

# **Kostenrisiken von Industriebauten mit flexiblen Nutzungsszenarien**

Ein Berechnungsmodell für die  
Investitionsentscheidung unter Verwendung  
probabilistischer Methoden

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

DISSERTATION

von

**Gökhan Uysal, M. Sc.**

aus

Ebersberg

**D 17**

**Darmstadt 2017**

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz
Tag der Einreichung:	18. Januar 2017
Tag der mündlichen Prüfung:	20. April 2017

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt  
Institut für Massivbau  
Franziska-Braun-Straße 3  
64287 Darmstadt

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

Uysal, Gökhan:

Kostenrisiken von Industriebauten mit flexiblen Nutzungsszenarien

Ein Berechnungsmodell für die Investitionsentscheidung unter Verwendung probabilistischer Methoden

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 35

ISBN 987-3-942886-12-3

Dr.-Ing. Gökhan Uysal

Geboren 1986 in Ebersberg. Von 2004 bis 2009 Studium der Architektur an der Hochschule für angewandte Wissenschaften in München. 2009 Freier Mitarbeiter bei Allmann Sattler Wappner Architekten GmbH in München. Von 2009 bis 2012 Studium des Wirtschaftsingenieurwesens an der Technischen Universität München. In dieser Zeit freiberufliche Tätigkeit in der Architekturplanung und Mitarbeiter in der Baukostensteuerung der BMW AG. Von 2013 bis 2016 externer Doktorand bei Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen einer Forschungs Kooperation mit der BMW AG. Seit 2015 im Konzerncontrolling der BMW AG.

# VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als externer Doktorand am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen einer Forschungsk Kooperation mit der BMW AG.

Mein größter Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner für die Unterstützung, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir eröffneten Möglichkeiten.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz möchte ich sehr herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates danken.

Herrn Ulrich Beisbart, Abteilungsleiter Steuerung Bauprojekte, Facility Management und Energie, danke ich aufrichtig für die Auszeit, die ich mir bei der BMW AG für diese Arbeit nehmen durfte. Ohne Ihre organisatorische Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Thomas Georges, Abteilungsleiter Projektmanagement LU danken, der mir als Mentor eine wertvolle Unterstützung und Motivation war. Frau Dipl.-Kffr. Elif Türkoğlu möchte ich im Besonderen für die persönlichen Ratschläge und Anregungen während der Erstellung dieser Arbeit danken.

Bei Herrn Dr.-Ing. Peter Schnellbach möchte ich mich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit sehr bedanken. Mein Dank gilt ebenfalls Frau Renate Mohr für die organisatorische Unterstützung während der Zeit am Lehrstuhl.

Ich bedanke mich zudem bei meinen Kolleginnen und Kollegen für die in beruflicher und privater Hinsicht ausgesprochen herzliche Zeit am Lehrstuhl, an die ich mich stets gerne erinnern werde.

Schließlich möchte ich mich ebenfalls bei meiner Familie bedanken. Meine Eltern und meine Schwester haben mein Studium erst möglich gemacht und mich fortwährend unterstützt. Diese Arbeit ist ihnen gewidmet.

München, Januar 2017

  
Gökhan Uysal

## **ZUSAMMENFASSUNG**

Im Bauwesen wird zunehmend gefordert das technologisch bedingte Kostenrisiko einer Investition über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu identifizieren. Die Lebenszykluskosten eines Gebäudes sind jedoch zum Zeitpunkt der Berechnung größtenteils unbekannt. Wichtige Parameter wie Kostenentwicklungen, Lebensdauern von Bauteilen oder Energieverbrauchswerte können nur mit einer gewissen Ungenauigkeit ermittelt werden. Unsichere Eingangsdaten gehen derzeit als Annahmen auf Basis von Expertenwissen in die Lebenszykluskostenberechnung ein. Durch diese deterministische Kostenbewertung können jedoch Kostenrisiken eines Bauwerks nicht adressiert werden. Um den geschilderten Unsicherheitsfaktoren entgegen zu wirken und Kostenrisiken innerhalb der Lebenszykluskostenberechnung zu quantifizieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Berechnungsansatz auf probabilistischer Grundlage entwickelt. Weiterhin ermöglicht das Modell erstmals, die beiden Zielfelder der ökonomischen Nachhaltigkeit "Lebenszykluskosten" und "Umnutzungsfähigkeit" in einem Kostenberechnungsmodell abzubilden. Hierfür wurde ein umfangreiches Bewertungssystem zur Messung des Flexibilitätsniveaus von Bauwerken entwickelt. Mithilfe eines speziellen Kostenquantifizierungsansatzes, der auf Korrekturfaktoren beruht, können schließlich die Änderungskosten in Abhängigkeit des Flexibilitätsniveaus ermittelt werden.

## **ABSTRACT**

There is a rising need in the construction industry to identify the technology related cost risks over the entire life cycle in an investment decision. However, in opposite to the construction costs, the life cycle costs of buildings are largely unknown at the time of the calculation. Important parameters such as cost trends, lifetimes of components or energy consumptions can only be determined with a certain inaccuracy. Currently, uncertain input data goes into the life cycle cost calculation as an estimate based on expert knowledge. Through this deterministic approach cost risks of construction projects cannot be addressed. Statements about the robustness of the cost calculation or the probability of occurrence are also not possible. To address the described uncertainties and to quantify cost risks over the entire life cycle, in this thesis a method is developed to calculate life cycle costs with a probabilistic approach. Furthermore the method allows for the first time to combine the two target fields of economic sustainability "life cycle costs" and "convertibility" in one costing model. For this purpose, an extensive evaluation system for measuring the flexibility levels of buildings was developed. Using a special cost quantification approach, which is based on correction factors, the costs for building conversions can be finally calculated in dependence of the building flexibility.

---

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>Abbildungen und Tabellen.....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungen und Formelzeichen .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Motivation .....	1
1.2 Abgrenzung des Betrachtungsumfangs und Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit .....	4
<b>2 Theoretische Grundlagen der Modellbildung .....</b>	<b>7</b>
2.1 Einführung .....	7
2.2 Untersuchungen zur Berücksichtigung der Umnutzungsfähigkeit und Kostenrisiken in der Lebenszykluskostenberechnung.....	7
2.2.1 Umnutzungsfähigkeit als Planungsparadigma in der Fabrikplanung.....	7
2.2.2 Kostenrisiken im Planungsprozess von Industriebauten .....	10
2.2.3 Elemente einer Fabrik .....	15
2.2.4 Lebenszyklen der Elemente einer Fabrik .....	17
2.3 Stand der Forschung in der Nachhaltigkeitszertifizierung und der Lebenszykluskostenberechnung .....	23
2.3.1 Entwicklung des Begriffs Nachhaltigkeit .....	23
2.3.2 Vorhandene Zertifizierungssysteme.....	24
2.3.3 Anwendungsgrenzen vorhandener Zertifizierungssysteme .....	27
2.3.4 Entwicklung von Ansätzen zur Lebenszykluskostenberechnung .....	29
2.3.5 Präzisierte Definition der Gebäudelebenszykluskosten .....	32
2.4 Kostenermittlungsverfahren im Bauwesen.....	33
2.4.1 Verfahren zur Ermittlung der Herstellkosten .....	33
2.4.2 Verfahren zur Ermittlung der Nutzungskosten .....	42
2.4.3 Technische und wirtschaftliche Lebensdauer von Bauteilen .....	50
2.5 Grundlagen der Investitionsrechnung.....	53
2.5.1 Investitionsrechnung unter Sicherheit.....	53
2.5.2 Investitionsrechnung unter Unsicherheit.....	60
2.6 Grundlagen der Entscheidungs- und Nutzentheorie .....	68

2.6.1	Entscheidungsverfahren für Multikriterienprobleme .....	68
2.6.2	Effizienzwertmethode nach Eisert.....	68
2.6.3	Soll-Ist-Zustandsvergleich nach Eman.....	69
2.6.4	Nutzwertanalyse .....	71
2.6.5	Analytisch-hierarchischer Prozess .....	72
2.7	Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen für die Konzeption eines Berechnungsansatzes .....	75
<b>3</b>	<b>Modellansatz zur Berechnung der Lebenszykluskosten.....</b>	<b>81</b>
3.1	Berücksichtigung der Umnutzungsfähigkeit und Kostenrisiken in der Lebenszykluskostenberechnung .....	81
3.2	Konzeptionelle Grundlagen .....	83
3.2.1	Gebäudelebenszyklus unter Unsicherheit .....	83
3.2.2	Flächenartenbasierte Lebenszykluskostenberechnung.....	84
3.2.3	Abgrenzung des Betrachtungsumfangs und Kostenerfassungslogik.....	87
3.3	Ermittlung der Lebenszykluskosten .....	91
3.3.1	Herstellkosten.....	91
3.3.2	Betriebskosten .....	92
3.3.3	Instandsetzungskosten .....	98
3.3.4	Rückbaukosten .....	99
3.3.5	Berücksichtigung von Preisentwicklung und Standort .....	99
3.3.6	Discounted-Cashflow-Modell und vollständiger Kostenplan .....	100
3.4	Zusammenfassung .....	103
<b>4</b>	<b>Integration der Umnutzungsfähigkeit in die Lebenszykluskostenberechnung ...</b>	<b>105</b>
4.1	Umnutzungsfähigkeit als wesentlicher Kostentreiber .....	105
4.2	Faktorenmodell zur qualitativen Bewertung der Umnutzungsfähigkeit.....	106
4.2.1	Konzeptionelle Grundlagen.....	106
4.2.2	Einflussfaktoren auf die Umnutzungsfähigkeit.....	108
4.2.3	Gewichtung von Einflussfaktoren .....	114
4.2.4	Gewichtung von Teil- und Unterkriterien .....	117
4.2.5	Erstellung von Kriteriensteckbriefen.....	118
4.3	Exemplarische Anwendung des Bewertungssystems .....	121
4.4	Kritische Analyse des Bewertungssystems .....	127

4.5	Modellansatz zur Quantifizierung der Kosten der Umnutzungsfähigkeit .....	129
4.5.1	Konzeptionelle Grundlagen.....	129
4.5.2	Auswahl und Konfiguration geeigneter Referenzgebäude.....	131
4.5.3	Korrektur nicht vergleichbarer Kosten innerhalb der Referenzgebäude...	131
4.5.4	Iterative Faktorennormierung anhand statistischer Kostenkennwerte .....	132
4.5.5	Kostenbewertung des Flexibilitätsniveaus eines Neubauprojekts .....	136
4.6	Zusammenfassung .....	137
<b>5</b>	<b>Integration des Kostenrisikos in die Lebenszykluskostenberechnung.....</b>	<b>139</b>
5.1	Kostenrisiken innerhalb der Lebenszykluskostenberechnung.....	139
5.2	Modellansatz zur Quantifizierung von Kostenrisiken .....	140
5.2.1	Konzeptionelle Grundlagen.....	140
5.2.2	Basisvariablen, Ergebnisvariable und Modellannahmen .....	142
5.2.3	Definition von Wahrscheinlichkeitsverteilungen.....	143
5.2.4	Anpassung von Verteilungsfunktionen an statistische Kostendaten.....	147
5.2.5	Definition von Kostenkorrelationen.....	149
5.2.6	Stochastische Simulation.....	150
5.3	Ergebnisbeurteilung mithilfe probabilistischer Entscheidungsbäume.....	152
5.3.1	Aufstellung des probabilistischen Entscheidungsbaums.....	152
5.3.2	Alternativenvorauswahl durch Dominanzkriterien .....	155
5.3.3	Alternativenauswahl anhand des Risikoprofils .....	156
5.4	Zusammenfassung .....	160
<b>6</b>	<b>Prototypische Software-Lösung LCC at Risk .....</b>	<b>161</b>
6.1	Programmversionen.....	161
6.2	Konfiguration eines Gebäudes.....	161
6.3	Bewertung der Kosten der Flexibilität und der Qualität.....	164
6.4	Bewertung der Bauänderungskosten anhand von Einzelmaßnahmen .....	166
6.5	Ergebnisdarstellung und Berichterstellung.....	167
6.6	Durchführung einer probabilistischen Lebenszykluskostenberechnung .....	168
6.7	Verifikation und Validierung des Berechnungsmodells.....	170
6.7.1	Verifikation der Forschungsergebnisse durch Expertengremium.....	170
6.7.2	Validierung durch Abgleich mit statistischen Kostenkennzahlen.....	171

<b>7 Exemplarische Anwendung des Modells.....</b>	<b>175</b>
7.1 Definition der Lebenszyklusszenarien und Gebäudealternativen.....	175
7.2 Aufstellung des probabilistischen Entscheidungsbaums .....	178
7.3 Berechnungsparameter der Lebenszykluskosten .....	180
7.4 Lebenszykluskostenberechnung und Alternativenauswahl .....	182
<b>8 Wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der Kostenrisiken von     Industriebauten .....</b>	<b>189</b>
<b>9 Zusammenfassung und Forschungsausblick .....</b>	<b>191</b>
9.1 Zusammenfassung .....	191
9.2 Forschungsausblick.....	193
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>195</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>215</b>
Anhang A: Lebenszykluskosten - Kosten- und Energiekennwerte, Nutzungsdauern	215
Anhang B: Flexibilitätsbewertung - Fragebögen, Kriteriensteckbriefe .....	232
Anhang C: Korrekturfaktoren - Flexibilität, Qualität, Länderindizes .....	292
Anhang D: Probabilistik - Verteilungsfunktionen, Parameter, Eigenschaften.....	311
Anhang E: Probabilistik - Verteilungstypen der Kosten und Lebensdauern .....	323
Anhang F: Probabilistik - Kostenkorrelationen .....	330
Anhang G: Berechnungsbeispiel - Lebenszykluskosten .....	332