Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper").

Systemauswahl und Bereitstellungsvariante von Bauproduktionseinrichtungen – Entscheidungsmodell

G. Girmscheid

Zusammenfassung In einem ersten Teil wurden das Konzept des Gesamtmodells zur Bereitstellung von Bauproduktionseinrichtungen eines Unternehmens sowie das Prognosemodell als Teilmodell vorgestellt. In diesem Beitrag werden das Entscheidungsmodell für die wirtschaftliche Systemauswahl auf Projekt- bzw. Projektclusterebene sowie die Bereitstellungsvarianten auf Unternehmensebene vorgestellt. Somit steht dem Unternehmen ein holistisches Modell zur Beurteilung der wirtschaftlichen Bereitstellung von Bauproduktionseinrichtungen zur Verfügung, das auf die Wettbewerbslage der strategischen Geschäftseinheit (SGE) abgestellt ist.

System selection and alternative approaches to providing construction production equipment – Decision-making model

Abstract The first paper presented the concept of the overall model for the provision of construction production equipment by a company and the forecast model as a part of the same. This paper addresses the decision-making model for commercial system selection at project or project cluster level and the provision alternatives at company level. Overall, companies are provided with an integrated model for assessing the commercial provision of construction production equipment aligned to the competitive situation of the strategic business unit (SBU).

1 Einleitung

Basierend auf dem von Girmscheid entwickelten Prognosemodell [1] für den zukünftigen Inventarbedarf der strategischen Geschäftseinheiten (SGE) eines Unternehmens wird in diesem Beitrag das Entscheidungsmodell für die

- Systemauswahl der Bauproduktionsgeräte auf Projekt- bzw. Projektclusterebene und für die
- Bereitstellungsvariante für Bauproduktionseinrichtungen auf SGE- und Unternehmensebene

vorgestellt.

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid
M.ASCE, John O. Bickel Award 2004 und 2005
Professor für Bauprozess- und Bauunternehmens-management
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

2 Stand der Forschung und Forschungsmethodik

Der Stand der Forschung bezüglich der Analysemodelle zur Beurteilung der kurz- und langfristigen Wirtschaftlichkeitsanalyse wurde bereits in [1] erläutert. Zudem wurde bereits in [1] die Forschungsmethodik zur Validierung und Reliabilitierung des Entscheidungsmodells im Gesamtzusammenhang des Prognose- und Entscheidungsmodells zur wirtschaftlichen Systemauswahl und Inventarbereitstellung dargelegt.

3 Projektebene – Systementscheidung für Produktionseinrichtungen

Die Systementscheidung für das jeweilige Projekt erfolgt für die Produktionsprozesskette sowie für die einzelnen Geräte, Anlagen und Betriebsmaterialien gemäß der Bauproduktionstheorie von Girmscheid [2], [3], [4] nach folgenden Entscheidungskriterien:

- Eignung für die produktionstechnische Aufgabenart, z. B. für die:
  - o geologischen und hydrologischen Bedingungen
  - o Qualitätsanforderungen
  - o geometrischen Operationsbereiche
- Erfüllung der produktionstechnischen Leistungsanforderungen
- Erfüllung der Vertrags- und Umweltanforderungen

Da alle zu vergleichenden Prozesse $B(\Phi, \Omega)$ sowie die dazugehörigen Produktionseinrichtungen Ω die definierte vertragliche Leistung in der geforderten Qualität und im Zeitrahmen erfüllen müssen, ist der Nutzen für alle Prozesse gleich. Daher wird das ökonomische Minimalprinzip zur Minimierung der Projektausgaben/-kosten [3] angewendet.
Zudem wird für die projektspezifische bzw. projektclusterspezifische Selektion des wirtschaftlichsten Produktionssystems $\underline{\Omega} = \left(\underline{\omega_\delta}\right) = \left\{\underline{\omega_1}, \underline{\omega_2}, \underline{\omega_3} \ldots\right\}$ für die Bauaufgabe des Projekts P eine statische Ausgaben- bzw. Kostenvergleichsanalyse auf Basis einer Kalkulation durchgeführt.
Unter {Ω} versteht man die Produktionsmittel (System) mit Gerätegruppen oder Betriebsmaterialien, die dem Bauproduktionsprozess {B} mit den jeweiligen Bauverfahrensvarianten zugeordnet sind.
Für die Bauproduktionsprozesse gilt:

$$\left\{\underline{B(\Phi,\Omega)}\right\} = \left\{\underline{B(\Phi,\Omega)}^{Baug}; \underline{B(\Phi,\Omega)}^{Rohbau}; \ldots\right\} = \left\{\underline{B(\Phi,\Omega)}^{\delta}\right\}$$

Der Bauproduktionshauptprozess $\{B\}^\delta$ für die Bauelementgruppe Φ^δ wird mit der Gerätegruppe bzw. den Betriebsmaterialien (Produktionsmittel) Ω^δ hergestellt [3]. Somit gilt:

$$\left\{\underline{B(\Phi,\Omega)}\right\}^\delta\Big|_{\chi_\delta=1}^{m_\delta} = F\left\{\left(\underline{\beta(\varphi,\omega)}\right)^\vartheta\Big|_{\chi_\vartheta=1}^{m_\vartheta};\left(\underline{\beta(\varphi,\omega)}\right)^{\vartheta+1}\Big|_{\chi_{\vartheta+1}=1}^{m_{\vartheta+1}};\ldots\right\}_{\chi_\delta=1}^{m_\delta}$$

Der Bauproduktionsprozess {B} für ein Bauwerk Ω mit den Hauptherstellungsprozessen für die Baustelleneinrichtung, die Baugrube, den Rohbau etc. wird in die Modul- bzw. Elementarherstellprozesse β der Bauverfahren für die einzelnen Bauelemente φ (z.B. Baugrubenverbau, Aushub, Stützen, Decken etc.) mit den dazugehörigen Produktionseinrichtungen ω (z. B. Bagger, Radlader, LKW`s, Stützenschalung, Deckenschalung etc.) untergliedert.
Der gesamte Bauprozess $\{B\}$ für ein Bauwerk Φ besteht aus den Hauptprozessen $\{B\}^\delta$:

$$\left\{\underline{B(\Phi,\Omega)}\right\}^{Proj} = \left\{\left\{\underline{B(\Phi,\Omega)}\right\}^\delta\Big|_{\chi_\delta=1}^{m_\delta}\right\} =$$
$$= \left\{\underline{B(\Phi,\Omega)}^{Baug.}\Big|_{\chi_\delta=1}^{m_{BG}};\underline{B(\Phi,\Omega)}^{Rohbau}\Big|_{\chi_\delta=1}^{m_{RB}};\ldots\right\}$$

δ = Bauelementgruppenindex (Baugrube, Rohbau, …)
ϑ = Bauelementindex (Stützen, Decken, …)
n_δ = Anzahl der Bauelementgruppen
n_ϑ = Anzahl der Bauelemente
Φ^δ = Bauelementgruppe
$\varphi^{\delta,\vartheta}$ = Bauelement der Bauelementgruppe
χ_δ = Bauprozessvariante für die Herstellung der Bauelementgruppe Φ^δ
χ_ϑ = Bauverfahrensvariante für die Herstellung der Bauelemente $\varphi^{\delta,\vartheta}$
m_δ = Anzahl der Bauprozessvarianten für die Elementgruppen
m_ϑ = Anzahl der Bauverfahrensvarianten für die Bauelemente

Dabei bildet der Vektor $\left\{\underline{\Phi^\delta}\right\}$ das bauliche System in Elementgruppen, z.B. Baugrube oder Rohbau ab sowie die einzelnen Bauelemente $\varphi^{\delta,\vartheta}$ (z.B. Stützen, Decken, Wände):

$$\{\underline{\Phi}\} = \left\{\underline{\Phi^\delta}\right\}\Big|_{\delta=1}^{n_\delta} = \left\{\{\underline{\Phi}\}^{Baustelleneinrichtung};\{\underline{\Phi}\}^{Baugrube};\{\underline{\Phi}\}^{Rohbau};\ldots\right\}$$

Für die Elementgruppe Φ^δ lassen sich die Bauelemente $\varphi^{\delta,\vartheta}$ wie folgt darstellen:

$$\left\{\underline{\Phi^\delta}\right\} = \left\{\varphi^{\delta,\vartheta}\right\}_{\vartheta=1}^{n_\vartheta} = \left\{\varphi^{\delta,1};\varphi^{\delta,2};\ldots\varphi^{\delta,\vartheta};\ldots\varphi^{\delta,n_\vartheta}\right\}$$

Für jeden Bauhauptprozess $\{B^\delta\}$, z.B. Baugrubenherstellung, gibt es χ_δ-Bauprozess- und χ_ϑ-Bauverfahrensvarianten mit den dazugehörigen Produktionsmitteln Ω:

$$\{\underline{\Omega}\} = \left\{\left\{\underline{\Omega^\delta}\right\}_{\chi_\delta=1}^{m_\delta}\right\}$$

Die Bauelementgruppen Φ^δ werden durch die Hauptprozesse B^δ und die Elemente $\varphi^{\delta,\vartheta}$ mittels Bauverfahren/Elementprozessen β^ϑ hergestellt. Somit kann man die Bauproduktionsmittelgruppen Ω^δ den Hauptprozessen B^δ und die Produktionsmittel $\left(n_\tau\cdot\omega_\tau^i\right)^\vartheta$ zur Herstellung der Bauelemente $\varphi^{\delta,\vartheta}$ wie folgt zuordnen [3]:

$$\left\{\underline{\Omega^\delta}\right\} = \left\{\left(\underline{n_\tau\cdot\omega_\tau^i}\right)^\vartheta\right\}^\delta \underset{def}{=} \left\{\underline{\omega_{i\tau}^{\delta,\vartheta}}\right\}$$

$$\{\underline{\Omega}\} = \left\{\underline{\omega_{i\tau}^{\delta,\vartheta}}\right\} = \left\{\left(\underline{\omega_{i\tau}^{1,\vartheta}}\right)_{\vartheta=1}^{m_\vartheta};\left(\underline{\omega_{i\tau}^{2,\vartheta}}\right)_{\vartheta=1}^{m_\vartheta};\ldots\right\} \underset{def}{=} \left(\underline{\omega^{\delta,\vartheta}}\right)$$

Die Produktionsmittelzuordnung zu den Bauprozessen und den Bauverfahrensvarianten kann man vereinfacht wie folgt darstellen:

$$\left\{\underline{\Omega^\delta}\right\} = \left(\underline{\omega^{\delta,\vartheta}}\right) = \left(\underline{\omega^{1,1}},\underline{\omega^{1,2}},\ldots\underline{\omega^{2,1}},\underline{\omega^{2,2}},\ldots,\underline{\omega^{3,1}},\ldots\right) \underset{def}{=} \left(\underline{\omega_\delta}\right)$$

$$\left\{\underline{\Omega^\delta}\right\} = \left(\underline{\omega_\delta}\right) = \left(\underline{\omega_1},\underline{\omega_2},\underline{\omega_3},\ldots\right)$$

i = Ressourcengruppe/Baugeräteart (Bagger, LKW …)
τ = Ressourcentyp/Gerätetyp (Geräteleistung etc.)
δ = Bauelementgruppenindex (Baugruppe/Rohbau/etc.)
ϑ = Bauelementeindex (Stützen/Wände/Decken/etc.)

3.1 Ausgaben- bzw. Kostenanalyse für ein projektspezifisches Produktionssystem

Für das jeweilige Projekt P müssen nun die Bauproduktionsprozesse B und Bauproduktionssysteme Ω zugeordnet werden. Zudem soll der Bauproduktionsprozess B^* und das Produktionssystem $\Omega_{min} = \Omega^*$ mittels ökonomischen Minimalprinzips identifiziert werden, so dass die geringsten Gesamtkosten bei gleichem definierten Nutzen (vorgegeben durch die Ausschreibung) erzielt werden.
Wenn man die Bauproduktionsprozesse nach projektspezifischen und produktionsspezifischen Charakteristiken der Projektcluster $P = \{A,B,C...\}$ ordnet, erhält man folgende Bauprozess- und Bauproduktionssystemcluster:

$$\left\{\underline{B(\Phi,\Omega)}\right\}^{P=\{A,B,C...\}} = \left\{\underline{B_{\chi_\delta}^{P=A}(\Phi,\Omega)}\Big|_{\chi_\delta=1}^{m_A};\underline{B_{\chi_\delta}^{P=B}(\Phi,\Omega)}\Big|_{\chi_\delta=1}^{m_B};\underline{B_{\chi_\delta}^{P=C}(\Phi,\Omega)}\Big|_{\chi_\delta=1}^{m_C};\ldots\right\}$$

Jeder Bauproduktionsprozess, z.B. für den Projektcluster $P = A$, wird in die Hauptproduktionsprozesse B^δ für die Bauelementgruppen Φ^δ wie folgt mit den jeweiligen Verfahrensvarianten χ strukturiert:

$$\left\{\underline{B_{\chi_\delta}^{P=A}(\Phi,\Omega)}\Big|_{\chi_\delta=1}^{m_A}\right\}^{Proj} = \left\{\underline{B_{\chi_{\delta,\vartheta}}^{P=A}(\Phi,\Omega)}^{Baug}\Big|_{\chi_\vartheta=1}^{m_{BG,\vartheta}}\Big|_{\chi_\delta=1}^{m_{BG,\delta}};\underline{B_{\chi_{\delta,\vartheta}}^{P=A}(\Phi,\Omega)}^{Rohbau}\Big|_{\chi_\vartheta=1}^{m_{RB,\vartheta}}\Big|_{\chi_\delta=1}^{m_{RB,\delta}};\ldots\right\}^{Proj}$$

Die Produktionsmittel Ω mit den Geräten ω werden dem Projektcluster $P = \{A,B,C...\}$ analog zugeordnet:

$$\{\underline{\Omega}\}^{P=\{A,B,C...\}} = \left\{ \underline{\Omega_{\chi\delta}^{P=A}\left(\omega^{\delta,\vartheta}\right)}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_A} ; \underline{\Omega_{\chi\delta}^{P=B}\left(\omega^{\delta,\vartheta}\right)}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_B} ; ... \right\} \underset{def}{=} \underset{def}{=} \left\{ \underline{\Omega_{\chi\delta}^{PC}}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_P} \right\}^{P=\{A,B,C...\}}$$

$$\{\underline{\Omega}\}^{P=\{A,B,C...\}} = \left\{ \underline{\Omega_{\chi\delta}^{P}}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_{PC}} \right\}^{P=\{A,B,C...\}} \underset{def}{=} \underset{def}{=} \left\{A^{\Omega}, B^{\Omega}, C^{\Omega}, ...\right\}^{P=\{A,B,C.}$$

Die Produktionsmittel z. B. für das Projekt $P = A$ werden den Bauelementgruppen mit den Bauprozess- und Bauverfahrensvarianten wie folgt zugeordnet:

$$\{\underline{\Omega}\}^{P=A} = = \left\{ \underline{\Omega_{\chi\delta,\vartheta}^{P=A}\left(\omega^{\delta,\vartheta}\right)}^{BG}\Big|_{\chi\vartheta=1}^{m_{BG,\vartheta}}\Bigg|_{\chi\delta=1}^{m_{BG,\delta}} ; \underline{\Omega_{\chi\delta,\vartheta}^{P=A}\left(\omega^{\delta,\vartheta}\right)}^{RB}\Big|_{\chi\vartheta=1}^{m_{RB,\vartheta}}\Bigg|_{\chi\delta=1}^{m_{RB,\delta}} ; ... \right\}$$

Die Bauproduktionsprozesse und die Produktionsmittel, die nach technischen, vertraglichen und umweltbedingten Anforderungen den Projektclustern zugeordnet werden, bezeichnet man wie folgt:

$$B = B(P)^{P=\{A,B,C...\}} = \left\{B^A, B^B, B^C, ...\right\}$$

$$\Omega = \Omega(P)^{P=\{A,B,C...\}} = \left\{A^{\Omega}, B^{\Omega}, C^{\Omega}, ...\right\}$$

Bei der Ausgabe- und Kostenanalyse des Bauproduktionsprozesses $\{B\}$ für die Systemauswahl der Produktionseinrichtung $\Omega = \Omega(P) = \{A^{\Omega}, B^{\Omega}, C^{\Omega}, ...\}$ im Projekt P der SGE werden kalkulatorisch nicht nur die Gerätekosten, sondern auch die Betriebskosten (Lohn) sowie anderer Kostenelemente wie folgt berücksichtigt:

$$C_{\Omega}^{Proj} = A_{\Omega}^{Fix} + A_{\Omega,Proj}^{Rüst} + A_{\Omega,Proj}^{AVS/Miete} + A_{\Omega}^{Plan} + A_{\Omega}^{Transp} + A_{\Omega}^{R\&R} + + A_{\Omega}^{Verlust} + \left(A_{\Omega}^{Transakt}\right) + A_{\Omega}^{Betrieb}\Big|_{\Omega=\left\{A^{\Omega} \vee B^{\Omega} \vee C^{\Omega} ...\right\}}^{Proj} \quad [€]$$

Dabei sind die folgenden Ausgaben bzw. Fixkosten für alle zu vergleichende Produktionssysteme $\Omega = \Omega(P) = \{A^{\Omega}, B^{\Omega}, C^{\Omega}, ...\}$ in etwa gleich:

$$\left\{A^{Fix} = A_{\Omega}^{Fix}; A^{Plan} = A_{\Omega}^{Plan}; A^{Transp} = A_{\Omega}^{Transp}; A^{R\&R} = A_{\Omega}^{R\&R}; A^{Verlust} = A_{\Omega}^{Verlust}; A^{Transakt} = A_{\Omega}^{Transakt}\right\}_{\Omega=\left\{A^{\Omega}, B^{\Omega}, C^{\Omega}, ..\right\}} \quad [€]$$

Die Angaben bzw. Kosten umfassen die gesamte Projektzeit $\left(t_a^{Proj} \le t \le t_e^{Proj}\right)$:

A^{Fix} = Aufsichts- bzw. Allgemeinkosten

$A_{\Omega,Proj}^{Rüst}$ = Kosten für die projektspezifische Vorbereitung des Systems wie z. B. Aufbau, Montage etc.

$A_{\Omega,Proj}^{AVS/Miete}$ = Interner AVS oder externer Mietsatz pro Einsatz oder pro Vorhaltezeit

A_{Ω}^{Plan} = Kosten der spezifischen AVOR-Leistungen

A_{Ω}^{Transp} = Transportkosten zur und von der Baustelle

$A_{\Omega}^{R\&R}$ = Revisions- und Reparaturkosten

$A_{\Omega}^{Transakt}$ = Transaktionskosten bei Marktbezug der Produktionssysteme (Anbahnung, Vereinbarung, Kontrolle etc.)

$A_{\Omega}^{Betrieb}$ = Betriebskosten der Produktionseinrichtung bezogen auf die Betriebszeit oder auf Flächeneinheiten

$A_{\Omega}^{Verlust}$ = Kosten für beschädigtes Gerät/Bauhilfsmaterialien

3.2 Entscheidungsfindung für das projektspezifische Produktionssystem

Die Auswahl des kostengünstigsten Bauproduktionsprozesses bzw. Bauproduktionssystems für das jeweilige Projekt bzw. Projektcluster erfolgt mittels ökonomischen Minimalprinzips des statischen Wirtschaftlichkeitsvergleichs (kurze Projektzeit/Kostenkalkulation) indem alle Prozessvarianten χ_δ mit den dazugehörigen Bauverfahrensvarianten χ_ϑ, die die technischen und projektspezifischen sowie umweltspezifischen Bedingungen erfüllen, wie folgt auf die Wirtschaftlichkeit hin untersucht werden:

$$C_{\Omega_{\min}}^{Proj} = \left\{ C_{\Omega_{\min}}^{Proj} \middle| C_{\Omega_{\min}}^{Proj} = Min\left(\sum_{\varepsilon} A_{\Omega,(\chi\vartheta,\chi\delta)}^{\varepsilon}\Big|_{\chi\vartheta=1}^{m_\vartheta}\Bigg|_{\chi\delta=1}^{m_\delta} \right)\Bigg|_{t_B^{Proj}}^{t_e^{Proj}} \right. \quad mit\ \varepsilon = \left\{ \varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix} Rüst \\ AVS/Miete \\ Betrieb \end{bmatrix} \right\} \Bigg\}$$

Damit wird das Projekt P mit dem Produktionssystem und Bauproduktionsprozess ausgeführt, das die minimalen Gesamtkosten erzeugt.
Als Produktionssystem $\Omega_{\min}$ wird das System mit den niedrigsten Kosten für das Projekt P definiert.
Somit gilt:

$$P(\Omega_{\min}) = \left\{ P(\Omega_{\min}) \middle| P(\Omega_{\min}) = P\left(\Omega_{\min} = \Omega_{\min}^{P}\right)^{P=\{A,B,C...\}} \right. \quad mit\ \Omega_{\min} \underset{def}{=} \left\{A^*, B^*, C^* ...\right\}\ folgt \quad \left(\left(P = A \to \Omega_{\min} = A^*\left(\omega^{\delta,\vartheta}\right) = A^*\right) \vee \left(P = B \to \Omega_{\min} = B^*\left(\omega^{\delta,\vartheta}\right) = B^*\right) \vee \left(P = C \to \Omega_{\min} = C^*\left(\omega^{\delta,\vartheta}\right) = C^*\right) \vee ...\right) \Big\}^{Proj}$$

Dies führt gleichzeitig zu den kostengünstigsten Produktionsprozessen B in den Projekten P:

$$B(\Phi, \Omega_{\min})^{P=\{A,B,C,...\}} = \left\{ B\left(\Phi, A^*\right)^{P=A} ; B\left(\Phi, B^*\right)^{P=B} ; ... \right\}^{Proj}$$

3.3 Ausgaben- bzw. Kostenanalyse für projektgruppenspezifische Produktionssysteme

Für die Analyse der unternehmerischen Bereitstellungsvarianten (Besitz/Miete) ist es erforderlich, eine projektspezifische Gliederung der Produktionseinrichtungen nach Projektcluster der SGF bzw. SGE retrospektiv wie auch prospektiv durchzuführen. Diese Gliederung erfolgt in produktionstechnisch analogen Projektclustern $P = \{A,B,C...\}$ nach Umsatz und Produktionsleistung, die durch Bauproduktionsprozesse $\{B(\Phi, \Omega)\}$ mit den Produktionssystemen $\Omega = \{A^\Omega, B^\Omega, C^\Omega ...\}$ hergestellt werden können.

Für die projektclusterspezifische Systemauswahl werden die statische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und das ökonomische Minimalprinzip herangezogen.

Die inhaltliche und zeitliche Systemabgrenzung wird wie folgt durchgeführt:

- Bildung von Projektclustern $P = \{A,B,C...\}$ nach bauproduktionsprozess- $\{B(\Phi, \Omega)\}$ und produktionstechnischen $\Omega = \Omega(P) = \{A^\Omega, B^\Omega, C^\Omega ...\}$ Gesichtspunkten
- Auswahl des Projekthauptclusters $P = A$ oder mehrerer Projekthauptcluster nach dem Pareto-Prinzip (A-B-C-Analyse)
- statische Wirtschaftlichkeitsanalyse des oder der Hauptprojektcluster nach dem Kostenminimalprinzip
- Aus retrospektivem Umsatz, Vorhaltemengen, Hauptleistungsmengen und Auslastungsgrad in Bezug zu produktionstechnisch bedingten Projektgruppen werden über die vergangenen n_a-Jahre Referenzindizes/-paramter gebildet [1].
- Aufgrund der prospektiven Umsatzprognosen über den Betrachtungszeitraum n_{ND} werden mittels der Referenzindizes der retrospektiven Betrachtung die zukünftigen Leistungs- und Vorhaltemengen ermittelt [1].
- Zur Systemanalyse verschiedener Produktionssysteme $\Omega = \Omega(P) = \{A^\Omega, B^\Omega, C^\Omega ...\}$ für die spezifischen Projektcluster $P = \{A,B,C...\}$ werden die Jahresmittelwerte der Ausgaben bzw. Kosten über den Prognosezeitraum gebildet und im Zahlungsstrom berücksichtigt [1].

Die Projekte werden nach folgenden produktionsspezifischen Kriterien in Projektcluster $P = \{A,B,C...\}$ geordnet:

- Konstruktionscharakteristiken der Projekte
- Gleichartige Bauproduktionsprozesse $\{B\}$ für die Projektcluster
- Gleichartige Ressourcen bzw. Produktionssysteme $\{\Omega\}$ für die Projektcluster

  z. B.: A: Hochbauten mit offener Aussenfassade, hergestellt mit großflächigen Schaltischen

  B: Hochbauten mit geschlossener Fensterfassade, hergestellt mit kleinrastiger Kassettenschalung

Das bedeutet, dass die Projektcluster nach Bauprozessen und Produktionssystemen geordnet werden. Daraus ergibt sich folgende Zuordnung für die Bauprozesse:

$$\left\{\underline{B(\Phi,\Omega)}\right\}^{P=\{A,B,C...\}} = \left\{\underline{B(\Phi,\Omega)^{P=A}}; \underline{B(\Phi,\Omega)^{P=B}}; \underline{B(\Phi,\Omega)^{P=C}}; ...\right\}$$

Bauproduktionsmittelmatrix:

$$\{\underline{\Omega}\}^{P=\{A,B,C...\}} = \left(\underline{\omega^{\delta,\vartheta}}\right)^{P=\{A,B,C...\}} = \left\{\underline{\Omega^P_{\chi\delta}}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_P}\right\}^{P=\{A,B,C...\}} =$$
$$= \left\{\underline{\Omega^A_{\chi\delta}}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_A}; \underline{\Omega^B_{\chi\delta}}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_B}; ...\right\}$$

$$\{\underline{\Omega}\}^{P=\{A,B,C...\}} = \left\{\underline{\Omega^P_{\chi P}}\Big|_{\chi P=1}^{m_P}\right\}^{P=\{A,B,C...\}} \underset{def}{=}$$
$$\underset{def}{=} \left\{A^\Omega; B^\Omega; C^\Omega ...\right\}^{P=\{A,B,C...\}}$$

Somit können die Bauproduktionsprozesse für die Projektcluster $P = \{A,B,C...\}$ durch die Zuordnung der spezifischen Produktionsmittel wie folgt dargestellt werden:

$$\underline{B(\Phi,\Omega)}^{P=A} = \left\{\underline{B^{P=A}_{\chi\delta}\left(\Phi,\Omega^A\right)}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_A}\right\} = \left\{\underline{B^{P=A}_{\chi\delta}\left(\Phi,A^\Omega\right)}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_A}\right\}$$
$$\underline{B(\Phi,\Omega)}^{P=B} = \left\{\underline{B^{P=B}_{\chi\delta}\left(\Phi,\Omega^B\right)}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_B}\right\} = \left\{\underline{B^{P=B}_{\chi\delta}\left(\Phi,B^\Omega\right)}\Big|_{\chi\delta=1}^{m_B}\right\}$$
$$\underline{B(\Phi,\Omega)}^{P=C} = ...$$

Die projektgruppenspezifische statische Wirtschaftlichkeitsanalyse für den Projektcluster erfolgt analog zur projektspezifischen Analyse. Das bedeutet, dass für jeden Projektcluster $P = \{A,B,C...\}$ aus den möglichen Bauproduktionsprozessen der optimale Bauproduktionsprozess $B = B(P) = \{B^A, B^B, B^C ...\}$ mit dem optimalen Produktionssystem $\Omega = \Omega(P) = \{A^\Omega, B^\Omega, C^\Omega ...\}$ aus dem Gesamtumfang der Produktionssysteme wie folgt für die Mietanalyse ermittelt wird:

$$C_{\Omega_{\min}}^{P=\{A,B,C,...\}} =$$
$$= \left\{C_{\Omega_{\min}}^{P=\{A,B,C,...\}} \middle| C_{\Omega_{\min}}^{P=\{A,B,C,...\}} = Min \sum_{\eta_P=1}^{m_\eta} \sum_{\varepsilon} A_{\Omega,(\chi_\vartheta,\eta_\delta);\eta_P}^{\varepsilon,P=\{A,B,C,...\}} \Big|_{\chi_\vartheta=1}^{m_\vartheta} \Big|_{\chi_\delta=1}^{m_\delta}\right.$$
$$mit\ \varepsilon = \left\{\varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix} Rüst \\ AVS/Miete \\ Betrieb \end{bmatrix}\right\} \wedge m_\eta = \left\{\left\{m_\eta \middle| m_\eta = \begin{bmatrix} m_A \\ m_B \\ ... \end{bmatrix}\right\}\right\}_{t_B}^{t_e}$$

Diese Berechnung wird für jeden Projektcluster $P = \{A,B,C...\}$ unter Berücksichtigung der Projektanzahl m_η im prospektiven Zeitintervall $\{t_B \le t \le t_e\}$ durchgeführt.

Damit erhält man für jeden Projektcluster P das optimale Produktionssystem Ω^* aus den möglichen Produktionssystemvarianten $\Omega(P)$ sowie den optimalen Bauproduktionsprozess B^* aus den Varianten $B(P)$. Somit gilt:

$$P(\Omega_{\min}) = \left\{P = A \to \Omega_{\min} = A^*; P = B \to \Omega_{\min} = B^* ...\right\}$$

sowie

$$B(\Phi,\Omega_{\min}) = \left\{B\left(\Phi,A^*\right)^{P=A}; B\left(\Phi,B^*\right)^{P=B}; ...\right\}$$

Die Eingangsgrößen werden wie folgt ermittelt:

- Rüstkosten

  Rüstkosten bzw. -ausgaben für (Vor-)Montage und Demontage von Produktionseinrichtungen (z. B.: Vormontage einer Tunnelbohrmaschine auf der Baustelle, Rüsten von Deckentischen auf dem Werkhof) ergeben sich wie folgt über die Prognosezeit $\{t_B \leq t \leq t_e\}$ zu:

$$A_{\Omega}^{Rüst}\Big|_{t=1}^{n_{ND}} = \left\{ A_{\Omega}^{Rüst} \Big| A_{\Omega}^{Rüst} = m_{\Omega} \cdot a_{Rüst} \neq 0 \text{ für notwendige Vor- und Demontage von Produktionseinrichtungen} \right.$$

$$\left. \vee A_{\Omega}^{Rüst} = 0 \Rightarrow \text{für Produktionseinrichtungen ohne Vor- und Demontage} \right\}\Big|_{t=1}^{n_{ND}}$$

Somit ergeben sich die mittleren jährlichen Rüstkosten (Erwartungswert) zu:

$$A_{\Omega,m}^{Rüst} = \frac{A_{\Omega}^{Rüst}}{n_{ND}}$$

- Mietkosten

Mietkosten bzw. -ausgaben ergeben sich extern aus Marktpreisen oder setzen sich intern aus Abschreibung, Verzinsung und Stationierung (AVS) zusammen und ergeben sich aus der Anzahl m_η der Projekte und der Projektlaufzeit t_{Proj} über die Prognosezeit $\{t_B \leq t \leq t_e\}$ zu:

Mietkosten oder AVS für Bauhilfsmaterialien $\Omega = BH$:

$$A_{\Omega=BH}^{Miete}\Big|_{t_B}^{t_e} = \sum_{\eta=1}^{m_\eta} F_{\Omega,\eta}^{Vorh} \cdot T_{\Omega,\eta}^{Vorh} \cdot a_{\Omega}^{Miete}\Big|_{\Omega=BH}\Big|_{t_B}^{t_e}$$

Mietkosten oder AVS für Geräte und Anlagen $\Omega = G$:

$$A_{\Omega=G}^{Miete}\Big|_{t_B}^{t_e} = \sum_{\eta=1}^{m_\eta} T_{\Omega,\eta}^{Vorh} \cdot a_{\Omega}^{Miete}\Big|_{\Omega=G}\Big|_{t_B}^{t_e}$$

Somit ergeben sich die mittleren jährlichen Mietkosten (Erwartungswert) zu:

$$A_{\Omega,m}^{Miete}\Big|_{t=1}^{t=n_{ND}} \cong \frac{A_{\Omega}^{Miete}}{n_{ND}}$$

- Betriebskosten

Betriebskosten enthalten die Verbrauchskosten sowie die Lohnkosten zum Betrieb des Produktionssystems Ω im Produktionsprozess B über die Prognosezeit. Für die Bauhilfsmaterialien $\Omega = BH$ gilt:

$$A_{\Omega=BH}^{Betrieb}\Big|_{t_B}^{t_e} = \sum_{\eta=1}^{m_\eta} F_{\Omega,\eta}^{ges} \cdot a_{\Omega} \cdot a_{\Omega,Lohn}\Big|_{\Omega=BH}\Big|_{t_B}^{t_e}$$

Betriebskosten für Geräte und Anlagen $\Omega = G$ zu:

$$A_{\Omega=G}^{Betrieb}\Big|_{t_B}^{t_e} = \sum_{\eta=1}^{m_\eta} T_{\Omega,\eta}^{Betrieb} \cdot a_{\Omega,Lohn}\Big|_{\Omega=G}\Big|_{t_B}^{t_e}$$

Somit ergeben sich die mittleren jährlichen Betriebskosten zu:

$$A_{\Omega,m}^{Betrieb} = \frac{A_{\Omega}^{Betrieb}}{n_{ND}}$$

Legende:

m_Ω	= Anzahl der Montage- und Demontagevorgänge von Geräten oder Bauhilfsmaterial der Gruppe im Zeitraum $n_{ND} = \{t_B \leq t \leq t_e\}$
$a_{Rüst}$	= Fixrüstkosten pro Montage- und Demontagevorgang
$F_{\Omega,\eta}^{ges}$	= Gesamte Schalfläche oder Wandflächen bei Bauhilfsmaterialien Ω (pro Projekt η oder pro Jahr t)
$F_{\Omega,\eta}^{Vorh}$	= Fläche an vorgehaltenem Bauhilfsmaterial Ω (pro Projekt η oder pro Jahr t)
$T_{\Omega,\eta}^{Vorh}$	= Vorhaltedauer von Bauhilfsmaterial Ω (pro Projekt j oder pro Jahr t)
a_{BH}^{Miete}	= Mietsatz für Bauhilfsmaterial (pro Flächeneinheit und Zeit)
a_{G}^{Miete}	= Gerätemiete pro Zeiteinheit
a_Ω	= Aufwandswert bei Bauhilfsmaterial [z. B. m²/h]
$a_{\Omega,\text{Lohn}}$	= Gruppenlohnansatz
η	= Projektlaufindex im prospektiven Zeitintervall $\{t_B \leq t \leq t_e\}$
m_η	= Anzahl der Projekte im Zeitraum $\{t_B \leq t \leq t_e\}$
n_{ND}	= Betrachtungs- bzw. Nutzungszeitraum

Damit erhält man die projektgruppenspezifische Systementscheidung $\Omega = \Omega(P) = \{A^*, B^*, C^* \ldots\}$ für den jeweiligen Projektcluster $P = \{A,B,C\ldots\}$. Auf dieser Entscheidungsgrundlage erfolgt die Miet-Besitzmodellanalyse.

4 Unternehmensebene – Miet- oder Besitzmodelle

Ein Wirtschaftlichkeitsvergleich zwischen Miet- und unterschiedlichen Besitzmodellen kann nur dann vollzogen werden, wenn die projektclusterorientierte Systemauswahl stattgefunden hat.
Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ist somit zweimal durchzuführen, einmal für die Systemselektion auf Projektebene bzw. Projektclusterebene mit den projektgruppenspezifischen Bedingungen und zum Anderen für die Miet- oder Besitzmodellentscheidung aus Unternehmens- bzw. Werkhofsicht (Unternehmensebene).
Daher ist es erforderlich, vorher die projektgruppenspezifische Systementscheidung $\Omega = \Omega(P) = \{A^*, B^*, C^* \ldots\}$ nach dem ökonomischen Minimalprinzip für die produktionstechnisch gegliederten Projektcluster $P = \{A,B,C\ldots\}$ durchzuführen. Für diese projektgruppenspezifische Systementscheidung $\Omega = \Omega(P) = \{A^*, B^*, C^* \ldots\}$, die für jede Projektgruppe $P = \{A,B,C\ldots\}$ das ökonomische Minimalprinzip wie folgt erfüllt

$$\left\{ P = A \rightarrow \Omega_{\min} = A^* \text{ mit } C_{\Omega_{\min}=A^*}^{P=A} = Min\left\{C_{\Omega}^{P=A}\right\}_{\Omega=\{A^\Omega, B^\Omega, C^\Omega \ldots\}} \right.$$

$$\wedge\, P = B \rightarrow \Omega_{\min} = B^* \text{ mit } C_{\Omega_{\min}=A^*}^{P=B} = Min\left\{C_{\Omega}^{P=B}\right\}_{\Omega=\{A^\Omega, B^\Omega, C^\Omega \ldots\}}$$

$$\wedge\, P = C \rightarrow \Omega_{\min} = C^* \text{ mit } C_{\Omega_{\min}=A^*}^{P=C} = Min\left\{C_{\Omega}^{P=C}\right\}_{\Omega=\{A^\Omega, B^\Omega, C^\Omega \ldots\}}$$

$$\left. \wedge\, P = \ldots \right\}$$

wird jetzt geprüft, ob das Miet- oder Besitzmodell die gesamtunternehmerisch wirtschaftlichste Lösung ist.
Die Entscheidung darüber, welche Variante die wirtschaftlichere ist, erfolgt durch den anschließenden Vergleich der alternativen Bereitstellungsvarianten durch Anwendung des ökonomischen Minimalprinzips mittels des Net-Present-Value-Differenzaxiom [5] aufgrund der Langfristigkeit der Entscheidung.
Die Ausgaben und sekundären Einnahmen fallen in den definierten Zeitspannen immer an. Daher müssen bei der Net-Present-Value-Differenzmethode die Ausgaben und Einnahmen obligatorisch berücksichtigt werden gemäß den Ansätzen:

- jährlich
- einmalig in einer bestimmten Zeitspanne
- einmalig

4.1 Mietmodell – Berechnung des Miet-NPV

Zur Ermittlung des gegenwärtigen Gesamtwertes der im Prognosezeitraum anfallenden Zahlungsströme in der SGE = {S} wird die NPV-Methode auf der Basis von primären Ausgaben angewendet weil der Nutzen durch die Auftraggebervorgaben gegeben ist.
Dazu werden die Zahlungsströme für den zukünftigen Einsatz der kostengünstigsten projekt-gruppenspezifischen Produktionssysteme $\Omega = \Omega(P) = \{A^*, B^*, C^* \ldots\}$, die in der SGE = {S} gemietet werden, berücksichtigt.
Die Ausgaben bei Mietsystemen fallen projektbezogen an und sind variabel bezogen auf die Nutzungszeiten bzw. ihren Einsatz oder fix aufgrund des einmaligen Auftretens (Fix- und Zusatzkosten). Als Voraussetzung für die Berechnung des NPV sind deshalb zunächst sämtliche Zahlungsströme in jährliche Größen zu transformieren.
Da bei dem Miet- als auch bei dem Besitzmodell der gleiche Nutzen entsteht (z. B. Herstellung einer Stahlbetondecke nach klar definierten Spezifikationen) werden nur die Cash-Drains bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt. Dafür werden die Cash-Drains als jährliche projektspezifische Miet-Zahlungsströme für die jeweiligen optimalen Produktionssysteme $\Omega = \Omega(P) = \{A^*, B^*, C^* \ldots\}$ je Projektcluster $P = \{A,B,C \ldots\}$ gebildet. Damit gilt das ökonomische Minimalprinzip.

<u>Miet-Cash-Drains</u>
Die Cash-Drains für Produktionsmittel wie Inventar und Bauhilfsmaterialien zur Entscheidung für Besitz- oder Mietmodell kann auf dem folgenden Aggregations- bzw. Differenzierungsstufen erfolgen:

- aggregiert auf die generelle Vorhaltung bzw. Bereitstellung aller Produktionssysteme
- differenziert für die verschiedenen projektgruppenspezifischen Produktionssysteme und deren Anteile an der Gesamtbereitstellung

<u>Mietmodell</u>
Mietbedingung:

$$\Big\{\Omega_{\min} = A^* \rightarrow P = A \wedge \Omega_{\min} = B^* \rightarrow P = B \wedge \\ \wedge \Omega_{\min} = C^* \rightarrow P = C \wedge \ldots\Big\}^{\{S\}}$$

bedeutet, dass für jedes Projekt das optimale und kostengünstigste Produktionssystem verwendet wird.

Miet-Cash-Drain – Gesamtbetrachtung:

$$C_t^M = \Big(A_{ges,t}^{M,Fix} + A_{ges,t}^{M,Miete} + A_{ges,t}^{M,Plan} + A_{ges,t}^{M,Transp} \\ + A_{ges,t}^{M,R\&R} + A_{ges,t}^{M,Verlust} + A_{ges,t}^{M,Transakt}\Big)^{\{S\}}$$

Miet-Cash-Drain der verschiedenen Projektcluster $P = \{A,B,C \ldots\}$ mit den zugeordneten Produktionsmitteln $\Omega(P) = \{A^\Omega, B^\Omega, C^\Omega \ldots\}$ zum Zeitpunkt t:

$$C_t^M = \sum_{P(\Omega)=A}^{\{B,C,\ldots\}} \sum_{\eta_{P(\Omega)}=1}^{\eta_{P,t}} \Big(A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Fix} + A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Miete} + A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Plan} + \\ + A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Transp} + A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,R\&R} + A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Verlust} + A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Transakt} \Big)^{\{S\}}$$

$$C_t^M = \sum_{P(\Omega)=A}^{\{B,C,\ldots\}} \sum_{\eta_{P(\Omega)}=1}^{\eta_{P,t}} \sum_{\varepsilon} \left\{ A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,\varepsilon} \right.$$

$$mit\ \varepsilon = \left\{ \varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix} Fix \\ Miete \\ Plan \\ Transp \\ R\&R \\ Verlust \\ Transakt \end{bmatrix} \right\} \wedge \eta_{P,t} = \left\{ \eta_{P,t} \middle| \eta_{P,t} = \begin{bmatrix} \eta_{A,t} \\ \eta_{B,t} \\ \eta_{C,t} \\ . \\ . \\ . \\ . \end{bmatrix} \right\}^{\{S\}}$$

Zuordnung der optimalen, kostengünstigsten Produktionsprozesse und Produktionssysteme zu dem Projektcluster:

$$P\{\Omega\} = \Big\{A\big(\eta_A; \Omega_{\min} = A^*\big) \wedge B\big(\eta_B; \Omega_{\min} = B^*\big) \wedge \\ \wedge C\big(\eta_C; \Omega_{\min} = C^*\big) \wedge \ldots\Big\}$$

$\eta_{P,t} = \left\{\eta_{P,t} \middle| \eta_{P,t} = \eta_{A,t}; \eta_{P,t} = \eta_{B,t}; \ldots\right\}_t$ Anzahl der Projekte im Jahr t im jeweiligen Projektcluster

Zeitabhängige Mietausgaben pro Jahr t für die Geräte und Bauhilfsmaterialien $\Omega = \left\{n_\tau \cdot \omega_\tau^i\right\}$ im Projektcluster $P(\Omega)$ pro Projekt $\eta_{P(\Omega)}$:

$$A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Miete} = \sum_i \sum_\tau \left(n_\tau \cdot \omega_\tau^i\right)_{\Omega,t} \cdot T_{P(\Omega),\eta_{P(\Omega)},t}^{Vorh,i,\tau} \cdot a_{i,\tau}^{Miete} \Bigg|_{\substack{i=Geräteart \\ \tau=Gerätetyp}}^{\{S\}}$$

$A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Miete}$	=	Mietausgaben im Projektcluster $P(\Omega)$ pro Projekt $\eta_{P,t}$ für die n_τ Geräte ω_τ^i der Geräteart i und Gerätetyp τ im Jahr t
i	=	Geräteart z. B. Bagger, Lader, LKW
τ	=	Gerätetyp (welcher Bagger, Leistung …)
$T_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{Vorh,i,\tau}$	=	Vorhaltedauer der Geräteart i und Gerätetyp τ im Projektcluster $P(\Omega)$ des Projektes $\eta_{P(\Omega)}$ im Jahr t
$a_{i,\tau}^{Miete}$	=	Mietkosten der Gerätart i und Gerätetyp τ pro Zeiteinheit

n_{τ} = Anzahl der Geräte
ω_{τ}^{i} = Ressource/Gerät der Geräteart i und Gerätetyp τ
$\{S\}$ = SGE

Die jährlich einmaligen projektabhängigen Ausgaben werden wie folgt prognostiziert:
1. Ermittlung der retrospektiven einmaligen Kosten pro Umsatz. Diese Kosten erhält man durch Summieren aller einmaligen Kosten je Projektcluster dividiert durch die Summe des jährlichen Umsatzes über den Zeitraum $\{t_B - n_a \leq t \leq t_B\}$:

$$a^{\varepsilon}_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),m} = \left\{ \frac{\sum_{\eta_{P(\Omega)}=1}^{\eta_P} A^{\varepsilon}_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega)} \Big|_{t=t_B}^{t=t_B-n_a}}{\sum_{t=t_B}^{t_B-n_a} U_t^{\{S\}}} \right.$$

$$\text{mit } \varepsilon = \left\{ \varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix} Fix \\ Plan \\ Transp \\ R\&R \\ Verlust \\ Transakt \end{bmatrix} \right\} \wedge P(\Omega) = \left\{ P(\Omega) \middle| P(\Omega) = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ . \\ .. \\ . \end{bmatrix} \right\} \wedge$$

$$\wedge \eta_{P(\Omega)} = \left\{ \eta_{P(\Omega)} \middle| \eta_{P(\Omega)} = \begin{bmatrix} \eta_A \\ \eta_B \\ \eta_C \\ . \\ .. \\ . \end{bmatrix}_{t_B}^{t_B-n_a} \right\} \wedge \eta = \left\{ \sum_{\xi=A}^{\{B,C,\ldots\}} \eta_{\xi} \right\}$$

2. Ermittlung der prospektiven einmaligen Kosten bezogen auf den jährlichen Umsatz der SGE im projektspezifischen Cluster $P(\Omega)$:

$$A^{M,\varepsilon}_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t} = U_t^{\{S\}} \cdot a^{\varepsilon}_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),m} \Big|^{\{S\}}$$

Die Betriebs- und Lohnkosten werden weder beim Miet- noch beim Besitzmodell berücksichtigt, da beim gleichen Produktionssystem $\Omega_{\min} = A^*$ beim Besitz- und Mietmodell im Projektcluster $P = A$ die gleichen Kosten auftreten und sich beim Vergleich aufheben. Jedoch werden sogenannte Ineffizienzkosten $\left(\Delta A_{\Omega}^{B,\,Ineff}\right)$ beim Besitzmodell angenommen, wenn für die Projektcluster $P = \{B,C\ldots\}$ das Produktionssystem $\Omega = A^*$ angewendet wird und nicht die optimalen $\Omega = B^*$ für $P = B$ sowie $\Omega = C^*$ für $P = C$ usw.
Berechnung des Miet-NVP's über die Systemnutzungsdauer $n_{ND,min}$ oder den festgelegten Betrachtungszeitraum n_{ND} der in der SGE $\{S\}$ betrachteten Produktionssysteme $\Omega = \Omega(P) = \{A^*, B^*, C^* \ldots\}$, die projektclusterspezifisch $P = \{A,B,C\ldots\}$ eingesetzt werden:

$$NPV_{t_B}^{M} = \sum_{t=t_B}^{t_e=t_B+n_{ND}} \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}} \sum_{P(\Omega)=A}^{\{B,C,..\}} \sum_{\eta_{P(\Omega)}=1}^{\eta_{P,t}} \sum_{\varepsilon} \cdot \left\{ A^{M,\varepsilon}_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t} \right.$$

$$\text{mit } \varepsilon = \left\{ \varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix} Fix \\ Miete \\ Plan \\ Transp \\ R\&R \\ Verlust \\ Transakt \end{bmatrix} \right\} \wedge \eta_{P,t} = \left\{ \eta_{P,t} \middle| \eta_{P,t} = \begin{bmatrix} \eta_{A,t} \\ \eta_{B,t} \\ \eta_{C,t} \\ . \\ . \\ . \\ . \end{bmatrix}^{\{S\}} \right\}$$

mit

$P\{\Omega\} = \{A\,(\eta_A;\ \Omega_{\min} = A^*) \wedge B\,(\eta_B;\ \Omega_{\min} = B^*) \wedge$
$\wedge\ C\,(\eta_C;\ \Omega_{\min} = C^*) \wedge \ldots\}$

$\eta_{A,t}$ = Anzahl der Projekte A im Jahr t (analog: $\eta_{B,t}$; $\eta_{C,t}$; …)
A^* = optimales und kostengünstigstes Produktionssystem Ω für den Projektcluster A (analog B^*; C^*; …)

Zusammenfassung:
Bei der Miete wird davon ausgegangen, dass für jedes Projekt das wirtschaftlichste Produktionssystem in Bezug auf minimale Herstellkosten verwendet wird, also mit den geringsten Aufwandswerten wie dies bereits bei der projektspezifischen Systemwahl vorgestellt wurde.

4.2 Besitzmodell – Berechnung des Besitz-NPV

Beim Besitzmodell wird man sich meist auf einige wenige bestimmte Produktionssysteme für alle Projekttypen $P = \{A,B,C\ldots\}$ festlegen. Das bedeutet, das man sich für den Projekttyp mit dem höchsten Umsatz bzw. größten Produktionsmengen nach dem Pareto-Prinzip entscheidet und das optimale kostengünstigste Produktionssystem $\Omega = A$ wählt, welches die geringsten Rohbaukosten (Fix- und Variablekosten) verursacht. Das Minimalprinzip umfasst dann:

- die Investitionsausgaben sowie die Ausgaben für Instandhaltung und Instandsetzung
- die Lohn- und Inventarausgaben für den Betrieb der Produktionseinrichtung

Wenn man sich z. B. für das optimale Schalungssystem $\Omega = A^*$ für den Projekttyp $P = A$ im Besitzmodell entscheidet, werden möglicherweise die Aufwandswerte zum Aufstellen und Umsetzen der Schalung bei den Projekttypen $P = \{B,C\ldots\}$ höher ausfallen [6]. Die höheren Aufwandswerte kann man auch als Differenzaufwandswerte zu den optimalen Schalungssystemen $\Omega = \{B^*,C^*\ldots\}$ betrachten, die bei den Projekttypen $P = \{B,C\ldots\}$ zum Minimalprinzip führten.
Die zusätzlichen Ausgaben für die Differenzaufwandswerte (Ineffizienzausgaben) für die Projekttypen $P = \{B,C\ldots\}$ ergeben sich z. B. für Schalungssysteme $\Omega = A^*$ aus dem Produkt aus Differenzaufwandswert $\Delta a^{A^*}_{\Omega,e,a}$ (e = Einschalen; a = Ausschalen), Schalfläche $F^{Sch}_{\Omega,t}$ und Mittellohn a_{Lohn}.

Ineffizienzausgaben für suboptimale Projektschalung im Rahmen des Besitzmodells:

$$\left(\underline{\Delta A_t^{B,Ineff}}\right)_{P=\{B,C..\}} = \begin{bmatrix}\Delta A_{B,t}^{Ineff}\\ \Delta A_{C,t}^{Ineff}\\ .\\ .\\ \Delta A_{...,t}^{Ineff}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\Delta a_{B,e,a}^{A^*}\\ \Delta a_{C,e,a}^{A^*}\\ .\\ .\\ \Delta a_{...,e,a}^{A^*}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}F_{B,t}^{Sch}\\ F_{C,t}^{Sch}\\ .\\ .\\ F_{...,t}^{Sch}\end{bmatrix}\cdot a_{Lohn}$$

$$\left(\underline{\Delta A_t^{B,Ineff}}\right)_{P=\{B,C..\}} = \left(\underline{\Delta a^{A^*}_{\{B,C...\},e,a}}\right)\cdot\left(\underline{F^{Sch}_{\{B,C...\},t}}\right)\cdot a_{Lohn}$$

Dies trifft auch für Produktionsgeräte zu, die z. B. eine geringere Leistung erbringen und damit höhere Kosten erzeugen als die projektspezifisch optimalen Geräte bzw. Gerätegruppen. Wenn Produktionsgeräte $\Omega = A^*$, die im Projektcluster $P = A$ optimale Leistungen und geringste Kosten erzeugen, in anderen Projektclustern $P = \{B,C\ ...\}$ eingesetzt werden, werden Ineffizienzkosten $\Delta A^{B,Ineff}_{t;P=\{B,C...\}}$ gegenüber den optimalen Geräten $\Omega = \{B^*,C^*...\}$ für die Projekte erzeugt.

Somit gilt:

$$\Delta A^{B,Ineff}_{t;P=\{B,C...\}} = \left\{ \Delta A^{B,Ineff}_{t;P=\{B,C...\}} \middle| \Delta A^{B,Ineff}_{t;P=\{B,C...\}} = \sum_{P=B}^{\{C,D..\}} \left(A_t^{Betrieb,P}\left(\Omega\left(A^*\right)\right) - A_t^{Betrieb,P}\left(\Omega\ \left(P\right)\right)\right)\right\}\Bigg|_{\substack{P=\{B,C...\}\\ \Omega(P)=\{B^*,C^*...\}}}$$

mit:

$$A_t^{Betrieb,P}\left(\Omega\left(A^*\right)\right) \rightarrow \left\{P=A\rightarrow\Omega_{\min}=A^* \wedge P=B\rightarrow\Omega=A^* \wedge P=C\rightarrow\Omega=A^*...\right\}$$

$$A_t^{Betrieb,P}\left(\Omega\ \left(P\right)\right) \rightarrow \left\{P=A\rightarrow\Omega_{\min}=A^*\wedge P=B\rightarrow\Omega_{\min}=B^* \wedge P=C\rightarrow\Omega_{\min}=C^*...\right\}$$

$\Omega\,(P)$ = Bauproduktionseinrichtungen $\{B^*,C^*...\}$
P = Projektcluster $\{B,C\ ...\}$

Die projektabhängigen jährlichen Besitzausgaben werden analog zu den projektabhängigen jährlichen Mietausgaben ermittelt.

$$A^{B,\varepsilon}_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t} = U_t^{\{S\}}\cdot a^{\varepsilon}_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),m}\Bigg|^{\{S\}} \quad mit\ \varepsilon = \left\{\varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix}Plan\\Rüst\\Transp\\R\&R\\Verlust\end{bmatrix}^B\right\}$$

Die Lagerungskosten für das gekaufte System werden wie folgt berechnet:

$$A^{B,Lager}_{A,t} = \sum\left(n_\tau\omega_\tau^i\right)\cdot a_t^{Miete\ Lager}$$

Es wird davon ausgegangen, dass die allgemeinen technischen Installationen für die Baustelleneinrichtung für die verschiedenen Produktionssysteme identisch sind. Damit erhält man für das Besitzmodell den jährlichen Cash-Drain unter Beachtung folgender Besitzbedingung:

$$\left\{\Omega_{\min}=A^*\rightarrow P=A \wedge \Omega=A^*\rightarrow P=B\wedge\Omega=A^*\rightarrow P=C...\right\}$$

Das heißt z. B. dass ein Produktionssystem $\Omega = A^*$ (z. B. Schalungssystem) in allen produktionsspezifischen Projektclustern $P = \{A,B,C...\}$ eingesetzt wird. Dadurch entstehen, außer im Projektcluster $P = A$ mit $\Omega_{\min} = A^*$, in allen anderen Projektclustern $P = \{B,C...\}$ die mit $\Omega = A^*$ hergestellt werden Mehraufwendungen gegenüber dem projektgruppenspezifischen Produktionsgeräten. Diese Mehraufwendungen werden als Ineffizienzkosten in der SGE = $\{S\}$ berücksichtigt.

<u>Besitz-Cash-Drain über alle Produktionseinrichtungen:</u>

$$C_t^B = \left(A^{B,Plan}_{ges,t} + A^{B,Rüst}_{ges,t} + A^{B,Transp}_{ges,t} + A^{B,R\&R}_{ges,t} + A^{B,Verlust}_{ges,t} + A^{B,Lager}_{ges,t} + \Delta A^{B,Ineff}_{ges,t}\right)^{\{S\}}$$

bzw. auf das Produktionssystem $\Omega = A^*$ der SGE bezogen:

$$C_t^B = \sum_\varepsilon \left\{ \sum_{\eta_A=1}^{\eta_{A,t}} A^{B,\varepsilon}_{\eta_A,P=A,t} + \sum_{P=B}^{\{C,D,..\}}\sum_{\eta_P=1}^{\eta_{P,t}}\left(A^{B,\varepsilon}_{\eta_P,P=\{B,C,..\},t} + \Delta A^{B,Ineff}_{\eta_P,P=\{B,C,..\},t}\right) \middle| \; mit\ \eta_{P,t} = \left\{\eta_{P,t} \middle| \eta_{P,t} = \begin{bmatrix}\eta_{B,t}\\ \eta_{C,t}\\ \eta_{D,t}\\ ..\\ .\end{bmatrix}\right\} \wedge mit\ \varepsilon = \left\{\varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix}Plan\\Rüst\\Transp\\R\&R\\Verlust\\Lager\end{bmatrix}^B\right\}\right\}$$

Da man sich beim Besitzmodell für das Produktionssystem $\Omega = A^*$ entscheidet, das für die Projektgruppe des Typs $P = A$ mit dem höchsten Umsatz bzw. mit der höchsten Produktionsmenge die geringsten Ausgaben/Kosten, aber bei den Projekttypen $P = \{B,C,D...\}$ höhere Ausgaben/Kosten im Betrieb z. B. zum Ein- und Ausschalen verursacht, ergibt sich der Besitz-NPV zu:

$$NPV_{t_B}^{B} = \left\{ A_{A^*,t_B}^{B,Invest} + \sum_{t=t_B}^{t_e=t_B+n_{ND}} \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}} \cdot \sum_{\varepsilon} \left\{ \sum_{\eta_{A^*}=1}^{\eta_{A^*,t}} A_{\eta_A,P=A,t}^{B,\varepsilon} + \right.\right.$$

$$\left. + \sum_{P=B}^{\{C,D,..\}} \sum_{\eta_P=1}^{\eta_{P,t}} \left\{ \left(A_{\eta_P,P=\{B,C,..\},t}^{B,\varepsilon} + \Delta A_{\eta_P,P=\{B,C,..\},t}^{B,Ineff} \right) \right.\right.$$

$$mit\ \eta_{P,t} = \left\{ \eta_{P,t} \middle| \eta_{P,t} = \begin{bmatrix} \eta_{B,t} \\ \eta_{C,t} \\ \eta_{D,t} \\ . \\ . \\ . \end{bmatrix} \right\} \wedge mit\ \varepsilon = \left\{ \varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix} Plan \\ Rüst \\ Transp \\ R\&R \\ Verlust \\ Lager \end{bmatrix}^{B} \right\} \Bigg\} -$$

$$\left. - \frac{1}{(1+q)^{(t_e-t_B)}} E_{A^*,t_e}^{B,Rest} \right\}^{\{S\}}$$

mit

$$P\{\Omega = A^*\} = \left\{ A\left(\eta_A; \Omega_{\min} = A^*\right) \wedge B\left(\eta_B; \Omega = A^*\right) \wedge C\left(\eta_C; \Omega = A^*\right) \wedge \ldots \right\}$$

4.3 NPV – Besitz- oder Mietmodellentscheidung

Die hier betrachtete unternehmensspezifische Bereitstellung von Produktionsmittel Ω nach dem Miet- oder Besitzmodell erfolgt nach dem ökonomischen Minimalprinzip. Dazu werden die projektspezifischen Produktionsmittel Ω mit den geringsten Kosten bei gleichem Nutzen in der langjährigen unternehmerischen Bereitstellungsanalyse für die Miet- bzw. Besitzmodellentscheidung berücksichtigt.

Um zu entscheiden, ob das Besitzmodell wirtschaftlich vorteilhafter ist als das Mietmodell, kann z. B. das ökonomische **NPV-Minimalprinzip** anwendet werden [7]:

$$NPV_{t_B}^{\min} = Min\left\{ NPV_{t_B}^{\Omega,\,Miete}; NPV_{t_B}^{\Omega,Besitz} \right\}_{\{\Omega=\{A,B,C..\}\}}$$

Auch das **NPV-Differenzaxiom** kann dazu benutzt werden [7]:

$$\Delta NPV_{t_B}^{B-M} = \left\{ NPV_{t_B}^{\Omega,Besitz} - NPV_{t_B}^{\Omega,Miete} \right\}_{\{\Omega=\{A,B,C..\}\}} \overset{\geq}{<} 0$$

mit:

$\Delta NPV_{t_B}^{B-M} > 0 \quad \rightarrow$ Mietmodell ist günstiger

$\Delta NPV_{t_B}^{B-M} < 0 \quad \rightarrow$ Besitzmodell ist günstiger

Beim Mietmodell geht man davon aus, dass für jede Projektgruppe $P = \{A,B,C..\}$ das technisch passende und wirtschaftlichste Produktionsmittel Ω (ökonomisches Minimalprinzip) bereitgestellt wird (Projektebene). Beim Besitzmodell werden die Produktionsmittel Ω bereitgestellt, die entweder für

- die dominierende Projektgruppe der SGE $P = \{A\}$ oder
- für alle Projektgruppen $P = \{A,B,C..\}$ der SGE

die geringsten Kosten bzw. Ausgaben verursachen. Daher gilt für das NPV-Differenzaxiom:

$$\Delta NPV_{t_B}^{B-M} = \left\{ A_{A^*,t_B}^{B,Invest} + \sum_{t=t_B}^{t_e=t_B+n_{ND}} \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}} \cdot \sum_{\varepsilon} \left\{ \sum_{\eta_{A^*}=1}^{\eta_{A^*,t}} A_{\eta_A,P=A,t}^{B,\varepsilon} + \right.\right.$$

$$+ \sum_{P=B}^{\{C,D,..\}} \sum_{\eta_P=1}^{\eta_{P,t}} \left\{ \left(A_{\eta_P,P=\{B,C,..\},t}^{B,\varepsilon} + \Delta A_{\eta_P,P=\{B,C,..\},t}^{B,Ineff} \right) \right.$$

$$mit\ \eta_{P,t} = \left\{ \eta_{P,t} \middle| \eta_{P,t} = \begin{bmatrix} \eta_{B,t} \\ \eta_{C,t} \\ \eta_{D,t} \\ . \\ . \end{bmatrix} \right\} \wedge mit\ \varepsilon = \left\{ \varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix} Plan \\ Rüst \\ Transp \\ R\&R \\ Verlust \\ Lager \end{bmatrix}^{B} \right\} \Bigg\} -$$

$$- \frac{1}{(1+q)^{(t_e-t_B)}} E_{A^*,t_e}^{B,Rest} - \sum_{t=t_B}^{t_e=t_B+n_{ND}} \frac{1}{(1+q)^{(t_e-t_B)}}$$

$$\sum_{P(\Omega)=A}^{\{B,C,..\}} \sum_{\eta_{P(\Omega)}=1}^{\eta_{P,t}} \sum_{\varepsilon} \left\{ A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,\varepsilon}\ mit\ \varepsilon = \left\{ \varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix} Fix \\ Miete \\ Plan \\ Transp \\ R\&R \\ Verlust \\ Transakt \end{bmatrix} \right\} \wedge \right.$$

$$\left. \wedge\, \eta_{P,t} = \left\{ \eta_{P,t} \middle| \eta_{P,t} = \begin{bmatrix} \eta_{A,t} \\ \eta_{B,t} \\ \eta_{C,t} \\ . \\ . \end{bmatrix} \right\} \right\}^{\{S\}}$$

Im Folgenden werden vereinfachende Annahmen getroffen.

Die Kosten, die projektspezifisch quasi einmalig auftreten, werden heuristisch daraufhin überprüft, ob sie relativ unabhängig sind von einem alternativen

- Produktionssystem bzw.
- Bereitstellungsmodell.

Wir gehen davon aus, dass die

- AVOR- und technischen Planungsausgaben/-kosten
- Transportausgaben/-kosten
- Verlustausgaben/-kosten für Kleinmaterial und Bruch
- Reinigungs- und Reparaturausgaben

bei jedem Projekt relativ unabhängig vom alternativen Produktionssystem sowie Miet- oder Besitzmodell sind. Daher werden sich diese Ausgaben/Kosten, die von Projekt- auf Jahresausgaben/-kosten umgerechnet wurden, bei der Differenzbildung aufheben.

$$\left\{ \sum_{P} \sum_{\eta_P} A_{\eta_P,P=\{A^*,B,C,..\},t}^{B,\varepsilon} - \sum_{P(\Omega)} \sum_{\eta_{P(\Omega)}} A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega)=(A,B,C,..),t}^{M,\varepsilon} \right\} \approx 0$$

dies gilt für:

$$\varepsilon = \left\{ \varepsilon \middle| \varepsilon = \begin{bmatrix} Plan \\ Transp \\ R\&R \\ Verlust \end{bmatrix} \right\}$$

Somit wird das NPV-Differenzaxiom:

$$\Delta NPV_{t_B}^{B-M} = \left\{ A_{A,t_B}^{B,Invest} - \frac{1}{(1+q)^{(t_e-t_B)}} \cdot E_{A^*,t_e}^{B,Rest} + \right.$$

$$+ \sum_{t=t_B}^{t_e=t_B+n_{ND}} \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}} \left\{ \left(\sum_{P(A^*)=A}^{\{B,C..\}} \sum_{\eta_{P(A^*)}=1}^{\eta_{P,t}} \left(A_{\eta_{P(A^*)},P(A^*),t}^{B,Rüst} + A_{\eta_{P(A^*)},P(A^*),t}^{B,Lager} \right) + \right. \right.$$

$$\left. + \sum_{P=B}^{\{C,D,..\}} \sum_{\eta_P=1}^{\eta_{P,t}} \Delta A_{\eta_P,P=\{B,C,..\},t}^{B,Ineff} \right) -$$

$$- \sum_{t=t_B}^{t_e=t_B-n_{ND}} \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}} \cdot \sum_{P(\Omega)=A}^{\{B,C..\}} \sum_{\eta_{P(\Omega)}=1}^{\eta_{P,t}} \left(A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Fix} + A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Miete} + A_{\eta_{P(\Omega)},P(\Omega),t}^{M,Transakt} \right)$$

$$mit\ \eta_{P,t} = \left\{ \eta_{P,t} \middle| \eta_{P,t} = \begin{bmatrix} \eta_{A,t} \\ \eta_{B,t} \\ \eta_{C,t} \\ . \\ . \end{bmatrix} \right\} \Bigg\}$$

$$\left. \begin{array}{l} mit\ P(A^*) = P(\Omega = A^*) = \left\{ A(\eta_A; \Omega_{\min} = A^*) \wedge B(\eta_B; \Omega = A^*) \wedge C(\eta_C; \Omega = A^*) \wedge \ldots \right\}^B \\ \wedge mit\ P(\Omega) = \left\{ A(\eta_A; \Omega_{\min} = A^*) \wedge B(\eta_B; \Omega_{\min} = B^*) \wedge C(\eta_C; \Omega_{\min} = C^*) \wedge \ldots \right\}^M \end{array} \right\}^{\{S\}}$$

Für die notwendige Bedingung gilt:

$\Delta NPV_{t_B}^{B-M} > 0$ Mietmodell ist die kostengünstigere Lösung.

$\Delta NPV_{t_B}^{B-M} < 0$ Besitzmodell ist die kostengünstigere Lösung.

4.4 Probabilistische NPV-Differenz Simulation

Zur vereinfachten Darstellung der probabilistischen NPV-Analyse für das Besitz- oder Mietmodell werden die Ausgabenterme je für die Mietausgaben sowie Besitzausgaben zusammengefasst. Dabei wird berücksichtigt, dass alle Cash-Drains C_0 zum heutigen Wert bekannt sind. Die heutigen Cash-Drains C_0 müssen daher für den Zeitpunkt $t = t_B + k$ über ihren Ausgaben- bzw. Kostensteigerungsindex μI hochgezinst werden.

Das Net-Present-Value-Differenzaxiom lässt sich wie folgt vereinfacht darstellen:

$$\Delta NPV_{t_B}^{B-M} = \sum_{t=t_B}^{t_e} \left\{ \sum_{\varepsilon_1} C_0^{B,\varepsilon_1} \cdot \left(\frac{1+\mu I_{\varepsilon_1}^B}{1+q} \right)^{(t-t_B)} - \sum_{\varepsilon_2} C_0^{M,\varepsilon_2} \cdot \left(\frac{1+\mu I_{\varepsilon_2}^M}{1+q} \right)^{(t-t_B)} \right\}^{\Omega=\{A,B,C,...\}}$$

C_0^{B,ε_1} = Cash-Drain-Element des Besitzmodells zum Zeitpunkt $t = t_B$

C_0^{M,ε_2} = Cash-Drain-Element des Mietmodells zum Zeitpunkt $t = t_B$

$\left(\mu I_{\varepsilon_1}^B, \mu I_{\varepsilon_2}^M\right)$ = Kostensteigerungsindizes

ε = {ε_1 – Ausgabengruppen – Besitzmodell; ε_2 – Ausgabengruppen – Mietmodell}

λ = ($B \vee M$) Bereitstellungsvariante: B =Besitzmodell $\vee$ M =Mietmodell

Der Cash-Drain der Ausgaben- und Einnahmengrößen sowie die Ausgaben-/Kostensteigerungsindizes und der Diskontierungssatz treten meist mit Unsicherheiten behaftet in Bandbreiten auf. Somit kann man die Unsicherheiten, die in diesen Bandbreiten liegen, durch probabilistische Dichte- und Verteilungsfunktionen für die Cash-Drain-Funktion mit Einnahmen und Ausgaben sowie für die Ausgaben-/Kostensteigerungsindizes und den Diskontierungssatz darstellen [7].

Damit gilt für die Cash-Drain-Elemente [7]:

$$\left\{C_{\min}^{\lambda,\varepsilon}; C_{EW}^{\lambda,\varepsilon}; C_{\max}^{\lambda,\varepsilon}\right\} = f\left\{\left(A_{\min}^{\lambda,\varepsilon}; A_{EW}^{\lambda,\varepsilon}; A_{\max}^{\lambda,\varepsilon}\right) \wedge \left(E_{\min}^{Rest}; E_{EW}^{Rest}; E_{\max}^{Rest}\right)\right\}$$

Die Ausgabensteigerungsindizes und der Diskontierungssatz [7] werden in folgenden Intervallen definiert:

$$\left(\mu I_{\min}^{\lambda}; \mu I_{EW}^{\lambda}; \mu I_{\max}^{\lambda}\right) \wedge \left(q_{\min}; q_{EW}; q_{\max}\right)$$

Für die Cash-Drain-Elemente der Miet- und Besitzmodelle kann mangels genauer oder statistisch abgesicherter Ist-Daten eine Dreiecks- oder BetaPERT-Dichtefunktion angenommen werden:

$$f\left(C^{\lambda,\varepsilon}\right) = Dreieck\left(C_{\min}^{\lambda,\varepsilon}, C_{EW}^{\lambda,\varepsilon}, C_{\max}^{\lambda,\varepsilon}\right)$$

bzw.

$$f\left(C^{\lambda,\varepsilon}\right) = BetaPERT\left(C_{\min}^{\lambda,\varepsilon}, C_{EW}^{\lambda,\varepsilon}, C_{\max}^{\lambda,\varepsilon}\right)$$

$$mit \quad C_{\min}^{\lambda,\varepsilon} \le C_{EW}^{\lambda,\varepsilon} \le C_{\max}^{\lambda,\varepsilon}$$

$C_{\min}^{\lambda,\varepsilon}$ = Minimaler Wert des Cash-Drain-Elements $C^{\lambda,\varepsilon}$

$C_{EW}^{\lambda,\varepsilon}$ = Erwartungswert des Cash-Drain-Elements $C^{\lambda,\varepsilon}$

$C_{\max}^{\lambda,\varepsilon}$ = Maximaler Wert des Cash-Drain-Elements $C^{\lambda,\varepsilon}$

Die dazugehörige Verteilungsfunktion für die Cash-Drain-Elemente lautet:

$$F\left(C^{\lambda,\varepsilon}\right) = \int_{C_{\min}^{\lambda,\varepsilon}}^{C_{\max}^{\lambda,\varepsilon}} f\left(C^{\lambda,\varepsilon}\right) dC^{\lambda,\varepsilon}$$

4.5 Net-Present-Value-Differenz – Ergebnis aller Simulationsläufe

Die Monte Carlo Simulation (MCS) führt nun über die Dichte-, Verteilungs- und Umkehrfunktion der Cash-Drain-Elemente, Ausgabensteigerungsindizes sowie des Diskontierungssatzes ca. 10.000 Simulationen durch, die mittels Latin Hypercube Sampling Methode unterstützt werden. Die Methode wird bei Girmscheid in [7] und [9] beschrieben. Die Bedingungsbeziehungen der Umkehrfunktionen für die probabilistisch verteilten Inputgrößen sind wie folgt:

Cash-Drain aus Ausgaben und sekundäre Einnahmen im Simulationslauf υ:

$$C_{\upsilon}^{\lambda,\varepsilon} = \left\{ C_{\upsilon}^{\lambda,\varepsilon} \middle| C_{\upsilon}^{\lambda,\varepsilon} = G\left(Z_{C_{\upsilon}^{\lambda,\varepsilon}}\right) \right\}$$

$$mit \quad Z_{C_{\upsilon}^{\lambda,\varepsilon}} = \left\{ Z_{C_{\upsilon}^{\lambda,\varepsilon}} \in \mathbb{R} \middle| \left(0 \le Z_{C_{\upsilon}^{\lambda,\varepsilon}} \le 1\right) \right\} \Bigg\}$$

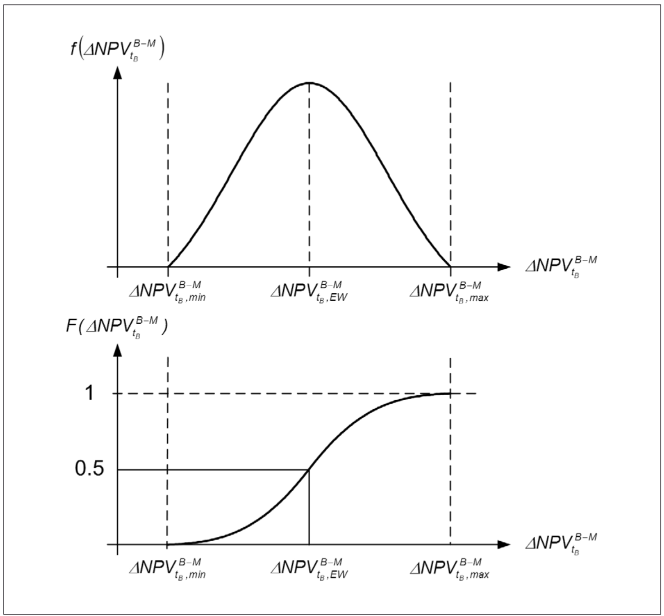

Bild 1. Dichte- und Verteilungsfunktion der Net-Present-Value-Differenz
Fig. 1. Density and distribution function of the Net Present Value difference

Ausgabensteigerungsindexfunktion im Simulationslauf υ:

$$\mu I_{\upsilon}^{\lambda,(\varepsilon)} = \left\{ \mu I_{\upsilon}^{\lambda,(\varepsilon)} \middle| \mu I_{\upsilon}^{\lambda,(\varepsilon)} = G\left(Z_{\mu I_{\upsilon}^{\lambda,(\varepsilon)}} \right) \right.$$

$$mit \quad Z_{\mu I_{\upsilon}^{\lambda,(\varepsilon)}} = \left\{ Z_{\mu I_{\upsilon}^{\lambda,(\varepsilon)}} \in \mathbb{R} \middle| \left(0 \le Z_{\mu I_{\upsilon}^{\lambda,(\varepsilon)}} \le 1 \right) \right\} \Bigg\}$$

Diskontierungsfunktion im Simulationslauf υ:

$$q_{\upsilon} = \left\{ q_{\upsilon} \middle| q_{\upsilon} = G\left(Z_{q_{\upsilon}}\right) \quad mit \quad Z_{q_{\upsilon}} = \left\{ Z_{q_{\upsilon}} \in \mathbb{R} \middle| \left(0 \le Z_{q_{\upsilon}} \le 1\right) \right\} \right\}$$

Daraus ergibt sich die Net-Present-Value-Differenz im Simulationslauf υ:

$$\Delta NPV_{t_B,\upsilon}^{B-M} = $$

$$= \sum_{t_B}^{t_e} \left[\sum_{\varepsilon_1} C_{0,\upsilon}^{B,\varepsilon_1} \cdot \left[\frac{1+\mu I_{a_1,\upsilon}^{B,(\varepsilon_1)}}{1+q_{\upsilon}} \right]^{(t-t_B)} - \sum_{\varepsilon_2} C_{0,\upsilon}^{M,\varepsilon_2} \cdot \left[\frac{1+\mu I_{\varepsilon_2,\upsilon}^{M,(\varepsilon_2)}}{1+q_{\upsilon}} \right]^{(t-t_B)} \right]$$

Nach Durchlauf aller Simulationen $\upsilon \approx 10.000$ erhält man die Dichtefunktion der Net-Present-Value-Differenz (**Bild 1**):

$$f\left(\Delta NPV_{t_B,\upsilon}^{B-M}\right) = f\left(\Delta NPV_{t_B,EW}^{B-M} \; ; \; \sigma_{B-M}^2\right) \Big|_{\upsilon \le \infty}$$

Die Verteilungsfunktion der Net-Present-Value-Differenz ist somit (Bild 1):

$$F\left(\Delta NPV_{t_B,\upsilon}^{B-M}\right) = \int_{\Delta NPV_{\min}}^{\Delta NPV_{\max}} f\left(\Delta NPV_{t_B,EW}^{B-M} \; ; \; \sigma_{B-M}^2\right) d\left(\Delta NPV\right) \Big|_{\upsilon \le \infty}$$

$C_{0,\upsilon}^{\lambda,\varepsilon}$ = Cash-Drain-Element ε der Bereitstellungsvariante λ im Simulationslauf υ zum Zeitpunkt $t = 0$ bzw. t_B

$\mu I_{\upsilon}^{\lambda,(\varepsilon)}$ = Ausgabensteigerungsindexfunktion μ der Bereitstellungsvariante λ im Simulationslauf υ

λ = $\{M \vee B\}$ Besitz- oder Mietmodell

q_{υ} = Diskontierungsfunktion im Simulationslauf υ

$\Delta NPV_{t_B,\upsilon}^{B-M}$ = Net-Present-Value-Differenz bezogen auf den Zeitpunkt t_B im Simulationslauf υ

$\Delta NPV_{t_B,EW}^{B-M}$ = Erwartungswert der Net-Present-Value-Differenz bezogen auf den Zeitpunkt t_B

σ_{B-M}^2 = Standardabweichung der Net-Present-Value-Differenz

$Z_{C_{\upsilon}^{\lambda,\varepsilon}}$ = Zufallszahl für die Cash-Drain-Element $C_{0,\upsilon}^{\lambda,\varepsilon}$

$Z_{\mu I_{\upsilon}^{\lambda,(\varepsilon)}}$ = Zufallszahl für Ausgabensteigerungsfunktion $\mu I_{\upsilon}^{\lambda,(\varepsilon)}$

$Z_{q_{\upsilon}}$ = Zufallszahl für die Diskontierungsfunktion q_{υ}

ε = ε = $\{\varepsilon_1$ – Ausgabengruppen – Besitzmodell; ε_2 – Ausgabengruppen – Mietmodell$\}$ – Cash-Drain-Elemente

υ = Simulationslauf/Szenario $_{\upsilon}$

5 Fazit

Das hier vorgestellte Modell ermöglicht es den Bauunternehmen, rational begründete Entscheidungen bei der Baugerätewahl auf Projektebene zur optimalen Systemauswahl sowie auf der Unternehmensebene bezüglich Besitz- oder Mietmodell zu treffen. Dieses Analyse- und Prognosemodell unterstützt die qualitative strategische Ausrichtung eines Unternehmens und der SGE. Damit wird die ziel- und ergebnisorientierte Unternehmensführung durch quantitative Aussagen des probabilistischen Modells, das die Bandbreite der Unsicherheiten von Prognosen widerspiegelt, unterstützt. Somit kann die Unternehmensführung Szenarien über Nachfrage, Marktangebot und Finanzsituation bei ihren Entscheidungen antizipieren.

Literaturverzeichnis

[1] *Girmscheid, G.:* Systemauswahl und Bereitstellungsvariante von Bauproduktionseinrichtungen – Prognosemodell. In: Bauingenieur (D), Vol. 83, 3/2008

[2] *Girmscheid, G.:* Bauproduktionstheorie – Strukturrahmen. In: Bauingenieur (D), Vol. 82, 9/2007, S. 397–403

[3] *Girmscheid, G.:* Bauproduktionstheorie – Struktur des Bauproduktionsprozesses. In: Bauingenieur (D), Vol. 82, 9/2007, S. 404–413

[4] *Girmscheid, G.:* Bauproduktionstheorie – Bauproduktionsprozessplanung und -steuerung. In: Bauingenieur (D), Vol. 83, 1/2008, S. 36–68

[5] *Girmscheid, G.:* NPV-Wirtschaftlichkeitsanalysemodell: Lebenszyklusbetrachtung von kommunalen Straßenunterhalts-PPPs. In: Bauingenieur (D), Vol. 81, 10/2006, S. 455–463

[6] *Girmscheid, G.:* Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse. Springer Verlag, Berlin/vdf Hochschulverlag der ETH Zürich, Zürich, 2005

[7] *Girmscheid, G.:* Risikobasiertes probabilistisches LC-NPV-Modell Bewertung alternativer baulicher Lösung. In: Bauingenieur (D), Vol. 81, 9/2006, S. 394–405

[8] *Boussabaine, H.; Kirkham, R:* Whole Life-cycle Costing: Risk and Risk Responses. Blackwell Publishing Ltd., Oxford (UK), 2004

[9] *Girmscheid, G.:* Risikomanagement-Prozess-Modell für Bauunternehmen – Risikobelastungsdimension. In: Bauingenieur (D) Vol 82, 2/2007, S. 53–61