



23

Benjamin Frhr. von Wolf-Zdekauer

**Energieeffizienz
von Anlagensystemen
zur Gebäudekühlung**

Ein nutzenbezogener Bewertungsansatz unter
betriebsnahen Randbedingungen

DISSERTATION

Heft 23

Darmstadt 2011

Energieeffizienz von Anlagensystemen zur Gebäudekühlung

Ein nutzenbezogener Bewertungsansatz unter betriebsnahen Randbedingungen

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

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Benjamin Frhr. von Wolf-Zdekauer

aus
Eschwege

D 17

Darmstadt 2011

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Marten F. Brunk
Tag der Einreichung:	8. Oktober 2010
Tag der mündlichen Prüfung:	10. August 2011

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau

Petersenstraße 12

64287 Darmstadt

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

Wolf-Zdekauer, Benjamin Frhr. von:

Effizienz von Anlagensystemen zur Gebäudekühlung. Ein nutzenbezogener Bewertungsansatz unter betriebsnahen Randbedingungen

1. Auflage, Darmstadt, Eigenverlag, Heft 23

ISBN 978-3-9811881-7-2

Benjamin Frhr. von Wolf-Zdekauer

Geboren 1978 in Eschwege/Hessen. Von 1998 bis 2004 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2004 bis 2005 Planung und Kalkulation in der Abteilung Technische Gebäudeausrüstung bei der Bilfinger Berger AG in Mannheim und Frankfurt a. M. Von 2005 bis 2009 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Von 2005 bis 2008 freier Mitarbeiter für Lebenszykluskostenprognosen bei KHP König und Heunisch Planungsgesellschaft, beratende Ingenieure für Bauwesen in Frankfurt a. M. Seit 2010 tätig im Bereich Energie- und Anlagen-Monitoring im Building Technology Center der Bilfinger Berger Hochbau GmbH, Frankfurt a. M.

„Optimismus ist in seinem Wesen keine Ansicht über die gegenwärtige Situation, sondern eine Lebenskraft, eine Kraft der Hoffnung, wo andere resignieren, eine Kraft den Kopf hochzuhalten, wenn alles fehlzuschlagen scheint, eine Kraft, Rückschläge zu ertragen, eine Kraft, die die Zukunft niemals dem Gegner lässt, sondern sie für sich in Anspruch nimmt.“

Dietrich Bonhoeffer: *Nach Zehn Jahren*, Berlin, 1943.

für

Nadja & Sophia

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Das gewählte Thema dieser Arbeit steht im Zusammenhang mit einem gemeinsamen und durch die Bilfinger Berger AG geförderten Forschungsvorhaben zur innovativen Gebäudetechnik am Institut für Massivbau. Für die finanzielle Unterstützung und die sehr gute Zusammenarbeit während des Forschungsprojekts bin ich sehr dankbar.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich sehr herzlich für seine Unterstützung und Diskussionsbereitschaft sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen und seiner stetigen Begeisterung für das Thema dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Marten F. Brunk danke ich sehr für sein Interesse an der Arbeit, die fachlichen Anregungen und die Übernahme des Koreferates.

Meinen Kolleginnen und Kollegen bin ich für die äußerst angenehme Zeit am Institut für Massivbau und das stets offene und freundschaftliche Verhältnis sehr dankbar. Meine Tätigkeit am Institut wurde dadurch zu einer wertvollen Zeit, in der ich mich sowohl persönlich als auch fachlich weiterentwickeln konnte. Ein sehr herzlicher Dank für die hilfreichen wissenschaftlichen Diskussionen gilt insbesondere Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christian Siegel und Dipl.-Ing. Achim Knauff.

Für die sorgfältige Durchsicht der Entwurfsfassung dieser Arbeit danke ich meiner Frau Nadja sowie meiner Schwiegermutter Margit Freifrau von Wolf-Zdekauer.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern, Brigitte und Fritz Wolf, die mich fortwährend liebevoll unterstützen. Vor allem aber möchte ich meiner lieben Frau Nadja von ganzem Herzen für ihren stetigen Rückhalt, ihr Verständnis und ihre Geduld danken, die zum Entstehen dieser Arbeit entscheidend beitrugen.

Mühlthal, August 2010

Benjamin Frhr. von Wolf-Zdekauer

ZUSAMMENFASSUNG

Die klimaverträgliche Deckung des Energiebedarfs stellt sowohl eine existenzielle als auch interdisziplinäre Herausforderung dar. Im Immobiliensektor ist in diesem Zusammenhang der erhöhte Einsatz energieeffizienter Anlagensysteme und regenerativer Energiequellen erforderlich. Zur Entscheidung über gebäudetechnische Lösungen im Rahmen der Planung sind die Identifikation der optimalen Raumklimatisierungsvariante in geeigneter Kombination mit Versorgungssystemen sowie eine Gegenüberstellung des ökonomischen und energetischen Nutzens im Gebäudebetrieb Voraussetzung zur Realisierung erfolgreicher Green Building Konzepte.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren zur nutzenbezogenen Bewertung und zur Analyse der Energieeffizienz von Anlagensystemen zur Gebäudekühlung unter betriebsnahen Randbedingungen vorgestellt. Die in diesem Rahmen entwickelte softwaretechnische Anwendung basierend auf einem Gebäudedatenmodell ermöglicht die Abbildung des energetischen Gebäude- und Anlagenverhaltens sowie eine zuverlässige Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Kühlturmvarianten mit Nutzung regenerativer Energiequellen. Hierbei werden insbesondere die effizienzrelevanten Einflussfaktoren auf den Erzeugungsaufwand für Klimakälte und der erzielte Nutzen der Energieverwendung betrachtet.

ABSTRACT

The climate-compatible fulfilment of energy demand represents an existential and interdisciplinary challenge. Regarding the real estate sector, an increasing appliance of energy efficient building systems and renewable energy sources is essential. Deciding solutions of energy systems during the design process, the identification of optimum room conditioning systems in combination with adequate cooling generation systems as well as the comparison of economic and energetic benefit at building operation renders a prerequisite for realisation of successful green building concepts.

Accordingly, the thesis in hand introduces a method of benefit based evaluation and efficiency analysis of systems for cooling, air handling and conditioning. The software application developed in this context is based on a building information model allows energetic balance of building and system performance as well as reliable assessment of cooling capacity applying systems using renewable energy sources. Thus, efficiency relevant factors of influence on energy demand of systems for cooling generation and for air conditioning in contrast to the benefit obtained, is scrutinised in detail.

INHALTSVERZEICHNIS

FORMELZEICHEN, EINHEITEN UND ABKÜRZUNGEN	VII
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung.....	1
1.3 Einordnung	4
1.4 Zielsetzung	5
1.5 Vorgehensweise	6
2 GRUNDLAGEN DER ENERGETISCHEN GEBÄUDE- UND ANLAGENBEWERTUNG	9
2.1 Energetische Bewertung von Gebäuden	9
2.1.1 Entwicklung und rechtlicher Hintergrund	9
2.1.2 Ziele und Anforderungskriterien der energetischen Bewertung von Gebäuden.....	10
2.1.3 Gebäudeenergieausweis – Nachweismethodik für Nichtwohngebäude.....	12
2.1.4 Bilanzierungsverfahren für Nichtwohngebäude.....	16
2.1.5 Geltungsbereich und Anwendung	22
2.1.6 Diskussion und weiterer Forschungsbedarf	23
2.2 Energetische Bilanzierung von Gebäuden und Anlagen	25
2.2.1 Übersicht Energiebilanz und Bilanzbereiche	25
2.2.2 Eingangparameter der Raumbilanz.....	27
2.2.2.1 Übersicht und energetische Relevanz der Einflussgrößen.....	27
2.2.2.2 Meteorologische Daten und externe Einflussgrößen	31
2.2.2.3 Parameter des Gebäudes	31
2.2.2.4 Parameter der Anlagentechnik	34
2.2.2.5 Parameter der Gebäudenutzung	35
2.2.3 Genauigkeit von Energiebilanzverfahren.....	37
2.3 Übersicht der Raumklima- und Erzeugersysteme der Raumluft- und Kältetechnik.....	39
2.3.1 Übersicht und Gliederung der Raumklimasysteme.....	39
2.3.2 Raumklimasysteme zur Nutzenergieübergabe	42

2.3.2.1	Zentrale Raumklimasysteme	42
2.3.2.2	Dezentrale Raumklimasysteme	44
2.3.2.3	Flächenintegrierte Raumklimasysteme (thermisch wirksame Oberflächen).....	50
2.4	Kälteerzeugersysteme.....	54
2.4.1	Kompressionskältemaschinen.....	54
2.4.2	Absorptionskältemaschinen	56
2.5	Thermische Behaglichkeit.....	57
2.5.1	Definition	57
2.5.2	Kriterien zur Quantifizierung der thermischen Behaglichkeit.....	59
2.5.3	Zusammenfassung der Behaglichkeitsbewertung.....	66
3	BILANZMODELL DES GEBÄUDEENERGIEBEDARFS	69
3.1	Überblick	69
3.2	Berechnungsmodell zur Bilanzierung des Raumenergiebedarfs	70
3.2.1	Überblick der prinzipiellen Berechnungsverfahren.....	70
3.2.1.1	Methoden mit Gewichtsfaktoren	70
3.2.1.2	Methoden mit finiten Differenzen	71
3.2.1.3	Methoden mit Ersatzmodellen.....	73
3.2.2	Zwei-Kapazitäten-Modell nach VDI 6007 Blatt 1 (2007).....	73
3.2.2.1	Eigenschaften und Prinzip des Bilanzverfahrens	73
3.2.2.2	Bauteilmodell anhand diskreter <i>RC</i> -Glieder.....	74
3.2.2.3	Verfahren zur Ermittlung des thermisch energetischen Raumverhaltens	87
3.3	Verfahren zur Ermittlung von Bilanzierungsrandbedingungen	92
3.3.1	Interne Wärmequellen und -senken	92
3.3.2	Wärmeaustausch von Außenbauteilen mit der Umgebung	95
3.3.3	Solare Einstrahlung.....	98
3.3.3.1	Berechnungsmodelle der Solarstrahlung mit Berücksichtigung der Bewölkungsverhältnisse.....	98
3.3.3.2	Direkte Einstrahlung.....	103
3.3.3.3	Diffuse Einstrahlung.....	105
3.3.4	Verschattungsbedingungen.....	110
3.3.4.1	Parameter des Verschattungsmodells	110
3.3.4.2	Bestimmung des stündlichen Strahlungsreduktionsfaktors der Umgebung für direkte Solarstrahlung	113

3.3.4.3	Bestimmung des konstanten Strahlungsreduktionsfaktors der Umgebung für den diffusen Solarstrahlungsanteil des bedeckten Himmels.....	114
3.3.4.4	Bestimmung des stündlichen Strahlungsreduktionsfaktors der Umgebung für den diffusen Solarstrahlungsanteil des klaren Himmels	116
3.3.4.5	Bestimmung des stündlichen Strahlungsreduktionsfaktors baulicher Vorsprünge für direkte Solarstrahlung.....	117
3.3.4.6	Bestimmung des konstanten Strahlungsreduktionsfaktors baulicher Vorsprünge für diffuse Solarstrahlung.....	122
3.3.5	Modellierung von Fensterglaskombinationen mit beweglichem Sonnenschutz.....	123
3.4	Verifikation des Berechnungsmodells zur Bilanzierung des Raumenergiebedarfs	126
3.4.1	Zielsetzungen und Methoden der Verifikation.....	126
3.4.2	Überblick der Testbeispiele.....	127
3.4.3	Verifikation der Raumreaktionen bei internen Lasten	129
3.4.4	Verifikation der Raumreaktionen bei in- und externen Lasten	131
3.4.5	Verifikation der Lastberechnung bei Sollwerteinhaltung	133
3.5	Entwicklung der Datenbankanwendung zur Gebäude- und Anlagenmodellierung	135
3.5.1	Prinzipieller Aufbau und Einordnung der Datenbankanwendung	135
3.5.2	Allgemeine Anforderungen an das Datenmodell	138
3.5.3	Gebäudedatenmodell	140
3.5.4	Anlagendatenmodell.....	142
3.6	Zusammenfassung.....	146
4	THERMISCH WIRKSAME BAUTEILOBERFLÄCHEN.....	149
4.1	Überblick.....	149
4.2	Energiebilanz von Betonkerntemperierungen	151
4.3	Umsetzung des Bilanzierungsverfahrens thermisch wirksamer Bauteiloberflächen	163
4.4	Verifikation der Bauteilaktivierung.....	169
4.5	Energiebilanz von Kapillarrohrkühldecken.....	177
4.6	Verifikation der Kapillarrohrkühldecke	180

4.7	Energiebilanz von Flächenheizungen und -kühlungen mit geringer Speicherkapazität	181
4.8	Verifikation Flächenheizungen und -kühlungen mit geringer Speicherkapazität	183
4.9	Energiebilanz von Flächenheizungen und -kühlungen mit Speicherkapazität	185
4.10	Verifikation der Flächenheizungen und -kühlungen mit Speicherkapazität	187
4.11	Zusammenfassung	189
5	ENERGIEBILANZ ZENTRALER RAUMLUFTTECHNISCHER ANLAGENSYSTEME	191
5.1	Überblick und Abgrenzung des Berechnungsmodells	191
5.2	Abbildung zentraler raumlufttechnischer Anlagensysteme	194
5.3	Bestimmung der Luftvolumenstromprofile	195
5.4	Bestimmung des Energiebedarfs der Luftbehandlungsfunktionen...	201
5.4.1	Übersicht des Berechnungsprinzips	201
5.4.2	Sollwerte des Zuluftzustands	203
5.4.3	Lufterhitzung	205
5.4.4	Luftkühlung	206
5.4.5	Wärmerückgewinnung	210
5.4.6	Luftbefeuchtung	212
5.4.7	Verdunstungskühlung	213
5.4.8	Sorptionsgestützte Kühlung	214
5.5	Bestimmung des Energiebedarfs zur Luftförderung	221
5.5.1	Energetische Abbildung des Ventilators und der Regelung bei konstantem oder variablem Volumenstrom	221
5.5.2	Druckverlust- und Kanalnetzberechnung	226
5.6	Verifikation zur Energiebilanz der Luftbehandlungsprozesse	231
5.7	Plausibilitätsprüfung des Energiebedarfs zur Luftförderung	237
5.8	Zusammenfassung	240
6	BILANZIERUNG DES ENERGIEBEDARFS DER KÄLTEERZEUGERSYSTEME	243

6.1	Energiebedarf der Kältemaschinen.....	243
6.2	Plausibilitätsprüfung des Energiebedarfs der Kältemaschinen	250
6.3	Energiebedarf der Rückkühlung.....	251
6.4	Freie Kühlung.....	256
6.5	Wasserbedarfsermittlung der Verdunstungsrückkühlung.....	259
6.6	Plausibilitätsprüfung des Wasserbedarfs der Rückkühlung	264
6.7	Zusammenfassung.....	267
7	BEWERTUNGSANSATZ DER ENERGIEEFFIZIENZ	269
7.1	Überblick der Bewertungsgrößen zur Beurteilung der Effizienz von gebäudetechnischen Energieanwendungen	269
7.2	Konzeption eines Kennzahlensystems für das Bewertungsmodell der Energieeffizienz	271
7.3	Beispiele zur Bildung von Energieeffizienzkennwerten	274
7.4	Verfahren zur Bestimmung der nutzenbezogenen Energieeffizienz.	277
	7.4.1 Behaglichkeitsbezogener Energieeffizienzkennwert	277
	7.4.2 Luftqualitätsbezogener Energieeffizienzkennwert.....	280
	7.4.3 Zusammengefasster Energieeffizienzkennwert.....	283
	7.4.4 Relativer Leistungskennwert zur Produktivitätsbewertung der Nutzung	284
7.5	Ermittlung der energetischen und exergetischen Anlagensystemeffizienz.....	288
	7.5.1 Leistungskennzahlen zur energetischen Beurteilung	288
	7.5.2 Kennzahlen zur exergetischen Beurteilung.....	291
7.6	Anwendungsbeispiele der Energieeffizienzbewertung	295
	7.6.1 Untersuchte Raumklimakonzepte und Anlagenvarianten	295
	7.6.2 Auswertung der Raumklimakonzepte zur exemplarischen Energieeffizienzbewertung.....	298
	7.6.2.1 Übersicht	298
	7.6.2.2 Häufigkeitsverteilungen der Raumlufttemperatur und der operativen Raumtemperatur	299
	7.6.2.3 Gegenüberstellung der Komfort- und Effizienzkennwerte	301
	7.6.2.4 Exergetische Umwandlungseffizienz der Anlagensysteme	303

7.6.2.5	Energieeffizienz-Einordnungsdiagramm.....	305
7.6.2.6	Einordnung der Ergebnisse der exemplarischen Anlagenvarianten.....	309
7.7	Zusammenfassung und kritische Diskussion des Bewertungsansatzes	309
8	SCHLUSSBETRACHTUNG	313
8.1	Resümee.....	313
8.2	Ausblick.....	315
9	LITERATURVERZEICHNIS	319
	ANHANG.....	347