



25

Carolin Roth

**Lebenszyklusanalyse
von Baukonstruktionen unter
Nachhaltigkeitsgesichtspunkten**

Ein Beitrag zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von
Gebäuden bei ungewissem Lebensweg

DISSERTATION

Heft 25

Darmstadt 2011

Carolin Roth

Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten

Für Bauherren und Investoren ist es in zunehmendem Maße von Interesse, welchen Beitrag ein Bauwerk zu einer Nachhaltigen Entwicklung leisten kann. Die Nachhaltigkeitsanalyse eines Gebäudes erfordert stets die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus. Merkmal der vorausschauenden Beurteilung jedoch ist, dass der künftige Lebensweg des Bauwerks unbekannt ist und die ihn bestimmenden Parameter durch Ungewissheit gekennzeichnet sind.

Zur Vorteilhaftigkeit einer Planungsvariante sind insbesondere dann keine verlässlichen Aussagen möglich, wenn ein heutiger Mehraufwand die Chance auf zukünftige Einsparungen eröffnet. Dies gilt sowohl für die Kosten als auch für Umweltgesichtspunkte. Typische Fragestellungen betreffen beispielsweise die Instandsetzungsfreundlichkeit, Umnutzungsfähigkeit oder Reinigungsfreundlichkeit eines Gebäudes.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die eine Lebenszyklusanalyse von Gebäuden unter Ungewissheit ermöglicht. Sie beruht im Kern auf der Nutzwertanalyse und der Szenariotechnik und ist für den Bewertenden flexibel auf viele Aufgabenstellungen anwendbar.



Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten

Ein Beitrag zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden
bei ungewissem Lebensweg

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

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Carolin Roth

aus
Böblingen

D 17

Darmstadt 2011

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lützkendorf
Tag der Einreichung: 20. April 2011
Tag der mündlichen Prüfung: 07. Oktober 2011

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau
Petersenstrasse 12
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

Roth, Carolin:

Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten
Ein Beitrag zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden bei ungewissem Lebensweg

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 25

ISBN 978-3-9811881-8-9

Dr.-Ing. Carolin Roth (geb. Hock)

Geboren 1979 in Böblingen. Von 1999 bis 2005 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2005 bis 2010 wissenschaftliche Mitarbeiterin bei Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Ab Juni 2010 tätig im Tragwerksplanungsbüro Hock Beratende Ingenieure GmbH in Haibach. Seit 2011 geschäftsführende Gesellschafterin.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstammt aus meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich herzlich für die Möglichkeiten, die er mir im Rahmen meiner Forschung am Fachgebiet eröffnet hat, sowie für seine Unterstützung meiner Promotion.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Lützkendorf danke ich als Korreferenten für die kritische Auseinandersetzung mit meiner Arbeit.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet danke ich für die schönen Jahre, die ich dort erlebt habe und die Freundschaften, die dort geschlossen wurden. Meine Zeit in Darmstadt bleibt mir in beruflicher wie in privater Hinsicht in lieber Erinnerung.

Für ihr Interesse an meiner Forschungsarbeit, die fachlichen Diskussionen und die kritische Durchsicht der Dissertationsschrift danke ich insbesondere Dr.-Ing. Carmen Schneider und Dipl.-Wirt.-Ing. Torsten Mielecke.

Meinem Mann danke ich dafür, dass es uns gelungen ist, Beruf und Familie zu vereinbaren, auch in anstrengenden Phasen, zu denen man die Fertigstellung einer Dissertation sicherlich zählen darf.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern. Ihr habt großen Anteil am erfolgreichen Abschluss meiner Promotion, denn Zuversicht, Selbstvertrauen und Motivation wurden mir durch euch mit auf den Weg gegeben. Ich wünsche mir, dass ich den Rückhalt und die Unterstützung, die ich noch heute erlebe, an meine Kinder weitergeben kann.

Haibach, Oktober 2011

Carolin Roth

ZUSAMMENFASSUNG

Für Bauherren und Investoren ist es in zunehmendem Maße von Interesse, welchen Beitrag ein Bauwerk zu einer Nachhaltigen Entwicklung leisten kann. Die Frage, wie dieser Beitrag *prospektiv* (d.h. vorausschauend) und *relativ* (d.h. im Vergleich von alternativen Baukonstruktionen) quantifiziert werden kann, beschäftigt bereits seit längerem die Bauforschung. Es ist allgemein anerkannt, dass die Nachhaltigkeitsanalyse von Gebäuden stets eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus erfordert. Merkmal der prospektiven Beurteilung jedoch ist, dass der künftige Lebensweg des Bauwerks unbekannt ist und die ihn bestimmenden Parameter durch Ungewissheit gekennzeichnet sind. Insbesondere Ökobilanz (Life Cycle Analysis, LCA) und Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC) fußen auf zahlreichen unsicheren Annahmen.

Zur Vorteilhaftigkeit einer Planungsvariante sind insbesondere dann keine verlässlichen Aussagen möglich, wenn ein heutiger Mehraufwand die Chance auf zukünftige Einsparungen eröffnet. Dies gilt sowohl für die Kosten als auch für Umweltgesichtspunkte. Typische Fragestellungen betreffen beispielsweise die Instandsetzungsfreundlichkeit, Umnutzungsfähigkeit oder Reinigungsfreundlichkeit eines Gebäudes.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik entwickelt, die eine Lebenszyklusanalyse von Gebäuden unter Ungewissheit ermöglicht. Sie beruht im Kern auf der Nutzwertanalyse und der Szenariotechnik und ist dank diverser Anpassungsmöglichkeiten für den Bewertenden flexibel auf viele Aufgabenstellungen anwendbar.

ABSTRACT

Life Cycle Analysis and Life Cycle Costing of Building Construction – Sustainability Assessment of Buildings in the light of Uncertainty

Building owners and investors are showing a growing interest in the sustainability impact of their building – the application of sustainability assessments and ratings is growing. Existing assessment schemes quantify building sustainability in a forward-looking, comparative way.

It is commonly recognized that the sustainability assessment of buildings must comprise the entire life cycle. The parameters that are needed in order to perform the (environmental) Life Cycle Analysis (LCA) and the economic Life Cycle Costing (LCC) are often uncertain. By reason of the unknown future life cycle, LCA and LCC are based on estimates or assumptions. When choosing among design alternatives at an early planning stage, a sound decision therefore often is difficult.

This is especially relevant, when design options require additional initial investments that are linked with possible future savings, both in costs and environmental burden. Adaptable buildings, appropriate refurbishment strategies or easy to clean constructions are typical examples for this type of problem.

This paper presents the framework for Life Cycle Analysis and Life Cycle Costing of building constructions in consideration of the uncertainty of the building life cycle. It is based on a weighted-sum multi-attribute decision method and scenario-based design. The method is applicable to many decision problems, where the best design option for a building construction is sought.

INHALT

Abbildungen und Tabellen.....	V
Abkürzungen und Formelzeichen	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise.....	2
2 Ausgangssituation	5
2.1 Einführung.....	5
2.2 Nachhaltiges Bauen.....	5
2.2.1 Politische Ziele.....	5
2.2.2 Operationalisierung eines Leitbilds	8
2.3 Nachhaltigkeitsanalyse.....	10
2.3.1 Anwendungsgebiete	10
2.3.2 Top-down-Ansatz.....	10
2.3.3 Bottom-up-Ansatz.....	11
2.3.4 Aktueller Stand der Nachhaltigkeitsanalyse für Gebäude	12
2.4 Bewertungskriterien	14
2.4.1 Vielfalt und Eignung der Kriterien	14
2.4.2 Quantifizierung der Kriterien.....	15
2.4.3 Kriterien der Ökobilanzierung	16
2.4.3.1 Bedeutung.....	16
2.4.3.2 Indikatoren	18
2.4.4 Kriterium Lebenszykluskosten	20
2.4.4.1 Bedeutung.....	20
2.4.4.2 Kapitalwert als Indikator.....	21
2.4.4.3 Annuität als Indikator.....	22
2.5 Kritische Analyse der Nachhaltigkeitsbewertung für Gebäude	24
2.6 Zusammenfassung.....	27
3 Grundlagen der Entscheidungstheorie	29
3.1 Einführung.....	29
3.2 Nachhaltigkeitsbewertung als Entscheidungsproblem.....	29
3.3 Entscheidungsverfahren für Multikriterienprobleme.....	31
3.3.1 Überblick.....	31
3.3.2 Voruntersuchungen	34
3.3.3 Allgemeines Verfahren nach der multi-attributiven Nutzentheorie.....	35
3.3.4 Nutzwertanalyse.....	36

3.3.5	Analytisch-hierarchischer Prozess	38
3.3.6	TOPSIS-Methode	40
3.3.7	Kosten-Nutzen-Analyse	41
3.3.8	Kosten-Wirksamkeits-Analyse	42
3.3.9	Preis-Leistungsmodell	42
3.4	Entscheidungen unter Ungewissheit und unter Unsicherheit.....	43
3.4.1	Überblick.....	43
3.4.2	Sensitivitätsanalyse	45
3.4.3	Szenariotechnik	46
3.4.4	Entscheidungsregeln bei Ungewissheit.....	49
3.4.5	Entscheidungsregeln bei Unsicherheit (bei Risiko)	52
3.5	Diskussion weiterer Lösungsansätze.....	54
3.5.1	Konzept der Realoptionen.....	54
3.5.2	Fuzzy-Logik-Ansätze	55
3.6	Zusammenfassung	57
4	Entwicklung einer Methodik zur Lebenszyklusanalyse unter Ungewissheit	59
4.1	Einführung.....	59
4.2	Zielsetzung	59
4.2.1	Aufgabenstellung	59
4.2.2	Anwendungsbereich	60
4.3	Lösungsansatz	60
4.4	Kardinales Analyseverfahren	61
4.4.1	Aufbau und Elemente des Verfahrens.....	61
4.4.2	Kriterienauswahl	62
4.4.2.1	Nachhaltigkeitsziele	62
4.4.2.2	Wirkungen von Emissionen	63
4.4.2.3	Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen.....	64
4.4.2.4	Nutzung erneuerbarer Ressourcen.....	66
4.4.2.5	Generationenübergreifendes Wirtschaften	67
4.4.2.6	Gesundheit.....	68
4.4.2.7	Risikovorsorge.....	70
4.4.2.8	Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit.....	71
4.4.2.9	Grundbedürfnisse	72
4.4.2.10	Kulturelle und soziale Ressourcen	73
4.4.3	Kriterienkatalog.....	74
4.4.4	Multikriterienbewertung	78
4.4.4.1	Verfahren.....	78
4.4.4.2	Transformation in einen Nutzwert	78

4.4.4.3	Gewichtungsfaktoren	80
4.5	Verfahren zur Lebenszyklus-Szenarienbewertung	81
4.5.1	Aufbau und Elemente des Verfahrens	81
4.5.2	Varianten	81
4.5.3	Szenarien	82
4.5.4	Analyse der Entscheidungsmatrix	83
4.6	Modellbildung	86
4.6.1	Bedeutung	86
4.6.2	Gebäudemodell	86
4.6.3	Lebenszyklusmodell.....	88
4.6.3.1	Definition des Lebenszyklus	88
4.6.3.2	Herstellung	91
4.6.3.3	Betrieb	91
4.6.3.4	Instandsetzung	91
4.6.3.5	Änderung	94
4.6.3.6	Beseitigung.....	95
4.6.4	Funktionelle Einheit, Bezugsgrößen und Betrachtungsrahmen.....	95
4.7	Bewertungsablauf.....	98
4.8	Zusammenfassung.....	100
5	Anwendungsfelder.....	101
5.1	Einführung.....	101
5.2	Reinigungsfreundlichkeit	101
5.3	Instandhaltungsstrategie.....	102
5.4	Nutzerkomfort	103
5.5	Instandsetzungsfreundlichkeit.....	104
5.6	Umnutzungsfähigkeit	106
5.7	Recyclinggerechtes Bauen	107
5.8	Zusammenfassung	108
6	Anwendung der entwickelten Methodik an einem Beispielgebäude	109
6.1	Einführung.....	109
6.2	Problembeschreibung und Zielfestlegung.....	109
6.3	Variantendefinition	110
6.4	Einflussanalyse.....	115
6.5	Adaption der Multikriterienbewertung	118
6.6	Ausarbeiten der Szenarien.....	121
6.6.1	Umfeldanalyse	121
6.6.2	Deskriptoren.....	128
6.6.3	Szenarien	129
6.7	Aufstellen der Entscheidungsmatrix	133

6.8	Analyse und Interpretation	136
6.8.1	Allgemeine Betrachtungen	136
6.8.2	Anwendung von Entscheidungsregeln bei Ungewissheit	137
6.8.3	Anwendung von Entscheidungsregeln bei Unsicherheit.....	138
6.8.4	Sensitivitätsanalysen	141
6.8.5	Interpretation der Ergebnisse	144
6.9	Zusammenfassung	145
7	Resümee und Ausblick.....	147
7.1	Resümee	147
7.2	Ausblick	150
8	Literaturverzeichnis.....	153
Anhang A	HGF-Ansatz mit Defizitanalyse für das Aktivitätsfeld Wohnen und Bauen	166
Anhang B	Steckbriefe des BNB-Systems.....	169
Anhang C	Beispiele zu nominalen, ordinalen und kardinalen Merkmalen	171
Anhang D	Zahlenbeispiele zu Entscheidungsregeln unter Ungewissheit.....	172
Anhang E	Bestimmung von Gewichtungsfaktoren nach der AHP-Methode	175
Anhang F	Nutzwertanalysen für das Beispielgebäude in allen Szenarien.....	179
Anhang G	Tabellen zu den Sensitivitätsanalysen für das Beispielgebäude.....	186