedingungen

geprüft und als vorläufig validiert und reliabilitiert betrachtet werden. Die Objektivität der phänomenologischen Hypothesen, die damit als Axiome gelten, konnte mathematisch-axiomatisch intersubjektiv überprüft werden. Somit erfüllt die hier vorgestellte Bauproduktionstheorie das kritisch rationalistische Wissenschaftsverständnis bezüglich nicht leerer Klassen von Validierungs- bzw. Reliabilitierungsmöglichkeiten.

In einem Folgebeitrag werden Handlungsempfehlungen zu Planung und Steuerung des Bauproduktionsprozesses abgebildet.

Somit steht ein Grundgerüst für weitere spezifische Forschung zur Verfügung, in dem die leitenden Axiome als theoretischer, konstruktivistischer Strukturrahmen aufgefasst werden. Dieser Strukturrahmen kann bei weiteren Forschungsarbeiten als theoretischer Leitrahmen dienen.

## Literatur

- [1] Girmscheid, G.: Bauproduktionstheorie – Strukturrahmen. In Bauingenieur (82), H. 09/2007
- [2] Popper, K.: Auf der Suche nach einer besseren Welt. Piper, München, 1984
- [3] Girmscheid, G.: Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften. Eigenverlag des IBB an der ETH Zürich, Zürich, 2004
- [4] Girmscheid, G.: Strategisches Bauunternehmensmanagement. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006
- [5] Girmscheid, G.: Angebots- und Ausführungsmanagement – Leitfaden für Bauunternehmen. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005
- [6] Girmscheid, G.; Motzko, Ch.: Kalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen – Grundlagen, Methodik und Organisation. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007
- [7] Girmscheid, G.: Fast Track Projects – Generisches, axiomatisches Anforderungsmanagement. In: Bauingenieur (82), H. 05/2007
- [8] Bamberg, G.: Entscheidungsbaumverfahren, in Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, W. Wittmann et al., Editor. 1993, Schäffer-Poeschel: Stuttgart. p. 3 Teilbände