

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn,
Nikolas D. Müller, Andreas Pfnür

benefit E2

Gebäudeintegrierte solaraktive Strategien:
Analytische Bewertung und Entwicklung
gebäudeintegrierter solaraktiver Systeme

F 3086

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0191-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

benefit E2

*Gebäudeintegrierte solaraktive Strategien: Analytische Bewertung
und Entwicklung gebäudeintegrierter solaraktiver Systeme*

Herausgeber:

*Christoph Kuhn, Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes
(Technische Universität Darmstadt)*

Mitwirkende Autoren:

*Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn,
Nikolas D. Müller, Andreas Pfnür*

Darmstadt 2018

Impressum

benefit E2

Gebäudeintegrierte solaraktive Strategien: Analytische Bewertung und Entwicklung gebäudeintegrierter solaraktiver Systeme

Herausgeber:

Christoph Kuhn, Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes

Autoren

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn - Teil 1, 2, 3, 4, 5, 7
Nikolas D. Müller, Andreas Pfnür - Teil 1, 6, 7

Förder- und Drittmittel

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-15.57)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren

Fachliche Betreuung: Dr.-Ing. Michael Brüggemann

Drittmittelpartner: Projekt- und Drittmittelpartner: GOLDBECK New Technologies GmbH

Projektteam:

Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Entwerfen und nachhaltiges Bauen, Prof. Christoph Kuhn
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre - Prof. Dr.-Ing. Andreas Pfnür
GOLDBECK New Technologies GmbH - Joachim Goldbeck

Projektleitung: Dr.-Ing. Steffen Wurzbacher,

Projektbetreuung GOLDBECK New Technologies GmbH: Angeliki Metaxa, Lukas Romanowski

Studentische Mitarbeit TU Darmstadt: Carolin Simon, Viktoria Bülow, Marius Riepe, Lucia Kulinski, Sarah Papperitz, Jonas Rau, Benjamin Wagner, Sören Wallbach

Forschungsmodule: Gabriela Atanasova, Robert Blessing, Anna Heer, Jana Weber

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
-------------	---

Definitiver Teil	10
------------------	----

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Nikolas D. Müller, Christoph Kuhn, Andreas Pfnür

Die Entwicklung des solaren Bauens (Teil 1)	13
--	-----------

1. Energiewende und Bauwesen (Ausgangslage)	14
1.1. Bisherige Anwendung solarer Systeme an Gebäuden	16
1.2. Hemmnisse bei der Integration von Solarsystemen	18
2. Fokus, Methodik und Berichtsstruktur	20
2.1. Forschungsfragen	20
2.2. Methodik und Struktur des Forschungsberichts	22

Literaturverzeichnis	25
----------------------	----

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn

Solaradaptive Gebäudehüllen (Teil 2)	27
---	-----------

1. Exkurs zur architektonischen Gestalt	29
2. Definition einer Solaradaptivität	32

Literaturverzeichnis	33
----------------------	----

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn

Typologiebezogene Solarstrahlungspotenziale (Teil 3)	35
---	-----------

1. Solare Strahlungsprofile typischer Gebäude	37
2. Analyse des deutschen Gebäudebestandes	38
2.1. Typisierungsansätze baulicher Strukturen	38
2.2. Analyse zur Häufigkeitsverteilung von Gebäudetypen	40
2.3. Abhängigkeiten bauart- und fassadenbezogener Gestaltungsmerkmale und möglicher Potenzialnutzung	47
3. Aufbau und Ablauf der Strahlungssimulationen (methodischer Teil)	51
3.1. Modellierung von Volumen und Flächen	51
3.2. Wetterdaten	52
3.3. Eigen- und Fremdverschattungen durch Umgebung und untergeordneten Bauteilen	53
4. Typologiebezogene Strahlungspotenziale (Ergebnisteil)	55
4.1. Übersicht analysierter Gebäude nach Typus	55
4.2. Aufbau der typologiebezogenen Steckbriefe	58
4.3. Hochhaus	64
4.4. Punktförmiger Bau	70
4.5. Zeilenbau	76
4.6. Hofförmiger Bau	82
4.7. Hallenbau	88
4.8. Vergleichende Betrachtung verfügbarer Strahlungspotenziale nach Typologie	95
5. Projektion und überschlägige Abschätzung zum Potenzial gebäudebezogener Solarenergienutzung	96

Literaturverzeichnis	98
----------------------	----

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn

Dynamische Betrachtungen solaradaptiver polyfunktionaler Fassaden (Teil 4)	101
1. Prinzip polyfunktionaler solaradaptiver Fassaden	103
1.1. Anforderungen und Aufgaben einer solaradaptiven Fassade	104
1.2. Übersicht integrierbarer Photovoltaiksysteme	106
1.3. Integrierte solarthermische Nutzung	108
1.4. Strukturelle Anforderung und Gliederungsoptionen	110
1.5. Exemplarische Anwendungen des polyfunktionalen Fassadenprinzips (Px-Fassade) als Polybox und Polykollektor	115
1.6. Konstruktiver Aufbau	117
2. Dynamische Bauteilbetrachtungen (Methodischer Teil der energetischen Simulationen)	120
2.1. Standort und Orientierung	120
2.2. Modellierung	120
2.3. Aufbau und Simulation der Fassadenkonfigurationen	122
2.4. Energetische Auswertungen der Simulationen	123
3. Systemkatalog solaradaptiver Fassaden	124
3.1. Übersicht untersuchter Varianten	124
3.2. Fassadenbauteile mit gekapselter, stehender Luftschicht	127
3.3. Fassadenbauteile mit durchströmter Luftschicht	145
3.4. Vergleichende Betrachtung der energetischen Eigenschaften untersuchter Px-Fassadenbauteile	170

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn

Einbindung solaradaptiver Fassaden in das Gebäudeenergiesystem (Teil 5)	173
1. Synergien zwischen solaradaptiven Fassaden und Gebäudeenergiesystemen	175
2. Gebäudeenergiemodell	177
2.1. Gebäudekenndaten und Bilanz spezifischer Energiebedarfe	177
2.2. Bilanz solarer Stromerträge	179
2.3. Maß der Eigenversorgung	180
2.4. Anlagentechnik und Berechnung des Endenergiebedarfs und CO ₂ Ausstoßes	183
3. Fallbeispiel: Freistehendes solaradaptives Bürohaus	185
3.1. Beispielhaft implementiertes Energiesystem	189
3.2. Untersuchte Szenarien zur Fassadenkonfiguration	189
4. Energetische Performance entwickelter solaradaptiver Fassaden	191
4.1. PV Jahresstromertrag	191
4.2. Spezifische Nutzenergiebedarfe	191
4.3. Strombilanz	194
4.4. Endenergiebedarf und CO ₂ Ausstoß	194
Literaturverzeichnis	195

Finanzielle Effekte solaraktiver Bauteile auf Eigentümer und Nutzer von Bürogebäuden (Teil 6)	197
1. Einleitung und Fragestellung	198
2. Grundlagen zur Bewertung alternativer Maßnahmen zur Durchsetzung der Energie- und Klimapolitik aus den Perspektiven immobilienwirtschaftlicher Stakeholder	201
2.1. Vorbemerkungen	201
2.2. Alternative Bewertungsansätze im Kontext der gebäudebezogenen Energiewende (Wärmewende)	201
2.3. Systemgrenzen bei Wirtschaftlichkeitsanalysen im Gebäudesektor	204
2.4. Ökonomische Werttheorien als Bewertungsgrundlage	206
2.5. Modell zur Systematisierung alternativer Bewertungsprozessen	211
2.6. Zwischenfazit	214
3. Diskussion alternativer Bewertungsansätze zur Wirtschaftlichkeitsanalyse bei energetischen Maßnahmen	215
3.1. Vorbemerkungen	215
3.2. Alternative Bewertungsansätze im Vergleich	215
3.3. Möglichkeiten und Grenzen alternativer Methoden der Wirtschaftlichkeitsberechnung	228
3.4. Akteursbezogene Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei Nicht-Wohngebäuden	239
4. Fallbeispiel und Berechnungsprämissen	246
4.1. Fallbeispiel	248
4.2. Kostenstrukturen	251
4.3. Berechnungsprämissen	256
5. Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalysen zum Einsatz solaraktiver Bauteile	261
5.1. Objektspezifische Wirtschaftlichkeit bei einer klassischen Lebenszykluskostenanalyse	262
5.2. Finanzielle Effekte aus der Perspektive von Vermietern und Mietern bei einer Anpassung der Nettomieten an Renditeerwartungen vermietender Eigentümer	263
5.3. Finanzielle Effekte aus der Perspektive von Selbstnutzern	268
5.4. Finanzielle Effekte für den Eigentümer bei einer Anpassung der Zielrendite an mieterseitig identische Nutzungskosten im Anfangsjahr	270
5.5. Finanzielle Effekte für den Eigentümer bei einer zusätzlichen Zahlungsbereitschaft für gestalterisch anspruchsvolle und zugleich solaraktivierte Fassaden bei dem Nutzer	273
5.6. Zwischenfazit	279
6. Ergebnisdiskussion	280
Literaturverzeichnis	286

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Nikolas Müller, Christoph Kuhn, Andreas Pfnür

Zusammenfassende Bewertung solaradaptiver Gebäudehüllen (Teil 7)	289
1. Ergebnisdiskussion	291
1.1. Strahlungspotenziale im Bestand erschließen	291
1.2. Energieeinsparung durch aktive und passive solarenergienutzung an polyfunktionalen Fassaden	295
1.3. Einbindung solaradaptiver Energiesysteme in die Gebäudeenergiestruktur	297
1.4. Wirtschaftlichkeit von Solarfassaden gegeben	298
2. Implikationen und weiterführende Forschungsfragen	298
2.1. Formspezifische Erhebungen zum Gebäudebestand	298
2.2. Kombinierte dynamische elektrothermische Simulation	299
2.3. Investitionskosten gezielt senken	300
 Literaturverzeichnis	 301
 Abbildungsverzeichnis	 302
 Tabellenverzeichnis	 321