

# **Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen**

**Entwicklung eines Modells und einer Softwarekomponente  
zur ökonomischen Analyse und  
Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden**

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von  
**Dipl.-Ing. Kati Herzog**  
aus Kaiserslautern

D 17  
Darmstadt im April 2005

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt

Institut für Massivbau

Petersenstraße 12

64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.tu-darmstadt.de>

Herzog, Kati:

Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen –

Entwicklung eines Modells und einer Softwarekomponente

zur ökonomischen Analyse und Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden

1. Auflage, Darmstadt, Eigenverlag, Heft 10

ISBN 3-9808875-8-8

Dr.-Ing. Kati Herzog

Geboren 1975 in Kaiserslautern. Von 1994 bis 2000 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt und der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne / Schweiz. Von 2001 bis 2005 wissenschaftliche Mitarbeiterin von Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

## VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Eine entscheidende Motivation zur Behandlung des gewählten Themenkomplexes war ein gemeinsames Forschungsvorhaben des Instituts und des Zentralverbands Deutsches Baugewerbe e.V. (ZDB), das aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung über den TÜV Rheinland gefördert wurde, wofür ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken möchte.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich sehr herzlich für die stete Unterstützung verbunden mit einer großen Diskussionsfreude und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner danke ich ganz besonders für sein Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferats.

Herrn Gerhard Winkler und Herrn Jörg Bauer vom ZDB danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit, die anregenden Diskussionen und die stetige Unterstützung, die sie mir während des gemeinsamen Forschungsvorhabens zu Teil werden ließen.

Meinen Kolleginnen und Kollegen bin ich für das freundschaftliche Verhältnis in beruflicher und privater Hinsicht und die gute Zusammenarbeit sehr dankbar und werde sie in guter Erinnerung behalten. Insbesondere danke ich Frau Dr.-Ing. Katja Hüske für ihre stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion auch über ihre Tätigkeit am Institut für Massivbau hinaus.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Studenten, die durch ihre fachlichen Diskussionen zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Namentlich erwähnen möchte ich Frau Dipl.-Ing. Cathrin Fenner, Herrn Christoph Henseleit und Herrn Alexander Buschmann.

Außerordentlich dankbar für ihren fachlichen Rat und die wertvollen Anregungen in zahlreichen Diskussionen bin ich meiner Cousine Frau Dipl.-Ing. Inga Scheler, Frau Dr.-Ing. Kaja Boxheimer, Frau Dipl.-Ing. Carola Janitschka, Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Maffini, Herrn Dr.-Ing. Eric Simon und Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Lutz Hansen. Für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts dieser Arbeit danke ich Frau Silke Heimann und Herrn Karsten Deike.

Vor allem richtet sich aber mein Dank an meine Eltern Elgin und Gerhard Herzog, die mich in all den Jahren liebevoll unterstützt und mir den notwendigen Rückhalt zum Gelingen dieser Arbeit gegeben haben.

Darmstadt, April 2005

Kati Herzog

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent	Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner
Tag der Einreichung:	2. Februar 2005
Tag der mündlichen Prüfung:	21. April 2005



„Man kann nicht in die Zukunft schauen,  
aber man kann den Grund für etwas Zukünftiges legen  
– denn Zukunft kann man bauen“

Antoine de Saint-Exupéry  
(1900 – 1944)



## INHALTSVERZEICHNIS

### Verzeichnis der Abkürzungen, Formelzeichen und Variablen..... V

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	4
1.3 Vorgehensweise .....	5
<b>2 Ausgangssituation und Rahmenbedingungen.....</b>	<b>9</b>
2.1 Einführung .....	9
2.2 Aktuelle Zahlen der Bauwirtschaft .....	10
2.3 Potentiale der gesamtheitlichen Kostenbetrachtung .....	11
2.4 Nachhaltiges Bauen .....	13
2.4.1 Leitbild der Nachhaltigkeit.....	13
2.4.2 Ziele einer nachhaltigen Entwicklung im Bauwesen.....	14
2.4.3 Grundlagen der Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden .....	15
2.5 Life Cycle Costing.....	18
2.6 Rahmenbedingungen einer lebenszyklusorientierten und nachhaltigen Entwicklung im Bauwesen .....	20
2.6.1 Überblick .....	20
2.6.2 Bauordnungsrecht.....	21
2.6.3 Bundeshaushaltsordnung.....	21
2.6.4 Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“ .....	22
2.6.5 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) und abfallrechtliche Verordnungen .....	23
2.7 Zusammenfassung und Konsequenzen.....	27
<b>3 Grundlagen der Lebenszykluskostenanalyse .....</b>	<b>29</b>
3.1 Einführung .....	29
3.2 Analysegegenstand und Analyseziel.....	29
3.3 Lebenszyklus von Gebäuden .....	31
3.3.1 Lebensphasen im Gebäudelebenszyklus .....	31
3.3.2 Lebenszyklusmodell.....	34
3.3.3 Lebensdauer .....	37
3.4 Lebenszykluskosten.....	39
3.4.1 Kosten im Gebäudelebenszyklus – Überblick.....	39
3.4.2 Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen.....	42
3.5 Kosteneinflussparameter .....	44
3.6 Zusammenfassung und Analyse .....	51

<b>4</b>	<b>Kritische Analyse bestehender Methoden und Instrumente zur Lebenszykluskostenanalyse .....</b>	<b>55</b>
4.1	Einführung.....	55
4.2	Anforderungen .....	56
4.3	Methoden zur Kostenermittlung .....	57
4.3.1	Darstellung der Methoden .....	57
4.3.2	Diskussion der Methoden.....	59
4.4	Methoden der Investitionsrechnung.....	60
4.4.1	Grundlagen.....	60
4.4.2	Verfahren der Investitionsrechnung unter Sicherheit.....	61
4.4.2.1	Statische und dynamische Verfahren .....	61
4.4.2.2	Diskussion der Verfahren.....	65
4.4.3	Verfahren der Investitionsrechnung unter Unsicherheit .....	68
4.4.3.1	Sensitivitäts- und Risikoanalyse .....	68
4.4.3.2	Diskussion der Verfahren.....	69
4.5	Hilfsmittel zur Ermittlung der Erst- und Folgekosten von Gebäuden.....	70
4.5.1	Überblick.....	70
4.5.2	Bauteildatenblätter nach Menkhoff und nach Diederichs .....	71
4.5.3	Kostendiagramme nach Kandel.....	72
4.5.4	Kritische Analyse.....	72
4.6	Instrumente zur Lebenszyklusanalyse von Gebäuden .....	73
4.6.1	Überblick.....	73
4.6.2	Instrumente zur Lebenszykluskostenanalyse von Gebäuden.....	74
4.6.2.1	STATSBYGG – Årskostnadsanalyse .....	74
4.6.2.2	BLCC – Building Life Cycle Cost .....	75
4.6.3	Softwaretools zur Nachhaltigkeitsanalyse von Gebäuden .....	76
4.6.3.1	LEGEP .....	76
4.6.3.2	bauloop.....	78
4.6.4	Kritische Analyse.....	79
4.7	Zusammenfassung .....	81
<b>5</b>	<b>Modell zur Lebenszykluskostenanalyse von Baukonstruktionen .....</b>	<b>83</b>
5.1	Einführung.....	83
5.2	Methodik.....	84
5.3	Beurteilungskriterien .....	85
5.4	Erweiterung des Lebenszyklusmodells – Softwaretool bauloop.....	88
5.4.1	Verfahrensmethodik .....	88
5.4.1.1	Allgemeine Vorgehensweise .....	88
5.4.1.2	Erweiterung der Verfahrensmethodik .....	89
5.4.2	Stoffstromberechnung und Schichtenmodell.....	90
5.4.2.1	Allgemeine Vorgehensweise .....	90
5.4.2.2	Erweiterung der Stoffstromberechnung und des Schichtenmodells.....	95



---

5.5	Systemgrenzen der ökonomischen Nachhaltigkeitsanalyse .....	97
5.6	Kostenermittlung.....	99
5.6.1	Methodische Grundlagen .....	99
5.6.2	Allgemeine Berechnungsmethodik des Modells .....	102
5.6.3	Bewertung von Materialbereitstellungs- und Einbauprozessen .....	106
5.6.3.1	Allgemeines.....	106
5.6.3.2	Bewertungsmethodik des Modells .....	107
5.6.4	Bewertung von Rückbauprozessen.....	113
5.6.4.1	Allgemeines.....	113
5.6.4.2	Bewertungsmethodik des Modells .....	116
5.6.5	Bewertung von Entsorgungsprozessen .....	122
5.6.5.1	Allgemeines.....	122
5.6.5.2	Bewertungsmethodik des Modells .....	125
5.7	Lebenszykluskostenanalyse .....	130
5.7.1	Ermittlung der Lebenszykluskosten.....	130
5.7.1.1	Allgemeines.....	130
5.7.1.2	Berechnungsmethodik des Modells .....	133
5.7.2	Sensitivitätsanalyse .....	135
5.7.2.1	Allgemeines.....	135
5.7.2.2	Berechnungsmethodik des Modells .....	136
5.8	Datengrundlagen .....	137
5.9	Zusammenfassung.....	146
<b>6</b>	<b>Softwarekomponente baulocc .....</b>	<b>149</b>
6.1	Einführung .....	149
6.2	Programmstruktur .....	149
6.3	Programmsystematik.....	153
6.3.1	Codierung der Datengrundlage .....	153
6.3.2	Automatisierung der Lebenszykluskostenanalyse.....	157
6.4	Datenbank.....	159
6.4.1	Überblick .....	159
6.4.2	Ökonomische Stammdaten .....	160
6.4.2.1	Kostendaten .....	160
6.4.2.2	Daten Kapitelwertberechnung .....	163
6.4.3	Bewertungsgrundlagen und -kriterien .....	164
6.4.3.1	Prozessbewertungskriterien .....	164
6.4.3.2	Entsorgungsmatrix .....	166
6.5	Eingabe .....	166
6.5.1	Überblick .....	166
6.5.2	Modifiziertes Eingabemodul bauloop.....	167
6.5.3	Eingabemodul baulocc .....	173
6.6	Berechnung.....	173

6.7	Analyse – Lebenszykluskostenanalyse .....	178
6.7.1	Modul Stoffstromanalyse .....	178
6.7.2	Modul Kostenermittlung und Lebenszykluskostenermittlung .....	181
6.7.3	Modul Qualitative Analyse – Sensitivitätsanalyse .....	183
6.8	Zusammenfassung .....	185
<b>7</b>	<b>Modellanwendungen und Verifikation der Methodik</b>	
	<b>zur Lebenszykluskostenanalyse von Baukonstruktionen .....</b>	<b>187</b>
7.1	Einführung .....	187
7.2	Doppelhaus – Objektbeschreibung und Grundlagen der Lebenszykluskostenanalyse .....	187
7.3	Lebenszykluskostenanalyse .....	190
7.3.1	Lebenszykluskosten .....	190
7.3.2	Analyse der Ergebnisse .....	192
7.3.3	Optimierung und lebenszyklusorientierte Gestaltung der Baukonstruktion .....	201
7.3.3.1	Bauteilgruppe Decken .....	201
7.3.3.2	Bauteilgruppe Außenwände .....	208
7.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerung .....	212
<b>8</b>	<b>Wesentliche Schlussfolgerungen</b>	
	<b>für die Ermittlung der Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen .....</b>	<b>215</b>
<b>9</b>	<b>Resümee und Ausblick .....</b>	<b>223</b>
9.1	Resümee .....	223
9.2	Ausblick .....	228
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>231</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>241</b>
	Anhang 1 – Lohnfaktor .....	243
	Anhang 2 – Kalkulationszinssatz .....	245
	Anhang 3 – Baupreisindex .....	249
	Anhang 4 – Prozessbewertungskriterien Beispiel Doppelhaus .....	251
	Anhang 5 – Positionen Beispiel Doppelhaus .....	253
	Anhang 6 – Alternativpositionen Beispiel Doppelhaus .....	263