

Risikobasiertes probabilistisches LC-NPV-Modell – Bewertung alternativer baulicher Lösungen

G. Girmscheid

394

Zusammenfassung Die Lebenszyklusanalyse (LCA) bzw. die Analyse der Lebenszykluskosten (LCCA „Life-Cycle Costing Analysis“) zur Beurteilung alternativer baulicher Lösungen ist bei grösseren Projektentscheidungen mittlerweile ein fester Bestandteil der Projektphasen. Die meisten heute genutzten LCA-Modelle weisen Unzulänglichkeiten auf, so dass Investoren keine ausreichende risikobasierte Entscheidungsbasis haben.

Das am Institut für Bauplanung und Baubetrieb (IBB) der ETH Zürich entwickelte LC-NPV-Modell basiert auf dem ökonomischen Minimalprinzip unter Berücksichtigung einer reinen Ausgabenbetrachtung bzw. dem Maximalprinzip bei Betrachtung von Einnahmen und Ausgaben.

Das LC-NPV-Modell wird nach der Systemtheorie inhaltlich (Cashflow- oder Vollkostenrechnung) und zeitlich, hinsichtlich des restlichen Veräusserungswertes (Einnahmen) auf einem gemeinsamen Zeitpunkt, abgegrenzt.

Ferner wird die Lebens-Nutzungsdauer von Bauteilen/Bauelementen für Instandsetzung und Erneuerung gemäss Lebensdauerkurven berücksichtigt. Die Unsicherheit zukünftiger Zahlungsströme wird durch probabilistische Bandbreiten für Szenarienbetrachtungen eingefangen. Damit verbessert das LC-NPV-Modell die Entscheidungsgrundlage für Investoren und Bauherren und stellt bei kompetenter Interpretation der Ergebnisse eine sinnvolle Entscheidungshilfe dar.

Probabilistic, risk-based LC-NPV model – evaluation of alternative buildings

Abstract Life cycle analysis (LCA) and Life cycle costing analysis (LCCA) as a means of choosing between alternatives of building or infrastructural solutions have meanwhile become an integral part in the project phases of major investment decisions. Most current LCA-Models are inadequate, and do not provide investors with a sufficient basis for making risk-based decision.

The LC-NPV model developed at the Institute for Construction Engineering and Management of ETH Zurich is based on the economic minimum principle in pure consideration of expenditure or on the maximum principle in consideration of receipt and expenditure. The LC-NPV model is delimited in terms of both content (cash flow or complete cost accounting) and time, regarding the residual sale value to a common point in time, in line with system theory. Furthermore the utilization life cycle of the construction components/elements for corrective maintenance and renewal was considered by life cycle curves.

The uncertainty of future developments of payment flows is incorporated into the model by probabilistic distribution.

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid

Vorsteher des Instituts für Bauplanung und Baubetrieb
ETH Zürich, CH-8093 Zürich

The LC-NPV model therefore improves the decision making basis for investors and property developers and, given a competent interpretation of the results, represents a powerful decision making tool.

1 Einleitung

Das Marktrisiko einer Investition in bauliche Anlagen steht bei den Investoren und Bauherren im Vordergrund. Vermehrt wird deshalb an die Bauwirtschaft die Forderung gestellt, das technologisch bedingte Kostenrisiko einer Investition zu tragen. Eine „faire“ Risikoteilung berücksichtigt momentan aber nur die Planungs- und Erstellungskosten des Bauwerks.

Professionelle Investoren und Bauherren werden zur Sicherstellung nachhaltiger Kostensicherheit von Unternehmen der Bauwirtschaft Lebenszykluskostengarantien bzw. Lebenszyklus-Performance-Garantien verlangen. Auch moderne innovative Unternehmen der Bauwirtschaft werden versuchen sich durch Lebenszyklusangebote in spezifischen Markt- und Kundensegmenten zu differenzieren [1]. Denn heute werden bauliche Anlagen nur auf Investitionskosten optimiert ohne Optimierung der sich über die Nutzungszeit potenzierten Nutzungs- bzw. Betriebskosten.

2 Stand der Forschung – Modellansatz

Die Forschung am Institut für Bauplanung und Baubetrieb (IBB) der ETH Zürich hat diese Betrachtung zum Schwerpunktthema gemacht, mit dem Forschungsansatz SysBau®, der die Lebenszyklusbetrachtung baulicher Anlagen in den Mittelpunkt stellt. Im Rahmen dieses Forschungsansatzes werden Projektabwicklungsformen [1], Geschäftsmodelle und Supportprozesse [2] wie Wissensmanagement- [3], [4] und Risikomanagementmodelle [5] entwickelt. In vorherigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wurden LCCA deterministisch entwickelt [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], und durch Sensitivitätsanalysen [13], [14] und probabilistische Ansätze [15] ergänzt.

Programme zur Berechnung der Lebenszykluskosten von Gebäuden existieren bereits seit einigen Jahren.

Als Beispiel hierzu sei das Programm „Building Life Cycle Cost Program“ (BLCC) [8] herausgegriffen, dessen erste Version bereits 1987 im Auftrag des „U.S. Department of Energy“ entwickelt wurde. Auch US-Bundesstaaten wie z.B. Alaska und Iowa sowie Kanada besitzen Handbücher und Richtlinien, die meist ähnliche Vorlagen oder zumindest Arbeitsblätter enthalten.

Zudem bieten private Programmanbieter integrale Programmpakete [16], [17] an.

Das hier vorgestellte LC-NPV-Modell basiert auf dem Vergleich von alternativen baulichen Lösungen, als Entscheidungsgrundlage dazu wird

- das ökonomische Minimalprinzip bei reiner Ausgabenbetrachtung bzw. das Maximalprinzip bei Ein- und Ausgabenbetrachtung
- das dynamische Investitionsparadigma mit Discounted Cash Flow (NPV) angewandt.

In diesem LC-NPV-Modell werden:

1. die inhaltlichen und zeitlichen Systembegrenzungen klar definiert
2. die unterschiedlichen Instandsetzungs- und Erneuerungszyklen von Bauteilen und Bauelementen differenziert
3. die Unsicherheiten zukünftiger Zahlungsströme, Ausgaben-/Einnahmenentwicklung sowie Geldwertentwicklung durch probabilistische Ansätze berücksichtigt
4. die Ausgabenentwicklung an die Basiselemente der volkswirtschaftlichen Teuerung (Lohn, Material etc.) gekoppelt
5. die LC-NPV-Analyse mittels Monte-Carlo Simulation (MCS) durchgeführt.

Da die Ausgaben- und Einnahmenentwicklung für so lange Zeiträume nur relativ genau vorhergesagt werden können, müssen von Experten Annahmen getroffen werden [11]. Diese liegen dann meist in Bandbreiten vor.

Die LC-NPV-Analyse bzw. LCC-Analyse sollte in den in **Bild 1** dargestellten Projektphasen durchgeführt werden. Dadurch erhält man eine sich stetig verbessernde Entscheidungsgrundlage, die mit der wachsenden Informationsverdichtung in den Projektphasen zunimmt.

Dabei verringert sich der Unsicherheitsgrad der Baukosten und Nutzungs-/Betriebskosten aufgrund der Konkretisierung der sich fortentwickelnden Planung innerhalb der Projektphasen.

Die Unsicherheiten in den Baukosten verringern sich bis zur Ausführung auf eine geringe Streubreite, hingegen verbleibt bei den Betriebskosten eine höhere Unsicherheit aufgrund des langfristigen Prozesszeitraumes (Bild 1).

Neben dieser Entwicklung, die von dem Konkretisierungsgrad der Projektziele abhängt, existiert auch noch die direkt zeitabhängige Kostenentwicklung. So muss man bei lang dauernden Projekten den Baupreisindex berücksichtigen [18].

Die Entwicklung bspw. der Grundstückskosten ist bei einer LCCA im Allgemeinen zeitunabhängig, da meist die Kosten des Grundstücks zum Zeitpunkt bekannt sind und meist bis zum Inbetriebnahme-Zeitpunkt der baulichen Anlage nur verzinst werden müssen.

3 Forschungsmethodik

Das Ziel der Baubetriebswissenschaften ist es, u.a. neue sozio-technische Realitäten zu schaffen, dazu gehören innovative Bauprozesse sowie die dazugehörigen Entscheidungs- und Prognosemodelle. Zur Entwicklung des LC-NPV-Entscheidungs- und Prognosemodells zur wirtschaftlichen Beurteilung alternativer baulicher Lösungen über einen definierten Lebenszyklus wurde das hermeneutische, konstruktivistische Forschungsparadigma [19], [20] angewendet.

Das denklöologische-deduktive LC-NPV-Modell wurde validiert und reliabilität durch Triangulation [21], [20]. Dazu wurde ein theoretischer Bezugsrahmen gewählt und ein Realisierbarkeitstest durchgeführt.

Der theoretische Bezugsrahmen des denklöologischen-deduktiven LC-NPV-Modells wurde zweistufig gewählt:

- Systemabgrenzung mittels Systemtheorie [22], [23] mit den inhaltlichen und zeitlichen Dimensionen
- Strukturierung mittels Finanztheorien mit den mathematischen und probabilistischen Dimensionen

Die Systemtheorie definiert das LC-NPV-Modell in der baubetrieblichen Realität durch die:

- Umfeldaspekte bezüglich des wirtschaftlichen Vergleichs alternativer baulicher Lösungen sowie des Lebenszyklusverhaltens der Bauteile und Bauelemente bedingt durch Nutzer- und Umwelteinflüsse
- Organisationsaspekte bezüglich der Einordnung in die Bauwerksprozessphasen
- Funktionsaspekte bezüglich der Nutzung des dynamischen Wirtschaftlichkeitsvergleich unter Einbezug aller Bewertungsgrößen unter Beachtung der inhaltlichen und zeitlichen Systemgrenzen zur Beurteilung der Alternativen nach den ökonomischen Wirtschaftlichkeitsprinzipien (Minimal- bzw. Maximalprinzip)

- Strukturaspekte bezüglich der Gliederung bzw. Untergliederung der Zahlungsströmelemente, der Einordnung in die Rechnungs- bzw. Finanztheorie (Cashflow oder Vollkostenrechnung) sowie des methodischen Vorgehens der Investitionstheorie
- Dynamikaspekte bezüglich der Zuschärfung der Prognosegenauigkeit aufgrund des Informationszuwachses in den Projektphasen, der dynamischen Ansätze zur zeitgleichen Bewertung der Zahlungsströme unter Berücksichtigung der Teuerungs- und Geldwertentwicklung

Das systemorientierte LC-NPV-Modell wird formalwissenschaftlich strukturiert durch

- Abgrenzung der Systemzahlungsströme (Ausgaben und Einnahmen) der Planung, des Baus sowie der systembedingten Ausgaben bzw. Einnahmen des Betriebs und der Nutzung sowie Ausscheidung nicht systembedingter Zahlungsströme (Mieter z.B. erhält Nutzfläche zu funktionalen Bedingungen) [24], [25], [26]

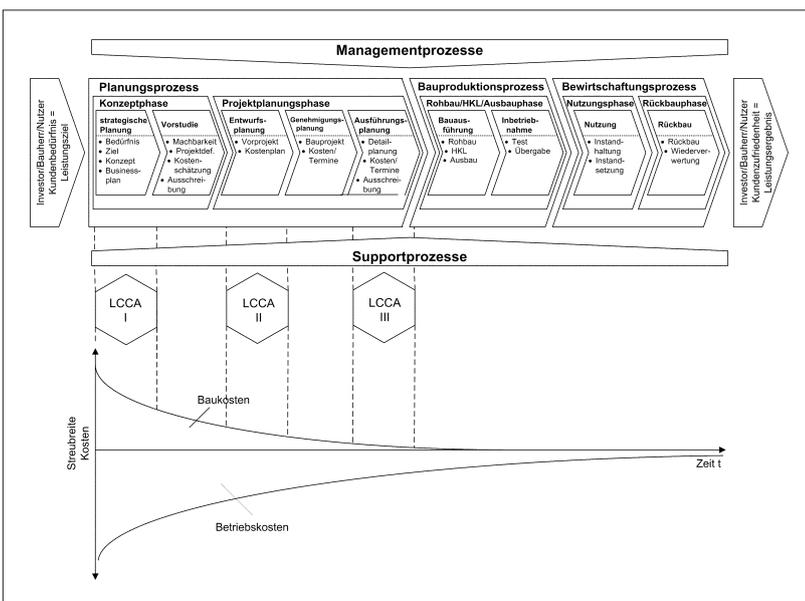


Bild 1. LCCA in verschiedenen Projektphasen und deren Genauigkeitsgrad/Vorhersagegrad
 Fig. 1. LCCA in various project phases and their degree of accuracy/forecast

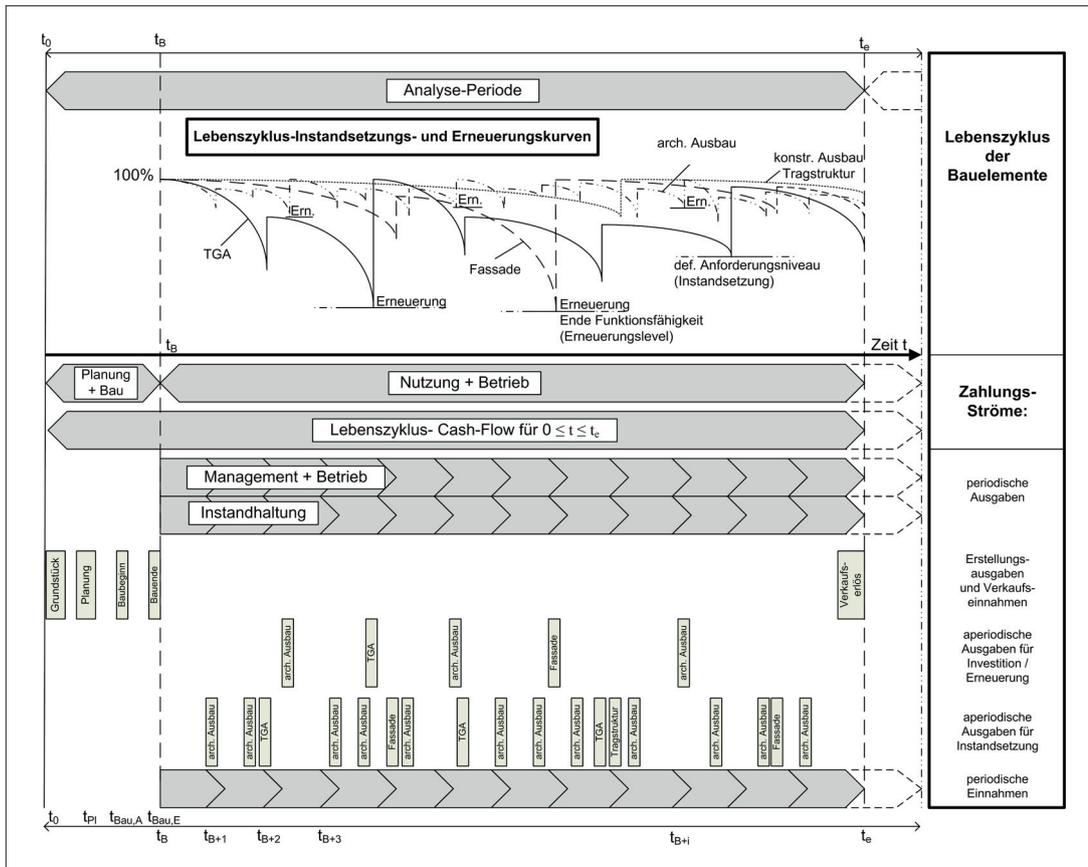


Bild 2. LC-NPV-Modell für Beurteilung alternativer baulicher Lösungen
 Fig. 2. LC-NPV model for evaluation of alternative building or infrastructural solutions

- systematische systembedingte Zahlungsstromgliederung in der Planungs- und Bauphase [27], [28] sowie in der Betriebs- und Nutzungsphase [24], [25], [26] mit unterschiedlicher Tiefengliederung je nach Projektphase und Wissensstand
- Zahlungsströme mit Ausgaben und Einnahmen sowie der realen oder virtuellen Ankaufsausgaben bzw. Verkaufseinnahmen an der jeweiligen zeitlichen Systemgrenze zur Sicherstellung des Restwertes der Alternativen aufgrund von unterschiedlichen Lebensdauern baulicher Lösungen nach finanz- bzw. rechnungstheoretischen Strukturen
- Net-Present-Value-Analyse [29] der systembedingten, systemabgegrenzten Zahlungsströme unter Berücksichtigung des Zeitaspektes bezogen auf einen gemeinsamen Referenzzeitpunkt unter Berücksichtigung der Teuerungs- und Geldwertentwicklung nach der Investitionstheorie
- Probabilistische Ansätze für die Zahlungsströme zur Berücksichtigung von Unsicherheiten und deren Auswirkungen auf die Ergebnisse mittels Simulationstheorie

4 Systemkonfiguration des LC-NPV-Modells

Jedes vergleichende Wirtschaftlichkeitsmodell muss mittels Systemtheorie in seine inhaltlichen und zeitlichen Strukturen und Interaktionen gegliedert werden. Inhaltliche Abgrenzung gliedert sich in:

- Methode: Net Present-Value (NPV) auf der Basis des Cash-Flows bzw. Cash-Drains oder Kosten-Barwert (K-BW) auf der Basis der Vollkostenrechnung

- Struktur: Ausgaben bzw. Kostenstrukturgliederung, z. B. gemäss [27], [28], [24]
- Die NPV- und K-BW-Methode sind gleichwertig. Bei der NPV-Methode werden nur Ausgaben und Einnahmen zum Zeitpunkt ihres Auftretens berücksichtigt [30]. Bei der K-BW-Methode werden nur Kosten und deren kalkulatorische Abschreibungen berücksichtigt [30]. Bei zeitnahen Ausgaben zu den Leistungen sind für Lohn, Material und Fremdleistungen diese identisch zu den Kosten. Jedoch bei Investitionen wird bei der Vollkostenrechnung nicht die Ausgabe berücksichtigt, sondern die Abschreibung und die kalkulatorischen Zinsen des jeweiligen Restabschreibungsbetrages aus der Vorperiode [30].
- In diesem Beitrag wird die NPV-Methode auf der Basis von Ausgaben-Einnahmen vorgestellt.
- Das LC-NPV-Modell ist unabhängig von Normen und muss sich an den Hauptausgabengruppen einer Immobilie bzw. Infrastruktur während ihrer Lebensphasen orientieren. Zur Hilfestellung und zum einheitlichen Vorgehen gibt es in vielen Ländern Kostenstrukturgliederungen für Planung und Bau [27], [28], Nutzung und Betrieb von Gebäuden [24], die weiter gegliedert werden für das Facilitymanagement in Leistungsbeschreibungen [25], [26]. Zudem bieten Arbeitshilfen Hinweise auf die Lebensdauer von Gebäuden und Bauteilen [16].
- Die zeitliche Abgrenzung muss für alle untersuchten Varianten gleich sein. Dabei ist es wichtig den Restwert als Einnahme jeder Variante, bezogen auf das Ende des Betrachtungszeitpunktes, zu bewerten unter Beachtung möglicher unterschiedlicher Lebensdauerkurven der gewählten baulichen Lösungen und Bauelemente (Bild 2). Man

muss also das bauliche System am Anfang kaufen und am Ende verkaufen, damit man die Varianten wirklich vergleichen kann, andernfalls bleibt der Wirtschaftlichkeitsvergleich unvollständig, da unterschiedliche Restwerte im Analysezeitraum beim Variantenvergleich aufgrund unterschiedlicher Restlebensdauer nicht berücksichtigt werden. Bild 2 zeigt die wichtigsten qualitativen und zeitlichen Elemente der LC-NPV-Analyse.

5 LC-NPV-Modell

Zur mathematischen Modellierung wird die Net-Present-Value bzw. Kosten-Barwertmethode herangezogen. Diese berücksichtigt den Geldzeitwert bzw. Gegenwartswert von Zahlungsströmen z.B. von zwei baulichen Alternativen a und b

$$\begin{aligned} \{C_{a,k}\} &= \{C_{a,0}; C_{a,1}; \dots; C_{a,n}\} = \\ &= \{E_{a,0}; E_{a,1}; \dots; E_{a,n}\} - \{A_{a,0}; A_{a,1}; \dots; A_{a,n}\} \\ \{C_{b,k}\} &= \{C_{b,0}; C_{b,1}; \dots; C_{b,n}\} = \{E_{b,k}\} - \{A_{b,k}\} \end{aligned}$$

zu den Zeitpunkten

$$\{t_{y,k}\} = \{t_{y,0}; t_{y,1}; \dots; t_{y,n}\} \quad \text{mit} \quad \{0 \leq t_{y,k} \leq t_e \mid y = a \vee y = b\}$$

bezogen auf einen Betrachtungszeitpunkt t_B unter Beachtung von Teuerung und Verzinsung durch Diskontierung. Dadurch wird sichergestellt, dass die Zahlungen zu unterschiedlichem Zeitpunkt wie folgt berücksichtigt werden: „A Dollar today is worth more than a dollar in ten years time“ [7].

Die Zahlungsströme können gemäss Bild 2 wie folgt allgemein in einer Grobgliederung der periodischen und aperiodischen Ein- und Ausgaben definiert werden:

$$\begin{aligned} C_{\chi,t} \Big|_{t=1}^n &= E_t \Big|_{t=1}^n - A_t \Big|_{t=1}^n + \left\{ E_t^E \Big| E_t^E = E_{\omega_j}^E \right. \\ &\quad \text{für } t = \{\omega_j\} = \{\omega_1; \dots; \omega_{m_1}\} \\ &\quad \vee E_t^E = 0 \text{ für } t \neq \{\omega_j\} \left. \right\} \\ &\quad - \left\{ A_t^{Inst,v} \Big| A_t^{Inst,v} = A_{\psi_k}^{Inst,v} \right. \\ &\quad \text{für } t = \{\psi_k\} = \{\psi_1; \dots; \psi_{m_2}\} \\ &\quad \vee A_t^{Inst,v} = 0 \text{ für } t \neq \{\psi_k\} \left. \right\} \\ &\quad - \left\{ A_t^{Ern,v} \Big| A_t^{Ern,v} = A_{\phi_l}^{Ern,v} \right. \\ &\quad \text{für } t = \{\phi_l\} = \{\phi_1; \dots; \phi_{m_3}\} \\ &\quad \vee A_t^{Ern,v} = 0 \text{ für } t \neq \{\phi_l\} \left. \right\} \end{aligned}$$

Der Net-Present-Value/Barwert einer baulichen Lösung χ bezogen auf den Zeitpunkt t_B (Betrachtungszeitpunkt) ist:

$$NPV_{\chi,t_B} = \sum_{t=1}^n C_{\chi,t} \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}}$$

Das Net-Present-Value-Entscheidungsaxiom nach dem ökonomischen Maximalprinzip bezogen auf die Einnahmen und Ausgaben zwischen m baulichen Lösungen χ lautet:

$$E - NPV_{t_B}^{\max} = \text{Max} \left(NPV_{\chi} \right) \Big|_{\chi=1}^{\chi=m} \quad \text{mit} \quad (1 \leq \chi \leq m)$$

Bei reiner Ausgabenbetrachtung mehrerer baulicher Lösungen mit gleicher Nutzenstiftung, z. B. gleichen Mietentnahmen, kann man den Zahlungsstrom bzw. Ausgabenstrom wie folgt definieren:

$$\begin{aligned} C_{\chi,t} \Big|_{t=1}^n &= A_t \Big|_{t=1}^n + \left\{ A_t^{Inst,v} \Big| A_t^{Inst,v} = A_{\psi_j}^{Inst,v} \right. \\ &\quad \text{für } t = \{\psi_k\} = \{\psi_1; \dots; \psi_{m_2}\} \\ &\quad \vee A_t^{Inst,v} = 0 \text{ für } t \neq \{\psi_k\} \left. \right\} \\ &\quad + \left\{ A_t^{Ern,v} \Big| A_t^{Ern,v} = A_{\phi_k}^{Ern,v} \right. \\ &\quad \text{für } t = \{\phi_l\} = \{\phi_1; \dots; \phi_{m_3}\} \\ &\quad \vee A_t^{Ern,v} = 0 \text{ für } t \neq \{\phi_l\} \left. \right\} \\ &\quad - \left\{ E_t^{Rest} \Big| E_t^{Rest} = E_{t_e}^{Rest} \right. \\ &\quad \text{für } t = t_e \vee E_t^{Rest} = 0 \text{ für } t \neq t_e \left. \right\} \end{aligned}$$

Daraus kann man das Net-Present-Value-Entscheidungsaxiom nach dem Minimalprinzip bezogen auf die Ausgaben wie folgt definieren:

$$A - NPV_{t_B}^{\min} = \text{Min} \left(NPV_{\chi} \right) \Big|_{\chi=1}^{\chi=m} \quad \text{mit} \quad (1 \leq \chi \leq m)$$

6 Ein- und Ausgabenansätze

Die Zahlungsströme mit

$$\{C_{\chi,t}\} = \{E_t; A_t; A_t^{Inst,v}; A_t^{Ern,v}; E_{t=m}^{Rest}\}$$

werden unterteilt in die (Bild 5):

- Konzeptions-, Planungs- und Bauzahlungsströme
- Nutzungs-, Betriebs-, Unterhalts- und Instandsetzungs- sowie Erneuerungszahlungsströme
- Restwert (Verkaufserlös) am Ende des Betrachtungszeitraumes

Die Zahlungsströme der Konzept-, Planungs- und Bauphase können nach [27], [28] in verschiedene Detaillierungsstufen gegliedert werden, im Folgenden werden nur die Hauptgruppen für eine Lösungsvariante χ dargestellt:

Grundstücksausgaben:

$$A_{\chi,t}^{Gr} = A_{t_0}^{Gr} \quad \text{für } t = t_0$$

Planungs- und Beratungsausgaben:

$$\begin{aligned} A_{\chi,t}^{Pl} &= \left(A_t^{Mgt} + A_t^{Vorb} + A_t^{HOAI} + A_t^{Berater} + A_t^{Gen} + A_t^{Fin-Pl} \right) \Big|_{\chi} \\ \text{für } t &= t_{Pl} \quad \text{mit} \quad (t_0 = 0 \leq t_{Pl} \leq t_{Bau}^{Beginn}) \end{aligned}$$

Baurealisierungsausgaben:

$$\begin{aligned} A_{\chi,t}^{Bau} &= \left(A_t^{Gr-Vorb} + A_t^{Roh} + A_t^{Tech} + A_t^{Ausbau,ext} + A_t^{Ausbau,int} \right) \Big|_{\chi} \\ \text{für } t &= t_{Bau} \quad \text{mit} \quad (t_{Bau}^{Beginn} \leq t_{Bau} \leq t_{Bau}^{Ende}) \end{aligned}$$

Die Zahlungsströme in der Nutzungs- und Betriebsphase können nach [24] gegliedert werden. Die Feingliederung

kann gemäß [25], [26] detailliert werden. Im Folgenden werden nur die Hauptgruppen für eine Lösungsvariante dargestellt:

Periodische Ausgaben:

$$\begin{aligned}
 A_{\chi,t}^{Nutz} &= A_{\chi,t}^{Obj-Mgt} + A_{\chi,t}^{Betr} + A_{\chi,t}^{Unterh} \\
 A_{\chi,t}^{Betr} &= A_{\chi,t}^{Bedien} + A_{\chi,t}^{Insp} + A_{\chi,t}^{Wart} + A_{\chi,t}^{Vers-Ent} + \\
 &\quad + A_{\chi,t}^{Rein} + A_{\chi,t}^{Sicher} \\
 A_{\chi,t}^{Unterh} &= A_{\chi,t}^{Roh-U} + A_{\chi,t}^{Tech-U} + A_{\chi,t}^{Ausbau-U} \\
 \text{für } t_B &\leq t \leq t_e
 \end{aligned}$$

Anmerkung: Es wurden keine periodischen Ausgaben für Zinsen angesetzt, da es sich hier um eine reine Ausgabenbetrachtung handelt, bei der die Planungs- und Erstellungsausgaben bereits berücksichtigt wurden.

Aperiodische Ausgaben:

$$\begin{aligned}
 A_{\chi,t}^{Inst,v} &= A_{\chi,t}^{Inst-Pl,v} + A_{\chi,t}^{Inst-Bau,v} \\
 A_{\chi,t}^{Ern,v} &= A_{\chi,t}^{Ern-Pl,v} + A_{\chi,t}^{Ern-Bau,v}
 \end{aligned}$$

Periodische Einnahmen:

$$E_{\chi,t}^{Nutz} = E_{\chi,t}^{Miete}$$

Aperiodische Einnahmen/Endwert am Ende der Betrachtungszeit (Restwert):

$$E_{\chi,t}^E = E_{\chi,t_e}^{Rest}$$

Der Net-Present-Value der baulichen Lösung χ über den Betrachtungszeitraum $t = n$ bezogen auf den Betrachtungszeitpunkt t_B (Bild 3) beträgt:

$$\begin{aligned}
 NPV_{\chi,t_B} &= \sum_{t=t_B}^n \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}} E_{\chi,t}^{Miete} + \frac{1}{(1+q)^{(t_e-t_B)}} E_{\chi,t_e}^{Rest} \\
 &\quad - \left\{ A_{t_0}^{Gr} (1+q)^{(t_B-t_0)} + A_{\chi,t}^{Pl} (1+q)^{(t_B-t_{Pl})} + \right. \\
 &\quad + A_{\chi,t}^{Bau} (1+q)^{\left(\frac{t_B-t_{\text{Beginn Bau}}}{2}\right)} + \\
 &\quad + \sum_{t=t_B}^n \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}} \left(A_{\chi,t}^{Obj-Mgt} + A_{\chi,t}^{Betr} + A_{\chi,t}^{Unterh} \right) + \\
 &\quad + \sum_{t=t_B}^n \frac{1}{(1+q)^{(t-t_B)}} \left[\sum_{j=1}^{m_2} \left\{ A_{\chi,t}^{Inst,v} \mid A_{\chi,t}^{Inst,v} = A_{\chi,\psi_k}^{Inst,v} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \text{für } t = \{\psi_k\} = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_{m_2}) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \vee A_{\chi,t}^{Inst,v} = 0 \text{ für } t \neq \{\psi_k\} \right\} + \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{j=1}^{m_3} \left\{ A_{\chi,t}^{Ern,v} \mid A_{\chi,t}^{Ern,v} = A_{\chi,\varphi_l}^{Ern,v} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \text{für } t = \{\varphi_l\} = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{m_3}) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \vee A_{\chi,t}^{Ern,v} = 0 \text{ für } t \neq \{\varphi_l\} \right\} \right\}
 \end{aligned}$$

Jedes Bauelement v kann weiter untergliedert werden in Unter-elemente u gemäß [24] und deren Lebenszykluskurven, wie z.B.

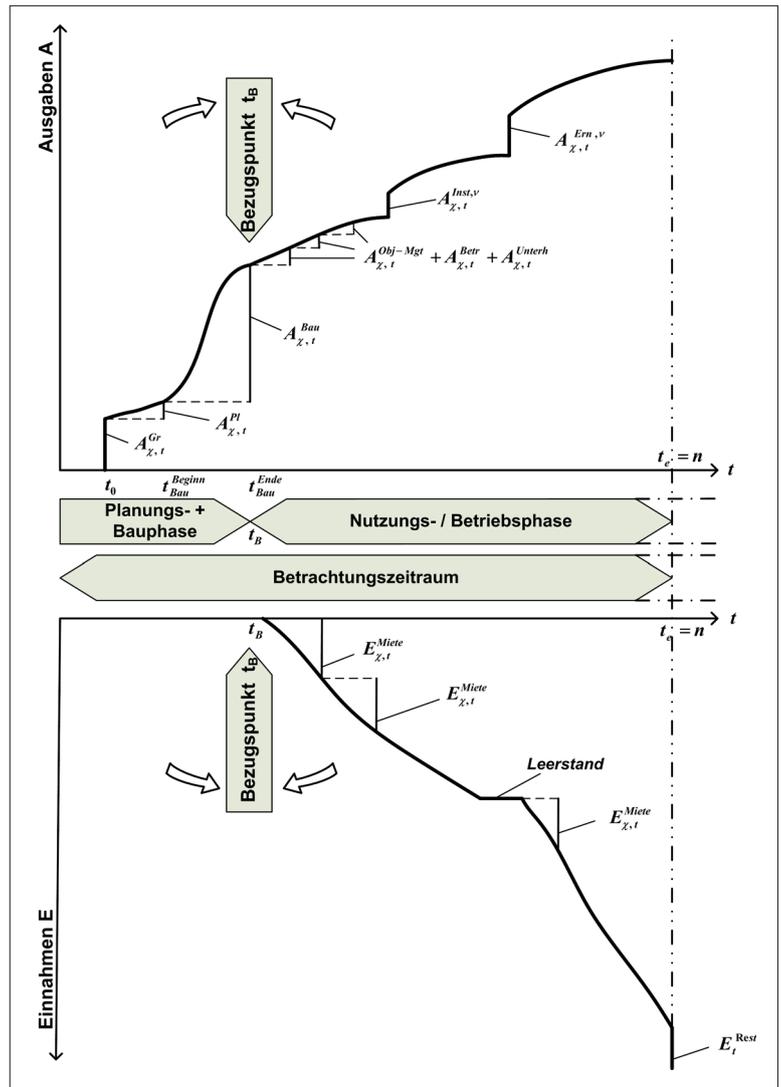


Bild 3. LC-NPV-Zahlungsströme
Fig. 3. LC-NPV payment flows

Ausbau:(v_u) = (Ausbau-Fussboden; Ausbau-Türen; Ausbau-Putz, ...)

7 Diskontierung und Teuerungsindex

Bei der Ermittlung des Net-Present-Value bzw. Barwert muss zwischen Diskontierungssatz und Teuerungsindizes unterschieden werden. Im Regelfall sind nur die heutigen Preise sowie Ausgaben für Löhne, Materialien etc. bekannt. Deswegen müssen die heutigen Preise und Ausgaben für Leistungen bzw. Kosten; entsprechend den zu erwartenden Preis-, Lohn-, Material- bzw. Produktsteigerungen hochgezinst werden. Die Ausgaben und Einnahmen werden auf den heutigen Geldwert auf der Basis der Geldwertentwicklung abgezinst (Bild 4).

Die Geldwertentwicklung bzw. der Realzins und damit auch der Diskontierungssatz setzt sich aus dem

- Nominalzins
- Risikosatz

zusammen.

Der Realzins bzw. Diskontierungssatz ergibt sich zu:

Nominalzinsfaktor: $NF = (1 + p)$

Risikofaktor: $RF = (1 + r)$

Diskontierungssatz: $DF = NF \cdot RF$

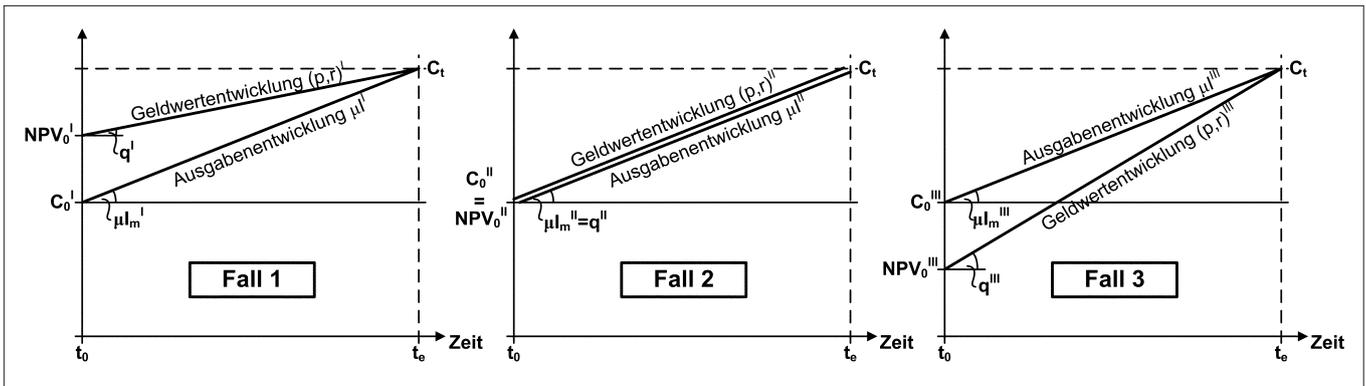


Bild 4. Kosten- und Geldwertentwicklungsszenarien
 Fig. 4. Scenarios of cost and cash value developments

$$DF = (1 + p)(1 + r) \quad \text{mit } r^*p \ll \{r;p\}$$

$$DF = (1 + r + p) = (1 + q)$$

Für n Jahre ergibt sich der Diskontierungszinssatz zu:

$$DF^n = (1 + r + p)^n = (1 + q)^n$$

Die Kosten-, Ausgaben- bzw. Marktpreisentwicklung ergibt sich aus der allgemeinen Inflation (Warenkorbpreissteigerung) oder differenziert nach Ausgaben- bzw. Kostenarten und wird durch die Hauptteuerungspreisindizes ausgedrückt:

$$(\underline{AI}) = \begin{bmatrix} LI \\ MI \\ MietI \\ EnergiI \\ etc. \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{--Lohnindex} \\ \text{--Materialindex} \\ \text{--Mietindex} \\ \text{--Energieindex} \\ \text{etc.} \end{array}$$

Diese können weiter differenziert werden (μI), z.B. die Löhne in:

- Mg-LI – Management-/Ingenieur – Lohnsteigerungsindex
- Fa-LI – Facharbeiterlohnsteigerungsindex
- Hi-LI – Hilfsarbeiterlohnsteigerungsindex

Weitere Preissteigerungsprognosen für Material und Instandsetzung sowie Erneuerung können auf der Basis vergangenheitsbezogener Statistiken der Fachverbände und der statistischen Ämter entwickelt werden.

Die Prognoserechnung für die Ausgabensteigerungen ist nicht Gegenstand dieses Beitrags; hierzu wird auf [31] verwiesen. Somit können die Ausgaben der Zukunft auf den heutigen Preisen $A_{\chi,0}^i$ zum Zeitpunkt t_0 aufgebaut werden durch Hochzinsung auf den jeweiligen Ausgabenzeitpunkt t :

$$\left(A_{\chi,t}^i \right) = \left(A_{\chi,0}^i (1 + \mu I)^{t-t_0} \right)$$

Zudem kann man die einzelnen Ausgaben durch ihre ein bis zwei wichtigsten Preis-Ausgabenindizes ausdrücken, z. B.:

$$\left(A_{\chi,t}^i \right) = f(LI, MI, \dots \vee BPR - I, TGA - I, \dots)$$

Die Ausgaben können durch die meist bekannten Basisausgaben (Löhne, Materialien, etc.) ausgedrückt werden. Dies erfolgt durch die jeweiligen Anteilsfaktoren der zwei bis maximal 3 Hauptkosten- bzw. Hauptausgabenarten (Pareto Prinzip):

$$A_{\chi,t}^i = f\left(\alpha_1^{Mg-L}; \alpha_2^{Fa-L}; \alpha_3^{Hi-L}; \beta_1^{BM}; \beta_2^{EM}; \beta_3^{Energ}; \gamma_1^{BPR}; \gamma_2^{TGA}\right) \Big|_{\chi,i,t}$$

Damit kann man die Ausgaben zum Zeitpunkt t aufbauend auf den heutigen Preisen durch die Basiskostensteigerungen wie folgt ausdrücken:

$$A_{\chi,t}^i = \alpha_{1,i}^{Mg-L} * A_{\chi,0}^i (1 + Mg - LI)^{t-t_0} + \alpha_{2,i}^{Fa-L} * A_{\chi,0}^i (1 + Fa - LI)^{t-t_0} + \alpha_{3,i}^{Hi-L} * A_{\chi,0}^i (1 + Hi - LI)^{t-t_0} + \beta_{1,i}^{BM} * A_{\chi,0}^i (1 + BM - I)^{t-t_0} + \beta_{2,i}^{EM} * A_{\chi,0}^i (1 + EM - I)^{t-t_0} + \beta_{3,i}^{Energ} * A_{\chi,0}^i (1 + Energ - I)^{t-t_0} + \gamma_{1,i}^{BPR} * A_{\chi,0}^i (1 + BPR - I)^{t-t_0} + \gamma_{2,i}^{TGA} * A_{\chi,0}^i (1 + TGA - I)^{t-t_0}$$

mit: $1 = \sum \alpha_j + \sum \beta_k + \sum \gamma_l$

analog für die Einnahmen:

$$E_{\chi,t}^{Miet} = E_{\chi,0}^{Miet} (1 + Miet - I)^{t-t_0}$$

$$E_{\chi,t}^{Rest} = E_{\chi,0}^{Rest} (1 + Imo - I)^{t-t_0}$$

In Vektorschreibweise:

$$\left(A_{\chi,t}^i \right) = \left(A_{\chi,0}^i * \sum_j \alpha_{j,i}^{\mu} (1 + \mu I)^{(t-t_0)} + \sum_k \beta_{k,i}^{\mu} (1 + \mu I)^{(t-t_0)} + \sum_l \gamma_{l,i}^{\mu} (1 + \mu I)^{(t-t_0)} \right)$$

$$E_{\chi,t}^{Miet} = E_{\chi,0}^{Miet} * (1 + Miet - I)^{(t-t_0)}$$

$$E_{\chi,t}^{Rest} = E_{\chi,0}^{Rest} * (1 + Imo - I)^{(t-t_0)}$$

8 Probabilistischer Lebenszyklusansatz

Die Ausgaben und Einnahmen sowie Teuerungs- und Diskontierungsansätze werden nur in Bandbreiten prognostizierbar sein zum Zeitpunkt t_0 . Daher ist die LC-NPV-Prognoserechnung besonders geeignet für eine stochastische Berechnung bzw. für eine Simulationsrechnung z.B. mittels Monte Carlo Simulation.

Mit Unterstützung der Monte Carlo Simulation lassen sich die möglichen Varianten und Kombinationen von Ereignissen betrachten. Im Regelfall treten bei Ausgaben und Einnahmen sowie Teuerungs- und Diskontierungsansätze weder nur die maximalen noch die minimalen Werte auf, jedoch die Ausga-

ben und Einnahmen treten immer auf (jährlich/einmalig). Solche Simulationen werden mit der Monte Carlo Simulation (MCS) durchgeführt [32].

Bei der Monte Carlo Simulation (MCS) handelt es sich um ein Verfahren zur numerischen Lösung mathematischer Problemstellungen durch die Verwendung von Zufallszahlen mit denen Zufallsereignisse bzw. die Ausprägungen von Ereignissen erzeugt werden [33]. Sie wird überwiegend dort eingesetzt, wo analytische Methoden versagen, z. B. zur Nachbildung einer nicht vorhandenen empirischen Datenbasis. Ihr Hauptanwendungsgebiet liegt dort, wo ein quantitativ formuliertes Entscheidungsproblem vorliegt, bei dem die Werte der Einflussgrößen – zumindest teilweise – nicht exakt bekannt, sondern nur schätzbar sind bzw. bei denen die Kombination der Ereignisse im jeweiligen Szenario bekannt bzw. nicht bekannt und die Ausprägung der jeweiligen Ereignisse z. B. in einem Intervall zwar bekannt ist, aber nicht die genaue Höhe der Ausprägung im betrachteten Ereignis. Ferner müssen Zielgrößen, Zielgrößenfunktionen und die Verknüpfungsfunktion bzw. Verknüpfungsooperatoren vorgegeben sein, an denen man die Auswirkungen von möglichen Entscheidungen beurteilen kann (z. B. Gewinn, Return on Investment, Risikokosten, Barwert)

Die Nachbildung einer empirischen Datenbasis erfordert eine grosse Anzahl von Zufallsereignissen. Ziel der MCS ist deshalb die Durchführung einer grossen Anzahl von Simulationsdurchläufen, wobei jeder Simulationsdurchlauf einer Kombination möglicher Zufallsereignisse entspricht. Es werden somit nicht alle möglichen Szenarien, was zu einer unendlichen Anzahl führen würde, sondern eine gewünschte, festgelegte Anzahl von Szenarien (z. B. 10000) mit Zufallsereignissen abgebildet.

Für eine solche Simulation bzw. stochastische Berechnung müssen die Ansätze für die:

- Ausgaben/Einnahmen
- Teuerungsfaktoren
- Realzins/Diskontierung

in probabilistischen Bandbreiten ermittelt werden, z. B. aus Erfahrungswerten bzw. Datenbanken.

Ausgaben und Einnahmen:

$$\left(A_{\chi,0}^i \right) = \left(\left. A_{\chi,0,\min}^i \right| \left. A_{\chi,0,EW}^i \right| \left. A_{\chi,0,\max}^i \right| \right)$$

$$\left(E_{\chi,0}^{Miete} \right) = \left(\left. E_{\chi,0,\min}^{Miete} \right| \left. E_{\chi,0,EW}^{Miete} \right| \left. E_{\chi,0,\max}^{Miete} \right| \right)$$

$$\left(E_{\chi,0}^{Rest} \right) = \left(\left. E_{\chi,0,\min}^{Rest} \right| \left. E_{\chi,0,EW}^{Rest} \right| \left. E_{\chi,0,\max}^{Rest} \right| \right)$$

Teuerungsfaktoren:

$$(\mu I) = (\mu I_{\min}, \mu I_{EW}, \mu I_{\max})$$

Diskontierungssatz:

$$(q) = (q_{\min}, q_{EW}, q_{\max})$$

Diese Einflussgrößen, die nur in Bandbreiten vorliegen, werden mangels genauer bzw. statistisch abgesicherter Ist-Daten mittels probabilistischer

- Dreieckdichtefunktion bzw.
- Beta PERT-Dichtefunktion

artikuliert bezüglich der Auftretensausprägung.

Für eine Dreiecks- oder Beta PERT-Dichtefunktion gilt:

$$f(A_{\chi,0}^i) = \text{Dreieck}(A_{\chi,0,\min}^i, A_{\chi,0,EW}^i, A_{\chi,0,\max}^i)$$

$$f(E_{\chi,0}^{Miete}) = \text{Dreieck}(E_{\chi,0,\min}^{Miete}, E_{\chi,0,EW}^{Miete}, E_{\chi,0,\max}^{Miete})$$

$$f(E_{\chi,0}^{Rest}) = \text{Dreieck}(E_{\chi,0,\min}^{Rest}, E_{\chi,0,EW}^{Rest}, E_{\chi,0,\max}^{Rest})$$

bzw.

$$f(A_{\chi,0}^i) = \text{BetaPERT}(A_{\chi,0,\min}^i, A_{\chi,0,EW}^i, A_{\chi,0,\max}^i)$$

$$f(E_{\chi,0}^{Miete}) = \text{BetaPERT}(E_{\chi,0,\min}^{Miete}, E_{\chi,0,EW}^{Miete}, E_{\chi,0,\max}^{Miete})$$

$$f(E_{\chi,0}^{Rest}) = \text{BetaPERT}(E_{\chi,0,\min}^{Rest}, E_{\chi,0,EW}^{Rest}, E_{\chi,0,\max}^{Rest})$$

mit:

$$A_{\chi,0,\min}^i \leq A_{\chi,0,EW}^i \leq A_{\chi,0,\max}^i$$

$$E_{\chi,0,\min}^{Miete} \leq E_{\chi,0,EW}^{Miete} \leq E_{\chi,0,\max}^{Miete}$$

$$E_{\chi,0,\min}^{Rest} \leq E_{\chi,0,EW}^{Rest} \leq E_{\chi,0,\max}^{Rest}$$

und den normierten Dichtefunktionen (A = 1):

$$f(A_{\chi,0}^i): \text{ Dichtefunktion von } A_{\chi,0}^i$$

$$f(E_{\chi,0}^{Miete}): \text{ Dichtefunktion von } E_{\chi,0}^{Miete}$$

$$f(E_{\chi,0}^{Rest}): \text{ Dichtefunktion von } E_{\chi,0}^{Rest}$$

Die dazugehörige Verteilungsfunktion:

$$F(A_{\chi,0}^i) = \int_{A_{\chi,0,\min}^i}^{A_{\chi,0,\max}^i} f(A_{\chi,0}^i) dA_{\chi,0}^i$$

$$F(E_{\chi,0}^{Miete}) = \int_{E_{\chi,0,\min}^{Miete}}^{E_{\chi,0,\max}^{Miete}} f(E_{\chi,0}^{Miete}) dE_{\chi,0}^{Miete}$$

$$F(E_{\chi,0}^{Rest}) = \int_{E_{\chi,0,\min}^{Rest}}^{E_{\chi,0,\max}^{Rest}} f(E_{\chi,0}^{Rest}) dE_{\chi,0}^{Rest}$$

Die Berechnung der Erwartungswerte für Ausgaben- und Einnahmen wird aus der Gleichgewichtsbetrachtung der Dichtefunktion um den Nullpunkt wie folgt ermittelt:

Normierter Flächeninhalt der Dichtefunktion:

$$A = \int_{A_{\chi,0,\min}^i}^{A_{\chi,0,\max}^i} f(A_{\chi,0}^i) dA_{\chi,0}^i = 1$$

Für die Dichtefunktion ergibt sich der Erwartungswert der Ausgabe i:

$$A_{\chi,0,EW}^i = \int_{A_{\chi,0,\min}^i}^{A_{\chi,0,\max}^i} A_{\chi,0}^i * f(A_{\chi,0}^i) dA_{\chi,0}^i$$

Die Varianz der Ausgabe i:

$$\sigma_{A_{\chi,0}^i}^2 = \int_{A_{\chi,0,\min}^i}^{A_{\chi,0,\max}^i} (A_{\chi,0}^i - A_{\chi,0,EW}^i)^2 * f(A_{\chi,0}^i) dA_{\chi,0}^i$$

Die Standardabweichung der Ausgabe i beträgt:

$$\sigma_{A_{\chi,0}^i} = \sqrt{\sigma_{A_{\chi,0}^i}^2} \quad \text{mit } (i) = \\ = \left((Gr; Pl; Bau)^{aperio} \cdot (Obj - Mgt; Betr; Unterh)^{perio} \cdot (Inst; Ern)^{aperio} \right)$$

Analog wird der Erwartungswert für die Einnahmen Miete und Restwert gebildet:

$$E_{\chi,0,EW}^{Miete} = \int_{E_{\chi,0,min}^{Miete}}^{E_{\chi,0,max}^{Miete}} E_{\chi,0}^{Miete} * f(E_{\chi,0}^{Miete}) dE_{\chi,0}^{Miete} \\ E_{\chi,0,EW}^{Rest} = \int_{E_{\chi,0,min}^{Rest}}^{E_{\chi,0,max}^{Rest}} E_{\chi,0}^{Rest} * f(E_{\chi,0}^{Rest}) dE_{\chi,0}^{Rest}$$

analog die Varianz und die Standardabweichung für Miete und Restwert:
Die Varianz:

$$\sigma_{E_{\chi,0}^{Miete}}^2 = \int_{E_{\chi,0,min}^{Miete}}^{E_{\chi,0,max}^{Miete}} (E_{\chi,0}^{Miete} - E_{\chi,0,EW}^{Miete})^2 * f(E_{\chi,0}^{Miete}) dE_{\chi,0}^{Miete} \\ \sigma_{E_{\chi,0}^{Rest}}^2 = \int_{E_{\chi,0,min}^{Rest}}^{E_{\chi,0,max}^{Rest}} (E_{\chi,0}^{Rest} - E_{\chi,0,EW}^{Rest})^2 * f(E_{\chi,0}^{Rest}) dE_{\chi,0}^{Rest}$$

Die Standardabweichung beträgt:

$$\sigma_{E_{\chi,0}^{Miete}} = \sqrt{\sigma_{E_{\chi,0}^{Miete}}^2} \\ \sigma_{E_{\chi,0}^{Rest}} = \sqrt{\sigma_{E_{\chi,0}^{Rest}}^2}$$

Die Simulation mittels Monte Carlo Simulation bildet einzelne Szenarien in jedem Rechenablauf ab. In jedem Rechenablauf bzw. gebildetem Szenarium werden für alle Ausgaben und Einnahmen sowie der dazugehörigen Teuerungsindizes und des Diskontierungssatzes je eine Zufallszahl generiert:

$$\left(Z_{X_{\epsilon,\chi}} \right)_{\delta} = \left\{ Z_{A_{\chi,0}^i}; Z_{E_{\chi,0}^{Miete}}; Z_{E_{\chi,0}^{Rest}}; Z_{\mu I}; Z_{q_0} \right\}_{\delta} \\ \text{mit } 0 \leq Z_{X_{\epsilon,\chi,\delta}} \leq 1$$

Diese Zufallszahlen bestimmen aus der jeweiligen Verteilungsfunktion der Einflussgrößen bzw. Zielgröße einen generativen Wert für jeden der beteiligten Terme in der jeweiligen Simulation δ :

$$\left(X_{\epsilon,\chi} \right)_{\delta} = \left(A_{\chi,0}^i; E_{\chi,0}^{Miete}; E_{\chi,0}^{Rest}; \mu I; q \right)_{\delta}$$

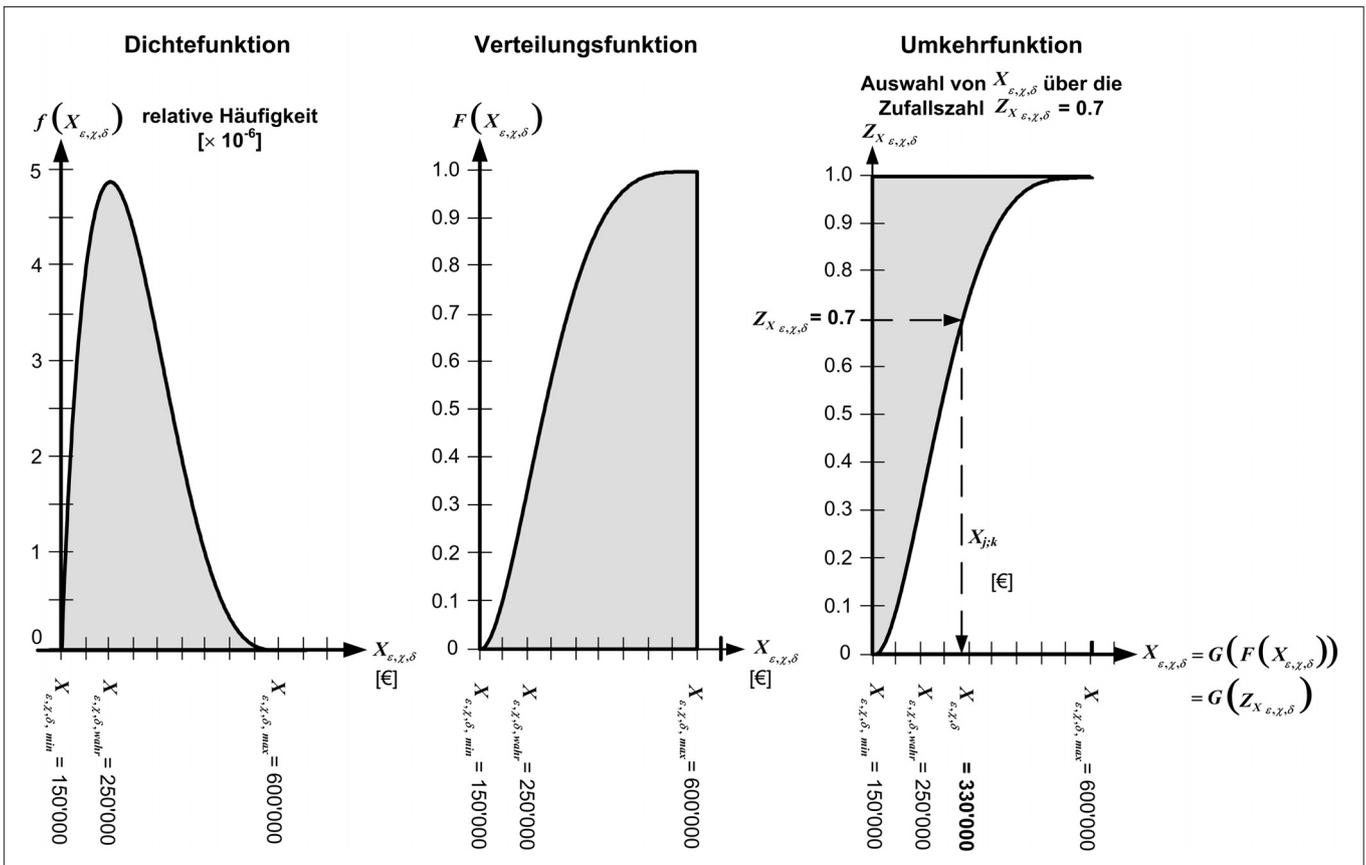


Bild 5. Einflussgrößen- (Ausgaben/Einnahmen/Teuerung/Diskontierung)

Fig. 5. Probability density function, cumulative distribution function and inverse function of influencing variables (expenditures/receipts/price rise/discontin

In jedem Simulationslauf δ wird für jede Einflussgröße $\{X_{\varepsilon,\chi}\}_\delta$ je eine Zufallszahl $\{Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}}\}$ generiert. Die mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators ermittelten Zufallszahlen $\{Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}}\}$ liegen im Intervall. $(0 \leq Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} \leq 1)$

Dies entspricht dem Wert der Verteilungsfunktion $F(X_{\varepsilon,\chi,\delta})$ der jeweiligen Einflussgröße $\{X_{\varepsilon,\chi,\delta}\}$.

Die Auswahl der Einflussgröße $\{X_{\varepsilon,\chi,\delta}\}$ über eine Zufallszahl $\{Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}}\}$ erfolgt anhand der Umkehrfunktion $G(F(X_{\varepsilon,\chi,\delta})) = \{X_{\varepsilon,\chi,\delta}\}$ (Bild 5).

Somit gilt für die Verteilungsfunktion (Bild 5):

$$Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} = F(X_{\varepsilon,\chi,\delta})$$

für die Umkehrfunktion (Bild 5):

$$G(F(X_{\varepsilon,\chi,\delta})) = G(Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}}) = \{X_{\varepsilon,\chi,\delta}\}$$

$$Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} = \left\{ Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} \in R \mid \left(0 \leq Z_{X_{\varepsilon,\chi,\delta}} \leq 1 \right) \right\}$$

Somit ergeben sich die Einflussgrößen im Simulationslauf δ wie folgt:

Ausgaben:

$$A_{\chi,0,\delta}^i = \left\{ A_{\chi,0}^i \mid A_{\chi,0}^i = G(Z_{A_{\chi,0,\delta}}^i) \right.$$

$$\left. \text{mit } Z_{A_{\chi,0}^i} = \left\{ Z_{A_{\chi,0}^i} \in R \mid \left(0 \leq Z_{A_{\chi,0}^i} \leq 1 \right) \right\} \right\}_\delta$$

Einnahmen:

$$E_{\chi,0,\delta}^{Miete} = \left\{ E_{\chi,0}^{Miete} \mid E_{\chi,0}^{Miete} = G(Z_{E_{\chi,0}^{Miete}}) \right.$$

$$\left. \text{mit } Z_{E_{\chi,0}^{Miete}} = \left\{ Z_{E_{\chi,0}^{Miete}} \in R \mid \left(0 \leq Z_{E_{\chi,0}^{Miete}} \leq 1 \right) \right\} \right\}_\delta$$

$$E_{\chi,0,\delta}^{Rest} = \left\{ E_{\chi,0}^{Rest} \mid E_{\chi,0}^{Rest} = G(Z_{E_{\chi,0}^{Rest}}) \right.$$

$$\left. \text{mit } Z_{E_{\chi,0}^{Rest}} = \left\{ Z_{E_{\chi,0}^{Rest}} \in R \mid \left(0 \leq Z_{E_{\chi,0}^{Rest}} \leq 1 \right) \right\} \right\}_\delta$$

Teuerungsindizes:

$$\mu I_\delta = \left\{ \mu I \mid \mu I = G(Z_{\mu I}) \right.$$

$$\left. \text{mit } Z_{\mu I} = \left\{ Z_{\mu I} \in R \mid \left(0 \leq Z_{\mu I} \leq 1 \right) \right\} \right\}_\delta$$

Diskontierung:

$$q_\delta = \left\{ q \mid q = G(Z_q) \right.$$

$$\left. \text{mit } Z_q = \left\{ Z_q \in R \mid \left(0 \leq Z_q \leq 1 \right) \right\} \right\}_\delta$$

Die Zahlungsströme $C_{\chi,0}$ ergeben sich aus:

$$C_{\chi,t} = C_{\chi,0} * (1 + \mu I)^{t-TB}$$

Das heißt, $C_{\chi,0}$ enthält die gleichen Terme wie $C_{\chi,t}$, jedoch bezogen auf den heutigen Zeitwert t_0 .

Net-Present-Value im Simulationslauf δ (Bild 6):

$$NPV_{\chi,tB,\delta} = \frac{(C_{\chi,0})^T}{\delta} * \left[\frac{(1 + \mu I_\delta)^{(t-TB)}}{(1 + q_\delta)} \right]$$

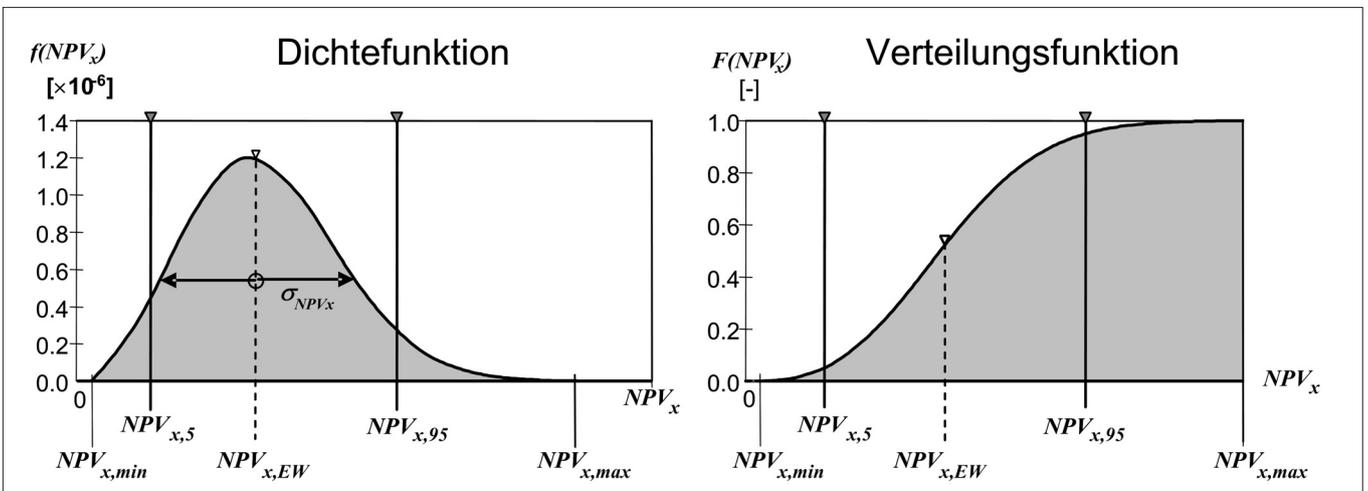


Bild 6. Dichte- und Verteilungsfunktion des NPV_χ der baulichen Lösung χ
 Fig. 6. Probability density function and cumulative distribution function of NPV_χ of building or infrastructural solution χ

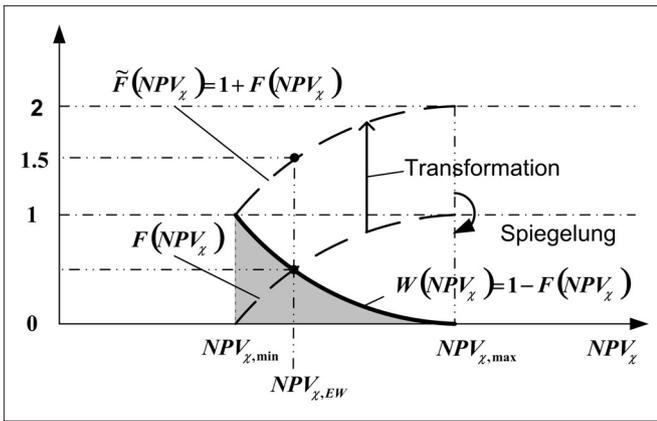


Bild 7. NPV-Wahrscheinlichkeitskurve der baulichen Lösung
Fig. 7. NPV-probability curve of the building or infrastructural solution

Dichtefunktion des Net-Present Values (Bild 6):

$$f(NPV_{\chi,t_B,\delta}) = f(NPV_{\chi,t_B,EW}; \sigma_{\chi,t_B}^2) \Big|_{\delta \leq \infty}$$

Verteilungsfunktion des Net-Present Values:

$$F(NPV_{\chi,t_B,\delta}) = \int_{NPV_{\chi,t_B,\min}}^{NPV_{\chi,t_B,\max}} f(NPV_{\chi,t_B,EW}; \sigma_{\chi,t_B}^2) dNPV_{\chi,t_B} \Big|_{\delta \leq \infty}$$

Die Ermittlung des NPV-Erwartungswertes, der Varianz sowie der Standardabweichungen erfolgt mittels zentralen Grenzwertsatzes der Stochastik. Der Erwartungswert NPV_{χ} der baulichen Lösung ergibt sich aus (Bild 6):

$$NPV_{\chi,t_B,EW} = \int_{NPV_{\chi,t,\min}}^{NPV_{\chi,t,\max}} NPV_{\chi,t} * f(NPV_{\chi,t_B}) dNPV_{\chi,t_B}$$

Das Net-Present-Value-Entscheidungsaxiom nach dem ökonomischen Maximalprinzip bildet auch bei der probabilistischen LC-NPV-Analyse die Basis für die Wahl der wirtschaftlichsten baulichen Alternative aus dem Spektrum der Alternativen ($1 \leq \chi \leq m$).

$$E - NPV_{t_B}^{\max} = \text{Max}(NPV_{\chi,t_B}) \Big|_{\chi=1}^{\chi=m}$$

Die Verteilungskurve $F(NPV)$ ergibt für $F(NPV_{\chi}) = 1$ den höchsten Wert für NPV_{χ} und für $F(NPV_{\chi}) = 0$ den niedrigsten. Aus heuristischer Überlegung folgt, dass der kleinste NPV_{χ} (Gewinn) mit höchster Wahrscheinlichkeit $P_W = 1$ sicher nach den Annahmen erreicht wird und der höchste NPV_{χ} mit der kleinsten Wahrscheinlichkeit $P_W = 0$. Daher wird die Verteilungskurve in die Wahrscheinlichkeitsverteilung $W(NPV)$ transferiert durch Transformation und Spiegelung (Bild 7).

Bei der probabilistischen Betrachtung der Entscheidung für die bauliche Variante steht nicht nur eine Entscheidungsgröße $NPV_{\chi,EW}$ zur Verfügung sondern die Varianz/Streubreite sowie die gesamte Verteilung möglicher Ergebnisse aufgrund der Varianz der Eingangsgrößen (Bild 8). Aus Bild 8 erkennt man, dass der $NPV_{\chi,EW}$ -Erwartungswert auch hier den Schlüsselwert/Keyparameter darstellt.

Aus Bild 8 kann man ablesen:

$$NPV_{2,EW} > NPV_{1,EW}$$

$NPV_{1,EW}$: wird bei Alternative $\chi = 1$ mit $P_W = 50\%$ Sicherheit erreicht,
wird bei Alternative $\chi = 2$ mit $P_W = 80\%$ Sicherheit erreicht

$NPV_{1,5\%}$: wird bei Alternative $\chi = 1$ nur noch mit einer Sicherheit von $P_W = 5\%$ erreicht,
wird bei Alternative $\chi = 2$ jedoch mit einer Sicherheit von $P_W = 60\%$ erreicht

Aufgrund dieser probabilistischen Ergebnisse können Entscheidungen auf unsicheren Eingangsgrößen „sicherer“ gefällt werden, da man die Auswirkungen von Änderungen auf das Ergebnis mit den Wahrscheinlichkeiten interpretieren kann.

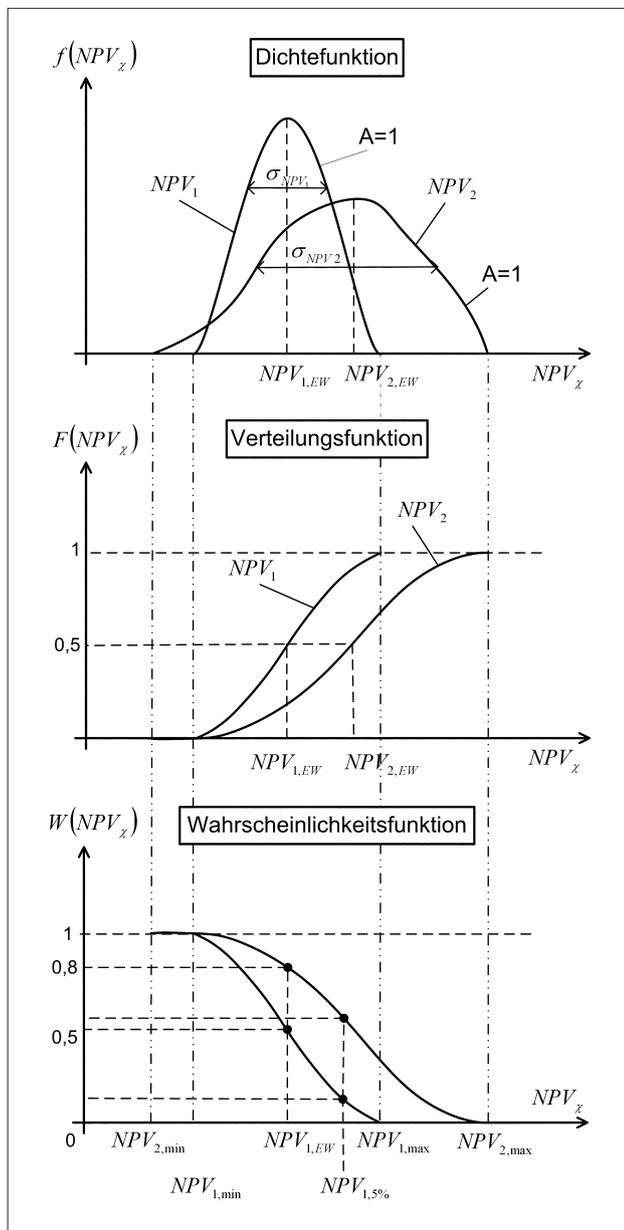


Bild 8. NPV-Dichte-, Verteilungs- und Wahrscheinlichkeitsfunktion für zwei alternative bauliche Lösungen
Fig. 8. NPV probability density function, cumulative distribution function and probability function for two alternative building or infrastructural solutions

9 Zusammenfassung/Ausblick

Das vorgestellte LC-NPV-Modell berücksichtigt bei der Berechnung des NPV die monetarisierbaren Lebenszyklus-Umlaufvermögensänderungen sowie die damit verbundenen Unsicherheiten die jeder Prognoserechnung zugrunde liegt. Ferner erfolgt mit diesem LC-NPV-Modell eine klare inhaltliche und zeitliche Systemabgrenzung unter Berücksichtigung des Markt- bzw. Restwertes bzw. des Verkaufserlöses jeder der betrachteten baulichen Lösungen. Somit ist sichergestellt, dass nicht nur eine Renditebetrachtung erfolgt, sondern gleichzeitig wird die Werterhaltung mit einbezogen und monetär bewertet. Zudem werden die Lebensdauerkurven verschiedener Bauteile, technische Einrichtungen und Materialien mathematisch finanziell berücksichtigt.

Mit diesem LC-NPV-Modell als Hilfsinstrument zur Entscheidungsfindung können Entscheidungen begründeter und sicherer gefällt werden.

Wie bei jeder Prognoserechnung entscheiden die Input-Daten über die Qualität des Ergebnisses. Im Rahmen des Facilitymanagement müssen diese Daten differenziert erfasst und bauteil- und materialspezifisch zugeordnet werden. Die vorhandenen DIN-Normen und GEFMA-Unterlagen bieten dazu gute Strukturierungsgrundlagen der Datenerfassung.

Formelzeichenverzeichnis

<i>a/b</i> :	Index für bauliche Alternative a bzw. b
<i>A</i> :	Ausgaben
<i>A – NPV</i> :	ausgabenbezogener Net-Present-Value
$A_t _{t=1}^n$:	periodische Ausgaben über die Laufzeit $t = 1$ bis $t = n$
Kostenarten i:	
<i>Ausbau,ext</i> :	Aussenanlagen (Gelände- und Verkehrsflächen, Baukonstruktionen und technische Anlagen ausserhalb des Bauwerks)
<i>Ausbau,int</i> :	interner Ausbau (Ausstattung)
<i>Ausbau – U</i> :	Unterhalt des internen und externen Ausbaus
<i>Bau</i> :	Baurealisierung
<i>Bedien</i> :	Bedienung der technischen Anlagen
<i>Berater</i> :	Gutachten und beratende Leistungen
<i>Betr</i> :	Betriebsausgaben (durch den bestimmungsgemässen Gebrauch des Gebäudes, der Anlagen, Einrichtungen und des Grundstücks laufend entstehende Ausgaben)
<i>Ern</i> :	Erneuerung
<i>Fin – Pl</i> :	Finanzierungs-Planung
<i>Gen</i> :	Prüfungen, Genehmigungen, Abnahmen
<i>Gr</i> :	Erwerb des Grundstückes
<i>Gr – Vorb</i> :	vorbereitende Massnahmen zur Bebauung des Grundstückes
<i>HOAI</i> :	Bearbeitung der in der HOAI beschriebenen Leistungen
<i>Insp</i> :	Inspektion der Baukonstruktion und der technischen Anlagen
<i>Inst</i> :	Instandsetzung
<i>Mgt</i> :	Management
<i>Nutz</i> :	Nutzung
<i>Obj – Mgt</i> :	Fremd- und Eigenleistungen der zur Verwaltung erforderlichen Arbeitskräfte und Einrichtungen
<i>Pl</i> :	Planung und Beratung
<i>Rein</i> :	Reinigung und Pflege

<i>Roh</i> :	Erstellung des Bauwerks – Rohbau
<i>Roh – U</i> :	baulichen Unterhalt (Baukonstruktion)
<i>Sicher</i> :	Kontroll- und Sicherheitsdienste
<i>Tech</i> :	technische Anlagen oder Anlagenteile
<i>Tech – U</i> :	betrieblicher Unterhalt (technische Anlagen)
<i>Unterh</i> :	Unterhalt
<i>Vers – Ent</i> :	Ver- und Entsorgung
<i>Vorb</i> :	Vorbereitung der Objektplanung
<i>Wart</i> :	Wartung der Baukonstruktion und der technischen Anlagen
<i>(A)</i> :	Vektor der Ausgaben
<i>BM</i> :	Baumaterial
<i>BPR/BPR – I</i> :	Baupreise-Rohbau/Baupreisindex-Rohbau
$C_{y,k}$:	Saldo der Zahlungsströme der baulichen Alternative a bzw. b
$C_{\chi,t} _{t=1}^n$:	Zahlungsströme einer baulichen Lösung χ über die Laufzeit $t = 1$ bis $t = n$
<i>(C)</i> :	Vektor der Zahlungsströme
<i>DF</i> :	Diskontierungsfaktor zur Verzinsung bzw. Diskontierung unter Berücksichtigung des Nominalzinses und des Risikosatzes
<i>E</i> :	Einnahmen
<i>E – NPV</i> :	einnahmenbezogener Net-Present-Value
$E_t _{t=1}^n$:	periodische Einnahmen über die Laufzeit $t = 1$ bis $t = n$
E_t^E :	Einnahmen einmaliger Ereignisse im Jahr t
$E_{\chi,t}^{Miete}$:	Einnahmen aus Miete der baulichen Lösung im Jahr t
$E_{\chi,t}^{Nutz}$:	Einnahmen aus Nutzung der baulichen Lösung im Jahr t
$E_{\chi,0}^{Re.st}$:	Einnahmen aus Verkauf (Restwert) der baulichen Lösung im Jahr $t = 0$
<i>EM</i> :	Elektro-Mechanik-Material/Geräte
<i>Energ</i> :	Energie (Wärme/Licht/Power)
<i>EW</i> :	erwarteter Wert
<i>(E)</i> :	Vektor der Einnahmen
<i>Fa – L</i> :	Facharbeiterlohn
<i>f(x)</i> :	Dichtefunktion von x
<i>F(x)</i> :	Verteilungsfunktion von x
<i>G(x)</i> :	Umkehrfunktion von x
<i>Hi – L</i> :	Hilfsarbeiterlohn
<i>i</i> :	Index der Hauptausgabengruppen (Nutzung, Planung, Bau, Betrieb, Instandsetzung, Erneuerung)
<i>Imo – I</i> :	Immobilienindex
<i>j</i> :	Laufindex
<i>k</i> :	Laufindex
<i>l</i> :	Laufindex
<i>LI</i> :	Lohnindizes (Mg-LI; Fa-LI; Hi-LI)
$(m_1/m_2/m_3)$:	Anzahl der einmaligen Ereignisse/durchgeführten Instandhaltungen/durchgeführten Erneuerungen
<i>MI</i> :	Materialindex (BM-I; EM-I; Energ-I)
<i>Miet – I</i> :	Mietindex
<i>min/max</i> :	kleinster/grösster Wert
<i>Mg – L</i> :	Managementlohn
<i>n</i> :	letztes Jahr des Betrachtungszeitraumes
<i>NF</i> :	Nominalzinsfaktor zum Auf- bzw. Abzinsen
<i>NPV</i> :	Net-Present-Value
<i>p</i> :	Nominalzinssatz
<i>q</i> :	Diskontierungszinssatz
<i>r</i> :	Risikosatz
<i>RF</i> :	Risikofaktor, mit dem das Kapital abgezinst bzw. aufgezinst werden muss

t :	Laufzeitindex
t_B :	Referenz-/Bezugszeitpunkt der Betrachtung
t_0/t_e :	Zeitpunkt zu Beginn/Ende der Analysephase
t_{Bau} :	Zeitpunkt des Anfalls der Baurealisierungsausgaben
$t_{Bau}^{Beginn} / t_{Bau}^{Ende}$:	Zeitpunkt zu Beginn/Ende der Baurealisierung
t_{Pl} :	Zeitpunkt zu Beginn der Planungs- und Beratungsarbeiten
$TGA - I$:	Baupreisindex-Technische Gebäudeausrüstung
X_e :	Einflussgrösse der Zahlungsströme, Teuerung und Diskontierung
γ :	Index der baulichen Alternative a bzw. b
Z_x :	Zufallszahl für x
α, β, γ :	spezifische Anteilsfaktoren der Hauptausgabengruppen i
δ :	Index für den Simulationslauf
ε :	Index für die versch. Ausgaben, Einnahmen, Teuerungsindizes und Diskontierungssatz $(A_{\chi,0}^i, E_{\chi,0}^{Miete}, E_{\chi,0}^{Rest}, \mu I_0, q_0)$
μI :	Teuerungsindex für die verschiedenen Ausgabenkategorien (Mg-L, Fa-L, Hi-L, BM, EM, Energ, BPR, TGA)
v :	Index der Bauelemente (Tragstruktur, TGA, Fassade/Fahrbahn, Ausbau, etc.)
σ_x :	Standabweichung von x
σ_x^2 :	Varianz von x
χ :	Index für die alternative bauliche Lösung
ω_j :	Zeitpunkt (Jahr) der Einnahmen des einmaligen Ereignisses j
ψ_k :	Zeitpunkt (Jahr) der aperiodischen Ausgaben für Instandhaltung k
φ_l :	Zeitpunkt (Jahr) der aperiodischen Ausgaben für Erneuerung l

of CIB 2004 Triennial Congress, Toronto, Ontario, May 2–9, S. 1–12, 2004

[8] Fuller, S. K.; Petersen, S. R.: Life-Cycle Costing Manual for the Federal Energy Management Program. NIST Handbook 135, 1995 Edition, Gaithersburg, 1996

[9] Hawk H.: Bridge Life-Cycle Cost Analysis. NCHRP Report 483, Washington, 2003

[10] Dell'Isola, A. J.; Kirk, S. J.: Life cycle costing for design professionals. McGraw-Hill, New York et al., 1981

[11] Mearig, T; Coffee, N.; Morgan, M.: Life cycle cost analysis handbook. State of Alaska – Department of Education & Early Development, Juneau, Alaska, 1999

[12] ISO (2000) ISO 15686 Part 1: Service Life Planning, International Organisation for Standardisation, Geneva, Switzerland

[13] Flanagan, R.; Kendell, A.; Norman, G.; Robinson, G. D.: Life cycle costing and risk management. In: Construction Management and Economics, May 1987, p. 553–571, 1987

[14] Pelzeter, A.: Ursache und Wirkung – Beeinflussung der Lebenszykluskosten eines Gebäudes durch seine Gestaltung. FACILITY MANAGEMENT, 5, 2005

[15] Boussabaine, H.; Kirkham, R.: Whole life-cycle costing: risk and risk responses. Blackwell Publishing, Oxford, 2004

[16] Rotermund, U.; Zain, R.: Nutzungskosten von Gebäuden. Deutscher Fachverlag, Frankfurt a. Main, 2002

[17] Internetportal der Conject AG, URL < <http://www.conject.com> >, zuletzt abgerufen am 3.05.2006

[18] N. N. 2004: Statistisches Jahrbuch der Schweiz 2004. Bundesamt für Statistik, Verlag Neue Zürcher Zeitung, Zürich

[19] Guba, E. G.; Lincoln, Y. S.: Competing paradigms in qualitative research. Chapter 6 (p. 105–118) in Denzin, N. K. & Lincoln, Y. S. (Eds.) Handbook of Qualitative Research. Thousand Oaks, Ca.: Sage, 1994

[20] Girmscheid, G.: Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften, Eigenverlag des IBB, ETH Zürich, Zürich, 2004

[21] Yin, R. K.: Case Study Research: Design and Methods. 3rd ed., Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2002

[22] Boulding, K.: General Systems Theory. In: General Systems, p. 11–17, 1956

[23] V. Bertalanffy, L.: General System Theory, New York, 1968

[24] DIN 18960 „Nutzungskosten im Hochbau“, Beuth Verlag, Berlin, 1999

[25] DIN 32736 „Gebäudemanagement“, Beuth Verlag, Berlin, 2000

[26] GEFMA 2000: „Kosten im Facility Management“, GEFMA, Nürnberg, 2004

[27] DIN 276 „Kostenplanung im Hochbau“, Beuth Verlag, Berlin, 1993

[28] SN 506 502 „EKG Elementkostengliederung“ Schweizer Norm, SNV Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur, 1995

[29] Ross, Stephen A.; Westerfield Randolph W.; Jaffe, Jeffrey F.: Corporate Finance. Third edition, RICHARD D. IRWIN, Burr Ridge – Illinois, 1993

[30] Girmscheid, G.: Wirtschaftlichkeitsanalysemodell – Lebenszyklusbetrachtung von kommunalen Strassenunterhalts-PPP's, Paper, 2006

[31] Sachs, L.: Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden, 11. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2004

[32] Girmscheid, G.; Busch, Th.: Risikomanagement in Generalunternehmungen, Eigenverlag des IBB, ETH Zürich, Zürich, 2005

[33] Mertens, P.: Simulation. 2. Aufl., Poeschel Verlag, Stuttgart, 1982

Literatur

[1] Girmscheid, G.: Projektentwicklung in der Bauwirtschaft: Wege zur Win-Win-Situation für Auftraggeber und Auftragnehmer. Springer, Berlin, 2004

[2] Girmscheid, G.: Strategisches Bauunternehmensmanagement. Springer Verlag, Berlin, 2006

[3] Girmscheid, G.; Borner: Wissensmanagement in Unternehmen der Bauwirtschaft – Zweck, Nutzen und Umsetzungsmöglichkeiten. In: Industrielles Bauen (Organ der Allianz der Bauindustrie-Organisation), Heft 3/2004, 2004

[4] Girmscheid, G.; Schmidle, Ch.: Prozessmodell für ereignisorientiertes Wissensmanagement in Bauunternehmungen. In: Bauingenieur, Band 78, H. 6, S. 284–291, 2003

[5] Girmscheid, G.; Busch, Th.: Risikomanagement in Bauunternehmen Projektrisikomanagement in der Angebotsphase. In: Bauingenieur, Band 78, H. 12, S. 571–580, 2003

[6] SIA: Schweizer Norm 506 480 „Wirtschaftlichkeitsrechnung für Investitionen im Hochbau“, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2004

[7] Rahmen, S.; Vanier, D. J.: Life cycle cost analysis as a decision support tool for managing municipal infrastructure. In: Proceedings