

Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen

Modellierung
und praxisnahe Prognose

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

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Frank Ritter

aus
Bessenbach / Unterfranken

D 17

Darmstadt 2011

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht

Tag der Einreichung: 26. Januar 2011

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Juni 2011

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau
Petersenstrasse 12
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.to>

Ritter, Frank:

Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen
Modellierung und praxisnahe Prognose

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 22

ISBN 978-3-942886-00-0

Dr.-Ing. Frank Ritter

Geboren 1975 in Aschaffenburg. Von 1995 bis 2001 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2001 bis 2002 Mitarbeiter in der Philipp Holzmann Ingenieurgesellschaft für Bautechnik in Neu-Isenburg. Von 2002 bis 2007 Mitarbeiter im Ingenieurbüro Hock – Beratende Ingenieure GmbH in Haibach. Von 2007 bis Anfang 2011 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. In dieser Zeit auch als freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König und Heunisch Planungsgesellschaft in Frankfurt/Main und Ingenieurbüro Hock – Beratende Ingenieure GmbH in Haibach tätig. Seit 2011 Bauleiter bei der Adam Hörnig Baugesellschaft GmbH & Co. KG.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich aufrichtig für seine Unterstützung, das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir eröffneten Möglichkeiten.

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

Bei Herrn Dipl.-Ing. Eric Brehm, Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing Torsten Mielecke und Frau Renate Mohr möchte ich mich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit bedanken.

Meinen Kollegen und Kolleginnen danke ich ganz besonders für die in beruflicher und privater Hinsicht ausgesprochen herzliche und angenehme Zeit am Institut, an die ich mich gerne erinnern werde. Meinen Zimmerkollegen Herrn Dipl.-Ing. Eric Brehm und Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Torsten Mielecke danke ich für das stets vorhandene Interesse und die Diskussionsbereitschaft bezüglich meiner Forschungsarbeit. Frau Renate Mohr danke ich für die vielfache Unterstützung im Rahmen der Datenerhebung.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern Ursula und Herbert Ritter für ihren fortwährenden Rückhalt, der mir insbesondere während meines Studiums eine große Hilfe war.

Der größte Dank gilt den beiden wichtigsten Menschen in meinem Leben, meiner lieben Mutter Ursula und meiner süßen Tochter Emilia Ritter, denen ich diese Arbeit widme. Ich bedaure zutiefst, dass sie sich nicht kennenlernen durften.

Darmstadt, Juni 2011

Frank Ritter

Zusammenfassung

Im Rahmen des gestiegenen Nachhaltigkeitsbewusstseins ist das Wissen um die realitätsnahe Lebenserwartung einer Konstruktion bzw. ihrer Bauteile sowohl für die Durchführung von Lebenszyklusanalysen als auch zur Planung von Instandsetzungsstrategien in zunehmendem Maße erforderlich.

Diese Arbeit enthält eine systematische Untersuchung der lebensdauerbeeinflussenden Faktoren von Bauteilen und Bauelementen. Anhand einer umfangreichen Datenerhebung werden Erfahrungswerte über die Lebensdauer von Bauteilen sowie deren Einflussgrößen gesammelt, um unter Berücksichtigung aktueller Bauteilkataloge und Literatur zu Bauschäden, die wesentlichen Einflussgrößen auf die Lebensdauer von Bauteilen identifizieren und quantifizieren zu können.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird ein Verfahren zur Vorhersage objektspezifischer Bauteillebensdauern in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussgrößen entwickelt. Durch die Erweiterung mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen kann schließlich anhand einer qualitativen Bewertung von sieben Einflusskategorien die spezifische Lebensdauer je nach Kenntnis der Umgebungsbedingungen mit entsprechender Eintrittswahrscheinlichkeit vorhergesagt werden.

Somit können bereits bei der Planung von Gebäuden die entsprechenden Bauprodukte und Bauteile derart aufeinander abgestimmt werden, dass die Stoff- und Energieflüsse reduziert und die Lebenszykluskosten minimiert werden. Der Einsatz von Bauteilen und Baustoffen nach vordergründig wirtschaftlichen Gesichtspunkten kann zukünftig im Sinne einer lebenszyklusgerechten Planung vermieden werden.

Abstract

In the context of the growing awareness of sustainability issues, the knowledge of the realistic life expectancy of a structure or its components gains importance for both, the implementation in life cycle assessments and the planning of maintenance strategies.

The following provides a systematic study of factors affecting the service life of parts and components. On the basis of an extensive data collection, empirical data over the lifetime of components and their parameters are collected to identify and quantify the main factors influencing the service life of components, taking into account catalogues of currently used parts and literature on structural damage.

Based on these results, a method for specific service life prediction of components is developed including the main factors. Due to the stochastic approach using probability distributions, the specific service life for certain environmental conditions can finally be predicted with a qualitative assessment of seven categories of influence factors.

Thus, the building products and components can already be adapted to one another in the planning of buildings in such a way, that the material and energy flows are reduced and the life cycle costs are minimized. The use of components and materials, especially in terms of economic use, can be avoided in the future to achieve a more lifecycle-oriented design.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Formelzeichen, Variablen und Abkürzungen	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Vorgehensweise	3
2 Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie im Bauwesen	7
2.1 Vorbemerkung	7
2.2 Einführung	7
2.3 Definition von Grenzzuständen	7
2.4 Zufallsgrößen und ihre Verteilungen	10
2.4.1 Allgemeines.....	10
2.4.2 Normalverteilung	11
2.4.3 Logarithmische Normalverteilung	12
2.4.4 Weibull-Verteilung.....	12
2.4.5 Mehrdimensionale Zufallsgrößen und Verteilungen.....	14
2.4.6 Transformation von Verteilungen	15
2.5 Anpassung von Daten an Verteilungsfunktionen auf statistischer Basis.....	16
2.5.1 Allgemeines.....	16
2.5.2 Wahrscheinlichkeitspapier und Lebensdauernetz	17
2.5.3 Methode der Minimierung der Fehlerquadrate	18
2.6 Parameterschätzung anhand von Basisdaten	18
2.6.1 Allgemeines.....	18
2.6.2 Momentenmethode.....	19
2.6.3 Maximum-Likelihood-Prinzip	20
2.6.4 Data Updating nach Bayes	22
2.7 Lösungsverfahren der Zuverlässigkeitstheorie	27
2.7.1 Allgemeines.....	27

2.7.2	Momentenmethode (FOSM)	27
2.7.3	Monte-Carlo-Simulation	28
2.8	Zusammenfassung.....	29
3	Grundlagen der Lebensdaueranalyse.....	31
3.1	Einführung	31
3.2	Aktuelle Bestrebungen im Bereich der Lebensdauerermittlung.....	35
3.3	Grundlagen der Lebensdauerermittlung nach DIN ISO 15686	36
3.4	Abnutzung, Wertverlust und Alterungsverhalten	41
3.5	Unterhaltungs- und Instandhaltungsstrategien.....	45
3.6	Zusammenfassung.....	47
4	Kritische Analyse ausgewählter Verfahren zur Lebensdauerermittlung ..	49
4.1	Einführung	49
4.2	Kennwertemethode	49
4.3	Referenzfaktorenmethode von Tomm, Rentmeister und Finke	51
4.4	Faktorenmethode nach DIN ISO 15686.....	51
4.5	Wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden	55
4.5.1	Einführung.....	55
4.5.2	Alterungsmodell nach Markov.....	55
4.5.3	Weitere probabilistische Ansätze	57
4.6	Softwaremodelle zur Lebensdauervorhersage	58
4.7	Zusammenfassung.....	59
5	Auswahl und Gruppierung der Bauteile	61
5.1	Einführung	61
5.2	Detaillierung und Gliederung der Bauelemente.....	61
5.3	Sammlung von Lebensdauerdaten	62
5.4	Identifikation maßgebender Einflussgrößen	65
5.4.1	Allgemeines.....	65
5.4.2	Lebensdauern mit statistischer Auswertung.....	65
5.4.3	Erstinvestitions- und Folgekosten	66
5.4.4	Risikobasierte Kenngrößen	67

5.4.5	Robustheit und Fehleranfälligkeit	68
5.5	Auswahl und Gruppierung der maßgebenden Bauteile	70
5.6	Modellbildung und Detaillierung.....	71
5.7	Lösbarkeit von Schichten.....	72
5.8	Zusammenfassung.....	74
6	Einflussfaktoren auf die Lebensdauer.....	75
6.1	Einführung	75
6.2	Materielle Einflussfaktoren nach DIN ISO 15686.....	75
6.2.1	Allgemeines.....	75
6.2.2	Komponentenqualität (Faktor A)	76
6.2.2.1	Allgemeines	76
6.2.2.2	Produktqualität.....	76
6.2.2.3	Erfahrungswerte und Testberichte	77
6.2.2.4	Komplexität des Bauteils	77
6.2.2.5	Verfügbarkeit von Komponenten	77
6.2.3	Entwurfsqualität (Faktor B)	78
6.2.3.1	Allgemeines	78
6.2.3.2	Eingliederung in die Konstruktion.....	78
6.2.3.3	Qualität des Planungsteams	78
6.2.3.4	Komplexität des Entwurfs.....	79
6.2.3.5	Qualitätssicherung in der Planung	79
6.2.4	Ausführungsqualität (Faktor C)	79
6.2.4.1	Allgemeines	79
6.2.4.2	Qualität der Ausführung	79
6.2.4.3	Qualität des Projektmanagements.....	80
6.2.4.4	Klimatische Verhältnisse auf der Baustelle	80
6.2.4.5	Komplexität der Ausführung	80
6.2.4.6	Qualitätssicherung in der Ausführungsphase.....	80
6.2.5	Innenräumliche Umgebungsbedingungen (Faktor D).....	80

6.2.5.1	Allgemeines	80
6.2.5.2	Raumluftbedingungen	81
6.2.5.3	Temperatureinwirkung	81
6.2.5.4	Chemische Angriffe	81
6.2.5.5	Biologische Angriffe	82
6.2.6	Außenräumliche Umgebungsbedingungen (Faktor E)	82
6.2.6.1	Allgemeines	82
6.2.6.2	Standortbedingungen	82
6.2.6.3	Temperatureinwirkungen	83
6.2.6.4	Sonneneinstrahlung	83
6.2.6.5	Feuchtigkeit	84
6.2.6.6	Biologische Angriffe	85
6.2.6.7	Erschütterungen	86
6.2.6.8	Wind	87
6.2.7	Nutzungsintensität (Faktor F)	87
6.2.7.1	Allgemeines	87
6.2.7.2	Art der Nutzung	88
6.2.7.3	Mechanische Einflüsse	88
6.2.7.4	Verschmutzungs- und Reinigungsintensität	89
6.2.7.5	Optischer Anspruch	89
6.2.7.6	Aktualisierte Gebäudeinformation	89
6.2.8	Instandhaltungsniveau (Faktor G)	89
6.2.8.1	Allgemeines	89
6.2.8.2	Instandhaltungszyklus	90
6.2.8.3	Instandhaltungsqualität	90
6.2.8.4	Aktualisierte Gebäudedokumentation	92
6.2.8.5	Instandhaltungsfreundlichkeit	92
6.3	Immaterielle Einflüsse	93
6.3.1	Allgemeines	93
6.3.2	Funktionale Überalterung	93

6.3.3	Modische Obsoleszenz	93
6.3.4	Baurechtliche Obsoleszenz	94
6.3.5	Ökologische Überalterung	94
6.3.6	Ökonomische Obsoleszenz	94
6.3.7	Technische Überalterung	94
6.3.8	Sonstige immaterielle Einflüsse	94
6.4	Materialspezifische Einflüsse	95
6.4.1	Allgemeines	95
6.4.2	Einflüsse auf bewehrten und unbewehrten Beton	95
6.4.3	Einflüsse auf mineralische Bindemittel in Mörtel, Putz und Estrich	96
6.4.4	Einflüsse auf keramische Werkstoffe	97
6.4.5	Einflüsse auf Naturstein	99
6.4.6	Einflüsse auf Glas	99
6.4.7	Einflüsse auf Holz	100
6.4.8	Einflüsse auf Metalle	101
6.4.9	Einflüsse auf Kunststoff	103
6.5	Zusammenfassung	103
7	Erweiterung der Datengrundlage	105
7.1	Einführung	105
7.2	Entwicklung von Fragebögen und Interviewleitfaden	105
7.3	Durchführung und Ergebnisse der Erhebung	107
7.4	Datenqualität nach DIN ISO 15686-8 (2008)	111
7.5	Datenupdate nach Bayes	114
7.6	Zusammenfassung	116
8	Vorhersage objektspezifischer Lebensdauern	119
8.1	Einführung	119
8.2	Entwicklung des Einflussgrößenmodells	120
8.3	Ergebnisse in den einzelnen Bauteilgruppen	129
8.4	Darstellung maßgebender Bauteile in vereinfachter Übersicht	132

8.5	Erweiterung des Modells durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen.....	135
8.6	Modellverifikation in der Praxis	139
8.6.1	Allgemeines.....	139
8.6.2	Büro- und Geschäftshaus in innerstädtischer Lage.....	139
8.6.3	Verwaltungsgebäude im stadtnahen Randgebiet in Süddeutschland	142
8.7	Modellvergleich und Sensitivität	143
8.8	Zusammenfassung.....	149
9	Anwendung im Bereich Lebenszyklusanalyse	153
9.1	Einführung	153
9.2	Grundlagen der Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 und 14044	153
9.3	Einführung in die Lebenszyklusanalyse hybrider Innenbauteile	155
9.4	Ökologische Bewertung von hybriden Innenbauteilen.....	157
9.5	Ökonomische Bewertung von hybriden Innenbauteilen.....	160
9.6	Zusammenfassung.....	164
10	Resümee und Ausblick.....	167
11	Literaturverzeichnis	173
Anhang.....	185
A	Bauelemente der Kostengruppe 300 nach DIN 276-1	187
B	Lebensdauerquellen	188
C	Liste der massgebenden Key-Komponenten.....	195
D	Beschreibung der Bauteilgruppen mit Schädigungsmechanismen.....	197
D.1	Fenster.....	197
D.2	Türen	198
D.3	Außenwandbekleidung, außen.....	199
D.4	Sonnenschutz	201
D.5	Innenwandbekleidung	202
D.6	Bodenaufbauten und -beläge.....	203
D.7	Deckenbekleidungen.....	204
D.8	Dachfenster und -öffnungen.....	205
D.9	Dachbeläge.....	206

D.10	Dachentwässerung und Schutzanlagen	208
E	Aggregations- und Schichtmodelle zusammengesetzter Bauteile	209
E.1	Fenster	209
E.2	Türen	211
E.3	Außenwandbekleidung, außen	213
F	Kartierungen der aussenräumlichen Umgebungsbedingungen.....	215
F.1	Allgemeines	215
F.2	Klimaübersicht für Mitteleuropa.....	215
F.3	Mittlere jährliche Sonnenscheindauer in Deutschland	216
F.4	Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in Deutschland	217
F.5	Hagelschlagrisiko nach Schadenssätzen	218
F.6	Schneelastzonen nach DIN 1055-5 (2005)	219
F.7	Erdbebenzonen nach DIN 4149 (2005)	220
F.8	Windlastzonen nach DIN 1055-4 (2005).....	221
G	Fragebogen der Datenerhebung.....	222
G.1	Musterfragebogen der Bauteilgruppe Fenster.....	222
H	Gesamtliste der untersuchten Bauteile.....	225
I	Umweltwirkungen von Wandbekleidungen und Bodenbelägen.....	235
H.1	Wandbekleidungen	235
H.2	Bodenbeläge.....	242