

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/tauforschung

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

Autoren

Steffen Wurzbacher

Dr.-Ing. M.Sc. Steffen Wurzbacher, Architekt und KlimaDesigner, entwickelt seit 2010 mit seinem eigenen Büro performative architektur Energie- und Nachhaltigkeitsstrategien auf Quartiers- und Gebäudeebene. Schwerpunkte liegen in der Beratung und Planung von Energieversorgungskonzepten, THG-Bilanzen, dem ökologischen Bauen, Wasserrecyclingkonzepten und dynamischen Simulationen für private Auftraggeber, Energie- und Wasserversorger sowie Kommunen. Von 2010 bis 2017 arbeitete er zudem als wissenschaftlicher Mitarbeiter in Forschung und Lehre an den Fachgebieten Entwerfen und Energieeffizientes Bauen sowie Entwerfen und Nachhaltiges Bauen, TU Darmstadt. Schwerpunkte seiner Forschungstätigkeit liegen im Bereich nachhaltiger Architektur und Stadtentwicklung. In seiner 2016 veröffentlichten Doktorarbeit untersuchte er Solarpotenziale urbaner Bebauungstypen unter dem Paradigma der Eigenversorgung.

Nikolas D. Müller

Prof. Dr.-Ing. Nikolas D. Müller, Architekt, ist seit Oktober 2017 Inhaber des Lehrstuhls Real Estate Engineering and Management sowie Studiengangsleiter für den M.Sc. Real Estate and Leadership an der HSBA Hamburg School of Business Administration. Zuvor war er am Fachgebiet Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre von Prof. Dr. Andreas Pfnür an der TU Darmstadt beschäftigt, wo er grundsätzlich zu den Wirkungsbeziehungen zwischen der Energie- und Klimapolitik und der Immobilienwirtschaft arbeitete. Er studierte Architektur an der TU Darmstadt, der TU Delft und der ETH Zürich sowie Bauprozessmanagement an der TU Eindhoven. 2015 promovierte er an der TU Berlin im Fach Soziologie bei Prof. Dr. Martina Löw zu der gesellschaftlichen Konstruktion von Städten.

Christoph Drebes

Dipl.-Ing. M.Sc. Christoph Drebes ist seit 2008 als Architekt und Climadesigner tätig. Am Fachbereich Architektur der TU Darmstadt begleitet er in teils projektleitender Position als wissenschaftlicher Mitarbeiter seit 2012 Forschungsprojekte im Bereich nachhaltiger und energieeffizienter Architektur und Stadtplanung. Seine aktuellen Forschungsschwerpunkte liegen in der dynamisch, simulativen Betrachtung von Energieströmen im Gebäude und dem suffizienten Umgang mit Architektur und Technik unter den wachsenden Anforderungen an Gebäudekomfort, Vernetzung und Digitalisierung. Seit 2015 ist er mit dem Büro AND. Studio für Architektur und Nachhaltigkeitsdesign eigenständig tätig und bietet für private und öffentliche Auftraggeber Planungs- und Beratungsleistungen für nachhaltige Architektur und Energiekonzeptionierung an.

Andreas Pfnür

Prof. Dr. Andreas Pfnür FRICS ist Leiter des Fachgebiets Immobilienwirtschaft und Baubetriebswirtschaftslehre am Fachbereich Rechts- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Universität Darmstadt. Er ist Mitglied der Vorstände des Instituts der deutschen Immobilienwirtschaft und des BPPP e.V. Netzwerk Infrastrukturmanagement sowie Fellow der RICS. Seine aktuellen Forschungsschwerpunkte umfassen unter anderem die Bereiche "Ökonomische Effekte der energetischen Gebäudesanierung", "Corporate Real Estate Management", "Real Estate Investment Management" und "Digitale Transformation der Immobilienwirtschaft". Vor seiner Zeit an der Universität war er in leitender Position einer auf Immobilien spezialisierten Topmanagement Beratung tätig.

Christoph Kuhn

Prof. Dipl.-Ing Christoph Kuhn BDA/DWB leitet seit 2013 das Fachgebiet Entwerfen und Nachhaltiges Bauen am Fachbereich Architektur der TU Darmstadt. Er arbeitet seit 1998 als selbständiger Architekt, aktuell in Partnerschaft im Büro Kuhn und Lehmann Architekten in Freiburg. Von 2007 bis 2013 lehrte er als Gastprofessor am Institut Nationale des Sciences Appliquées de Strasbourg INSA, 2008-2010 als Vertretungsprofessor und 2010-2013 als Professor am Karlsruher Institut für Technologie KIT am Fachgebiet Nachhaltiges Bauen und integratives Entwerfen. Forschungsschwerpunkte sind Strategien zu Effizienz, Suffizienz und Konsistenz, die Vernetzung und Synergien der Energieströme und Leistungsbedarfe im Gebäude und auf Quartiersebene und der Ressourceneinsatz über den gesamten Lebenszyklus. Seit 2018 ist Christoph Kuhn Prodekan des Fachbereichs Architektur.

Kurzfassung

Der rasant wachsende Ausbau der gebäudebezogenen Solarenergienutzung bietet die Chance zu einer tragenden Säule einer erneuerbaren Energieversorgung zu werden. Gleichzeitig wurden unterschiedliche Vorbehalte hinsichtlich der Verwendung applizierter und technischer Solarsysteme durch unterschiedliche Experten des Bauwesens geäußert. Für einen weiteren erfolgreichen Ausbau der gebäudebezogenen Solarenergie bedarf es somit adaptiver und gestalterisch hochwertiger Systemlösungen, die für die handelnden Akteure wirtschaftlich sind.

Das vorliegende Forschungsprojekt knüpfte an die qualitative Interviewforschung des vorangegangenen Projektes „benefit E“ (AZ: SWD-10.08.18.7-13.47) und die dort identifizierten Hemmnisse bei der Integration von gebäudebezogenen Solarsystemen an und entwickelte Strategien und Konzepte für zukünftige, solaradaptive Gebäudehüllen.

Unter „solaradaptiv“ werden dabei Prinzipien bezeichnet, welche eine passive und aktive Solarenergienutzung innerhalb einer architektonischen Gestalt nutzungsgerecht ermöglichen. Dabei besitzen sie die Fähigkeit durch unterschiedliche Konfigurationen auf spezifische energetische, konstruktive oder gestalterische Belange zu reagieren. Ein wesentlicher Aspekt dabei liegt auf der Berücksichtigung thermodynamischer Effekte volatiler solarer Erträge. Phasenverschiebung und Laststeuerung sind dabei wichtige Grundeigenschaften solaradaptiver Verhaltensweisen. Insbesondere solare Wärme und Abwärme aus solarer Stromproduktion können in unterschiedlicher Weise energetisch verwertet werden. Gleichzeitig müssen auch solaradaptive Gebäudehüllen den gleichen wirtschaftlichen Anforderungen gerecht werden, die auch an „Standardsysteme“, ohne solarer Funktionsweise gestellt werden.

Ziel des Projektes benefit E2 war die Analyse dezidierter Anwendungsgebiete solarenergetischer Nutzungen an unterschiedlichen Gebäuden, der Entwurf eines solaradaptiven Prinzips unter Berücksichtigung energetischer, konstruktiver und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen sowie die Darstellung dessen gestalterischer Bandbreiten. Methodisch wurden hierfür die vier Maßstabebenen – Gebäude, Hülle mit konstruktivem Bauteilaufbau sowie Bauprozess und Betrieb – bearbeitet.

Für die Analyse von Anwendungsgebieten und Handlungsfeldern solarer Nutzungen wurden in einem ersten Schritt umfangreiche typologische Untersuchungen vorgenommen. Anhand von Simulationen wurden spezifische solare Strahlungsprofile („solarer Fingerabdruck“) für die gängigen Gebäudetypen – punktförmiger Bau, Hochhaus, Zeilenbau, hof förmiger Bau und Halle - generiert. Ermittelte energetische und baustrukturelle Kennwerte wurden in einen eigenen Typologiekatalog einbeschrieben. Parallel zur Ermittlung von Strahlungspotenzialen an typischen Gebäude wurden diese in Anzahl und Anteil am gesamten Gebäudebestand quantifiziert.

In einem zweiten Schritt wurde ein solaradaptives Fassadenprinzip entworfen. Dieses setzt sich aus einem feingliedrigen, vorgehängten „Fassadenrost“ zusammen, welcher in hohem Maße vorgefertigt werden kann und durch seine Kleinteiligkeit eine maximale

Gestaltungsfreiheit für den Architekten ermöglicht. Der „Rost“ ist Tragstruktur für eine äußere und innere Schicht, welche jeweils unterschiedliche konstruktive und gestalterische Aufgaben übernehmen.

Die äußere Schicht dient dem Wetterschutz, der solaren Energieerzeugung (aktiv und passiv) sowie der individuellen architektonischen Ausdrucksform, die innere Schicht bildet den Raumabschluss und besteht aus einem Dämpaket, Festverglasung oder Fensterflügel. Der Zwischenraum des „Rostes“ kann je nach energetischem Ziel Luft einkapseln oder luftdurchströmt sein. Eine geschlossene Luftschicht dient dabei dem Speicher solarer Wärme sowie Abwärme aus aktiver solarer Stromproduktion. Eine Durchströmung hingegen ermöglicht den Abtransport solarer Wärmelasten aus dem Zwischenraum.

Je nach Konfiguration wurden ganz unterschiedliche thermodynamische Verhaltensweisen im Sommer- und im Winterfall vermutet. Zur Bestimmung sinnvoller Schichtzusammenstellungen wurden deshalb dynamische Simulationen unterschiedlicher Bauteilaufbauten durchgeführt. Neben einer Serie variierender solaradaptiver polyfunktionaler Fassadenprinzipien, wurden auch gängige „Standard“ Bauteilaufbauten simuliert. Die Ergebnisse des bauteilbezogenen Variantenvergleichs flossen zur weiteren Bewertung ebenfalls in das folgend beschriebene Gebäudeenergiemodell ein.

Zur energetischen, ökologischen und monetären Bewertung von Integrationsmöglichkeiten thermischer und elektrischer Solarenergie wurde in einem dritten Schritt ein Gebäudeenergiemodell entwickelt, mit welchem alle wesentlichen Energieströme, inklusive Anlagentechnik am Gebäude abgebildet werden können. Die unterschiedlichen Konfigurationen konnten somit auch Endenergetisch und hinsichtlich des resultierenden CO₂-Ausstoßes bewertet werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Gebäudeenergiemodells wurden die finanziellen Effekte des entwickelten Systems am Beispiel eines Bürogebäudes analysiert. Für diese Analyse wurde eine Schnittstelle wesentlicher Kenndaten entwickelt, die es ermöglicht hat, umfangreiche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung solaradaptiver Fassaden durchzuführen. Ein besonders Merkmal ist, dass die finanziellen Effekte solaraktiver Fassadenelemente auf der Grundlage vollständiger Finanzpläne modelliert und dabei die wechselseitigen Effekte für die Eigentümer und Mietern abbildet.

Die umfangreichen Analysen haben große Einsatzfelder solaradaptiver Gebäudehüllen im Bestand identifiziert. Das neue polyfunktionale Fassadenprinzip erweist sich hierbei als energetisch und gestalterisch flexibel einsetzbar. Durch die Pufferung von solarer Wärme und Abwärme aus aktiven Systemen kann der Heizwärmeverbrauch äquivalent zu Dämmmaßnahmen gesenkt werden. Die „Anfälligkeit“ solarer Pufferzonen hinsichtlich einer sommerlichen Überhitzung kann durch gesteuerte Durchströmungen weitgehend ausgeschlossen werden. Die Ergebnisse umfangreicher Analysen zeigen zudem, dass solaraktive Fassadenelemente für Eigentümer und Mieter wirtschaftlich sein können und damit einen Beitrag zur Durchsetzung der Wärmewende (Energiewende im Gebäudebereich) leisten. Insgesamt wird der hybriden Solarenergienutzung gerade im Fassadenbereich großes Potenzial zur regenerativen Energieerzeugung zugesprochen.

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

Definitorischer Teil

Zeichenerklärungen und Abkürzungsverzeichnis

BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BMJ	Bundesministerium für Justiz
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CF	Cashflow (Geldfluss)
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz)
EEWärmeG	Gesetz zur Förderung erneuerbarer Energien im Wärmebereich (Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz)
EK	Eigenkapital
EKR	Eigenkapitalrendite
EnEG	Gesetz zur Einsparung von Energie in Gebäuden (Energieeinsparungsgesetz)
EnEV	Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung)
FK	Fremdkapital
HT'	Spezifischer, auf die Wärme übertragende Umfassungsfläche bezogener Wärmeverlust
LCC	Lebenszykluskostenanalyse (LCC)
p.a.	per Anno / pro Jahr
PE	Primärenergie
THG	Treibhausgase/Treibhausgasemissionen
QP	Jahres-Primärenergiebedarf
Qoutg	Nutzenergieabgabe
VoFi	Vollständige Finanzplanung
VoFI-EKR	Eigenkapitalrendite ermittelt über Vollständige Finanzplanung

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

Die Entwicklung des solaren Bauens (Teil 1)

1. Energiewende und Bauwesen (Ausgangslage)

Die beschlossene Energiewende und das im Jahr 2010 verabschiedete Energiekonzept der Bundesregierung (BMWi 2010) hat sich zum Ziel gesetzt „bis 2050 nahezu einen klimaneutralen Gebäudebestand zu haben.“ (ebd. 2010 S.22) Weiter wird als Zwischenziel angestrebt den Wärmebedarf um 20% bis zum Jahr 2020 zu senken. Bis 2050 soll der Primärenergiebedarf um 80% gesenkt werden (Kennwerte gem. ebd. 2010 S.22). Der Gebäudesektor übernimmt dabei eine wichtige Aufgabe innerhalb des allumfassenden Transformationsprozesses der Energiestrukturen. Die Formulierungen umgreifen dabei den gesamten Bereich des Bauens, inklusive Neu- und Bestandsbauten. Neben Auflagen der Reduktion von Wärmebedarfen werden mit der Veröffentlichung des Energiekonzeptes auch dezidierte Forderungen zur Einbindung erneuerbarer Energien in das Gebäudeenergiesystem formuliert. So sieht das Energiekonzept vor, „dass der verbleibende Bedarf überwiegend durch erneuerbare Energien gedeckt wird.“ (ebd. 2010 S.22).

*Artikel 2: Punkt 2:
„Niedrigstenergiegebäude“
ein Gebäude, das eine sehr hohe, nach Anhang I bestimmte Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der fast bei Null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen – einschließlich Energie aus erneuerbaren Quellen, die am Standort oder in der Nähe erzeugt wird – gedeckt werden;*

Der Logik einer Senkung des Bedarfs bei gleichzeitiger Nutzung regenerativer Quellen folgt auch die Europäische Union mit der ebenfalls im Jahr 2010 verabschiedeten „Niedrigstenergie Richtlinie“ (EU 2010). Dort wird das Ziel einer zwingenden Umsetzung eines „Niedrigstenergiestandards“ für alle Neubauten ab dem Jahr 2019 (öffentliche Bauten), bzw. 2021 (private Bauten). Die genaue Definition hierzu erfolgt in Artikel 2 der Richtlinie. Demnach ist ein „Niedrigstenergiegebäude“ ein Gebäude, das eine sehr hohe (...) Gesamtenergieeffizienz aufweist. Der bei fast Null liegende oder sehr geringe Energiebedarf sollte zu einem ganz wesentlichen Teil durch Energie aus erneuerbaren Quellen – einschließlich Energie aus erneuerbaren Quellen, die am Standort oder in der Nähe erzeugt wird – gedeckt werden“ (ebd. 2010 Art. 2, Abs. 1). Insbesondere der Zusatz „erneuerbare Quellen, die am Standort oder in der Nähe erzeugt wird“ (ebd. 2010 Art. 2, Abs. 1), stellt neben der Vermeidung von Verlusten

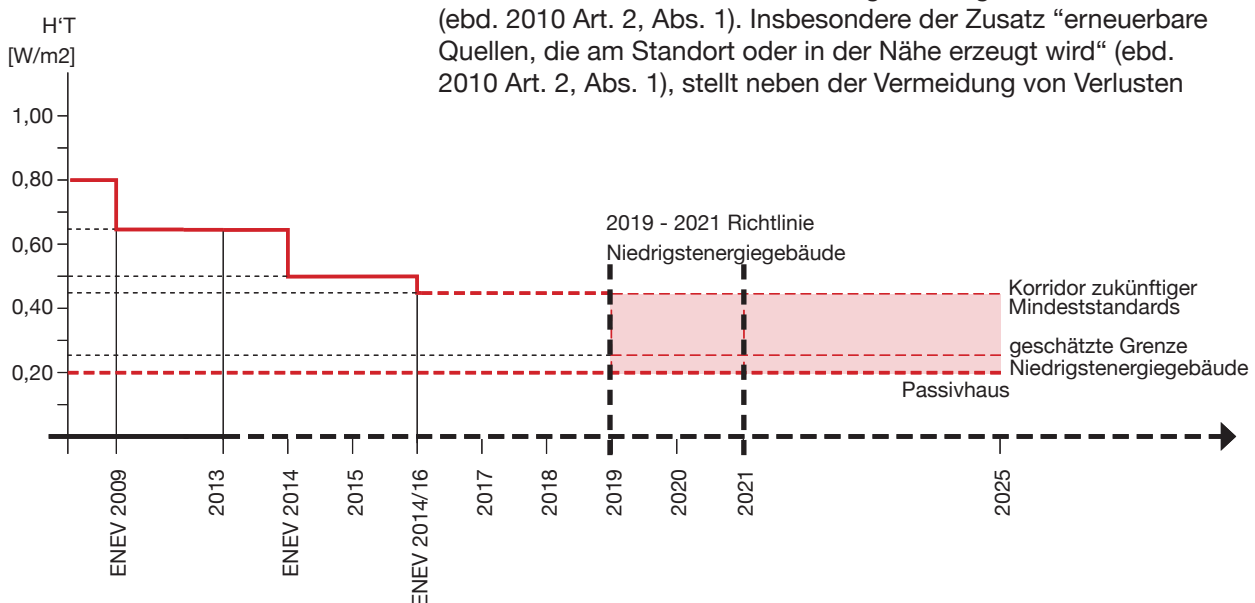


Abb. 1: Entwicklung der gesetzlichen Anforderungen an die Gebäudeenergieeffizienz anhand des spezifischen Transmissionswärmetransferkoeffizienten $H'T$; Darstellung möglicher Korridore der zukünftigen EU-Richtlinie „Niedrigstenergiegebäude“
Quelle: performative architektur

auch die Energiegewinnung in den Mittelpunkt. Entscheidend hierbei ist der Zusatz „am Standort“ (ebd.). Dieser impliziert, dass keine Ausgleichsrechnungen mit weiter entfernt produzierter erneuerbarer Energie vorgenommen werden kann. In den allermeisten Fällen findet sich als erneuerbares Potenzial am Standort primär die Solarenergie.

Auf nationaler Ebene wurden mit der Energieeinsparverordnung (EnEV) und dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) zwei rechtliche Instrumente einer Implementierung energieeffizienter Gebäude und der Einbindung erneuerbarer Energien geschaffen. Die EnEV trat im Jahr 2002 als Nachfolge der bis dato gültigen Wärmeschutzverordnung (WSchV) und der Heizungsanlagenverordnung (HeizAnV) in Kraft. Seitdem wurden die durch die EnEV geregelten energetischen Belange in mehreren Neufassungen systematisch verschärft. Die EnEV gibt Rechenverfahren und Grenzwerte auf unterschiedlichen Ebenen vor. Explizit gelten Anforderungen der EnEV für den Neubau und für Sanierungsmaßnahmen im Bestand.

Das EEG wurde im Jahr 2000 als Nachfolger des Stromeinspeisegesetz von 1991 eingeführt. Es setzt einen gesetzlichen Rahmen zur Einspeisung von Strom in das öffentliche Netz. Hierbei werden in Anlehnung an das Energiekonzept der Bundesregierung (BMWi 2010) dezidierte Ausbauziele für die Jahre 2025, 2035 und 2050 benannt. Für den Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung werden Einspeisevergütungssätze beschrieben, welche mit der Zunahme des Ausbaus sukzessive nach unten korrigiert werden. Neben Vergütungssätzen bei der Einspeisung regelt das EEG insbesondere in der Fassung von 2014 auch Umlagen auf eigengenutzten Strom für Anlagen mit einer Größe über 10 kWp. Insgesamt stellt das EEG einen wichtigen Bezugsrahmen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer geplanten Implementierung von Photovoltaik an Gebäuden dar.

Neben der Verwertung von Biomassen beschränkt sich die Gewinnung erneuerbarer Energien in bebauten Gebieten auf die Nutzung der Solarenergie. Der deutsche Gebäudebestand mit seinen Fassaden- und Dachflächen bietet dabei ein enormes Potenzial zum Ausbau thermischer und elektrischer Solarsysteme. Eigenen Schätzungen nach (vgl. Typologiebezogene Solarstrahlungspotenziale (Teil 3) (S. 35ff) beläuft sich das theoretische solare Strompotenzial aller Fassaden- und Dachflächen in Deutschland auf bis zu 78% des bundesweiten Nettostrombedarfs (2016). Der gleichen Schätzung nach beläuft sich die resultierende Abwärme auf das Vierfache des gesamten deutschen Wärmebedarfs. Die gebäudebezogene Solarenergienutzung bietet somit das Potenzial einen wesentlichen Anteil an einer zukünftigen erneuerbaren Energieversorgung zu leisten.

1.1. Bisherige Anwendung solarer Systeme an Gebäuden

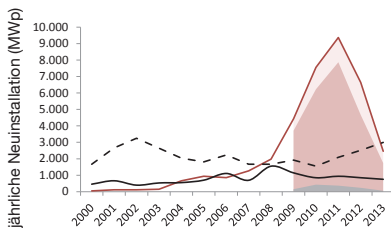
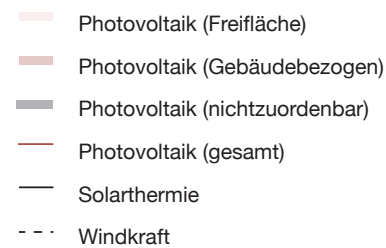


Abb. 2:
jährliche neuinstallierte Leistung
regenerativer Energiesysteme
Quelle: Hegger, Drebes, Wurzbacher
(2015) auf Datengrundlage von
Bundesverband Solarwirtschaft
e.V. (2015a), Bundesverband
Solarwirtschaft e.V. (2015b),
Netztransparenz.de (2015)

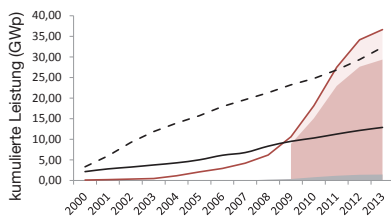


Abb. 3:
Kumulierte installierte Leistung
regenerativer Energiesysteme
Quelle: Hegger, Drebes, Wurzbacher
(2015) auf Datengrundlage von
Bundesverband Solarwirtschaft
e.V. (2015a), Bundesverband
Solarwirtschaft e.V. (2015b),
Netztransparenz.de (2015)



Abb. 4:
Beispiel eines Plusenergiegebäudes mit
geneigtem Solardach und einer nord-
Süd-Ausrichtung im Stadtteil Vauban,
Freiburg
Foto: Steffen Wurzbacher

Eine solarenergetische Nutzung an Gebäuden und auf Freiflächen hat seit dem Jahr 2000 rasant zugenommen. Im Bereich der Photovoltaik haben die technischen Fortschritte sowie politische Rahmenbedingungen der Einspeisevergütung zu einem explosionsartigen Ausbau der Photovoltaik zwischen den Jahren 2008 bis 2011 geführt (vgl. hierzu Hegger; Drebes; Wurzbacher 2015 S.13f). Nach Kürzungen im Bereich der Vergütungssätze in den Jahren 2009 und 2012 durch zwei EEG-Novellierungen ging der jährliche Zuwachs wieder deutlich zurück und stabilisierte sich auf Zuwachsraten des Jahres 2008.

Seit dem Jahr 2009 wird bei photovoltaischen Systemen zwischen den Anwendungsfällen Gebäude und Freifläche unterschieden. Dies wirkt sich auf die Höhe der Vergütungssätze aus, welche bei gebäudebezogenen Anlagen etwas höher liegt, als bei Freiflächenanlagen. Nach Unterschreitung des mittleren Strompreises durch die Einspeisevergütung im Jahr 2010 haben sich ein weiteres Mal wichtige Randbedingungen bei der Entscheidung über eine Errichtung photovoltaischer Systeme ergeben. Stand vor diesem Zeitpunkt der maximale Ertrag im Mittelpunkt einer Anlagenbewertung, wurde mit dem Unterschreiten der mittleren Preise eine Einspeisung zunehmend finanziell uninteressant.

Demgegenüber wirkt sich seither die Eigennutzung finanziell immer positiver aus. Ein Fokus auf eine Steigerung eigengenutzten Stroms führt auch dazu, dass neben den bisher favorisierten 30° südgeneigten Dachflächen andere Orientierungen zunehmend interessant werden.

In gleicher Zeit, in der die Photovoltaik einen explosionsartigen Zuwachs erfuhr, erfolgte der Ausbau der Solarthermie hingegen langsamer und stetiger. Bis zum Jahr 2013 waren in Bezug auf die kumulierte Leistung gerade einmal halb so viel Gigawatt Solarthermie wie Photovoltaik installiert (vgl. Hegger; Drebes; Wurzbacher 2015 S.13). Vielfach wurde dem System der Solarthermie das baldige Ende vorhergesagt. Gründe hierfür wurden oftmals in den Größenbegrenzungen im Sommerfall und der damit verbundenen Beschränkung auf die Bereitstellung von Warmwasserwärme sowie in den oftmals ineffizient und falsch eingestellten hydraulischen Eigenschaften wassergeführter Systeme gesehen.

Ein weiterer Grund einer verstärkten Fokussierung auf die Photovoltaik wird auch in der Entwicklung neuer Energiestandards wie der Nullenergie- oder Plusenergiestandard gesehen. Hierbei wird auf bestehende Bilanzierungsansätze (z.B. DIN4108, DIN18599, Passivhausprojektierungspakte, etc.) zurückgegriffen und den bilanzierten Jahresbedarfen ein möglicher Jahresertrag regenerativer Systeme gegenübergestellt. Bei ausgeglichener Summe aus Bedarf und Ertrag wird von Nullenergie- bei positiver Bilanz von Plusenergie gesprochen. Eine genaue Definition und Rechnungsmethode hierzu liefert das BMVI (2011). Diese führt die zuvor beschriebenen Leitziele der „Niedrigstenergie richtlinie“ (EU 2010) fort und definiert einen eindeutigen Bewertungsrahmen

eines „Plus-Energie-Gebäudes“. Demnach wird ein Gebäude diesem Standard zugeschrieben, wenn dessen Primär-, als auch der Endenergiebedarf negativ ausfallen (vgl. BMVI 2011 S.1). Als Bilanzgrenze wird das Grundstück definiert. Somit sind Ausgleichsrechnungen nur im Bereich der Primärenergiebilanz möglich. Ein endenergetischer Überschuss hingegen muss anhand von Quellen innerhalb des Grundstücks an Gebäuden oder Freiflächen erfolgen. Die Definition macht lediglich Angaben zur Netzeinspeisung von Strom. „Der netzeingespeiste Strom ist analog dem Verdrängungsstrommix zu bewerten.“ (ebd. 2011 S.1). Eine Einspeisung weiterer Energien wie Biogas oder solare Wärme wird in der Definition nicht erwähnt. Aus dieser definitorischen Fokussierung auf den solaren Strom reduzieren sich die im Einklang mit der Definition stehenden technischen Optionen in der Regel auf großflächige Photovoltaikanlagen in 30° geneigten Dächern und einer strombetriebenen Wärmepumpe. Mit solarthermischen Systemen hingegen wird ein „Plus-Energie-Haus-Standard“ gemäß BMVI (2011) in der Regel nicht erreicht. Die Basis eines „Plus-Energie-Hauses“ bildet in der Regel ein Gebäude mit energetischen Standards nahe des Passivhauses. Kritiker dieses Energiestandards führen hierbei an, dass verwendete Bilanzverfahren volatile und saisonale Schwankungen regenerativer Energien nicht ausreichend berücksichtigten. Im ungünstigsten Fall könnten dabei Doppelbelastungen des Stromnetzes durch eingespeiste Überschüsse im Sommerfall einerseits und entnommene Bedarfe im Winterfall andererseits auftreten. Somit gilt es eine stärkere Netzdienlichkeit bei einem fortschreitenden Ausbau der Solarenergie umzusetzen.

Parallel zu den Bestrebungen im Bereich von „Null- oder Plusenergie“ haben sich verschiedene Architekten einer solarthermischen Nutzung auch auf dem planerischen Wege angenähert. So finden sich vielfältige räumlich-konstruktive Lösungsansätze mit Pufferzonen, Doppelfassaden oder weiteren baulichen „Kollektoren“. Oftmals werden Grundrisse und Schnitte dabei auch als unterschiedliche energetische Zonen mit jeweils eigenen thermischen Verhaltensweisen definiert. Viele baulichen Ansätze arbeiten dabei mit Luft als Speicher- oder Transportmedium. Wärme kann hierbei in vielfältiger Weise zur direkten Belüftung oder zur indirekten Verwertung über eine Wärmepumpe genutzt werden.

Eine weite Verbreitung haben die sogenannten Doppelfassaden ab den 1990er Jahren erlangt. Die bevorzugt im Büro- und Hochhausbau eingesetzten Systeme sammeln dabei passive Solarerträge für eine weitere Verwendung im Innenraum. Doppelfassaden werden oftmals in Situationen realisiert, in denen eine natürliche Lüftung über Fenster nicht möglich ist. Dies trifft insbesondere an Standorten mit hohen Windgeschwindigkeiten zu. In diesem Fall lassen sich Fenster oftmals zum Fassadenzwischenraum öffnen. Der Zwischenraum wird energetisch als „Kollektor“ oder „Pufferzone“ ausgeformt. Da je nach jahreszeitlicher Wetterlage teilweise sehr hohe solarthermische Einträge auftreten können, ist unter Umständen eine entsprechende Steuerungsfunktion nötig. So weisen viele Doppelfassaden Klappen und Steuerungseinrichtungen auf, welche eine Durchlüftung und Entladung des erwärmten Zwischenraums ermöglichen. Oftmals erfolgt eine Steuerung dabei über automatisierte Messeinrichtungen.



Abb. 5:
„Haus im Haus“ Prinzip mit einfacher Klimahülle und temperierten Kernzonen;
„Cubity“ Solar Decathlon Beitrag 2014 der TU Darmstadt
Foto: Steffen Wurbacher

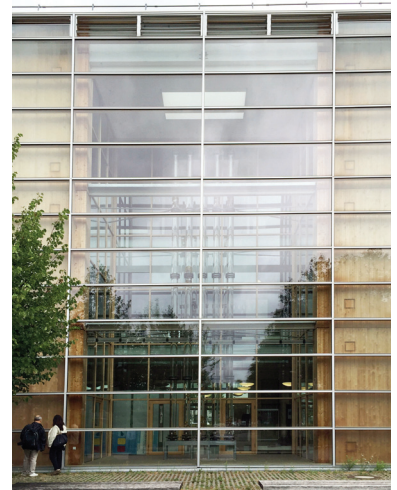


Abb. 6:
Baulicher Luftkollektor an einem Institutsgebäude in Freiburg;
Architektengemeinschaft Pfeifer, Roser, Kuhn, Freiburg
Foto: Steffen Wurbacher

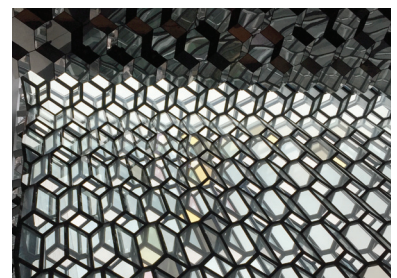


Abb. 7:
Wabenfassade am Konzerthaus Harpa Reykjavik;
Architekt Henning Larsen Architects, Kopenhagen
Foto: Steffen Wurbacher

Weitere Entwicklungen im Bereich baulicher Kollektoren finden sich in Form von Wintergärten oder saisonal öffnen- oder schließbaren Loggien, Atriumhöfen oder „Haus-in-Haus-Konzepten“. Beispielhaft sei hier auf das Institutsgebäude für Umweltmedizin und Krankenhaushygiene in Freiburg verwiesen. Hier wurden sowohl Prinzipien der Doppelfassade, Atrien und Pufferzonen errichtet, welche stärkeren Temperaturschwankungen unterliegen können, als die temperierten Labor- und Bürobereiche. Ein ähnliches Prinzip verfolgt das 2014 errichtete Projekt „Cubity“ der TU Darmstadt. Hier wurden temperierte Kernzonen innerhalb einer einfachen Klimahülle positioniert. Der Zwischenraum wird gemeinschaftlich genutzt und unterliegt größeren klimatischen Schwankungen. Das Klima- und Energiekonzept sieht dabei vor, dass Anforderungen an die Hüllflächen der Kernzonen reduziert werden können, da diese nicht mehr an die Außenluft angrenzen, sondern an die klimatische Zwischenzone.

1.2. Hemmnisse bei der Integration von Solarsystemen

Trotz des rasanten Ausbaus, insbesondere der Photovoltaik, wird die aktive solare Energiegewinnung an Gebäuden bisher nicht als selbstverständlicher Teil der Architektur wahrgenommen. Bisher erfolgt der Ausbau von Photovoltaik und Solarthermie primär additiv. Das bedeutet, dass Module nachträglich mit einer eigenen Tragkonstruktion auf das Dach oder vor die Fassade gesetzt werden. Elemente verbleiben damit eigenständig und verbinden sich nicht mit der Architektur. Durch den starken Zuwachs prägen aufgesetzte Solarapparaturen mittlerweile vielerorts die Dachlandschaften. Bei einer bisherigen Einbringung

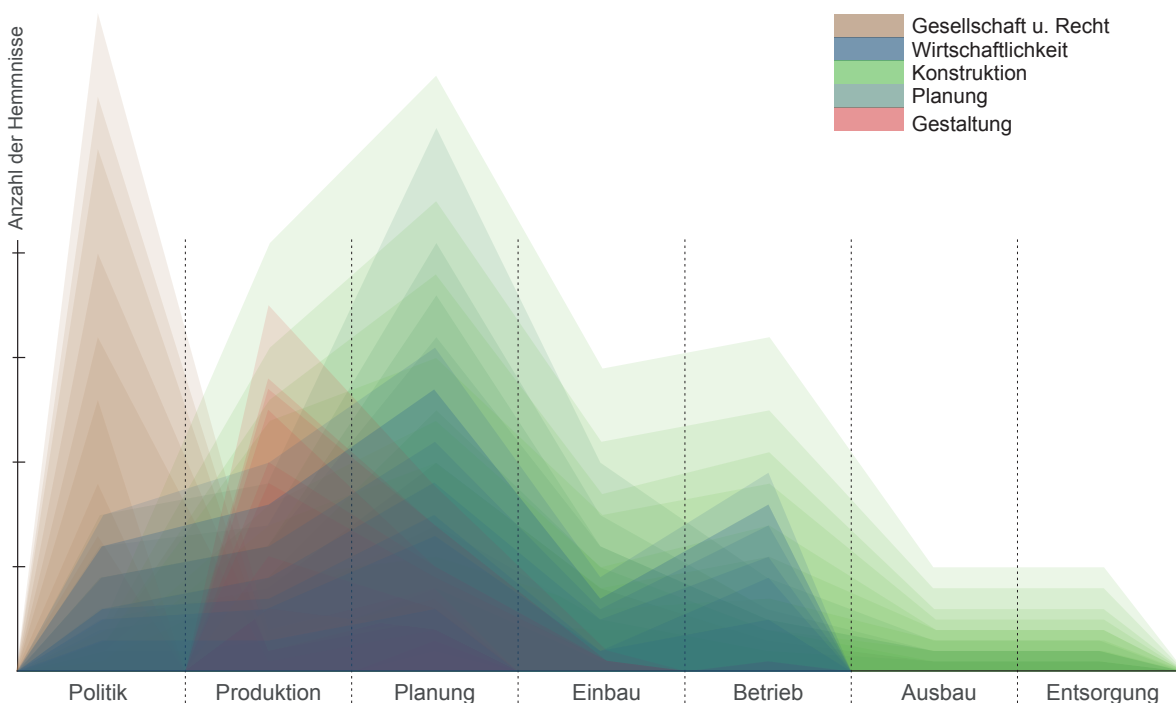


Abb. 8: Durch Experten des Bauwesens vorgetragene Hemmnisse zur Anwendung solarer Energiesysteme in der Gebäudehülle im Lebenszyklus
Quelle: Hegger, Drebes, Wurzbacher (2015)

von Photovoltaik in Fassaden wird oftmals das jeweilige Fassadenraster den Formaten markgängiger Solarmodule angepasst. Da die Systeme selber primär aus funktionalen Aspekten entwickelt wurden, kollidieren hierbei oftmals architektonisch-gestalterische Belange mit dem eher technisch geprägten Ausdruck der Module. Additiver Umgang sowie die direkte Einbindung technischer Solarsysteme haben vielfach Vorbehalte an der Nutzung von Solarsystemen an Gebäuden hervorgerufen. Unterschiedliche Akteure des Bauens sowie aus der Gesellschaft äußern hierzu vermehrt Kritik an einem empfundenen starken Eingriff in das städtisch-architektonische Bild.

Eine umfassende Analyse zu den Hemmnissen, die einer breiteren architektonischen Integration entgegenstehen, wurde in der vorangegangenen Projektphase von Hegger; Drebes; Wurzbacher (2015) anhand einer qualitativen Interviewforschung durchgeführt. Die Arbeit führt dabei eine Reihe von Experteninterviews zu jeweils persönlich wahrgenommenen Hemmnissen und Strategiebausteinen einer vermehrten Anwendung integrierter solaraktiver Systeme in Dach und Fassade durch. Die aufgezeichneten Antworten werden dabei den Rubriken „planerischer, gestalterischer, technisch-konstruktiver, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher“ Hemmnisse zugewiesen. Innerhalb dieser Rubriken werden benannte Hemmnisse weiter gruppiert und gegliedert. Das Ergebnis der Arbeit stellt eine umfangreiche Analyse zu Hemmnissen in der Herstellung, Planung und Errichtung sowie im Betrieb integrierter Solarsysteme dar. Die Studie zeigt aktorsgruppenübergreifend eine grundlegend vorhandene Skepsis zur großflächigen Kombination von Architektur mit technischen Systemen zur Solarenergienutzung in der Gebäudehülle.

Der überwiegende Konsens ist, dass eine flexible Handhabbarkeit und gestalterische Varianz im Umgang mit den technischen Komponenten in Architektur weiterhin sehr eingeschränkt ist, jedoch die Grundvoraussetzung darstellt, um architektonische Varianz und Vielfalt zu bieten und damit einhergehende vermehrte Anwendungen zu finden. Der Studie zu Folge fehlen bis dato insbesondere in den ersten Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes der politische und planerische Wille zur Ausschöpfung der Möglichkeiten gebäudebezogener Solarenergienutzung.

Technische Systeme zur Solarenergiegewinnung und architektonische Leitgedanken scheinen weiterhin nur schwer vereinbar, ohne den gewünschten Ausdruck des Gebäudes zu schmälern. Trotz bereits vorliegender Ausdrucksmöglichkeiten ist das Erscheinungsbild der Solarenergie nach wie vor technisch geprägt. Aufgrund fehlender Flexibilität bieten Solarsysteme bisher wenig Möglichkeiten vielfältiger Ausdrucksformen. Eine „Integration“ erfolgt bisher daher meistens in applizierter und additiver Weise.

2. Fokus, Methodik und Berichtsstruktur

2.1. Forschungsfragen

Handlungsfelder im Bauwesen

Das Bauwesen und insbesondere der Gebäudebestand stellt mit seinen lokalen Ausprägungen ein wichtiges kulturelles Erbe und Gedächtnis dar. Dieses zu bewahren und behutsam zu entwickeln ist eine große Herausforderung für Architekten im Rahmen der beschlossenen Energiewende. Als Verbraucher von rund 50% des gesamten deutschen Nutzenergiebedarfs steht die Entwicklung des Bestandes seither im Fokus von Energieeinsparmaßnahmen sowie als Träger für erneuerbare Energiesysteme. In beiden Bereichen wurden unterschiedliche Maßnahmen der Energieeffizienz ergriffen. Gesetzliche Regelungen der Energieeinsparverordnung stellen mit ihren kontinuierlich verschärften Wärmeschutzanforderungen einen wichtigen Hebel zur Reduktion gebäudebezogener Wärmebedarfe dar. Gleichzeitig begünstigen Fördermaßnahmen (z.B. im Rahmen des KfW-Programms) die Tätigkeit von Investitionen im Bereich des Wärmeschutzes. Im Bereich des Ausbaus regenerativer Energiegewinnung finden sich ebenfalls unterschiedliche Instrumente wieder. Fördermaßnahmen unterstützen die Investition thermischer Solarsysteme und durch die zuvor beschriebene Einspeisevergütung wurden über einen längeren Zeitraum Anreize zur Errichtung von Photovoltaikanlagen geboten. Durch die stufenweise Kürzung der Einspeisesätze hat sich der Anreiz zur Errichtung elektrischer Solarsysteme mittlerweile zugunsten einer stärkeren Eigenversorgung verschoben.

Bisherige Maßnahmen in der Gesetzgebung und Förderung differenzieren in der Regel nicht nach individuellen baulichen Gegebenheiten. Das bedeutet, dass an alle Gebäude gleiche Anforderungen, unabhängig von Baualter oder Typus, gestellt werden. Unsere gebaute Umwelt erweist sich sowohl im Bestand, als auch im Neubau jedoch als sehr heterogen in seiner morphologischen und konstruktiven Ausformulierung. Im Hinblick auf eine solare Aktivierung der Gebäudehüllen zeigen Bestandsstrukturen ganz unterschiedliche „solare Begabungen“. So wirkt sich das städtische Umfeld, die Form des Baukörpers und weitere untergeordnete typische Bauteile, wie Balkone, Dachüberstände oder Dachaufbauten, vielfältig auf nutzbare Solarpotenziale aus. Diese können daher ganz unterschiedlichen Abminderungen unterlegen sein. Daneben bestimmt auch die Menge, in der ein Typus in Deutschland zu finden ist, maßgeblich über die Größe eines erschließbaren Potenzials. So können vergleichsweise kleinteilige Flächen in der Summe ein großes Potenzial darstellen, sofern dieser Typus in einer großen Anzahl zu finden ist. Hieraus ergeben sich folgende Forschungsfragen: Welche Hüllflächen baulicher Strukturen weisen die größten solaren Potenziale auf und welche Relevanz haben diese innerhalb der Architektur? Wie können die heterogenen Hüllflächen solar adaptiv und gestalterisch integrativ entwickelt werden? Welche gesetzlichen oder förderrechtlichen Maßnahmen sind nötig, um identifizierte Handlungsfelder zu erschließen?

Solare Energien dynamisch betrachten

Neben der Bestimmung von Handlungsfeldern innerhalb der heterogenen Ausprägungen des Bauwesens ist auch eine differenziertere Betrachtung von solarenergetischen Potenzialen nötig. Wie einleitend bereits erläutert, werden Solarenergien bisher in einfachen Bilanzverfahren in Energiebewertungen einbezogen. Dadurch werden volatile Schwankungen im Tages- und Wochenverlauf jedoch nicht ausreichend berücksichtigt. Eine nachhaltige Nutzung der Solarenergie, sowohl für die Strom- und Wärmeproduktion, bedingt jedoch eine detailliertere Betrachtung, als dies in den bisherigen Rechenverfahren der Fall ist. Daneben wirkt sich auch die je nach Nutzung unterschiedlich verlaufende Nachfrage auf das Maß einer Nutzung solarer Energien maßgeblich aus. Bedarf und Solarpotenzial können dabei zeitlich zusammenfallen, beziehungsweise zu unterschiedlichen Zeiten vorliegen.

Bei der solaren Stromproduktion entscheidet bereits heute das Maß der „Synchronität“ von Angebot und Nachfrage über die Höhe der Eigenversorgung und damit über die Wirtschaftlichkeit eines Systems. Je mehr solar produzierter Strom selber genutzt werden kann, desto weniger Strom muss im Jahresverlauf dazu gekauft werden. Damit können Betriebskosten deutlich reduziert werden.

Weitere große Anwendungsmöglichkeiten der Solarenergie werden im Bereich passiver und „passiv-aktiver“ Energien gesehen. Hier werden vielfältige Möglichkeiten der Wärmepufferung bis hin zur Einbindung von solarer Abwärme in das Gebäudegesamtsystem vermutet. Die vereinzelt realisierten Beispiele solarer Pufferzonen (vgl. 1.1) erlauben zudem neben energetischen Effekten auch räumliche Qualitäten zu erschließen. Hierbei wird angenommen, dass die Ausbildung solarer „Puffer“ auch unter Umständen zu einer partiellen Substitution von Schichtaufbauten, wie der Wärmedämmung, führen kann. Dadurch könnten neue und viel breiter gestreute Möglichkeiten der energetischen „performance“ zukünftiger Gebäudehüllen umgesetzt werden. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass potenziell positive Effekte passiver „Energiesammlung“ in der Winterzeit nicht zu Überhitzungsproblemen im Sommerfall führen.

Zur Überprüfung voran genannter Thesen sind dynamische Betrachtungen der solaren und gebäudebezogenen Energieströme unter Berücksichtigung zeitlich aufgelöster volatiler Schwankungen notwendig. Hierbei lassen sich folgende Forschungsfragen identifizieren: Gibt es die Möglichkeit unterschiedliche solare Strategien in der Gebäudehülle zu verfolgen und trotzdem die gültigen gesetzlichen Energiestandards zu erfüllen? Bietet die Nutzung von Solarenergie in Fassaden die Chance Materialien und Schichtaufbauten zu substituieren? Wie müssten gesetzliche Standards angepasst werden, um eine breitere Solarenergienutzung zu ermöglichen?

Gebäude und Energietechnik als synergetisches Gesamtsystem

Eine nachhaltige solare Energienutzung bedingt die integrale Einbindung dieser in das Gesamtenergiesystem eines Gebäudes. Hierbei bilden Energiegewinnung, Bedarfe und Versorgungssystem einen Dreiklang, welcher individuell nach

Nutzung und Gebäudetyp ausgebildet wird. Je nach Beschaffenheit eines Gebäudes in seiner Form und Nutzung können somit ganz unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten solarer Energiepotenziale erfolgen. Hierbei stellt sich die Frage in welcher Relation aktive und passive solare Gewinne zu Wärme- und Strombedarfen jeweiliger Gebäude stehen. Sollten sich Maßnahmen einer aktiven oder passiven Solarenergienutzung in der energetischen Gesamtbilanz ähnlich positiv darstellen wie die Einbringung einer leistungsfähigen Dämmung, lägen damit vielfältigere Strategien im Bereich des energieeffizienten Bauens vor.

Aus den genannten Thesen zur Einbindung solarer Energiegewinnung in das Gebäudegesamtsystem lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten: In welchem Verhältnis stehen passive und aktive Solarpotenziale zu den gebäudebezogenen Energiebedarfen? Wie lassen sich im kontextuellen Zusammenhang des Gebäudes und seiner Orientierung spezifische Lösungen erzielen? Wie muss ein Gebäudeenergiesystem beschaffen sein, um eine Integration von Solarsystemen zu befördern?

Finanzielle Effekte solaraktiver Bauteile

Gestalterisch integrierte Solarsysteme evozieren aus planerischer und bautechnischer Sicht derzeit einen finanziellen Mehraufwand, welcher die Wirtschaftlichkeit eines Systems grundsätzlich beeinflussen. Systemlösungen, welche einen konstruktiven und materialspezifischen Optimierungsprozess durchlaufen haben, können unter Umständen auch zu einer Verbesserung eines wirtschaftlichen Betriebs beitragen. Somit sind neue Ansätze einer Einbindung solarer Energienutzung neben einer energetischen und ressourchentechnischen Bewertung auch monetär zu betrachten.

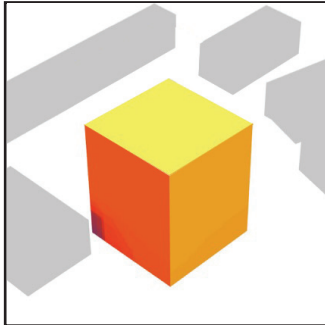
2.2. Methodik und Struktur des Forschungsberichts

Aus den zuvor beschriebenen Forschungsfragen zu Handlungsfeldern im Gebäudebestand, neuen dynamischen Betrachtungen, einer Einbettung solaradaptiver Systeme als Teil eines Gebäudeenergiegesamtsystems und weiteren monetären Effekten werden insgesamt vier Arbeitsfelder definiert.

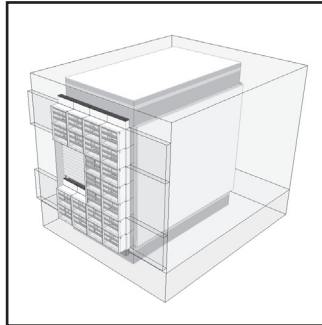
Kern des methodischen Vorgehens bildet ein Gebäudeenergiemodell, welches die Schnittstelle und Bilanzenebene zur Bewertung von energetischen und finanziellen Verhaltensweisen bildet. Dieses wird durch zwei sektorale Analysen (vgl. Abb. 9) gespeist und führt diese zu einer ganzheitlichen Systembetrachtung zusammen. Dies beiden Inputparameter fokussieren auf die Maßstabsebene der Typologie und des Bauteils.

Anhand des Gebäudeenergiemodells werden ganzheitliche Systembetrachtung zu Anwendung solaradaptiver Gebäudehüllen vorgenommen. Über eine weitere Schnittstelle (Output 2) werden Energie- und Gebäudekennwerte für die umfangreichen Kosten- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen extrahiert.

Input 1: Typologische Strahlungssimulation



Input 2: Dynamische Fassadensimulation

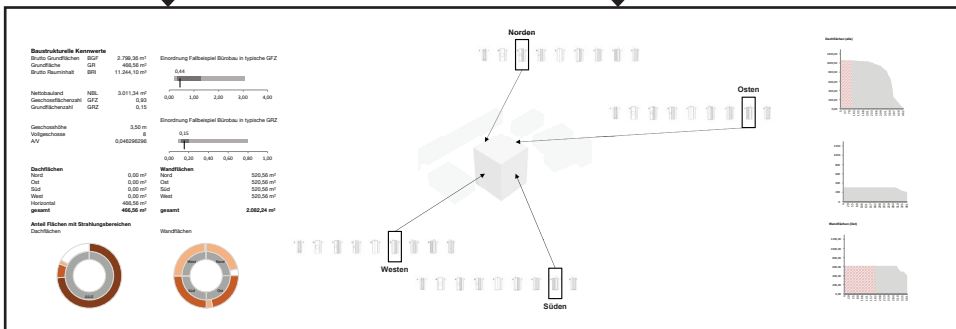


Input 3: Kostenanalysen

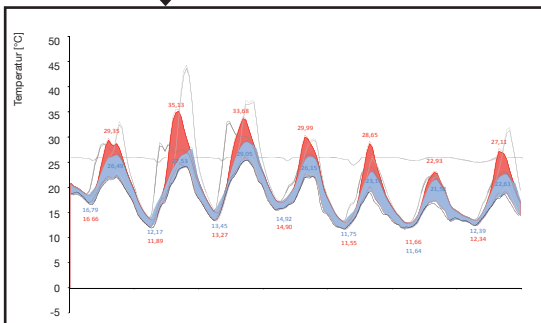
Baukosten Übersicht

100	Grundstück
200	Herrichten und Erschließen
300	Bauwerk - Baukonstruktionen
400	Bauwerk - Technische Anlagen
500	Außenanlagen
600	Ausstattung und Kunstwerke
700	Baunebenkosten
Summe	
Differenz	

Gebäudeenergiemodell



Output 1: Energie- und Lastbewertung



Output 2: Lebenszyklusbetrachtung

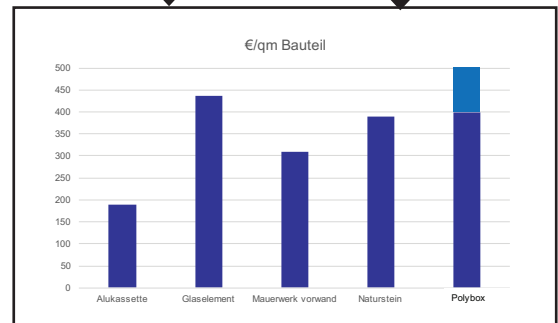


Abb. 9:
Methodisches Vorgehen, Input- und Output Parameter des Gebäudeenergiemodells
Quelle: Eigene Darstellung

Neben dem einleitenden Teil „Die Entwicklung des solaren Bauens (Teil 1) (S. 13ff) gliedert sich die vorliegende Arbeit in folgende Bereiche:

Solaradaptive Gebäudehüllen (Teil 2) (S. 27ff)

Dieser Teil beinhaltet eine Annäherung an den Begriff der architektonischen Gestalt und der damit verbundenen Frage einer gelungenen Integration von Solarsystemen. Im weiteren Verlauf wird eine eigene Definition einer solaradaptiven Gebäudehülle beschrieben.

Typologiebezogene Solarstrahlungspotenziale (Teil 3) (S. 35ff)

In diesem Teil stehen die typologischen Untersuchungen zu solaren Strahlungspotenzialen unterschiedlicher Gebäudetypen sowie deren Häufigkeit im Deutschen Gebäudebestand im Fokus. Hierfür wird eine Typisierung vorgenommen, welche die gängigsten Bauweisen des Deutschen Gebäudebestandes nach formspezifischen Eigenschaften gliedern. Die Ermittlung von Strahlungspotenzialen erfolgt anhand von Simulationen. Diese werden anhand eines eigens entwickelten Programms über die Plattform „Grasshopper“ durchgeführt. Als Vergleichswerkzeug wird das Prinzip des „solaren Fingerabdrucks“ verwendet.

Dynamische Betrachtungen solaradaptiver polyfunktionaler Fassaden (Teil 4) (S. 101ff)

Aufbauend auf den einleitend beschriebenen Aufgaben solaradaptiver Gebäudehüllen wird ein Fassadenprinzip exemplarisch für einen Bürobau entworfen. Durch thermische Simulationen werden unterschiedliche Konfigurationen im Schichtaufbau hinsichtlich deren spezifischen Wärmeverhaltens (Wärmeverluste und passive Wärmegewinne) untersucht. Die Simulationen erfolgen unter Verwendung der thermischen Simulationssoftware „Equa IDA ICE“.

Einbindung solaradaptiver Fassaden in das Gebäudeenergiesystem (Teil 5) (S. 173ff)

Nach den beiden sektoralen Betrachtungen der spezifischen Solarpotenziale unterschiedlicher Typologien (Teil 3 (S. 35)) und den dynamischen Simulationen entwickelter Varianten solaradaptiver Fassadenprinzipien (Teil 4 (S. 101)) werden beide Teilanalysen zusammengeführt. Hierfür wird ein eigenes Gebäudeenergiemodell entwickelt, welches die Geometrie- und Strahlungsdaten unterschiedlicher Testgebäude mit den thermischen Simulationsdaten der Fassadenvarianten kombiniert. Anhand des Modells werden Aussagen zu Wirkungsweisen passiver und aktiver Solarenergiegewinnung sowie deren Anteil aller gebäudebezogenen Energieströme getroffen. Beispielhaft hierfür wird ein freistehendes Bürogebäude mit unterschiedlichen solaradaptiven polyfunktionalen Fassaden für die vergleichenden Untersuchungen herangezogen. Das Modell bildet auch eine Schnittstelle zu weiteren externen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen.

Finanzielle Effekte solaraktiver Bauteile auf Eigentümer und Nutzer von Bürogebäuden (Teil 6) (S. 197ff)

In diesem Teil werden die finanziellen Effekte solaraktiver Bauteile analysiert und Optimierungspotentiale herausgearbeitet. Im Fokus steht die Beantwortung der Fragestellung, welche wirtschaftlichen Effekte für immobilienwirtschaftliche Akteure zu erwarten sind, wenn gestalterisch anspruchsvolle solaraktive Systeme eingesetzt werden.

Zusammenfassende Bewertung solaradaptiver Gebäudehüllen (Teil 7) (S. 289ff)

Die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Analysen werden hier zusammengefasst. Ferner werden hier aus den Ergebnis weitere Forschungsfragen abgeleitet und ein Ausblick auf weitere Anwendungsbereiche gegeben.

Literaturverzeichnis

Skyscraper Diagram

Skyscraper Diagram; abgerufen von: <http://skyscraperpage.com/diagrams/?searchID=73774417&page=1>; Zugriff am: 09.08.2016

Baier (2000)

Baier, Franz Xaver: ...Das Andere der Gestalt: Eine neue Raumtheorie (1. Aufl. ed.); In: Schimmel, Hanno (HG.): Gestalt Erscheinungsformen in Architektur und Kunst Frankfurt am Main 2000

BMVI (2011)

BMVI: Wohnhäuser mit Plus-Energie Niveau – Definition und Berechnungsmethode; 2011; abgerufen von: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/BauenUndWohnen/Bauen/anlage-1-definition_und_berechnungsgrundlage.pdf?__blob=publicationFile; Zugriff am: 20.10.2014

BMWi (2010)

BMWi: Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung; Berlin 2010

Caspary (2013)

Caspary, Uta: Ornamente der Fassade in der europäischen Architektur seit den 1990er Jahren; Berlin 2013

Domeisen; Schweizerisches Architekturmuseum (2008)

Domeisen, Oliver; Schweizerisches Architekturmuseum: Ornament neu aufgelegt; Basel 2008

Engel (2002)

Engel, Heino: Methodik der Architektur-Planung (1. Aufl. ed.); Berlin 2002

EU (2010)

Europäische Union: RICHTLINIE 2010/31/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden.; (2010)

Flusser (1991)

Flusser, Vilém: Gesten Versuch einer Phänomenologie; Düsseldorf 1991

Fonatti (1982)

Fonatti, Franco: Elementare Gestaltungsprinzipien in der Architektur; Wien 1982

Hegger; Drebes; Wurzbacher (2015)

Hegger, Manfred; Drebes, Christoph; Wurzbacher, Steffen: benefit E Gebäudeintegrierte solaraktive Systeme - Strategien zur Beseitigung technischer, wirtschaftlicher, planerischer und rechtlicher Hemmnisse; 2015; abgerufen von: http://www.ee.architektur.tu-darmstadt.de/media/architektur/fachgruppe_c/ee/forschung_dissertationen_4/ordner/151112_benefit_E_Endbericht.pdf; Zugriff am: 22.11.2015

(Pahl 2000)

Pahl, Jürgen: Gestalt in der Architekturtheorie am Ende des 20. Jahrhunderts (1. Aufl. ed.); In: Schimmel, Hanno (HG.): Gestalt Erscheinungsformen in Architektur und Kunst Frankfurt am Main 2000

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn

Solaradaptive Gebäudehüllen (Teil 2)



Abb. 10:
Dacheindeckungen mit Schiefer, Ton
gebrannten Dachsteinen, Reet und
Blech im Wandel der Zeit
Fotos: Steffen Wurzbacher



Abb. 11:
Holzkonstruktionen im Wandel der Zeit
Fotos :Steffen Wurzbacher

Aus den vorangegangenen Analysen der qualitativen Interviewforschung von Hegger; Drebes; Wurzbacher (2015) geht hervor, dass eine überwiegende Gruppe der am Bau beteiligten Akteure sich eine Entwicklung von Systemen vorstellt, welche in ihrer Anmutung Teil des Gesamtkonzeptes eines Gebäudes sind und sich in Dimension und Ausdruck einem architektonischen Gesamtkonzept unterordnen. Der allseitig genannte Schlüsselbegriff lautet dabei „Integration“. Systeme sollten dabei in die Gestalt der Fassade oder des Daches in einer integrierten Art und Weise eingebettet werden. Unterschiedliche Auffassung gibt es bei der Frage, wie die gestalterische Integration im Detail aussehen kann und was überhaupt unter „Gestalt“ und „Integration“ zu verstehen ist. Während ein Teil der Interviewpartner bereits eine Positionierung von Modulen in gleicher Ebene wie die angrenzende Fassaden- oder Dachhaut als ausreichend integriert beschreiben, fordern andere wiederum, dass Systeme sich stärker im Ausdruck selber ändern müssten. Eine weitere Gruppe befragter Experten äußerte sogar den Wunsch solare Energienutzung an Gebäuden ganz anders und in Form von durchgehend architektonischen Lösungen zu denken. Somit gilt es in einem ersten Schritt die Begriffe „Gestalt“ und „Integration“ zu klären und darauf aufbauend eine Definition zur gestalterischen Integration zu entwickeln.

1. Exkurs zur architektonischen Gestalt

Facis und die „gute“ Gestalt

Um den Begriff der „Gestalt“ haben im Laufe der Geschichte bereits viele Architekten, Philosophen und Theoretiker gerungen. Ebenso um die Frage einer guten Gestalt. Architekturen haben im Laufe der Zeit ganz unterschiedliche Ausdrücke und Vorschläge einer ‚guten‘ Gestalt entwickelt. Sie dienen dabei als wichtiges Kommunikationsmittel verschiedenster und gesellschaftlicher und individueller Ausdrücke. Die Kommunikation findet dabei über den Raum und die Gebäudehülle statt. Insbesondere der Fassade wird in diesem Zusammenhang traditionell eine wichtige kommunikative und charakterprägende Aufgabe zugetragen. Die Fassade ist ein „[...] Bereich der Architektur, wo in großer Intensität und Dichte künstlerische, formalästhetische, technomediale und materialtechnische Innovationen realisiert werden.“ (Caspary 2013 S.39)

Dass diese Funktion der Fassade bereits seit den Anfängen der höher entwickelten Architektur im Mittelpunkt steht, lässt sich an der Begriffsbildung selber erkennen. Deren Ursprung geht auf das lateinische „facis“ (Gesicht) zurück und verdeutlicht, dass die Fassade individueller Ausdruck seines „Inneren“ nach „Außen“ ist. Vielfach wird die Fassade auch mit dem menschlichen Gesicht verglichen, welches Unikat, Charakter und Persönlichkeit prägt (vgl. Domeisen; Schweizerisches Architekturmuseum 2008 ; Flusser 1991). Caspary zieht hierbei den Vergleich „mit der Kommunikationsfunktion des menschlichen Gesichtes (...) Informationen über die Geschichte oder die Funktion des Gebäudes mitzuteilen“ (ebd. 2013 S.46).

Der Begriff der Gestalt, beziehungsweise der Gestaltung ist so alt wie die Architektur selbst. In der Neuzeit haben sich umfangreiche



Abb. 12:
Kupferstich von Cornelius Galle:
Adspetus Incauti Dispendium, 1601,
entnommen aus: Caspary (2013 S.47)

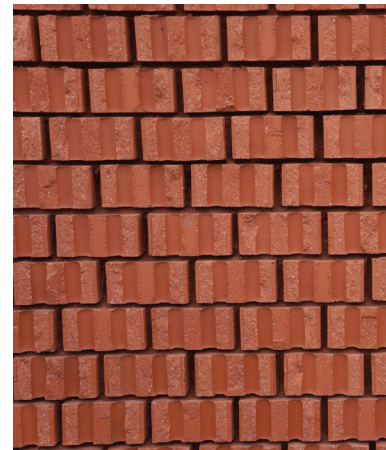


Abb. 13:
Konstruktionsprinzipien und
Gestaltungsweisen des Ziegels im
Wandel der Zeit
Fotos: Steffen Wurzbacher

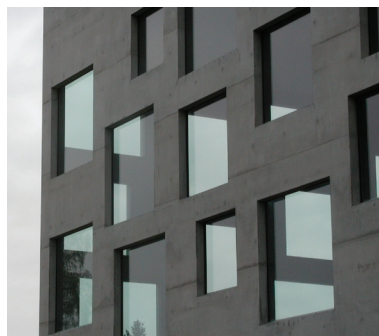
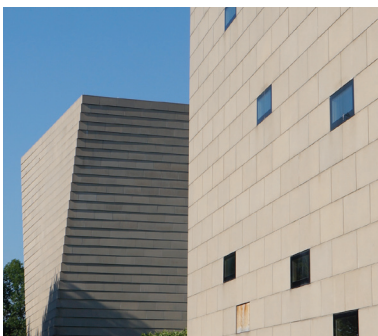


Abb. 14:
Verwendung von Sichtbeton als eigene
Ausdrucksform der Fassade
Fotos :Steffen Wurzbacher

Ansätze für Gestaltungstheorien entwickelt. Engel bezeichnet mit ‚Gestaltung‘ „den kreativen Vorgang, für ein bestimmtes Vorhaben eine äußere Form zu entwickeln, die dem Sinn des Vorhabens entspricht und seine Bedeutung der berührten Gesellschaft vermittelt: Geräte, Vorgänge, Texte, Programme, Organisationen, Kunstformen, (...) schlichtweg alles, was zur Sinnerfüllung die bestimmte äußere Form benötigt.“ (Engel 2002 S.81) Die von Engel erbrachte Definition lagert dem Begriff weitere Bedeutungsebenen an und geht damit über andere Auffassungen, dass „Gestalt (...) üblicherweise ein Objekt, eine Form oder ein (...) Umriß“ (Baier 2000 S.87) sei, hinaus. Somit beinhaltet die Gestalt neben formspezifischen Merkmalen auch Aspekte der Wahrnehmung und im weiteren Sinne auch der ‚Kommunikation‘. Somit ergibt sich in der Begrifflichkeit eine eindeutige Unterscheidung zwischen „Formgebung“ und „Gestaltung“ (vgl. Engel 2002 S.81). Eine weitere Bedeutungsebene wird im Prozess der Gestaltfindung und Gestaltbildung selber gesehen. Pahl merkt hierzu an, dass „Gestalt mehr als Form (ist). Sie ist immer das Ergebnis eines Prozesses, der jeweils weitere Prozesse auslöst.“ Pahl (2000 S.36) Somit werden auch Umstände und externe Rahmenbedingungen relevant, die den Prozess der Gestaltung beeinflussen. Diese können, technische, konstruktive, materialspezifische sowie städtebauliche oder gesellschaftliche Einflussfaktoren sein.

Mehrfach wurde bislang der Versuch unternommen die Qualität von Gestalt messbar zu machen. Quantifizierbare Kriterien scheiterten bislang an der komplexen und kontinuierlichen Wandelung der Begriffsauffassung zur Gestalt in der Architektur. So finden sich ‚pragmatischere‘ Auffassungen wie „das ästhetische Aussehen, Qualität des Materials und (...) Verarbeitung, Preis, eventuell ökologische Aspekte und Haltbarkeitsdauer“ (Baier 2000 S.87). Im Gegensatz dazu werden Kriterien benannt, die einer eindeutigen persönlichen Haltung wie „Reinheit und Klarheit durch Verzicht auf dekoratives Oberflächenfinish“, „Luxurieren durch Askese“ sowie „Authentizität des Materials“ (Engel 2002 S.81) entspringen.

Im theoretischen Diskurs zur Gestalt liefert Franco Fonatti mit seinem Werk „Elementare Gestaltungsprinzipien in der Architektur“ (ebd. 1982) einen weiteren wichtigen Beitrag, indem er vorallem Prozesse und Strukturen analysiert. Hierbei entwickelt er die Theorie einer Gestaltungsmatrix, „die ihrerseits unsichtbar bleibt, da sie nur als ‚Hilfswerkzeug und ‚Mittel‘ eingesetzt wird.“ (ebd. 1982 S.18) Diese lassen sich auch als ‚Leitfaden‘ für die Gestalt von Gebäudehüllen umdeuten. So bilden Lastabtragung, Rhythmik und Maß essentielle Kriterien einer Fassadengestalt, welche sich strukturell äußern.

Insgesamt sind alle theoretischen Ansätze zur architektonischen Gestalt stets im Spiegel des jeweils zur Entstehungszeit vorherrschenden Architekturdiskurses zu lesen. Hieraus ergeben sich jeweils unterschiedliche subjektive Schwerpunkte zur Gewichtung einer gelungenen Gestalt.

Technisch-konstruktive Rahmenbedingungen als Gestalt prägende Elemente

Übereinstimmung herrscht bei den überwiegenden Abhandlungen jedoch in der Anerkennung von materialspezifischen und konstruktiven Randbedingungen als Bausteine einer Gestaltbildung. Die feingliedrige Rasterung eines Klinkermauerwerks sowie das Abbild der aus Holz errichteten Betonverschalung werden gemeinhin als gestaltprägende Elemente anerkannt. Hierin liegt eine ‚Offenheit‘ in der Definition einer ‚guten‘ Gestalt. In der Historie des Bauens haben neben gesellschaftlich-kulturellen Änderungen stets auch technisch-konstruktive Entwicklungen zu einer neuen ästhetischen Bewertung geführt. Beispiele größerer gestalterischer Umbrüche im Bauwesen finden sich an den Übergängen von Epochen. In diesem Zusammenhang wird auf die Veränderung der als ästhetisch empfundenen Proportionsmaße des gotischen gegenüber des romanischen Baustils verwiesen.

Daneben finden sich zahllose Umbrüche tradierter Bauformen aufgrund der Einführung von neuen Materialien und Konstruktionsweisen. Der Rundbogen verdankt seine Entstehung tragstrukturellen Zwängen bei der Ausbildung von Öffnungen innerhalb einer gemauerten Wand. Die heute bewunderten Schieferdächer historischer Gebäude des Siegerlandes waren bis ins Hochmittelalter noch mit Reet oder Holzschindeln eingedeckt. Bisher hat jede neue konstruktiv-technische Erfindung zur Verschiebung ästhetischer Bewertungsmaßstäbe guter Architektur geführt. Somit besteht die Möglichkeit, dass neue funktionale Entwicklungen auch zu einer neuen Ästhetik und damit zu einer neuen Vorstellung einer gelungenen Gestalt führen.

2. Definition einer Solaradaptivität

Durch die zuvor beschriebene ‚Offenheit‘ in der Prägung der architektonischen Gestalt ist davon auszugehen, dass neue technisch-konstruktive Rahmenbedingungen langfristig auch eine allgemeine ästhetische Akzeptanz erfahren. Das bedeutet, dass neue Anforderungen eines Systems Gestalt bildend wirken können. Somit wird davon ausgegangen, dass Material, Rasterung und Fügung neuer Systeme langfristig als Teil einer architektonischen Gestalt anerkannt werden, sofern diese sich mit dem Gesamtwerk verbinden. Insofern sind Solarsysteme planerisch in die Gestalt, Konstruktion und Energiestruktur einzubinden.

Bisher wurden entweder elektrische oder thermische Systeme realisiert. Oftmals durchzieht sich ein Richtungsstreit in der Wissenschaft über die „richtige“ Form der Solarenergienutzung. Dabei hat die einleitend beschriebene Potenzialuntersuchung beiden Verwertungsformen einen positiven Beitrag zur Umsetzung der Energiewende bescheinigt. Auch wird das bisherige Denken in funktionalen Schichten kritisiert. Bisher wurde für jede Funktion eine entsprechende Schicht vorgesehen. So wurden beispielsweise Dämmplatten für den Wärmeschutz, Dampfsperren für den Feuchteschutz, Paneele, Mauerwerk oder Putzschicht für den Wetterschutz hintereinander angeordnet. Im Laufe der Zeit haben sich somit vielschichtige, komplexe Bauteile entwickelt.

Aus den beschriebenen Entwicklungen im solaren Bauen werden Lösungen vorgeschlagen, welche in hybrider Form sowohl thermische, als auch elektrische Energie gewinnen und in das Gebäudeenergiesystem einspeisen können. Diese Hybridsysteme sollten dabei flexibel auf unterschiedliche Formen passiver und aktiver Energiegewinnung, Anforderungen der Konstruktion, Dämmung und Wetterschutz sowie vielschichtige Gestaltungsformen reagieren können. Diese Form der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit wird im Folgenden als adaptiv verstanden. Ein weiterer Aspekt bei der Entwicklung adaptiver Systeme zielt auf der Berücksichtigung der zuvor beschriebenen volatilen und saisonalen Schwankungseffekte regenerativer Solarenergien ab. Hierbei können dynamische und zeitlich hochaufgelöste Analysemethoden Abhilfe schaffen.

Definition solaradaptiver Gebäudehüllen:

- Erfüllt alle regulären Aufgaben (Regenschutz, Windschutz, Schall- und Wärmeschutz, etc.) von Fassaden und Dächern
- Löst das Denken in Einzelschichten zugunsten einer flexiblen Einbindung von Funktionen, Materialien und Systeme ab
- Bindet Solarsysteme architektonisch und nutzungsgerecht ein
- Ermöglicht eine hybride Energiegewinnung mit Berücksichtigung volatiler und saisonaler Schwankungen
- Einbeziehung von Energieströmen der Fassade in das Gesamtenergiesystem des Gebäudes
- Erlaubt eine flexible Ausprägung der Effizienzaspekte – Verlustminimierung, Gewinnmaximierung

Literaturverzeichnis

Baier (2000)

Baier, Franz Xaver: ...Das Andere der Gestalt: Eine neue Raumtheorie (1. Aufl. ed.); In: Schimmel, Hanno (HG.): Gestalt Erscheinungsformen in Architektur und Kunst Frankfurt am Main 2000

Caspary (2013)

Caspary, Uta: Ornamente der Fassade in der europäischen Architektur seit den 1990er Jahren; Berlin 2013

Domeisen; Schweizerisches Architekturmuseum (2008)

Domeisen, Oliver; Schweizerisches Architekturmuseum: Ornament neu aufgelegt; Basel 2008

Engel (2002)

Engel, Heino: Methodik der Architektur-Planung (1. Aufl. ed.); Berlin 2002

Flusser (1991)

Flusser, Vilém: Gesten Versuch einer Phänomenologie; Düsseldorf 1991

Fonatti (1982)

Fonatti, Franco: Elementare Gestaltungsprinzipien in der Architektur; Wien 1982

Hegger; Drebes; Wurzbacher (2015)

Hegger, Manfred; Drebes, Christoph; Wurzbacher, Steffen: benefit E Gebäudeintegrierte solaraktive Systeme - Strategien zur Beseitigung technischer, wirtschaftlicher, planerischer und rechtlicher Hemmnisse; 2015; abgerufen von: http://www.ee.architektur.tu-darmstadt.de/media/architektur/fachgruppe_c/ee/forschung_dissertationen_4/ordner/151112_benefit_E_Endbericht.pdf; Zugriff am: 22.11.2015

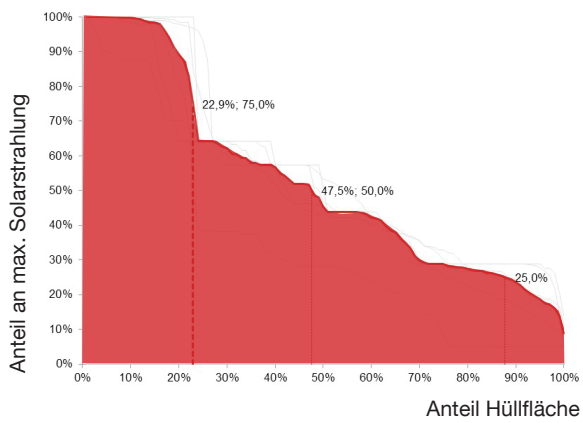
(Pahl 2000)

Pahl, Jürgen: Gestalt in der Architekturtheorie am Ende des 20. Jahrhunderts (1. Aufl. ed.); In: Schimmel, Hanno (HG.): Gestalt Erscheinungsformen in Architektur und Kunst Frankfurt am Main 2000

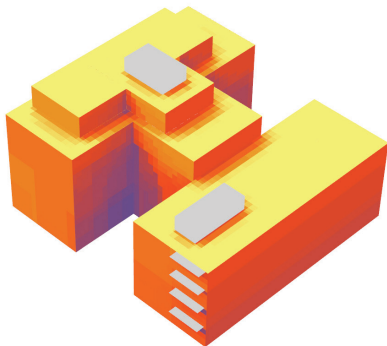
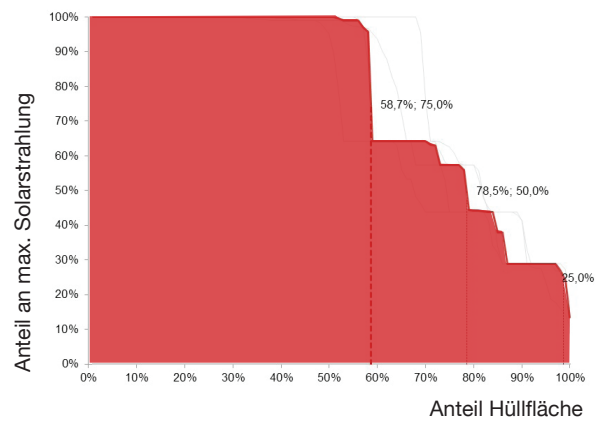
Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn

Typologiebezogene Solarstrahlungspotenziale (Teil 3)

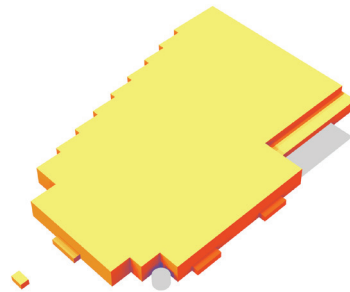
Hofförmiger Bau



Hallenbau



Strahlungsbild



Strahlungsbild

Abb. 15:
Prinzip des Solaren Fingerabdrucks
(Beispiele: hofförmiger Baut und Hallenbau)
Quelle: Eigene Darstellung

1. Solare Strahlungsprofile typischer Gebäude

Im folgenden Kapitel werden Analysen zu spezifischen Solarpotenzialen typischer Gebäude des Deutschen Gebäudebestandes sowie Studien zur Häufigkeitsverteilung von Typgebäuden beschrieben. Die Untersuchungen erfolgen anhand typologischer Fallstudien. Hierfür wird der Gebäudebestand in unterschiedliche Typen unterteilt und anhand einer eigenen Simulationsmethodik mit den Programmen „Grasshopper“ und „Rhino“ hinsichtlich spezifischer Strahlungserträge analysiert. Dabei werden mehrere Testgebäude pro Gebäudetyp untersucht und zu einem typischen Strahlungsprofil zusammengefasst.

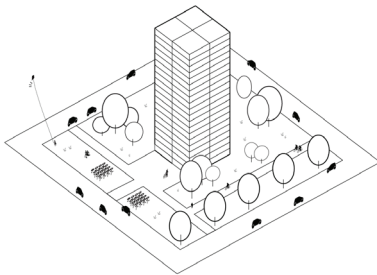
Die Darstellung des Strahlungsprofils stellt eine eigene Setzung dar und wird im Folgenden als „solarer Fingerabdruck“ benannt. Anhand dieses Indikators lassen sich Auswirkungen von Eigen- und Fremdverschattungen sowie Mengen zu erwartender typischer Strahlungen auf alle Teilflächen herauslesen. Der „Solare Fingerabdruck“ stellt dabei auch ein Werkzeug dar, mit welchem überschlägig erste Abschätzungen zu Anteilen nutzbarer Dach- und Fassadenflächen in Abhängigkeit zum jeweiligen Gebäudetypus vorgenommen werden können. Die Darstellung erfolgt anhand eines einfachen Graphen. Die X-Achse benennt den Anteil an der Gesamtfläche in Prozent, die Y-Achse benennt den Anteil auftreffender Strahlung in Relation zur auftreffenden Strahlung des jeweiligen Standortes auf eine unverschattete horizontale Fläche. Ein Wert von 100% auf der Y-Achse bedeutet, dass keine Abminderung der Solarstrahlung durch Eigen- oder Fremdverschattung vorliegt. Je stärker ein Bauteil geneigt ist, desto kleiner wird auch der Y-Wert. Neben dieser rein aus der Geometrie heraus resultierenden Abminderung zeigen sich auch die unterschiedlichen Verschattungseffekte der Umgebung, durch Versprünge im Baukörper oder durch untergeordnete Bauteile. In den folgenden Untersuchungen werden jeweils drei unterschiedliche Teile der Gebäudehülle zu einem „solaren Fingerabdruck“ zusammengefasst. So werden jeweils Graphen für die Fassaden- die Dachflächen und für die gesamte Gebäudehülle erstellt. In den Betrachtungen Fassade, Dach, Hülle wird zusätzlich zwischen einem Strahlungsprofil ohne und mit Einfluss typischer umgebender Bebauungen sowie untergeordneten Bauteilen unterschieden. Die Gestalt der Umgebung wird dabei anhand der real vorliegenden Strukturen durchgeführt.

2. Analyse des deutschen Gebäudebestandes

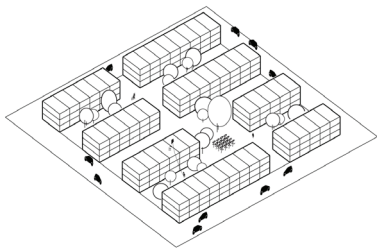
2.1. Typisierungsansätze baulicher Strukturen

Zu weiteren Potenzialstudien wird eine Typisierung des Gebäudebestandes vorgenommen. Anhand dieser „Repräsentanten“ werden die folgenden Solarsimulationen durchgeführt. Hierfür ist die Definition einer Typisierung erforderlich, welche den Anforderungen der Solarpotenzialstudie gerecht wird. Hierfür werden einleitend bereits bestehende Typisierungsansätze der Literatur betrachtet.

Im Bereich der Typisierung von baulichen Strukturen finden sich in der Literatur ganz unterschiedliche Ansätze wieder. Eine umfangreiche Beschreibung unterschiedlicher bestehender Typisierungsansätze finden sich bei Wurzbacher (2017 S.71ff). Je nach Anwendungsfall ist die jeweilige Klassifizierung dabei stärker form- oder nutzungsbasiert, beziehungsweise gliedert bauliche Strukturen in Epochen.



Unter „formbasiert“ wird eine Typisierung verstanden, welche primär die Beschaffenheit der im städtischen Raum verorteten Baukörper und deren Relation untereinander beschreibt. Typische Klassifizierungen folgen hierbei oftmals dem Schema „Punkt - Zeile - Block“. So finden sich bei Deilmann et al. (1977 S.24) die Grundformen „Hof“, „Linear“ und „Molekular“ und bei Reinhardt; Trudel (1979 S.68ff) die Typen „Einzel-, Reihen-, Zeilen-“, und „Punktbauung“ sowie den Typus „Terrassierte Bauung“.



Im Gegensatz zur Betonung der Form, betonen die „nutzungsbasierten“ Typisierungen stärker den „Zweck“ des Gebäudes. Typisierungen dieser Art werden bei städtebaulichen oder energetischen Planungen angewendet. Hierzu sind die Ansätze von Roth (1980 S.15) und Hegger et al. (2012 S.30) zu zählen. Beide Typisierungsansätze verfolgen das Ziel Stadtstrukturen für energetische Analysen in bilanztechnisch erfassbare Bereiche gliedern zu können. So wurde der Typisierungsansatz von Roth (1980) zur ersten überschlägigen Bewertung einer Fernwärmeversorgung entwickelt. Die dafür definierten „Siedlungstypen“ beinhalten pauschalisierte Angaben zu baustrukturellen Merkmalen wie bauliche Dichte, Bruttogrundfläche und Form und energetischen Eigenschaften wie Heizwärmebedarf, Trinkwasserwärmebedarf sowie Sanierungszustand und Baulter. Einen vergleichbaren Ansatz entwickelt Hegger et al.

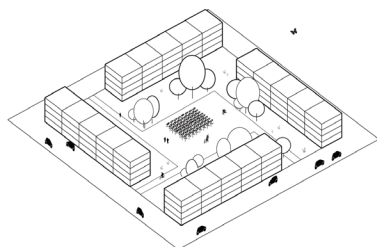


Abb. 16:
Gleiches Maß baulicher Dichte
(GFZ=1,0) in Punktförmiger,
zeilenartiger und Blockartiger
Bebauung
Quelle: Wurzbacher(2017) auf
Grundlage von: Fernandez Per &
Mozas 2004 aus: Berghauser Pont &
Haupt, 2010, S.13

(2012) mit der Beschreibung „Energetischer Stadtraumtypen“. Diese beinhalten neben den bei Roth (1980) beschriebenen baulichen und energetischen Eigenschaften weitere pauschalisierte Potenzialgrößen wie Solar-, Biomasse- oder Abwärmepotenzial. Auch sind die angegebenen energetischen Eigenschaften um alle relevanten gebäudebezogenen Bedarfe (z.B. Strom, Brennstoffe, etc.) erweitert.

Da Gebäude gleicher Typologien sich im Laufe der Zeit im architektonischen Ausdruck, der Konstruktion und teilweise sogar morphologisch verändert haben, finden sich in der Literatur auch Ansätze einer zeitlichen Typisierung wieder. Everding (2007) gliedert ihre 20 Stadtraumtypen (vgl. ebd. 2007 S.190) neben morphologischen Gegebenheiten auch nach zeitlichen Eigenschaften. So finden sich zum Beispiel drei unterschiedliche Stadtraumtypen einer Einfamilienhausbebauung (Stadtraumtyp 6, 12, 16) mit Unterscheidung nach Gebäuden der Gründer- und Vorkriegszeit (Stadtraumtyp 6), der 50er bis 70er Jahre (Stadtraumtyp 12) und der 80er Jahre (Stadtraumtyp 16) wieder. Everding greift in der zeitlichen Gliederung auf bestehende Einteilungen der Literatur (vgl. Bürger; Hesse; Quack et al. 2016 ; Institut Wohnen und Umwelt GmbH 2005) zurück.

Für die folgenden Untersuchungen wird eine eigene Typisierung angewendet. Diese basiert auf den zuvor beschriebenen „formbasierten“ Ansätzen. Der Fokus auf der Form wurde gewählt, da die Bestimmung spezifischer Solarpotenziale primär anhand volumetrischer Eigenschaften des jeweiligen Baukörpers und seiner unmittelbaren Umgebung geprägt ist. Die Grundeinteilung lehnt sich dabei an das oben beschriebene Schema „Punkt –Zeile- Block“ an. Neben diesen drei Grundformen werden der Hallenbau und das Hochhaus als eigenständiger Typus definiert. Grund für einen eigenständigen Typus Halle liegt in den außerordentlich großen und zumeist geschlossenen Dachflächen und in der überwiegend eingeschossigen Bauweise. In diesen Formeigenschaften unterscheidet sich die Halle grundlegend von den ebenfalls eher flächigen hofähnlichen Bauten. Das Hochhaus wurde vor allem aus brandschutztechnischen, konstruktiven und statischen Gründen nicht der punktförmigen Bebauung zugewiesen. Im Formverhalten des ungerichteten Baukörpers, kompakter Form und überwiegend freistehend, sind diese beiden Typen jedoch eng miteinander verwandt und Übergänge eines punktförmigen Baus zu einem Hochhaus sind fließend.

Benefit E2 Gebäudetypen

- Hochhaus
- Hallenbau
- Hofähnlicher Bau
- Zeilenbau
- Punktförmiger Bau

2.2. Analyse zur Häufigkeitsverteilung von Gebäudetypen

- Wohngebäude mit Mischnutzung
- Bildung, Büro, Verwaltung bis 1983
- Bildung, Büro, Verwaltung ab 1984
- Gewerbe, Industrie bis 1983
- Gewerbe, Industrie ab 1984
- Handel, Dienstleistung, Praxisgebäude bis 1983
- Handel, Dienstleistung, Praxisgebäude ab 1984
- Beherbergung, Gastronomie, Kliniken bis 1983
- Beherbergung, Gastronomie, Kliniken ab 1984
- Sonstige (Sport, Kultur)

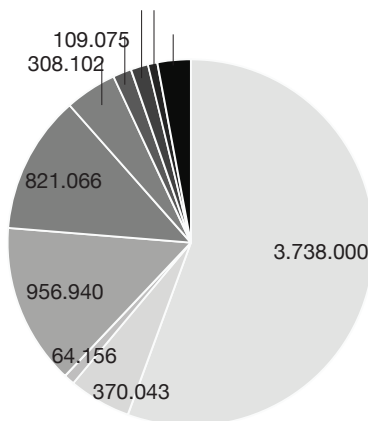


Abb. 18:
Gebäudeanzahl der Wohngebäude mit Mischnutzung und der Nichtwohngebäude
Quelle: Eigene Darstellung nach Bürger et al. 2016, S. 123

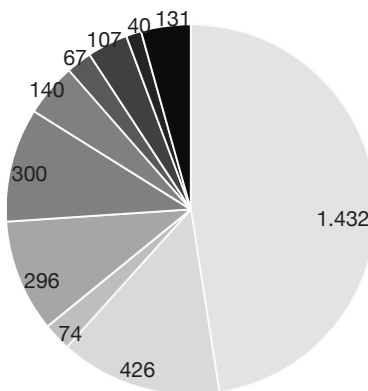


Abb. 17:
Flächenverteilung des Nichtwohngebäudebestandes in Mio. m²
Quelle: Eigene Darstellung nach Bürger et al. 2016, S. 123

Im Folgenden wird eine Analyse zur Häufigkeitsverteilung definierter Gebäudetypen durchgeführt. Diese dient der Abschätzung, in welcher Häufigkeit und Größe ein identifiziertes Strahlungspotenzial innerhalb des deutschen Gebäudebestandes vorliegt und für welche Typologien entsprechende Handlungspotenziale abgeleitet werden können.

Ziel der Analyse ist die Quantifizierung von Fassaden-, Dach- und Geschossflächen sowie der Anzahl jeweiliger Gebäudetypen. Hierfür werden statistische Erhebungen und Hochrechnungen aus der Literatur herangezogen und den oben beschriebenen Gebäudetypen zugewiesen.

2.2.1. Quantifizierung des deutschen Gebäudebestandes in der Literatur

Im Folgenden werden die betrachteten Studien hinsichtlich ihres Forschungsschwerpunktes (Wohngebäude und Nichtwohngebäude) und der verwendeten Methoden unterschieden, um die bestmögliche Übersicht über den Forschungsstand zu gewinnen. Eine Forschungsarbeit, welche den Gebäudebestand nach formspezifischen Eigenschaften (vgl. Benefit E2 Gebäudetypen) untergliedert, liegt bisher nicht vor. Aus diesem Grund werden Anhaltspunkte in den Daten extrahiert, welche eine Zuweisung in die projekteigenen Gebäudetypen ermöglichen.

Statistische Erhebungen (2010)

Eine Studie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU) und dem Bremer Energie Institut (BEI) aus dem Jahr 2010 präzisiert den Gebäudebestand mittels einer Umfrage unter Hauseigentümern, mit dem Ziel, den Datenbestand bezüglich der energetischen Sanierung des Bestandes zu ergänzen. Neben den hierfür relevanten Angaben wurden auch allgemeinere Daten der Gebäude ermittelt. Durchgeführt wurde die Erhebung mithilfe des Bundesverbandes des Schornstefegerhandwerks, um die systematische Einteilung Deutschlands in Kehrbezirke für die Vollständigkeit der Studie zu nutzen. (vgl. Diefenbach; Cischinsky; Rodenfels et al. 2010 S.9) aus den Auswertungen von 7.510 Gebäudedatensätzen, wovon 7.364 Wohngebäude und 146 Nichtwohngebäude mit Wohnnutzung umfassen (vgl. ebd. 2010 S.36), ergaben sich prozentuale Aufschlüsselungen von Ein-, Zwei- und Mehrfamilienhäusern am gesamten Gebäudebestand. Diese wurden mittels einer Redressement-Analyse an die Bautätigkeitsstatistik angepasst. (Diefenbach; Cischinsky; Rodenfels et al. 2010 S.29ff). Des Weiteren gibt die Studie Auskunft über die Konstruktionsarten und den Ausbaustand der Gebäudetypen, die Bauform (z.B. freistehend, Reihenbebauung, etc.) sowie den Dachtypus (z.B. Flachdach, Steildach, etc.)

Zensus 2011 (2015)

Eine weitere Quelle bietet der Zensus 2011 (Destatis 2015), welcher zum Stichtag des 9. Mai 2011 mittels einer Gebäude- und Wohnungszählung den Wohngebäudebestand in Deutschland

zu ermitteln versuchte. (Destatis 2015 S.3) Insgesamt ergab die Erhebung einen Gebäudebestand von 18.922.618 Gebäuden mit Wohnraum, welche sich in Wohngebäude (18.239.634), Sonstige Gebäude mit Wohnraum (663.258) und Wohnheime (19.793) aufteilen (vgl. ebd. 2015 S.5). Des Weiteren gibt die Erhebung Aufschluss über die Geometrie der Gebäude. So sind 62,5% der Wohngebäude freistehend, 15% Doppelhaushälften, 19,7% gereichte Häuser und 2,9% andere Gebäudetypen (vgl. ebd. 2015 S.9). Neben absoluten Anteilen von Typen innerhalb des Gebäudebestandes finden sich Angaben zur räumlichen Verteilung. So ergibt sich beispielsweise für die Art des Gebäudes eine große Differenz zwischen Flächenländern und Stadtstaaten. Während sich die Verteilungen der Flächenländer relativ den Anteilen Gesamtdeutschlands ähneln, sind in den Stadtstaaten nur 38,2% der Wohngebäude freistehend, 12,9% Doppelhaushälften, 44,5% gereicht und 4,4% andere Gebäudetypen (vgl. ebd. 2015 S.9).

Deutsche Wohngebäudetypologie (2015)

Die Datenbasis des Instituts Wohnen und Umwelt (IWU) zur deutschen Wohngebäudetypologie (Loga; Stein; Diefenbach et al. 2015) bietet einen dritten Ansatzpunkt zur Abschätzung des Bestandes. Dieser wurde mittels der Daten des Zensus 2011 nochmals aktualisiert. Die Arbeit gliedert den Gebäudebestand in freistehende Wohngebäude mit 1-2 Wohnungen (EFH), Wohngebäude mit 1 bis 2 Wohnungen als Doppelhaus, gereichtes Haus oder sonstiger Gebäudetyp (RH), Wohngebäude mit 3 bis 12 Wohnungen (MFH) und Wohngebäude mit 13 oder mehr Wohnungen (GMH) (vgl. ebd. 2015 S.17).

Breitenerhebung (2011)

Eine Studie zur Abschätzung des Bestandes im Bereich des Gewerbe-, des Handels- und des Dienstleistungssektors stellt die Arbeit von Schlomann; Dütschke; Gigli et al. (2011) dar. Mittels Breitenerhebung unter 2.000 Arbeitsstätten im Jahr 2008 wurden Angaben zu Energieverbrauch, Flächennutzung, energierelevanter Ausstattungsmerkmalen sowie weitere Basisdaten für die Einordnung der Gebäude in eine Typologie gesammelt. (vgl. ebd. 2011 S.77) Die Gliederung sieht eine Einteilung nach Baujahren und Gebäudeart vor. Die Arbeit unterscheidet zwischen Wohngebäude mit Mischnutzung, Bürogebäude, Laden-/Verkaufsgebäude, Werkstattgebäude, Lager-/Garagengebäude, Lager-/Garagengebäude, Sonstige Gebäude ohne Wohnnutzung.

Hausumringe und Hauskoordinaten (2013)

Ein weiterer Ansatz zur Erhebung von Daten zum Gebäudebestand liefert die Studie des BMVBS (2013), welche unter Bezugnahme der vorangegangenen Studie aus dem Jahr 2011 mittels Daten der Hausumringe und Hauskoordinaten und Daten aus ALK und ALKIS den Gebäudebestand typologisch einordnet (vgl. ebd. 2013 S.20). Die digitale „Automatisierte Liegenschaftskarte“ (ALK) dient zur Bestimmung von Gebäudezahl, Gebäudegrundfläche und dazugehöriger Nutzungen vgl. BMVBS (2013 S.17) Mittels der Hausumringe, einem Basisprodukt des ALK, können die Gebäude nicht nur quantifiziert, sondern auch bezüglich ihrer geometrischen Form (freistehend, in Reihe etc.) beschrieben werden. Entsprechend der Erkenntnisse aus der vorangegangenen Studie (BMVBS 2011) wurde eine differenzierte Einteilung beheizter Nichtwohngebäude vorgenommen. Hierbei ist zu beachten, dass Mischnutzungen mit dominierender Wohnnutzung nicht betrachtet,

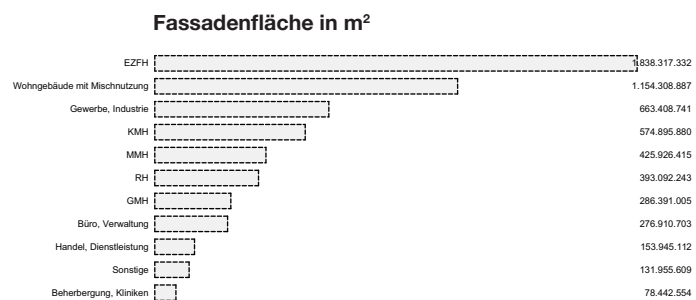
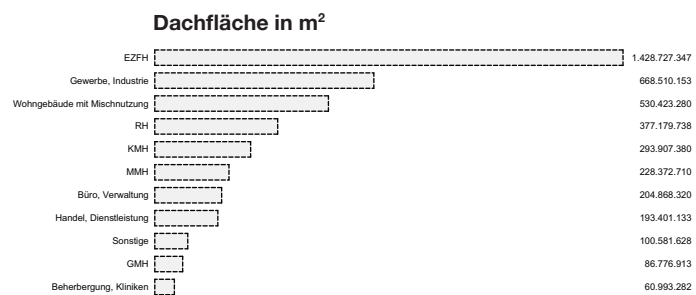
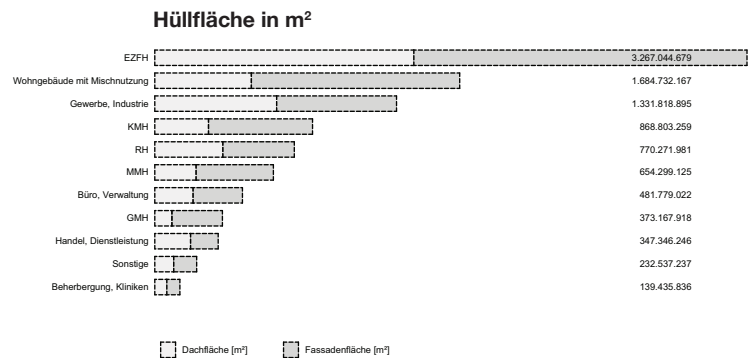
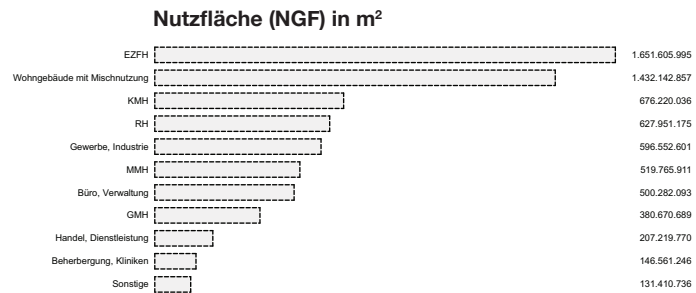
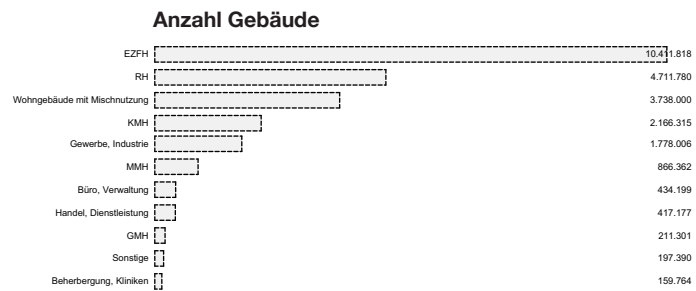


Abb. 19:
 Vergleichende Betrachtung
 verschiedener Kenngrößen der
 Wohn- und Nichtwohngebäude und
 anschließende Sortierung
 Quelle: Eigene Darstellung und
 Hochrechnung auf Datengrundlage von
 von Bürger; Hesse; Quack et al. (2016)

hingegen Mischnutzungen, in denen Nichtwohnnutzungen dominieren, in die Betrachtung miteinbezogen wurden (vgl. ebd. 2013 S.23). Eine weitere Unterteilung wird im Bereich der Geschossigkeit getroffen, da sich somit über die Hausumringe die jeweilige BGF und die NGF der Typen ermitteln lassen.

Heizenergiebedarfe von Hallenbauten (Rosenkranz; Mailach; Gritzki et al. 2011)

Diese Studie befasst sich ausschließlich mit dem Energieverbrauch im Bereich Heizen von Hallenbauten in Deutschland. Auch hier findet sich der Ansatz zur Quantifizierung des Gebäudebestandes nach beheizten Gebäuden. Durch den ausschließlichen Fokus auf den Typus Halle können Ergebnisse von Rosenkranz; Mailach; Gritzki et al. (2011) den in dieser Studie gesetzten Typologie des Hallenbaus zugeordnet werden. Die Arbeit liefert jährliche Werte zu Neuerrichtungen von „hallentypischen“ Bauten für die Jahre 1980 bis 2009. Dabei wird zwischen den Nutzungen Landwirtschaft, Fabrik und Werkstattgebäude, Handels- und Lagergebäude und sonstige unterschieden. Der gesamte Bestand beheizter Hallengebäude, welche zwischen 1960 und 2009 errichtet wurden, wird mit 283.600 bis 359.000 Gebäuden (ebd. 2011 S.42) angegeben.

Umweltbundesamt (2016)

Eine Studie von Bürger; Hesse; Quack (2016) versucht, die bereits genannten Untersuchungen übereinzubringen. Hierzu werden die Baualtersklassen der Datenbasis Gebäudebestand von Diefenbach; Cischinsky; Rodenfels et al. (2010) und des Zensus 2011 (Destatis 2015) an die Studien von Diefenbach (2013) und Loga; Stein; Diefenbach et al. (2015) angepasst.

Diese zusammenfassende Studie dient im weiteren Verlauf als Grundlage zur Abschätzung von Häufigkeitsverteilungen und Größen jeweiliger Hüllflächen. Zwar unterscheiden sich die Klassifizierungen der Gebäude von Bürger; Hesse; Quack (2016) zu denen in dieser Arbeit definierten Gebäudetypen, eine Zuweisung zueinander ist jedoch in den meisten Fällen problemlos möglich.

Aus den folgenden Grafiken wird ersichtlich, dass die Gruppe der freistehenden Einfamilienhäuser (EZFH) nach Bürger; Hesse; Quack (2016) mit deutlichem Abstand die größte Anzahl an Gebäuden sowie die größte Summe aller Dachflächen von 1428 Mio. Quadratmetern und Fassadenflächen von 1.838 Mio. Quadratmetern aufweist.

Die zweitgrößte Summe aller Dachflächen finden sich mit 669 Mio. Quadratmetern auf Gewerbe-, Industriegebäuden. Die zweitgrößte Summe aller Fassadenflächen stellen im Deutschen Gebäudebestand Wohngebäude mit Mischnutzungen mit 1.154 Mio. Quadratmetern dar.

Die drittgrößte Summe aller Dachflächen weisen mit 530 Mio. Quadratmetern Wohngebäude mit Mischnutzung auf. Bei den Fassadenflächen liegen Gewerbe, Industrie mit einer Summe von 663 Mio. Quadratmetern auf Platz drei.

Weitere größere Dach- und Fassadenflächenpotenziale finden sich in der Typologie der Reihenhäuser sowie kleinen und großen Mehrfamilienhäusern wieder.

2.2.2.Abschätzung zur Häufigkeitsverteilung der „Benefit E2 Gebäudetypen „

Hochhaus

Aus der vorliegenden Literatur lassen sich keine eindeutigen Aussagen zur Anzahl und Größe von Dach- und Fassadenflächen her ableiten. Hochhäuser können in den Klassifizierungen von Bürger; Hesse; Quack (2016) in den Typen „Wohngebäude mit Mischnutzung“, „Büro, Verwaltung“, „sonstige“ und „Große Mehrfamilienhäuser“ zu finden sein. Unter der unwahrscheinlichen Annahme, dass alle genannten Typen Hochhäuser seien, erhielte man einen maximalen „Grenzwert“ der Summe aller Hochhausdächer von 923 Mio. Quadratmetern und einer Summe aller Hochhausfassaden von 1.848 Mio. Quadratmetern. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass alle genannten Typen in Hochhausbauweise errichtet wurden. Vielmehr wird geschätzt, dass maximal 20% der genannten Gebäude als Hochhaus errichtet werden. Unter dieser Annahme wiese der Deutsche Gebäudebestand eine Summe aller Hochhausdächer von 185 Mio. Quadratmetern und eine Summe aller Hochhausfassaden von 370 Mio. Quadratmetern auf. Diese Zahlen sind jedoch nicht verifiziert und daher nicht als Grundlage weiterer Hochrechnungen zu verstehen. Eine Abschätzung zur Häufigkeitsverteilung von Hochhäusern im deutschen Gebäudebestand kann somit nicht vorgenommen werden.

Hallenbau

Oschatz; Rosenkranz; Mailach et al. (2012) benennen in ihrer Studie eine Anzahl von 283.600 bis 359.000 (ebd. 2012 S.43) Hallengebäude in Deutschland. Angaben zu erwartenden Dach- oder Fassadenflächen werden hierbei nicht getroffen. Eine indirekte Hochrechnung kann jedoch anhand der in gleicher Studie genannte Nutzfläche erfolgen. Diese geben Oschatz; Rosenkranz; Mailach et al. (2012) mit einem Wert von 508 bis 625 Mio. Quadratmetern (ebd. 2012 S.46) an. Dieser Wert entspricht in etwa den Angaben von Bürger; Hesse; Quack (2016) für den Gebäudetypus „Gewerbe, Industrie“. Somit ist davon auszugehen, dass es sich bei diesem Typus um reine Hallenbauten handelt. Legt man nun die Angaben zu resultierenden Dach- und Fassadenflächen von Bauten der „Gewerbe, Industrie“ gemäß Bürger; Hesse; Quack (2016) der Schätzung zu jeweiligen Hüllflächen für Hallenbauten zugrunde, erhält man eine Summe aller Hallendächer von 669 Mio. Quadratmetern und eine Summe aller Hallenfassaden von 663 Mio. Quadratmetern.

Hofförmiger Bau

Bei den hofförmigen Bauten lassen sich aus den bisherigen vorliegenden Studien ebenfalls keine genauen Ableitungen zur Häufigkeitsverteilung ziehen. Die von Bürger; Hesse; Quack (2016) definierten Typen können bis auf die Typen „einstehendes Familienhaus“, „Reihenhaus“ und „Gewerbe, Industrie“ alle als hofförmiger Bau, als Zeilenbau oder punktförmiger Bau vorkommen. Eine Untergliederung in diese jeweiligen Bereiche ist aus der vorliegenden Datenlage nicht möglich. Insgesamt wird jedoch von einem erheblichen Flächenpotenzial insbesondere im Dachbereich innerstädtischer Blockbebauungen ausgegangen.

Zeilenbau

Eine vollständige Quantifizierung der Anzahl von Zeilenbauten im deutschen Gebäudebestand ist, wie schon bei den hofförmigen Bauten beschrieben, nicht möglich. Einzige eindeutige Zuweisung kann bei den Reihenhäusern getroffen werden. Dieser Subtyp zeilenartiger Gebäude stellt nach Bürger; Hesse; Quack (2016) allein eine Summe aller Reihenhausdachflächen von 377 Mio. Quadratmetern und eine Summe aller Reihenhausfassadenflächen von 393 Mio. Quadratmetern dar. Ein weiterer nicht unerheblicher Dach- und Fassadenanteil wird im Bereich kleiner- und größerer Mehrfamilienhäuser vermutet. Insbesondere in den Wohngebäuden des „Wiederaufbaus“ ab den 1949er Jahren finden sich überwiegend einfache Zeilenbauten wieder. Somit wird von einem erheblichen Flächenpotenzial im Bereich von Zeilenbauten ausgegangen.

Punktförmiger Bau

Im unteren Dichtebereich finden sich die freistehenden Einfamilienhäuser als Subtyp einer punktförmigen Bebauung wieder. In den Untersuchungen von Bürger; Hesse; Quack (2016) stellt dieser Typus sowohl in der Summe aller Nutzflächen, als auch in der Summe aller Dach- und Fassadenflächen den größten Anteil im Deutschen Gebäudebestand dar. Mit einer Summe von 1.429 Mio. Quadratmetern Dachfläche und 1.828 Mio. Quadratmetern Fassadenfläche stellt dieser Typus ein erhebliches Flächenpotenzial bereit. In den mittleren und höheren Dichtebereichen lassen sich, im Gegensatz zu dem eindeutig definierten Subtyp des freistehenden Einfamilienhauses, keine weiteren eindeutigen Zuordnungen treffen. Es können sowohl die bei Bürger; Hesse; Quack (2016) genannten Typen „Wohnhäuser mit Mischnutzung“, „kleine Mehrfamilienhäuser“, „große Mehrfamilienhäuser“, „Büro, Verwaltung“, „Sonstige“ und „große Mehrfamilienhäuser“ in punktförmiger Bebauung vorliegen. Somit ist eine Quantifizierung aller punktförmigen Gebäude nicht möglich. Insgesamt wird allein schon in den unteren Dichtebereichen der Einfamilienhäuser ein erhebliches Flächenpotenzial insbesondere in den Dächern identifiziert.

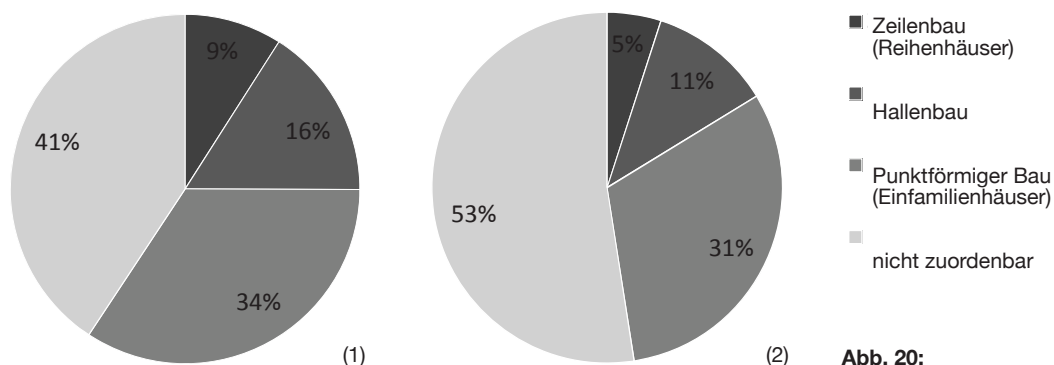


Abb. 20:
Anteil der (1) Dach- und (2)
Fassadenflächen des deutschen
Gebäudebestands
Quelle: Eigene Darstellung

BAK	Baujahr	Zeilenbau		Hochhaus	
		Wohnungsbau	Bürobau	Wohnungsbau	Bürobau
A	Bis 1918				
B	1919-1948				
C	1949-1957				
D	1958-1968				
E	1969-1978				
F	1979-1983				
G	1984-1994				
H	1995-2001				
I	2002-2009				
J	ab 2010				

Tab. 1:
Auswahl typologiebezogener Referenzbauten
Quelle: Eigene Darstellung, a.G.Deutsche
Gebäudetypologie; IWU; 06/2005

2.3. Abhängigkeiten baualters- und fassadenbezogener Gestaltungsmerkmale und möglicher Potenzialnutzung

Die Literatur gliedert die Entwicklung des Bauens in mehrere Baualtersklassen. Deren zeitliche Übergänge orientieren sich an historischen Ereignissen Veränderungen der wärmetechnisch relevanten Bauvorschriften sowie Zeitpunkte statischer Erhebungen. Somit repräsentieren die verschiedenen Klassen Gebäude mit gleicher Konstruktionsweise oder energierelevanten Merkmalen. Für die vorliegende Arbeit werden die Zeitschritte und Codierungen von Bürger; Hesse; Quack et al. (2016 S.112) übernommen. Hierbei wird in zehn Baualtersklassen unterschieden, welche von A (bis 1918) bis J (ab 2010) durchstrukturiert sind.

Der deutsche Gebäudebestand dominieren aufgrund des Wiederaufbaus nach dem Zweiten Weltkrieg Gebäude der Baualtersklassen D-F (1949-1978). Als Typus wird in dieser Zeit oftmals der Zeilenbau realisiert. Ab den Jahren 1969 bis 1983 werden zudem hochverdichtete Wohnquartiere der umgangssprachlich genannten „Großwohnsiedlungen“ errichtet. Gebäude fallen hierbei oftmals unter die Hochhausverordnung und werden sowohl in ungerichteter punktförmiger bis hin zur gerichteten Zeilenstruktur in allen Formen umgesetzt.

Im Folgenden werden baualters- und fassadenbezogene Gestaltungsmerkmale analysiert, welche eine mögliche solare Aktivierung der Fassaden und Dächer von Gebäuden einschränken, bzw. sogar ausschließen können. Die Untersuchung verfolgt dabei gleich mehrere Ziele. Zum einen soll auf die gestaltungsprägenden Aspekte der Gebäudehülle verwiesen werden. Nicht alle Fassaden- oder Dachflächen können in architektonisch verträglicher Weise mit den bisher vorliegenden Solarsystemen belegt werden. Hier gilt es zwischen Effizienz und Ausdruck abzuwägen und ein gestalterisch verträgliches Maß einer Einbindung solarer Nutzung zu finden. Der zweite Grund der Untersuchung zielt auf die Ermittlung konkreter Abminderungsfaktoren solarer Energienutzung. Diese fließen in die gebäudebezogenen Bilanzen der folgenden Kapitel ein.

Für die Untersuchungen werden einzelne Gebäude als repräsentative Beispiel für die jeweilige Typologie und Baualter gewählt. Die Auswahl erfolgt anhand subjektiver Einschätzung, inwiefern ein Typus stellvertretend für eine ganze Gebäudegruppe stehen kann.

Die Analyse gestaltprägender Elemente kann sich im Rahmen dieser Analyse nur auf ausgewählte Gebäude konzentrieren. Aufgrund der dominierenden Menge an Wohnungsbauten der Nachkriegsjahre werden repräsentative Zeilen der Jahre 1958 bis 1983 sowie Wohnhochhäuser der Jahre 1969 bis 1983 gewählt. Im Bürobau werden Zeilenbauten der Jahre 1979 bis 2001 und Hochhäuser der Jahre 1958 bis 1968 sowie von 1979 bis 1983 gewählt. Alle gewählten Repräsentanten werden einer eingehenden Fassaden- und Dachstudie unterzogen und spezifische Gestaltungsmerkmale qualitativ und quantitativ beschrieben. Die Hüllstudien weisen dezidierte Flächenanteile opaker und transparenter Bereiche sowie Flächen für Balkonbrüstungen sowie Dachaufbauten auf.

Baualtersklasse	Zeitraum
A	bis 1918
B	1919-1948
C	1949-1957
D	1958-1968
E	1969-1978
F	1979-1983
G	1984-1994
H	1995-2001
I	2002-2009
J	ab 2010

Tab. 2:
Zusammenfassung und Gliederung von Epochen des neueren Bauwesens nach Baualtersklassen.
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Bürger et al. (2016 S.112)

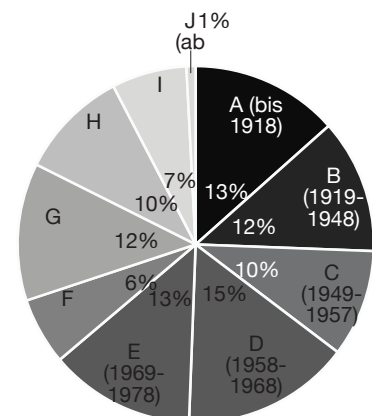


Abb. 21:
Häufigkeitsverteilung von Gebäuden des deutschen Gebäudebestandes nach Baualtersklassen
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Bürger et al. (2016 S.112)



Abb. 22:
Gegenüberstellung der Dachform
Fotos: Jana Weber



Abb. 25:
variierende Fassadengestaltung
Foto: Jana Weber

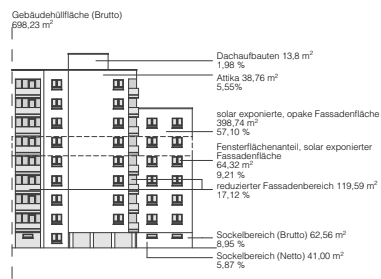
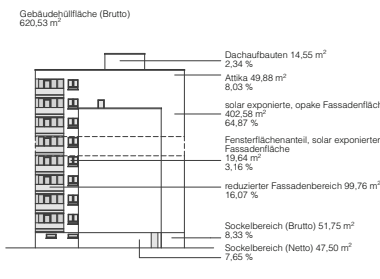
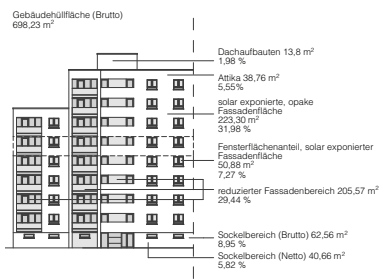


Abb. 24:
Ansichten Fassaden Hochhaus Alterbauklasse F, exemplarisch
Quelle: Eigene Darstellung

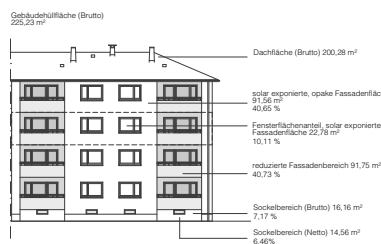
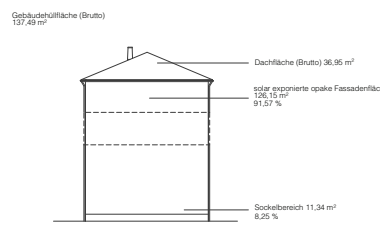
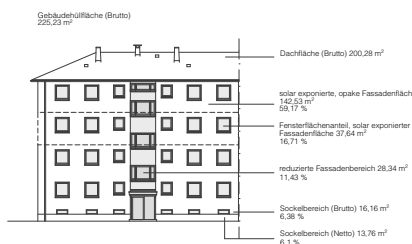


Abb. 23:
Ansichten Fassaden MFW der Baualtersklasse D, exemplarisch
Quelle: Eigene Darstellung

Dach

Die älteren untersuchten repräsentativen Mehrfamilienhäuser weisen typischerweise Satteldächer, vereinzelt auch Walmdächer auf. Diese sind je nach Baualtersklasse D und E unterschiedlich geneigt. Die Fläche ist in geringem Maße mit kleineren Aufbauten versehen. So finden sich Schonsteine und kleinere Dachgauben, welche zu einer gewissen Eigenverschattung führen können. Die untersuchten Wohnhochhäuser der Baualtersklassen E und F sind allesamt mit Flachdächern versehen. Strahlungsminderungen im Dachbereich ergeben sich durch überhöhte Treppenhaukerne oder auf dem Dach positionierte technische Installationen. Die Attikabereiche sind nur geringfügig überhöht und führen dabei zu keiner grundlegenden Eigenverschattung. Bei den untersuchten Wohngebäuden der Baualtersklasse F wurden keinerlei Aufbauten identifiziert. Somit kann Wohngebäuden der Baualtersklassen F von einem weitgehend unverminderten Strahlungspotenzial auf Dachflächen ausgegangen werden.

Insgesamt fällt der Anteil nutzbarer Dachflächen im Verhältnis zu den dominierenden Fassadenflächen deutlich kleiner aus.

Fassade

Die Fassaden der Mehrfamilienhäuser der Baualtersklassen D bis F werden überwiegend als solaraktivierbar und gestalterisch überformbar eingestuft. Teilweise finden sich komplett bis weitgehend geschlossene Fassaden der Schmalseite. Hier kann eine großflächige und zusammenhängende solare Energienutzung umgesetzt werden. Anhand der repräsentativen Gebäude wurde ein Anteil von 88 bis 92,8% als nutzbares Flächenpotenzial geschätzt.

Die Hauptfassaden sind stärker ausdifferenziert. Hier finden sich neben Bereichen einer Lochfassade auch Balkonzonen wieder. Die untersuchten repräsentativen Gebäude weisen dabei einen Fensterflächenanteil zwischen 9-18 % auf. Des Weiteren finden sich rückspringende Bereiche der Balkonzonen, welche für eine solare Aktivierung nicht in Betracht kommen. Diese wurde an den untersuchten Gebäuden mit 17,2% bis 40,7% ermittelt. Prinzipiell kann über eine Aktivierung der Balkonbrüstungen nachgedacht werden. Hier können sowohl thermische, als auch elektrische Systeme platziert werden. Dadurch könnte dieser Fassadenbereich ebenfalls anteilig nutzbar gemacht werden.

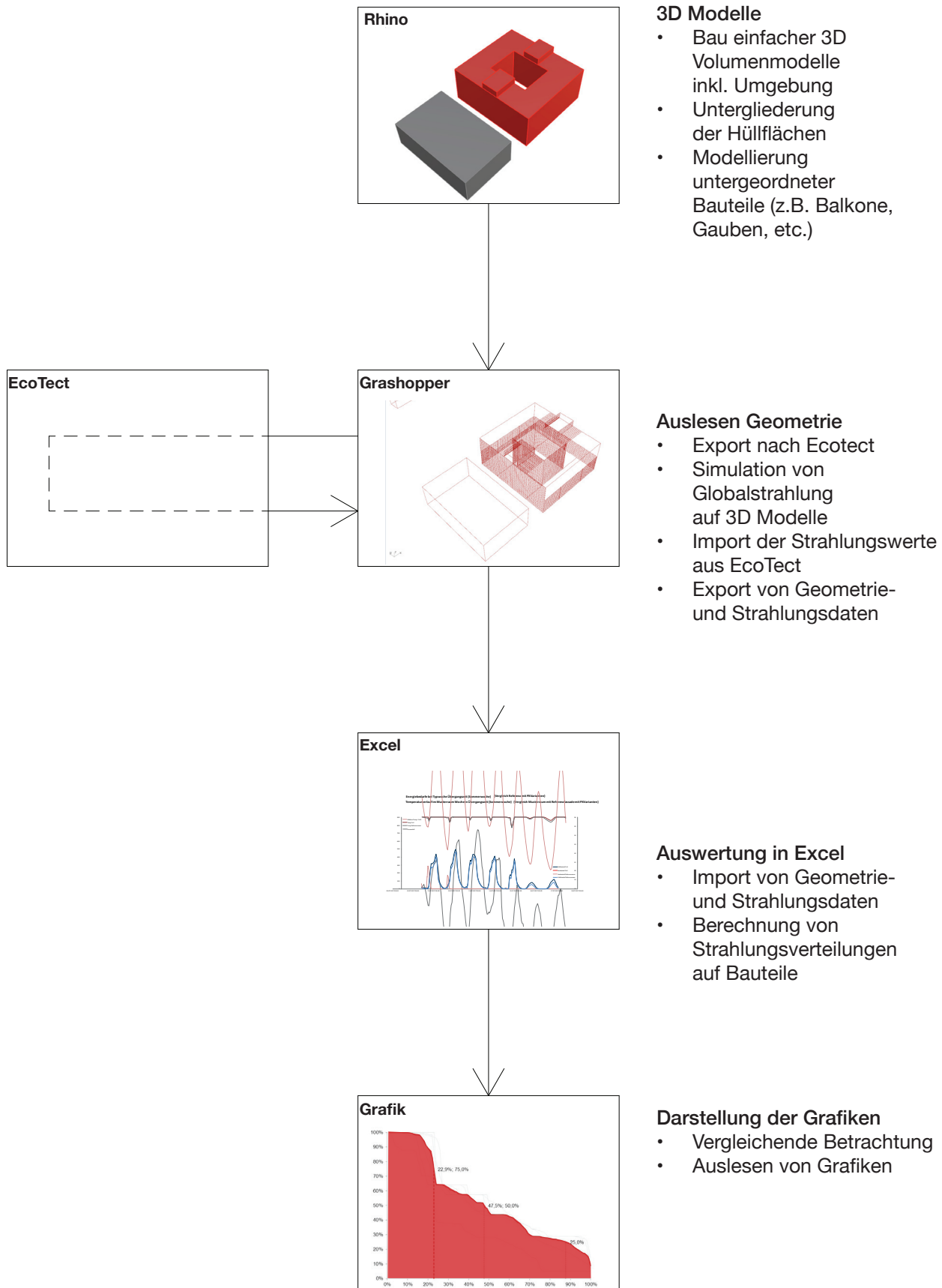


Abb. 26:
 Aufbau des Simulationsmodells
 mit den Komponenten: 1. Rhino, 2.
 Grasshopper, 3. EcoTect, 4. Excel
 Quelle: Eigene Darstellung

3. Aufbau und Ablauf der Strahlungssimulationen (methodischer Teil)

3.1. Modellierung von Volumen und Flächen

Die Modellierung zu untersuchender Gebäudetypen erfolgt je nach Ursprung (Testgebäude aus dem Portfolio des Drittmittelpartners, eigene Modelle, etc.) in gängigen 3D-Programmen, wie AutoCAD, Revit, Rhino, oder Andere. Vor der Simulation werden diese in den Formaten „dxf“ oder „3ds“ in das 3D Programm „Rhino“ importiert. Nach Prüfung der Geometrien und werden die Teilflächen und Komponenten des Gebäudes einer eigenen Layerstruktur zugewiesen. Diese ist notwendig, damit die an Rhino gekoppelte Plattform „Grasshopper“ eine Unterscheidung der Hüllflächen, Volumen und weiteren Komponenten vornehmen kann. Sobald der Testkörper den definierten Anforderungen entspricht, werden die Simulationsschritte gestartet.

Das jeweilige Testgebäude wird sowohl als 3D Volumenkörper, als auch als 3D-Fläche modelliert. Hierfür wird das Testgebäude in einem ersten Schritt als einfacher städtebaulicher Volumenkörper modelliert. Sofern das Gebäude aus mehrere Teilvolumen besteht, sind diese zu einem einzigen Körper zu vereinigen. Nach Erstellung des Volumenkörpers wird dieser dupliziert und auf einem neuen Layer platziert. Dort wird das Volumen gesprengt und die daraus erhaltenen Flächen auf unten beschriebene Layer aufgeteilt. Flächen sollten dabei immer als Rechtecke vorliegen. Komplexere O-, T-, L-, E- oder F- Formen können im weiteren Verlauf der Simulationen zu Systemabstürzen führen. Darüber hinaus sind Wand- und Dachflächen in „strahlungssensible“ Bereiche und „exponierte“ Bereiche zu untergliedern. Diese Unterscheidung dient der Reduktion der Gesamtzahl zu simulierender Flächen und damit zur Verkürzung der Simulationszeit. In einem folgenden Schritt werden die Normalen der Teilflächen geprüft. Damit die Simulation eine Teilfläche erkennt, muss die jeweilige Normale nach Außen zeigen. Zeigt eine Normale nach Innen (in das Gebäude) so wird in der Ausgabe ein Strahlungsertrag von Null Kilowattstunden angezeigt. Um dies zu vermeiden, ist eine entsprechende Prüfung notwendig.

Umliegende Gebäude sind als einfache und ggf. abstrahierte Körper zu modellieren. Das Modell ist auf eine Bodenplatte zu stellen. Zur Vermeidung von doppelten „ineinander fallenden“ Flächen sind die Bereiche der Grundfläche in der Bodenplatte auszusparen. In einem größeren Abstand ist ein umlaufender Rand in durchschnittlicher Höhe der umgebenden Bebauung zu ziehen. Dieser stellt eine abstrahierte Form weiterer Umgebung dar und dient dazu sehr flach einfallende Strahlung auszublenden.

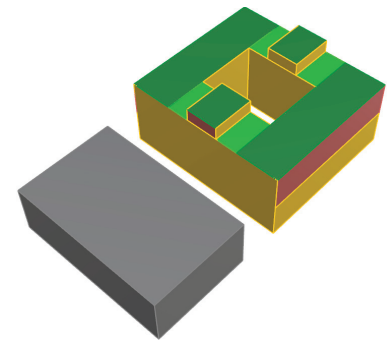


Abb. 27:
Darstellung der Gliederung der Hüllflächen in Dach und Wandflächen sowie einer weiteren Untergliederung in exponierte und reduzierte Bereiche
Quelle: Eigene Darstellung

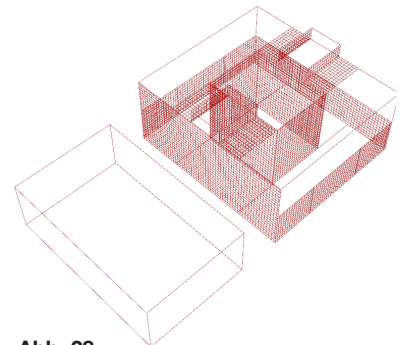


Abb. 28:
Darstellung der automatischen Rasterung der Hüllflächen in Grasshopper
Quelle: Eigene Darstellung

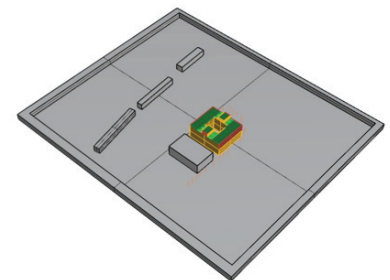


Abb. 29:
Darstellung der Umgebung des Testgebäudes mit Bodenplatte, abstrahierten umliegenden Gebäuden und umfassenden Rand
Quelle: Eigene Darstellung

3.2. Wetterdaten

In den Strahlungsanalysen oben beschriebener Testgebäude werden Klimadatensätze des Standortes Potsdam (Referenzklima Deutschland) verwendet. Datenquelle ist (Meteotest Genossenschaft 2017). Verwendung findet das DWD-Testreferenzjahr mit folgender Einstellung:

- normale Temperatur
- Periode Strahlungsparameter 1991-2010
- Periode Temperaturparameter 2000 - 2009

3.3. Eigen- und Fremdverschattungen durch Umgebung und untergeordneten Bauteilen

Insgesamt werden Werte für Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung in einer Jahresbilanz simuliert. Die Simulation von Strahlungswerten erfolgt dabei auf alle Hüllflächen der jeweiligen Testgebäude. Diese sind in „exponierte“ und „reduzierte“ Bereiche untergliedert. Reduzierte Bereiche sind diejenigen Teilflächen, an denen ein geringerer Strahlungsertrag zu erwarten ist. Dies sind insbesondere Bereiche entlang von Ecken, neben Aufbauten, die Erdgeschosszone sowie weitere Flächen, die in unmittelbarem Einfluss von Verschattung stehen. Reduzierte Bereiche werden dabei in Rasterfelder von einem auf einem Meter untergliedert.

In den Simulationen werden verschiedenen Verschattungseinflüsse analysiert und folgend beschrieben. Hierfür werden drei Teilsimulationen durchgeführt, in welchen sukzessive verschattende Elemente, wie die Umgebung, oder untergeordnete Bauteile, „zugeschaltet“ werden. Es werden folgende Simulationen pro Testgebäude getätigt:

Red 0 (ohne Umgebung, ohne untergeordnete Bauteile):

Eine erste Simulation wird ohne externe Reduktionseinflüsse (Red 0) simuliert. Hierbei wird der „reine“ Baukörper ohne seine typische Umgebung und ohne verschattende untergeordnete Bauteile analysiert. Hierbei können Rückschlüsse auf eine typische Eigenverschattung des jeweiligen Testgebäudes gezogen werden. Einflüsse aus der Umgebung oder durch untergeordnete Bauteile treten hierbei nicht auf.

Red 1 (mit Umgebung, ohne untergeordnete Bauteile)

In der zweiten Simulation werden reduzierende Einflüsse der Umgebung (Red 1) auf das Strahlungspotenzial des jeweiligen Testgebäudes bewertet. Hierfür wird die zuvor modellierte typische Umgebung in der Simulation eingeblendet. Untergeordnete Bauteile werden hingegen nicht berücksichtigt. Aus dem Vergleich zwischen Red 0 und Red 1 können Einflussfaktoren der Umgebung auf das am Testgebäude vorliegende Strahlungspotenzial bestimmt werden.

Red 2 (mit Umgebung, mit untergeordneten Bauteilen)

In einer dritten Simulation werden neben den verschattenden Einflüssen der Umgebung auch weitere Einflüsse auf untergeordneten Bauteilen wie Vordächer, Balkone, Dachaufbauten, Schornsteine, etc. untersucht. Anhand des Vergleichs zwischen Red 1 und Red 2 lassen sich Aussagen zu Auswirkungen genannter Aufbauten auf das verbliebene Strahlungspotenzial treffen. Auch lassen sich „fragmentierte“ Bereiche in Fassaden und Dächer identifizieren, deren spezifisches Potenzial rechnerisch zwar hoch ausfällt, durch mehrere kleinteilige Schattenwürfe jedoch für eine aktive Solarenergienutzung technisch nicht geeignet erscheint.



Abb. 30:

Red 0: Baukörper ohne Umgebung und ohne untergeordnete Bauteile
Quelle: Eigene Darstellung

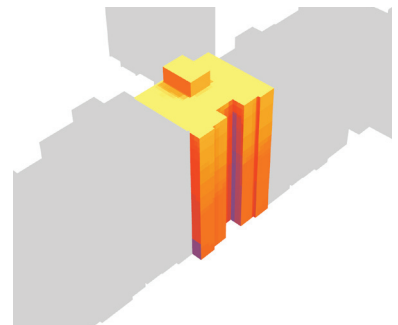


Abb. 31:

Red 1: Baukörper mit Umgebung, jedoch ohne untergeordneten Bauteilen
Quelle: Eigene Darstellung

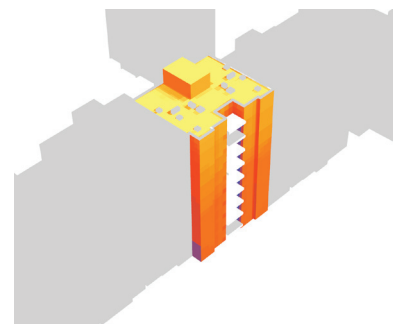


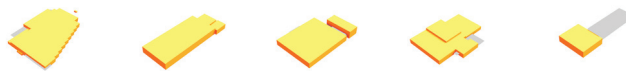
Abb. 32:

Red 2: Baukörper mit Umgebung und mit untergeordneten Bauteilen
Quelle: Eigene Darstellung

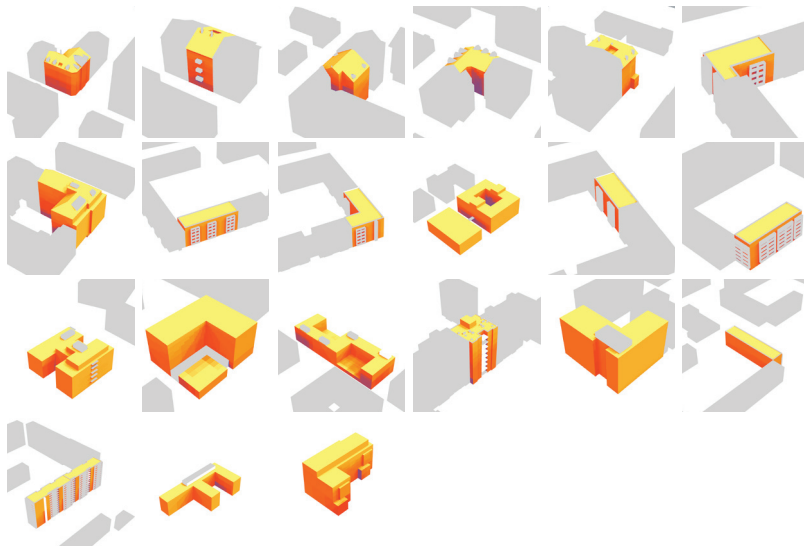
Hochhaus



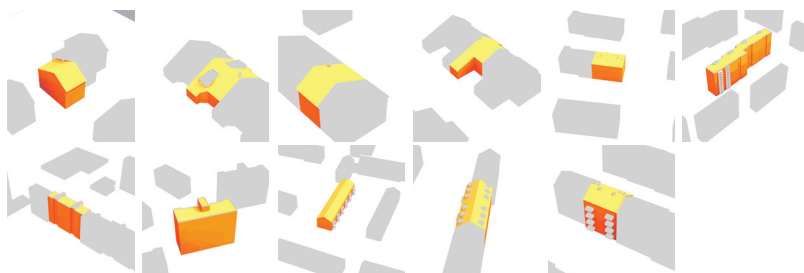
Hallenbau



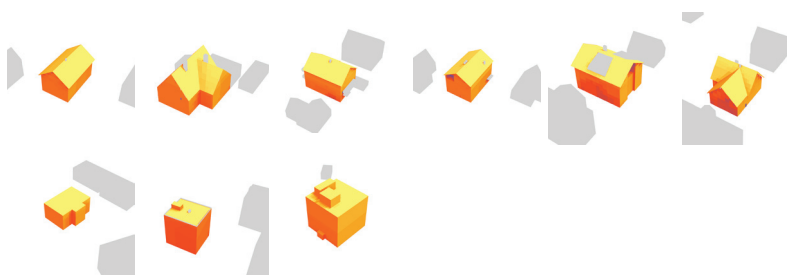
Hofförmiger Bau



Zeilenbau



Punktförmiger Bau



4. Typologie bezogene Strahlungspotenziale (Ergebnisteil)

4.1. Übersicht analysierter Gebäude nach Typus

Innerhalb der beschriebenen Gebäudetypen werden real existierende Gebäude inklusive deren individueller Umgebung für die weiteren Strahlungsanalysen verwendet. Insgesamt werden 49 Testgebäude modelliert und simuliert. Da die einzelnen Typen eine ganz unterschiedliche Varianz in der Formbeschaffenheit aufweisen, wird für „heterogenere“ Typen eine größere, für „homogenere“ Typen eine geringere Anzahl an Testgebäuden analysiert. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass unterschiedliche Hallenbauten in ihren spezifischen Strahlungsprofilen eng beieinanderliegen, hof förmige Bauten hingegen sehr unterschiedlich ausfallen. Aus diesem Grund wird hier eine größere Anzahl an Testgebäuden untersucht.

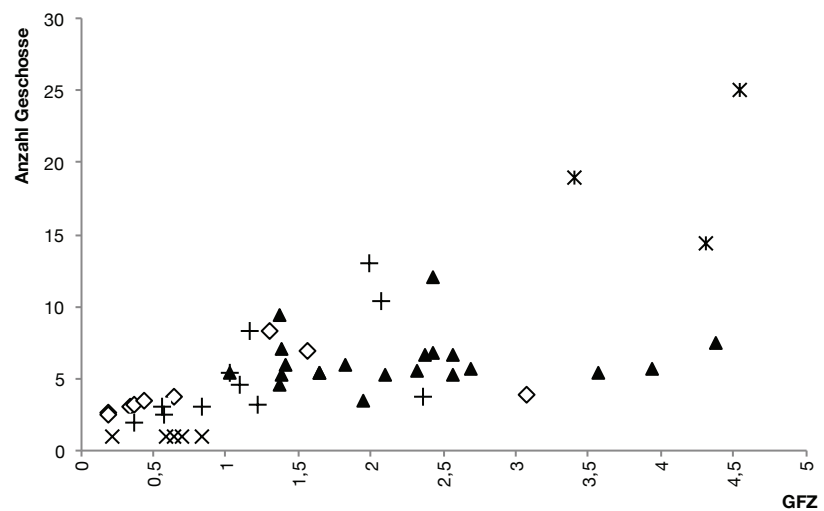
Insgesamt wird folgende Anzahl an Testgebäuden untersucht:

- | | |
|---------------------|---------|
| • Hochhaus | 3 Stk. |
| • Hallenbau | 5 Stk. |
| • Hofförmiger Bau | 21 Stk. |
| • Zeilenbau | 11 Stk. |
| • Punktförmiger Bau | 9 Stk. |

Die Auswahl zu analysierender Testgebäude erfolgt nach individueller Einschätzung, ob die Auswahl beispielhaft für eine größere Menge an Gebäuden diesen Typus stehen kann. Dabei wird darauf geachtet, dass das jeweilige Testgebäude möglichst repräsentativ im architektonischen Ausdruck beschaffen ist. Neben den „repräsentativen“ Auswahlkriterien wird auch darauf geachtet, dass eine größere Bandbreite baulicher Dichten Berücksichtigung findet. So finden sich in allen Typen kleinere Gebäude in einer aufgelockerten Umgebung mit einer GFZ von 0,18 bis hin zu sehr großen Gebäuden in hoch verdichteter Umgebung mit einer GFZ von bis zu 4.

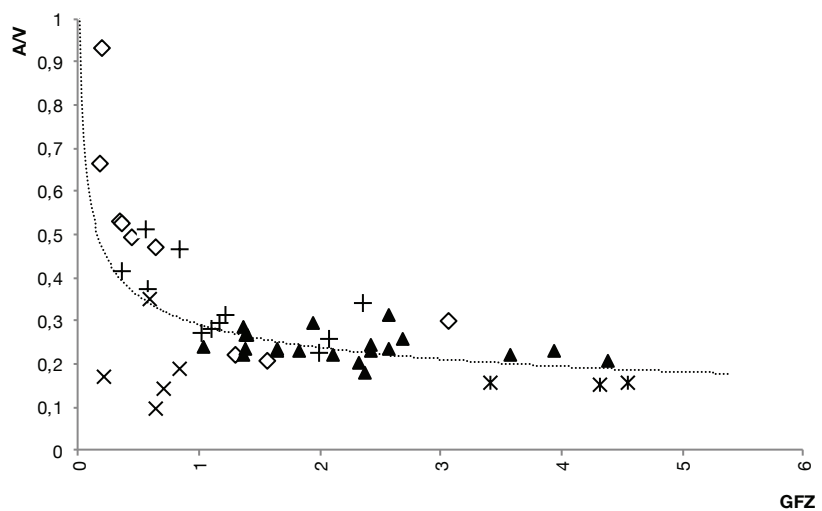
- ◇ Punktförmiger Bau
- + Zeilenbau
- ▲ Hofförmiger Bau
- × Hallenbau
- ✕ Hochhaus

Abb. 33:
Varianz in der Anzahl Vollgeschosse
untersuchter Testgebäude
Quelle: Eigene Darstellung



- ◇ Punktförmiger Bau
- + Zeilenbau
- ▲ Hofförmiger Bau
- × Hallenbau
- ✕ Hochhaus

Abb. 34:
Varianz im Maß der Kompaktheit (a/V)
untersuchter Testgebäude; Je höher
die bauliche Dichte, desto kompakter
werden Morphologien
Quelle: Eigene Darstellung



Mit steigender baulicher Dichte steigt tendenziell auch die Anzahl der Vollgeschosse analysierter Testgebäude. Auffällig dabei ist es, dass die Anzahl der Vollgeschosse sich bei der sehr weit verbreiteten Bauform des Blocks (hofförmiger Bau) bei steigender baulicher Dichte in den überwiegenden Testgebäuden nicht weiter erhöht. Die bauliche Verdichtung erfolgt bei dieser Typologie primär in der Fläche und nicht in der Höhe. Im Gegensatz dazu finden sich Zeilenbauten mit hoher baulicher Dichte und großer Anzahl an Geschossen wieder. Hierzu lassen sich insbesondere die Bauten der 1950er bis 1970er Jahre des Wohnungs- und Bürobaus zuordnen. Die überwiegende Anzahl der Wohnbauten dieser Zeit werden als mehrgeschossige Zeilenbauten errichtet. In den sogenannten „Großwohnsiedlungen“ finden sich zudem Baukörper mit bis zu 20 Geschossen. Hier finden sich in den späteren Baujahren der 1960er und Anfang 1970er Jahren auch stärker verwinkelte Körper wieder, bei welchen der Übergang zum Typus der hofförmigen Bauten „fließend“ wird. Je nachdem, ob die städtebauliche Gesamtfigur stärker verwinkelt ist oder strenger linear organisiert ist, werden die beispielhaft ausgewählten Testgebäude der Gruppe hofförmiger Bauten, bzw. den Zeilenbauten zugeschrieben.

4.2. Aufbau der typologiebezogenen Steckbriefe

Die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen werden zu typologiebezogenen Steckbriefen zusammengefasst. Ziel hierbei ist es eine kompakte Darstellung typischer baustruktureller und strahlungsspezifischer Kennwerte nach Typus zu erhalten. Daran anknüpfend werden erste Bewertungen vorgenommen, welche Hüllflächen jeweiliger Typen sich besonders zur solaren Aktivierung eignen.

Die Steckbriefe gliedern sich wie folgt:

1. Seite – typologische Beschreibung

Anhand von Fotos beispielhafter Gebäude wird die Bandbreite an Gebäuden innerhalb dieses Typus dargestellt. Neben der beschriebenen Bebilderung liefert eine Kurzbeschreibung einen kompakten Abriss zu deren charakteristischen Eigenschaften.

2. Seite – baustrukturelle Eigenschaften

Es folgen Beschreibungen und Kennwerte baustruktureller Eigenschaften. So werden die typischen Bereich der GFZ und GRZ der analysierten Testgebäude benannt. Des Weiteren werden Bandbreiten der BGF und dem Maß der Kompaktheit (A/V) sowie ein weiterer formbeschreibender Faktor dargestellt. Hierbei handelt es sich um das Verhältnis der Schmal- zu Hauptseite, anhand welcher Aussagen getroffen werden, wie stark ein Gebäude gerichtet oder unterichtet ist.

Die Beschreibung erfolgt anhand von Balkendiagrammen, deren Kennlinie den Median aller Testgebäude beschreibt. Ein dunkelgrauer Bereich beinhaltet alle Kennwerte von 1. Quartil bis 3. Quartil aufwärts. Anhand dieser Darstellung lassen sich neben den Medianwerten auch Aussagen zur Streuung treffen. Je weiter die beschriebenen Quartile auseinanderliegen, desto größer die Streuung. Eine große Streuung bedeutet, dass mit größeren Abweichungen und damit auch mit größerer Unschärfe bei den Ergebnissen zu rechnen ist.

Neben den grafischen Darstellungen werden weitere typische Konstruktions- und Gestaltungsmerkmale der Fassade textlich beschrieben.

3. bis 5. Seite – Strahlungspotenziale

Die folgenden drei Seiten sind strukturell gleich aufgebaut. Die Seite drei beschreibt Strahlungspotenziale der Dachflächen, Seite vier der Fassadenflächen und Seite fünf der gesamten Gebäudehülle. Hier finden sich jeweils zwei Darstellungen der solaren Fingerabdrücke für die Reduktionsstufen RED 0 (ohne Umgebung und ohne untergeordnete Bauteile) und RED 2 (mit Umgebung und mit untergeordneten Bauteilen). Des Weiteren werden ebenfalls anhand von Balkendiagrammen die Bereiche hoch exponierter und exponierter Bereiche inklusive jeweiliger Bandbreite beschrieben. Anhand der Breite der Quartile lassen sich Aussagen zu möglichen Abweichungen in der Höhe jeweiliger Potenziale treffen.

Anhand der solaren Fingerabdrücke können für jeden Typus und für die jeweiligen Flächen – Dach, Fassade oder gesamte Hüllfläche - einfach und schnell Hochrechnungen zu möglichen Strahlungserträgen durchgeführt werden.

6. Seite – Strategie zur Aktivierung von Dach und Fassade

Die letzte Seite des Steckbriefs beinhaltet eine kurze textliche Erläuterung zu möglichen Handlungsfeldern jeweiliger Typen. Hier werden Strategien zur solaren Aktivierung von Dach- und Fassadenflächen beschrieben und Abschätzungen zur Relevanz jeweiliger Dach- und Fassadenpotenziale getroffen.

Beispielhafte Abbildungen

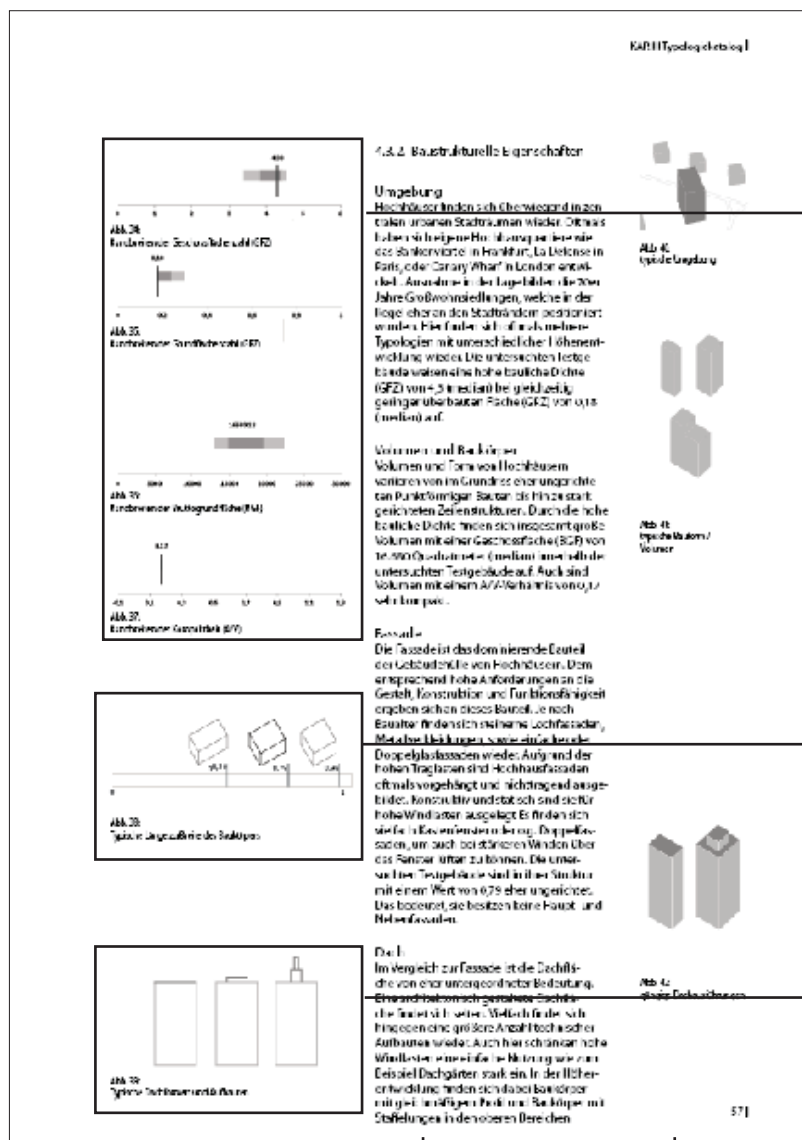
Allgemeine textliche Beschreibung
der Typologie

4.3. Skizzenriss - Hochhaus



4.3.1. Typologische Beschreibung

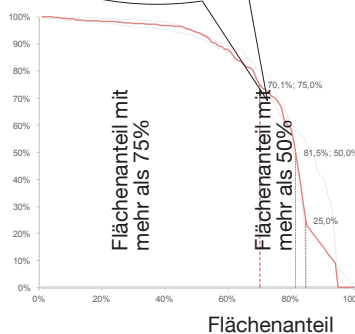
Hochhausarten finden sich in allen Bauteildimensionen und in stark unterschiedlicher Ausprägung innerhalb des deutschen Gebäudesystems wieder. Eine rechtliche Regelung ist in der Hochhausrichtlinie (HHR) beschrieben. Hierbei gilt ein Gebäude als Hochhaus, wenn dessen oberster Geschossboden höher als 22 Meter über der natürlichen Geländeoberfläche liegt. Bei Bürogebäuden mit einer Geschosshöhe von 3,675 Metern liegt bereits das fünfte Obergeschoss knapp oberhalb von 22 Metern. Typologisch können somit ganz unterschiedliche Gebäudeformen unter die Definition „Hochhaus“ fallen. Sowohl ein Zellenbau, Blockgebäude oder ein punktförmiger Bau sind Hochhäuser sobald sie die oben beschriebene rechtliche Höhenbeschränkung überschreiten. In der Art der Nutzung dominieren Wohn- oder Bürogebäude.



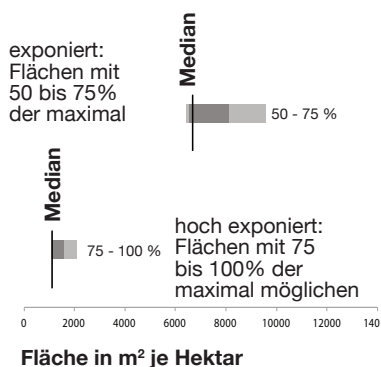
Seite 3-5 Strahlungspotenziale der Dach- bzw. Fassadenflächen und der Gebäudehülle gesamt

Diagrammatische Darstellung
des solaren Fingerabdrucks
der betrachteten
Flächen für verschiedene
Strahlungspotenziale (RED 0,
RED 2)

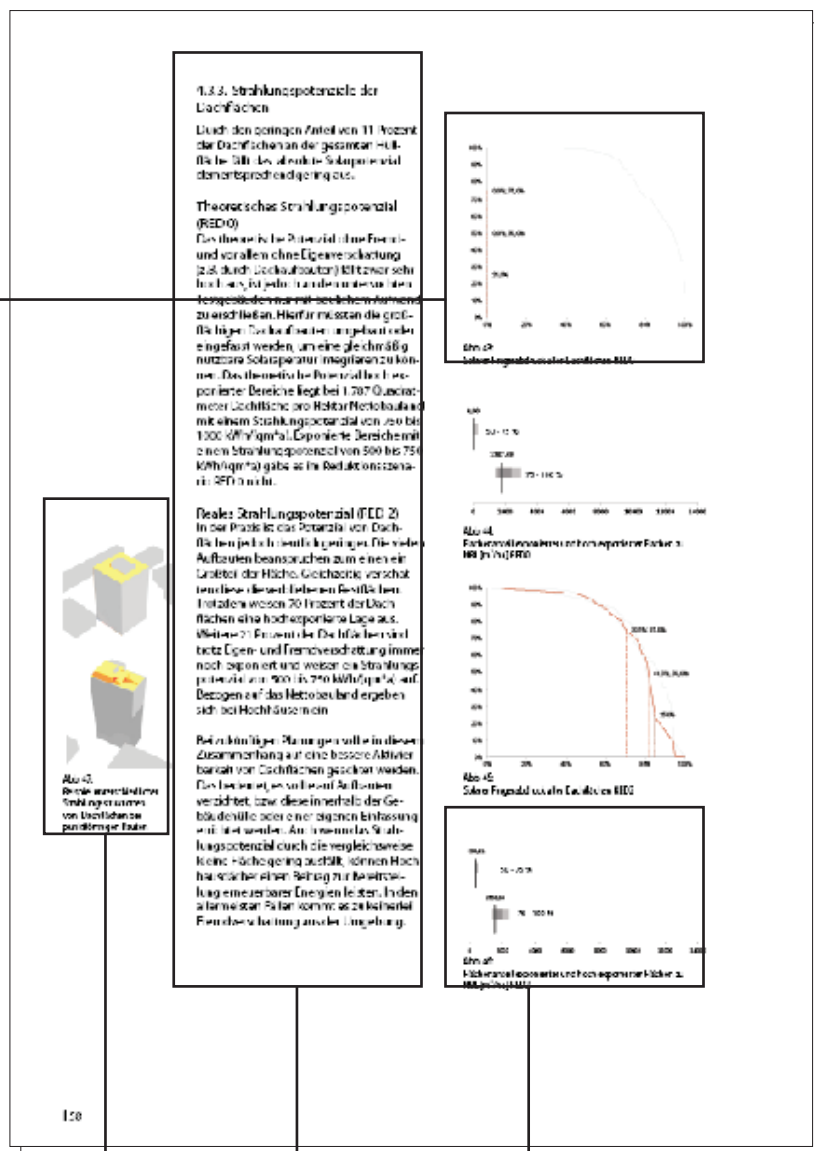
70,1% der betrachteten
Flächen weisen einen
Strahlungsertrag von
mehr als 75% gemessen



Beispielhafte Darstellung des solaren Fingerabdrucks



Beispielhafte Darstellung des Verhältnisses von exponierten und hoch exponierten Flächen zu NBL



Falschfarben-
bilder der solaren
Strahlung an
beispielhaften
Gebäuden

Textliche Erläuterung
des theoretischen
(RED 0) und des
realen (RED 2)
Strahlungspotenzials

Diagrammatische Darstellung
des Verhältnisses von
exponierten und hoch
exponierten Flächen zu NBL



Seite 6 Strategie zur Aktivierung von Dach und Fassaden bei Hochhäusern

4.3. Hochhaus



Abb. 35:
Sozialer Wohnungsbau der 1960er
Jahre
Quelle: Steffen Wurzbacher



Abb. 37:
Wohnungsbau der 1970er Jahre
Quelle: Steffen Wurzbacher



Abb. 36:
Büro-Hochhäuser verschiedener
Baualter
Foto: Christoph Drebes



Abb. 38:
Bürobau verschiedene Baualter
Foto: Christoph Drebes



Abb. 39:
Hochhaus mit Wohnnutzung
Foto: Christoph Drebes



Abb. 40:
Sozialer Wohnungsbau
Foto: Christoph Drebes

4.3.1. Typologische Beschreibung

Hochhausbauten finden sich in allen Baualterklassen und in stark unterschiedlicher Ausprägung innerhalb des deutschen Gebäudebestandes wieder. Eine rechtliche Regelung ist in der Hochhausrichtlinie (HHR) beschrieben. Hierbei gilt ein Gebäude als Hochhaus, wenn dessen oberster Geschossboden höher als 22 Meter über der natürlichen Geländeoberfläche liegt. Bei Bürogebäuden mit einer Geschosshöhe von 3,675 Metern liegt bereits das fünfte Obergeschoss knapp oberhalb von 22 Metern. Typologisch können somit ganz unterschiedliche Gebäudeformen unter die Definition „Hochhaus“ fallen. Sowohl ein Zeilenbau, Blockgebäude oder ein punktförmiger Bau sind Hochhäuser sobald sie die oben beschriebene rechtliche Höhenbeschränkung überschreiten. In der Art der Nutzung dominieren Wohn- oder Bürogebäude.

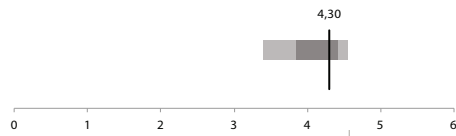


Abb. 44:
Bandbreiten der Geschossflächenzahl (GFZ)
Quelle: Eigene Darstellung

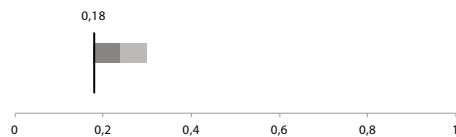


Abb. 45:
Bandbreiten der Grundflächenzahl (GRZ)
Quelle: Eigene Darstellung

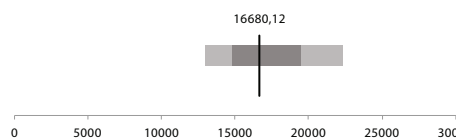


Abb. 46:
Bandbreiten der Bruttogrundfläche (BGF)
Quelle: Eigene Darstellung

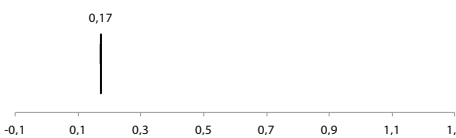


Abb. 47:
Bandbreiten der Kompaktheit (A/V)
Quelle: Eigene Darstellung

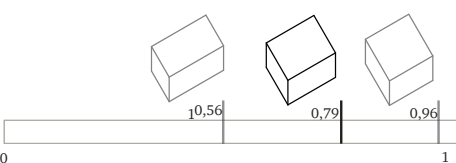


Abb. 48:
Typische Länge zu Breite des Baukörpers
Quelle: Eigene Darstellung

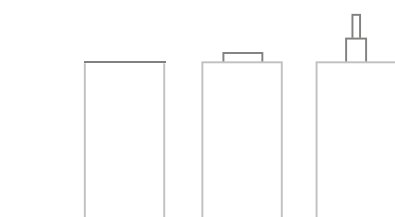


Abb. 49:
Typische Dachformen und Aufbauten
Quelle: Eigene Darstellung

4.3.2. Baustrukturelle Eigenschaften

Umgebung

Hochhäuser finden sich überwiegend in zentralen urbanen Stadträumen wieder. Oftmals haben sich eigene Hochhausquartiere wie das Bankenviertel in Frankfurt, La Defense in Paris, oder Canary Wharf in London entwickelt. Ausnahme in der Lage bilden die 70er Jahre Großwohnsiedlungen, welche in der Regel eher an den Stadträndern positioniert wurden. Hier finden sich oftmals mehrere Typologien mit unterschiedlicher Höhenentwicklung wieder. Die untersuchten Testgebäude weisen eine hohe bauliche Dichte (GFZ) von 4,3 (median) bei gleichzeitig geringer überbauten Fläche (GRZ) von 0,18 (median) auf.

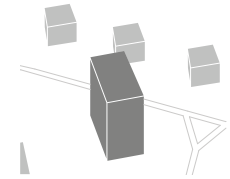


Abb. 41:
Typische Umgebung
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 42:
Typische Bauform / Volumen
Quelle: Eigene Darstellung

Volumen und Baukörper

Volumen und Form von Hochhäusern variieren von im Grundriss eher ungerichteten punktförmigen Bauten bis hin zu stark gerichteten Zeilenstrukturen. Durch die hohe bauliche Dichte finden sich insgesamt große Volumen mit einer Geschossfläche (BGF) von 16.680 Quadratmeter (median) innerhalb der untersuchten Testgebäude auf. Auch sind Volumen mit einem A/V-Verhältnis von 0,17 sehr kompakt.

Fassade

Die Fassade ist das dominierende Bauteil der Gebäudehülle von Hochhäusern. Dem entsprechend hohe Anforderungen an die Gestalt, Konstruktion und Funktionsfähigkeit ergeben sich an dieses Bauteil. Je nach Baualter finden sich steinerne Lochfassaden, Metallverkleidungen, sowie einfache oder Doppelglasfassaden wieder. Aufgrund der hohen Traglasten sind Hochhausfassaden oftmals vorgehängt und nichttragend ausgebildet. Konstruktiv und statisch sind sie für hohe Windlasten ausgelegt. Es finden sich vielfach Kastenfenster oder o.g. Doppelfassaden, um auch bei stärkeren Winden über das Fenster lüften zu können. Die untersuchten Testgebäude sind in ihrer Struktur mit einem Wert von 0,79 eher ungerichtet. Das bedeutet, sie besitzen keine Haupt- und Nebenfassaden.

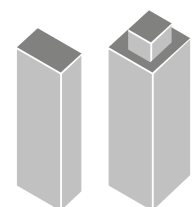


Abb. 43:
Gängige Dachausführungen
Quelle: Eigene Darstellung

Dach

Im Vergleich zur Fassade ist die Dachfläche von eher untergeordneter Bedeutung. Eine architektonisch gestaltete Dachfläche findet sich selten. Vielfach findet sich hingegen eine größere Anzahl technischer Aufbauten wieder. Auch hier schränken hohe Windlasten eine einfache Nutzung wie zum Beispiel Dachgärten stark ein. In der Höherentwicklung finden sich dabei Baukörper mit gleichmäßigem Profil und Baukörper mit Staffelungen in den oberen Bereichen.

4.3.3. Strahlungspotenziale der Dachflächen

Durch den geringen Anteil von 11 Prozent der Dachflächen an der gesamten Hüllfläche fällt das absolute Solarpotenzial dementsprechend gering aus.

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Das theoretische Potenzial ohne Fremd- und vor allem ohne Eigenverschattung (z.B. durch Dachaufbauten) fällt zwar sehr hoch aus, ist jedoch an den untersuchten Testgebäuden nur mit baulichem Aufwand zu erschließen. Hierfür müssten die großflächigen Dachaufbauten umgebaut oder eingefasst werden, um eine gleichmäßig nutzbare Solarapertur integrieren zu können. Das theoretische Potenzial hoch exponierter Bereiche liegt bei 1.787 Quadratmeter Dachfläche pro Hektar Nettobauland mit einem Strahlungspotenzial von 750 bis 1000 kWh/(qm*a). Exponierte Bereiche mit einem Strahlungspotenzial von 500 bis 750 kWh/(qm*a) gäbe es im Reduktionsszenario RED 0 nicht.

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

In der Praxis ist das Potenzial von Dachflächen jedoch deutlich geringer. Die vielen Aufbauten beanspruchen zum einen ein Großteil der Fläche. Gleichzeitig verschatten diese die verbliebenen Restflächen. Trotzdem weisen 70 Prozent der Dachflächen eine hochexponierte Lage aus. Weitere 21 Prozent der Dachflächen sind trotz Eigen- und Fremdverschattung immer noch exponiert und weisen ein Strahlungspotenzial von 500 bis 750 kWh/(qm*a) auf.

Bei zukünftigen Planungen sollte in diesem Zusammenhang auf eine bessere Aktivierbarkeit von Dachflächen geachtet werden. Das bedeutet, es sollte auf Aufbauten verzichtet, bzw. diese innerhalb der Gebäudehülle oder einer eigenen Einfassung errichtet werden. Auch wenn das Strahlungspotenzial durch die vergleichsweise kleine Fläche gering ausfällt, können Hochhausdächer einen Beitrag zur Bereitstellung erneuerbarer Energien leisten. In den allermeisten Fällen kommt es zu keinerlei Fremdverschattung aus der Umgebung.

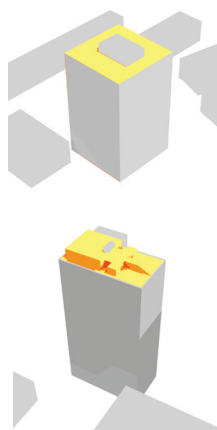


Abb. 50:
Beispiel
unterschiedlicher
Strahlungssituationen
von Dachflächen
bei punktförmigen
Bauten
Quelle: Eigene
Darstellung

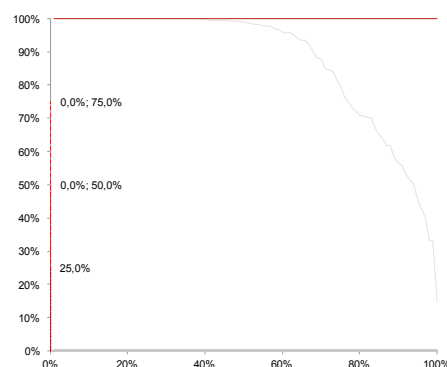


Abb. 51:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

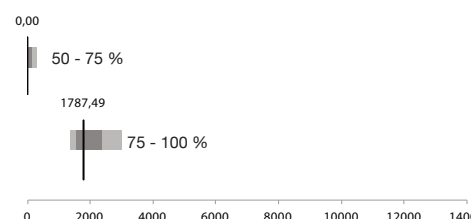


Abb. 52:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter
Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

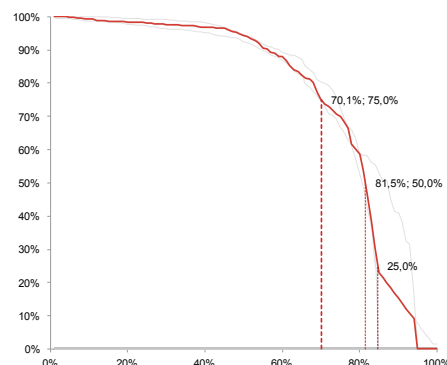


Abb. 53:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

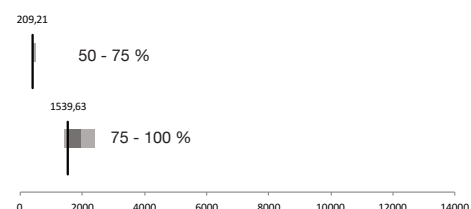


Abb. 54:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter
Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

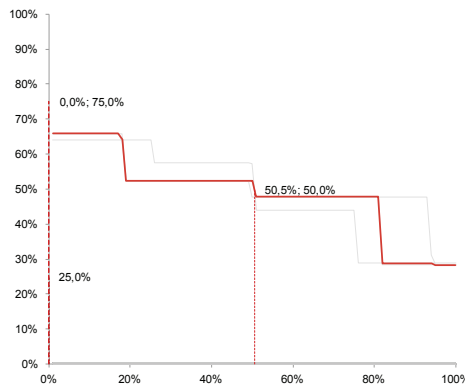


Abb. 55:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

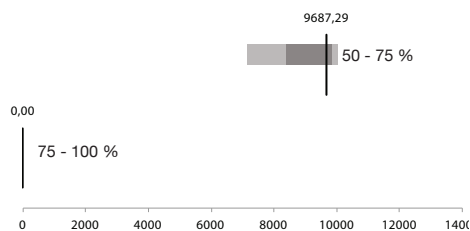


Abb. 56:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter
Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

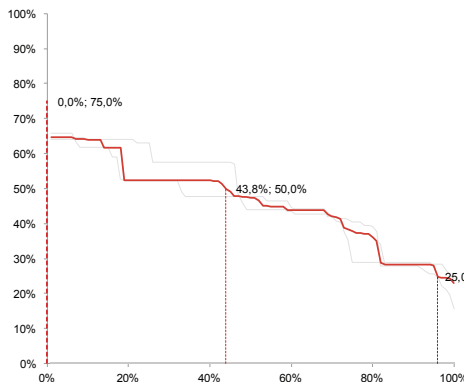


Abb. 57:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

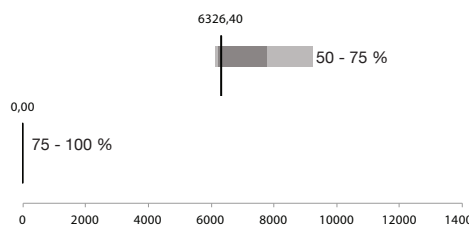


Abb. 58:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter
Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

4.3.4. Strahlungspotenziale der Fassadenflächen

Die Fassadenflächen machen mit 89% den mit Abstand größten Anteil an der gesamten Hüllfläche aus. Somit fällt der Hochhausfassade eine Schlüsselrolle hinsichtlich einer energetischen Aktivierung zu. Gleichzeitig ist die Fassade im Gegensatz zum Dach in der Regel von allen Seiten und aufgrund der Höhe auch noch von Weitem sichtbar. Solaraktive Systeme müssen daher gerade im Fassadenbereich architektonisch integriert werden und sollten nicht als „applizierte“ Anwendungen interpretiert werden.

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Die Darstellungen des „solaren Fingerabdrucks“ zum theoretischen Potenzial (RED 0) der Hochhausfassaden zeigen eine eindeutige Abtreppung der Strahlungserträge nach Orientierung. Südfassaden bieten das größte, die Nordfassade das geringste Strahlungspotenzial. Dazwischen sortiert sich die Ost- und Westfassade ein.

Rund 50% der Fassadenfläche hat ein theoretisches exponiertes Strahlungspotenzial von 500 bis 750 kWh/(qm*a). Bezogen auf das Nettobauland bedeutet dies, dass 9.687 Quadratmeter Fassadenfläche pro Hektar Nettobauland in diesem Strahlungsbereich liegen. Hoch exponierte Bereiche finden sich an vertikalen Fassaden naturgemäß nicht.

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Durch umliegende Gebäude und durch vereinzelte untergeordnete Bauteile wird das Strahlungspotenzial in der Realität in einem gewissen Maße abgemindert. Im Gegensatz zu anderen Typologien ist der Unterschied zwischen den Reduktionsstufen RED 0 und RED 2 jedoch eher gering.

43% der Fassadenflächen haben ein exponiertes Strahlungspotenzial von 500 bis 750 kWh/(qm*a). Das bedeutet, dass sich 6.326 Quadratmeter Fassadenfläche pro Hektar Nettobauland diesem Strahlungsbereich zuordnen lassen.

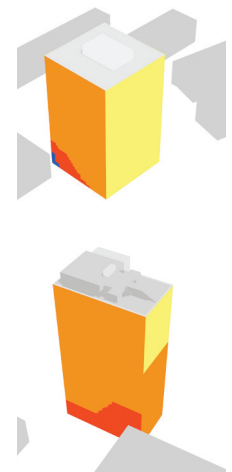


Abb. 59:
Beispiel
unterschiedlicher
Strahlungssituationen
von Fassadenflächen
bei punktförmigen
Bauten
Quelle: Eigene
Darstellung

4.3.5. Strahlungspotenziale der Gebäudehülle

Das Strahlungspotenzial an der Gebäudehülle typischer Hochhäuser fällt an den untersuchten Testgebäuden vergleichsweise ähnlich aus. Ein kleiner Anteil hoch exponierter Flächen von unter zehn Prozent findet sich vor allem in Dachbereich wieder.

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Betrachtet man die Simulationen reduzierenden Einflussfaktoren wie Umgebung sowie untergeordneten Bauteilen (RED 0), so ergeben sich fast gleichmäßig abgetreppte „solare Fingerabdrücke“. Das bedeutet, dass die einzelnen Teilflächen wie Dach sowie Nord-, Ost-, Süd- und Westfassaden jeweils gleichmäßig bestrahlt werden. Größere Eigenverschattungen wie sie bei anderen komplexen Geometrien zu beobachten sind, lassen sich hingegen nicht beobachten. Mit 9 Prozent hochexponierter und 55 Prozent exponierter Flächen weist dieser Gebäudetypus ein insgesamt hohes gleichmäßiges Strahlungspotenzial auf. Als theoretisches Potenzial (RED 0: ohne Fremdverschattung) stehen am Referenzklimastandort Potsdam bei diesem Gebäudetyp 10.123 Quadratmeter Hüllfläche pro Hektar Nettobauland mit einem Strahlungspotenzial von 500 bis 750 kWh/(qm*a) sowie 1.767 Quadratmeter Hüllfläche pro Hektar Nettobauland mit einem Strahlungspotenzial von 750 bis 1000 kWh/(qm*a) zur Verfügung.

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Dieses in der Theorie sehr hohe Strahlungspotenzial wird in der realen Anwendung durch Fremd- und Eigenverschattung (RED 2) weiter abgemindert. Bei Hochhäuser fällt die Abminderung jedoch vergleichsweise geringer aus, als bei anderen Gebäudetypen. Dies wird im Vergleich der beiden Strahlungssimulationen RED 0 und RED 2 deutlich. Im nebenstehenden Diagramm zum „solaren Fingerabdruck“ zeigt sich, dass mit 7 Prozent hochexponierter und 47 Prozent exponierter Flächen auch unter den Potenzial mindernden Faktoren der Eigen- und Fremdverschattung immer noch ein hohes Maß gleichmäßig bestrahlter Flächen vorzufinden ist. Insgesamt reduziert sich das reale Potenzial (RED 2: mit Fremdverschattung) am Referenzklimastandort Potsdam bei diesem Gebäudetyp auf 6.667 Quadratmeter Hüllfläche pro Hektar Nettobauland mit einem Strahlungspotenzial von 500 bis 750 kWh/(qm*a) sowie 1.124 Quadratmeter Hüllfläche pro Hektar Nettobauland mit einem Strahlungspotenzial von 750 bis 1000 kWh/(qm*a).



Abb. 60:
Beispiele von Strahlungssituationen auf Baukörpern
Quelle: Eigene Darstellung

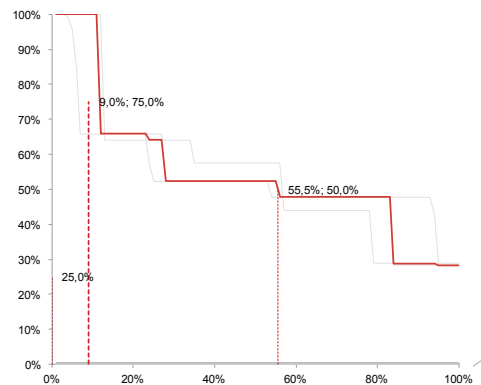


Abb. 61:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

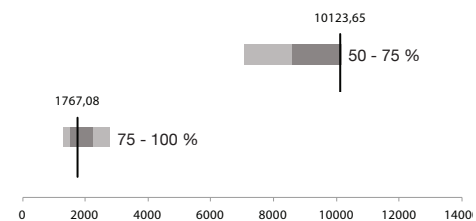


Abb. 62:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

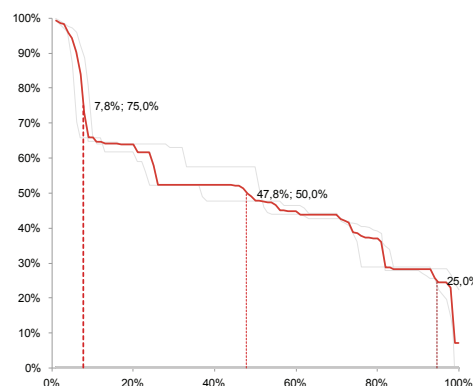


Abb. 63:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

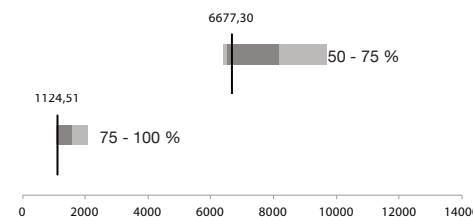


Abb. 64:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

4.3.6.Strategie zur Aktivierung von Dach und Fassaden bei Hochhäusern

Hochhäuser eignen sich durch die spezifische Form und Lage in der Stadt sehr gut zur systematischen Nutzung von Solar-energie für die Wärme- oder Strombereitstellung. Je nach Nutzung kann hierbei der Schwerpunkt stärker auf eine der beiden Energieformen gelegt werden. Eine solare Stromerzeugung eignet sich besonders im Büro- und Gewerbebereich. Wohnbauten können zudem mit einer solaren Strom- und Wärme-gewinnung ausgestattet werden, um gleichzeitig den Wärmebedarf zu reduzieren. Üblicherweise finden sich Hochhäuser in innerstädtischer Lage mit entsprechend hohen Energiebedarfen wieder. Dementsprechend kann Solar produzierter Strom an die unmittelbare Nachbarschaft abgegeben werden, sofern dieser nicht selber genutzt wird.

Solaradaptiver neuer Gebäudeabschluss

Hochhausdächer sind vielfach Aufstellungsort unterschiedlichster technischer Anlagen. Hierbei werden Möglichkeiten der freiräumlichen (z.B. Dachgarten, Terrasse, etc.) oder solarenergetischen Nutzung von Dachflächen wortwörtlich verbaut. Auch stellen Dachflächen im Vergleich zu den Fassadenflächen nur einen geringen Anteil an der gesamten Gebäudehülle dar. Somit ist der zu erwartende Betrag insgesamt eher gering zu bewerten. Trotzdem gilt es gerade strahlungsexponierte Bereiche des Gebäudes zu solar zu aktivieren und Flächenpotenziale nicht ungenutzt zu belassen.

Bei Neubauten sollte auf offene Aufbauten verzichtet und die Dachfläche als Aufstellort solaraktiver Systeme freigehalten werden. Dies kann auch in Kombination mit einer freiräumlichen Nutzung wie Dachbegrünung, Terrasse oder dergleichen gesehen.

Ein weiterer Lösungsansatz wird in der Einhausung von Dachaufbauten sowohl im Bestand, als auch im Neubau gesehen. Dieser neue Gebäudeabschluss kann gestalterisch-skulptural inszeniert werden und dem Gebäude einen eigenen individuellen oberen Abschluss verleihen. Solch ein Leichtbau kann wiederum Träger für solaraktive Systeme sein, welche ebenfalls entsprechend gestalterisch integriert werden sollten.

Integrierte Fassadensysteme

Insbesondere die exponierten Fassadenflächen bieten Raum zur Integration von Solarsystemen. Wie die vorherigen Untersuchungen zur Strahlungsreduktion auf Fassaden gezeigt haben, wirkt sich die Umgebung nur geringfügig auf eine Minderung des theoretischen Strahlungspotenzial der Fassadenflächen von Hochhäusern aus. Wenn eine Fremdverschattung auftritt, so findet sich diese primär in den unteren Geschossen. Die höher liegenden Geschosse der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Testgebäude sind jedoch weitgehend unverschattet. Dort kann die volle Höhe des nach Orientierung variierenden Strahlungspotenzials energetisch genutzt werden.

Hochhäuser sind aufgrund ihrer Höhe in der Regel weithin sichtbar. Gebäudeform, -höhe sowie verwendete Fassadenmaterialien dieser Typologie werden besonders oft als repräsentative Ausdrucksform der jeweiligen Bauherren oder Nutzer aufgegriffen. Durch die Sichtbarkeit der Fassade ist ein besonderes Maß architektonischer Gestaltung notwendig. Gleichzeitig stellen hohe angreifende Windlasten, Belange des Brandschutzes, Statik und Konstruktion besondere Anforderungen an die Ausführung der Fassade. Somit gilt es im Rahmen einer solaren Aktivierung von Hochhausfassaden architektonisch gestalterische Lösungen zu entwickeln, welche nicht additiv, sondern integriert in die Fassade eingebunden werden.

Die im folgenden Kapitel entwickelte solaradaptive „Polyboxfassade“ findet mit Hochhäusern sowohl bei einer Wohn-, als auch einer Büro-, oder Gewerbenutzung ein breites Anwendungsfeld. Den hohen Windlasten und der damit einhergehenden Problematik einer natürlichen Lüftung durch offenbare Fenster kann mit einer entsprechend konfigurierten Polybox einer Doppelfestverglasung in Kombination mit einem Fenster mit Prallscheibe wirksam entgegengetreten werden.

4.4. Punktförmiger Bau



Abb. 65:
Freistehendes Einfamilienhaus
Foto: Christoph Drebes



Abb. 67:
modernes Mehrfamilienhaus
Foto: Steffen Wurzbacher



Abb. 69:
einzelnstehendes Bürogebäude
Foto: Christoph Drebes



Abb. 66:
frühes Einfamilienhaus mit Satteldach
Foto: Steffen Wurzbacher



Abb. 68:
dörfliches Mehrfamilienhaus mit
Mansarddach
Foto: Steffen Wurzbacher



Abb. 70:
Bürogebäude mit antiken
Fassadenelementen
Foto: Steffen Wurzbacher

4.4.1. Typologische Beschreibung

Als punktförmige Bauten werden alle freistehenden kleineren und größeren Gebäude zusammengefasst. Hierunter fallen Einfamilienhäuser, kleinere Mehrfamilienhäuser bis hin zu großen Stadtvillen. Merkmale dieser Typen sind freistehende und eher ungerichtete Gebäudekörper. Die Abgrenzung zu zeilenartigen Bauten erfolgt in diesem Projekt über das Verhältnis Nebenfassade zu Hauptfassade. Bei einem Verhältnis kleiner 1/3 gelten Baukörper als gerichtet und damit als zeilenartige Bauten.

Punktförmige Gebäude finden sich in allen Baualtersklassen. Auch stellt dieser Typus den höchsten Anteil an Gebäuden des deutschen Gebäudebestandes dar. Insbesondere die freistehenden Einfamilienhäuser mit einer Anzahl von 10,4 Millionen und einer Nettogeschossfläche von 1,65 Milliarden Quadratmetern dominieren den Bestand. Somit stellt dieser Typus ein großes Handlungsfeld im Bereich gebäudebezogener Energienutzung dar. In den 1950er bis 1970er Jahren werden zudem vielfach kleinere und größere Mehrfamilienhäuser in einer punktförmigen Volumetrie errichtet. Ab den 2000er Jahren werden zudem in innerstädtischer Lage höher verdichtete punktförmige Strukturen errichtet.

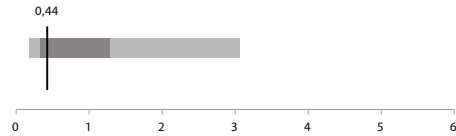


Abb. 71:
Bandbreiten der Geschossflächenzahl (GFZ)
Quelle: Eigene Darstellung

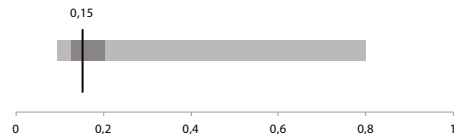


Abb. 72:
Bandbreiten der Grundflächenzahl (GRZ)
Quelle: Eigene Darstellung

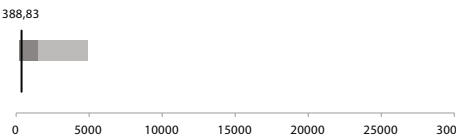


Abb. 73:
Bandbreiten der Bruttogrundfläche (BGF)
Quelle: Eigene Darstellung

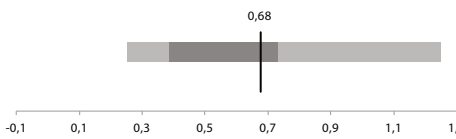


Abb. 74:
Bandbreiten der Kompaktheit (A/V)
Quelle: Eigene Darstellung

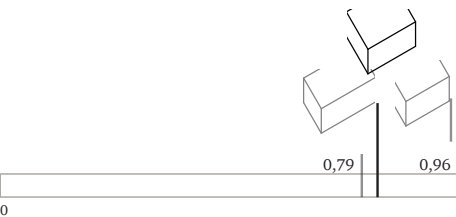


Abb. 75:
Typische Länge zu Breite des Baukörpers
Quelle: Eigene Darstellung

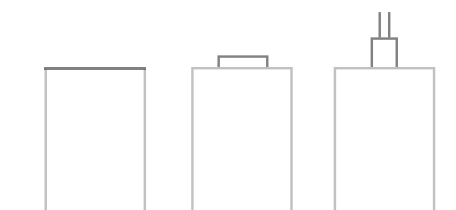


Abb. 76:
Typische Dachformen und Aufbauten
Quelle: Eigene Darstellung

4.4.2. Baustrukturelle Eigenschaften

Umgebung

Die typische Umgebung punktförmiger Bauten bilden in der Regel andere freistehende punktförmige Bauten. Je nach Situation stehen diese entweder linear oder versetzt zueinander. Kleinere freistehende Einfamilien- und Doppelhäuser werden entweder trauf- oder giebelseitig entlang von Wohnstraßen positioniert. Größere Stadtviellen werden zur Einhaltung gesetzlicher Abstandsregelungen hingegen oftmals „schachbrettartig“ versetzt zueinander angeordnet. Die Bandbreite baulicher Dichte beinhaltet geringe bis sehr hohe Dichten mit einer GFZ von bis zu 3. Der Medianwert der GFZ liegt bei den untersuchten Testgebäuden jedoch bei einer Dichte von 0,44 GFZ.

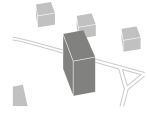


Abb. 77:
Typische Umgebung
Quelle: Eigene Darstellung

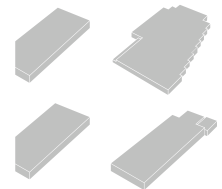


Abb. 78:
Typische Bauform / Volumen
Quelle: Eigene Darstellung

Volumen und Baukörper

Durch die freistehende Anordnung sind punktförmige Bauten in der Regel weniger kompakt als Gebäude in gekoppelter Bauweise. In den vorliegenden Untersuchungen wurde ein A/V Verhältnis von 0,68 ermittelt.

Fassade

Punktförmige Bauten sind eher ungerichtet. Das bedeutet, sie bilden vier gleichwertige Fassaden in alle Himmelsrichtungen aus. Der Medianwert des Verhältnisses Neben- zu Hauptfassade liegt bei den untersuchten Testgebäuden bei 0,82.

Dach

Der obere Gebäudeabschluss von punktförmigen Bauten variiert sehr stark je nach Subtyp, Baualter und Region. Bei älteren Häusern finden sich oftmals tradiert regionale Dachformen wie Satteldächer, Walmdächer, etc. und ebenfalls regional variierende zugehörige Aufbauten wie Schornsteine oder Dachgauben. Im Bereich der kleineren freistehenden Einfamilienhäuser zergliedern Gauben, Dachfenster, Anbauten, Antennen oder Schornsteine zusammenhängende Dachflächen. Trotzdem bilden die für Deutschland ermittelten 1,43 Milliarden Quadratmeter Dachfläche von Einfamilienhäusern ein beachtliches Flächenpotenzial.

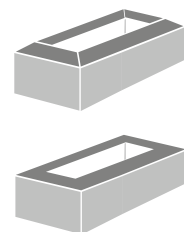


Abb. 79:
Gängige Dachausführungen
Quelle: Eigene Darstellung

4.4.3. Strahlungspotenziale der Dachflächen

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Dachflächen punktförmiger Bauten weisen ein hohes bis sehr hohes theoretisches Strahlungspotenzial auf. Fremdverschattung kann im Dachbereich bei dieser Bauform weitgehend ausgeschlossen werden. Lediglich bei kleineren freistehenden Einfamilienhäusern wurden vereinzelte Teilverschattungen durch Vegetation beobachtet.

Strahlungsreduzierend wirken sich bei diesem Typus stärker geneigte Dächer mit unterschiedlicher Orientierung aus. So finden sich gerade in den älteren Baualtersklassen steil geneigte Dachformen wieder. Insgesamt weisen ca. 80% aller Dachflächen einen Strahlungsertrag von größer als 750 kWh/(qm*a) auf. Das sind 1462 Quadratmeter pro Hektar Nettobauland. Im mäßig exponierten Bereich zwischen 500 und 750 kWh/(qm*a) finden sich hingegen nur ca. 17% der Dachflächen. Das entspricht 260 Quadratmetern pro Hektar Nettobauland.

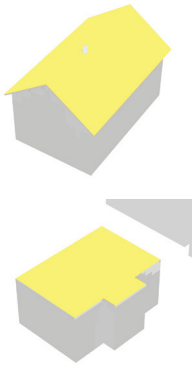


Abb. 80:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Dachflächen bei punktförmigen Bauten
Quelle: Eigene Darstellung

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Untergeordnete Bauteile wie Dachgauben, Dachfenster oder Schornsteine wirken sich bei den analysierten Testgebäuden moderat auf eine Minderung des Strahlungsertrags von Dachflächen aus. Insgesamt weisen ca. 67% aller Dachflächen einen spezifischen Strahlungsertrag von größer als 750 kWh/(qm*a) auf. Bezogen auf das Nettobauland sind dies 1262 Quadratmeter pro Hektar Nettobauland. Im Bereich mittlerer Exposition zwischen 500 und 750 kWh/(qm*a) finden sich in etwa 18% der Dachflächen. Das sind ca. 291 Quadratmetern pro Hektar Nettobauland.

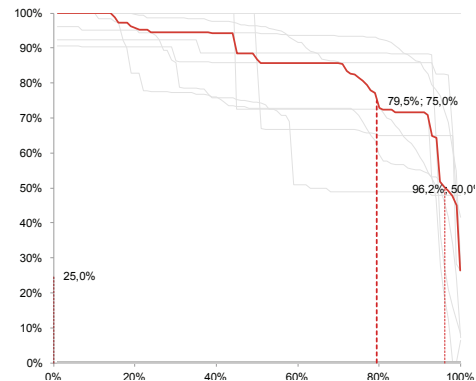


Abb. 81:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

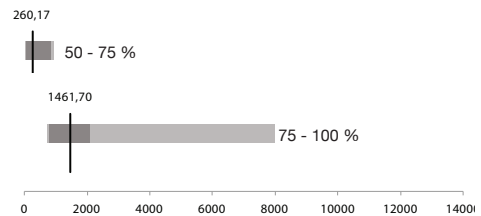


Abb. 82:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

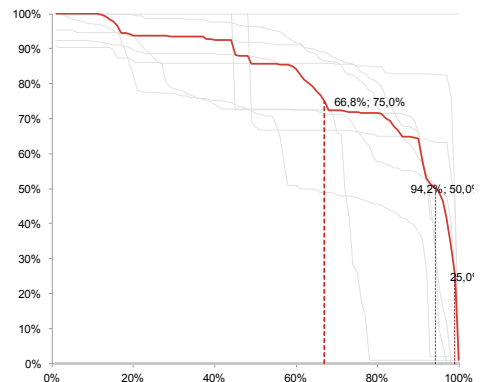


Abb. 83:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

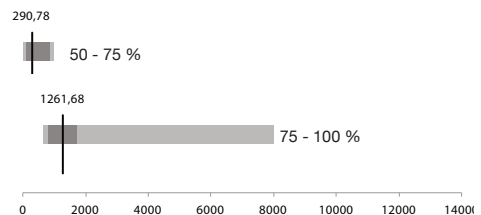


Abb. 84:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

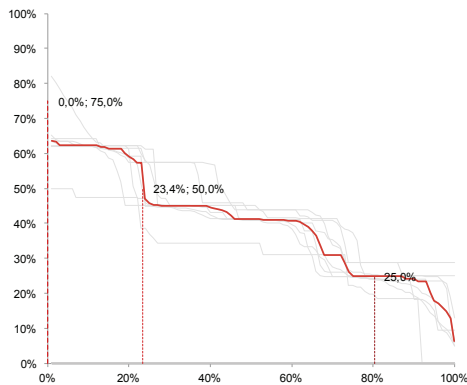


Abb. 85:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

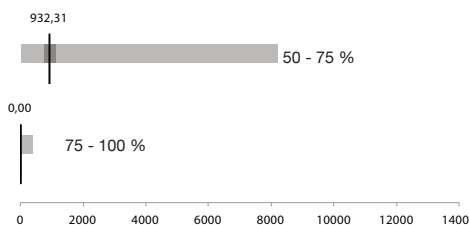


Abb. 86:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

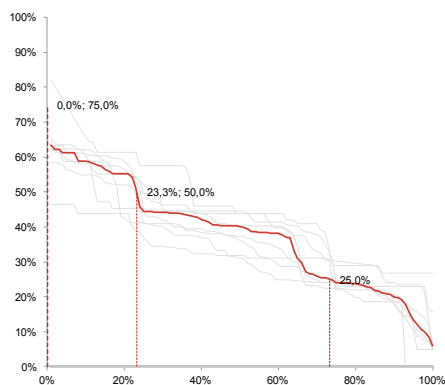


Abb. 87:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

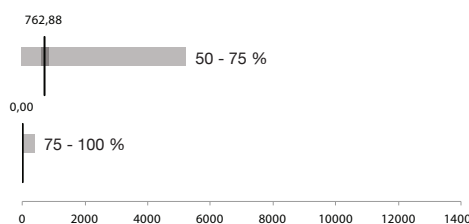


Abb. 88:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2

4.4.4. Strahlungspotenziale der Fassadenflächen

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Die Fassadenflächen punktförmiger Gebäude zeigen einen unstetigeren Strahlungsverlauf, als die zuvor beschriebene Hochhaustypologie. Dies ist auf die stärker gegliederten Baukörper untersuchter Testgebäude zurück zu führen. Diese führen zu einer erhöhten Eigenverschattung und zu einer Reduktion des Strahlungsertrages. Insgesamt weisen 23% der Fassadenflächen einen Strahlungsanteil zwischen 500 und 750 kWh/(qm*a) auf. Dies entspricht 932 Quadratmeter Fassadenflächen pro Hektar Nettobauland. 20% der Fassadenflächen sind hingegen so stark eigenverschattet, dass lediglich ein Strahlungsertrag von unter 250 kWh/(qm*a) auftreten.

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Einflüsse durch untergeordnete Bauteile wie Balkone, Vordächer oder andere Anbauten wirken sich aufgrund der ohnehin höheren Eigenverschattung nur noch geringfügig auf die Reduktion des Strahlungsertrags aus. Die Strahlungsprofile von RED 0 und RED 2 sind somit fast identisch. Insgesamt finden sich 763 Quadratmeter Fassadenflächen pro Hektar Nettobauland mit einem realen Strahlungspotenzial von 500 bis 750 kWh/(qm*a).

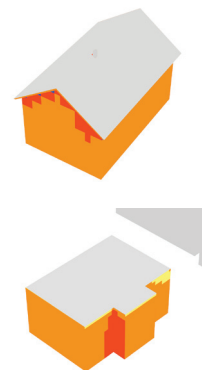


Abb. 89:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Fassadenflächen bei punktförmigen Bauten
Quelle: Eigene Darstellung

Strahlungspotenziale der Gebäudehülle

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED0)

Zusammenfassend weisen die Hüllflächen punktförmiger Gebäude ein eher heterogenes Strahlungspotenzial auf. Die untersuchten Testgebäude variieren in der Ausformulierung von Dachform, Baukörpergliederung und Orientierung der Hauptfasaden stark und führen zu einer deutlichen Spreizung der solaren Fingerabdrücke.

Insgesamt 18% aller Hüllflächen weisen dabei einen Strahlungsertrag von über 750 kWh/(qm*a) auf. Aus den vorangegangenen Untersuchungen zu Dach- und Fassade kann davon ausgegangen werden, dass dieser hoch exponierte Bereich ausschließlich auf Dachflächen zu finden ist. Bezogen auf das Nettobauland sind dies 1386 Quadratmeter pro Hektar hoch exponierte und 1381 Quadratmeter exponierte Hüllflächen. Die exponierten Flächen mit einem Strahlungsertrag zwischen 500 und 750 kWh/(qm*a) finden sich primär in den Fassaden.

Reales Strahlungspotenzial (RED2)

Das reale Potenzial unterscheidet sich nur geringfügig vom theoretischen Potenzial. Somit wirken sich Umgebung und untergeordnete Bauteile nicht signifikant auf das Strahlungspotenzial aus. Insgesamt reduziert sich der Anteil hoch exponierter Bereiche in geringfügigem Maße. Insgesamt sind 1212 Quadratmeter pro Hektar Nettobauland mit einem Strahlungsertrag von über 750 kWh/(qm*a) hoch exponiert und 1417 Quadratmeter pro Hektar mit einem Strahlungsertrag von 500 bis 750 kWh/(qm*a) exponiert.

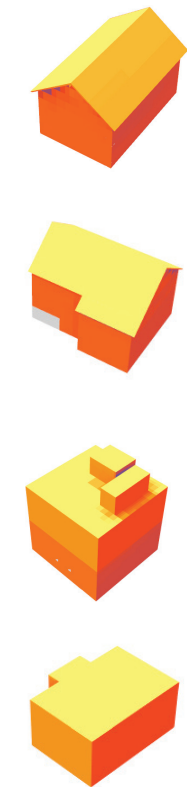


Abb. 90:
Beispiele von Strahlungssituationen auf Baukörpern
Quelle: Eigene Darstellung

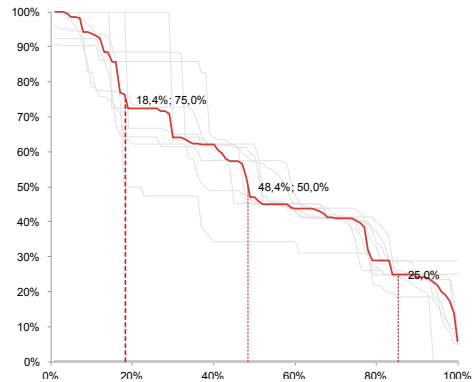


Abb. 91:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

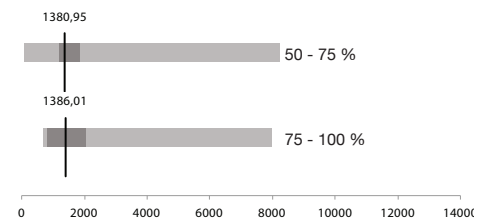


Abb. 92:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

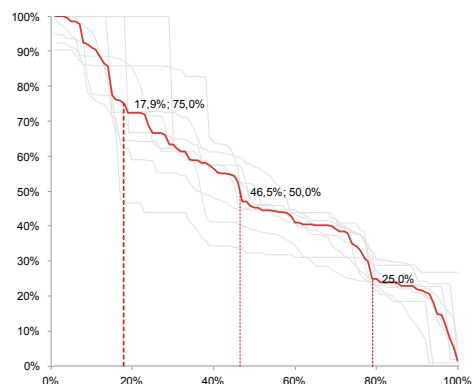


Abb. 93:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

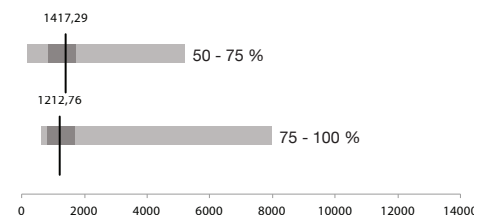


Abb. 94:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

4.4.5.Strategie zur Aktivierung von Dach und Fassaden bei punktförmigen Gebäuden

Der Typus punktförmiger Bauten variiert stark von kleinen freistehenden Einfamilienhäusern bis zu großen Stadtvillen oder Bürogebäuden. Somit unterscheiden sich Maßnahmen zur Aktivierung der Gebäudehülle je nach Subtypus deutlich voneinander. Die Untersuchungen an ausgewählten punktförmigen Testgebäuden aller Subtypen hat gezeigt, dass die zur Verfügung stehenden Dach- und Fassadenflächen geringer ausfallen, als bei anderen Bauformen. Demgegenüber steht ein hoher und nur geringfügig reduzierter Strahlungsertrag, insbesondere auf Dachflächen punktförmiger Bebauung. Des Weiteren dominieren Einfamilienhäuser sowohl in der Anzahl, als auch in der Summe der Dach- und Fassadenflächen den gesamten deutschen Gebäudebestand. Somit fällt das theoretische und erschließbare Solarpotenzial beträchtlich aus.

„Solarer Dachstein“

In der Praxis stellt die solare Erschließung der Dachflächen aufgrund der Kleinteiligkeit und der Zergliederung durch untergeordnete Bauteile wie Schornsteine und Dachgauben eine planerische Herausforderung dar. Auch liegt der überwiegende Anteil freistehender Einfamilienhäuser in privater Hand und somit außerhalb des direkten Zugriffs der Öffentlichkeit. Aus diesem Grund wird empfohlen, ein eigenes Förderprogramm zur energetisch-architektonischen Entwicklung aufzusetzen. Ziel hierbei sollte es sein, neben dem energetischen Ertrag vor allem die Integration zu fördern.

Gleichzeitig sind einfache gestalterische Lösungen gefordert, die eine Integration von elektrischen und thermischen Solarsystemen in der Logik einfacher Dachsteine anbietet. Systeme sollten dabei kleinteilig und flexibel im Maße sein, um eine homogene Einbindung in die vielfältigen Dachlandschaften

zu ermöglichen. Hier sind neue Systemlösungen seitens des Baugewerbes gefragt.

Gleiches gilt auch für die solare Aktivierung der Dachflächen größerer punktförmiger Bauten. Hierbei sollten je nach Dachform „solare Dachsteine“ zum Einsatz kommen, bzw. gestalterische Lösungen zur Integration von Systemen in Flachdächer gefunden werden. Bei größeren punktförmigen Gebäuden ist zudem bei Flachdachbauten auf weitere Dachnutzungen wie Terrassen oder Gründächer zu reagieren. Denkbar dabei ist die Einbringung elektrischer oder thermischer Systeme im Attikabereich.

„Solare Fassadendämmung“

Im Bereich der Fassaden punktförmiger Bebauung wird eine Einbindung elektrischer Systeme aufgrund der stärkeren Teilverschattung als eher kritisch betrachtet. Einer elektrischen Aktivierung sollte daher stets eine Einzelfallprüfung vorausgehen. Hierbei sollten neben Verschattungssituationen durch Gebäude auch sich verändernde Vegetation berücksichtigt werden. Unkritisch hingegen kann eine thermische Energiegewinnung sowie die „solare Dämmung“ gemäß des Polyboxprinzips (vgl. folgendes Kapitel) erfolgen. Diese können trotz Teilverschattungen zu einer Reduktion des Heizwärmebedarfs beitragen. Durch den großen Anteil freistehender Gebäude im deutschen Gebäudebestand wird ein großes Integrationspotenzial solarthermischer Systeme in der Fassade gesehen, welches einen Beitrag zur Reduktion des bundesdeutschen Wärmebedarfs leisten könnte.

Da solarthermische Fassadensysteme vorwiegend baulich errichtet werden, kann eine vermehrte Umsetzung über Förderungen energetischer Sanierungsprogramme erfolgen. Hierbei müssen jedoch die Berechnungsgrundlagen der EnEV entsprechend angepasst werden.

4.5. Zeilenbau



Abb. 95:
Reihenhauszeile
Foto: Steffen Wurzbacher



Abb. 96:
Mehrfamilienhauszeile der 1970er
Jahre
Foto: Steffen Wurzbacher



Abb. 97:
homogen gerasterte Bürozeile
Foto: Christoph Drebes



Abb. 98:
städtisches Reihenendhaus
Foto: Christoph Drebes



Abb. 99:
typische Bürozeile der 1950er Jahre
Foto: Steffen Wurzbacher



Abb. 100:
Bürozeile 1960er Jahre
Foto: Christoph Drebes

4.4.6. Typologische Beschreibung

Zeilenbauten werden alle Gebäude mit eindeutiger Haupt- und Nebenfassade bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird hierfür das Seiten- zu Längenverhältnis zwischen Neben- und Hauptfassade herangezogen. Sofern das Verhältnis kleiner als 1/3 (Breite zu Länge) ausfällt, wird das Gebäude als Zeilenbau betrachtet.

Zeilenbauten finden sich grundsätzlich in allen Baualtersklassen wieder. In Bauten vor 1918 ist dieser Typus jedoch nur selten vertreten. Eine erste große Verbreitung erfährt der Zeilenbau ab den 1920er Jahren als Reihenhaus- bzw. Wohnzeile. Eine weitere großflächige Verbreitung folgt ab den 1950er Jahren im Wiederaufbau in Form der typischen „Nachkriegszeile“. Hierbei finden sich vor allem vier- bis fünfgeschossige Mehrfamilienwohnhäuser in freistehender Zeilenstruktur. Ab den 1960er und 1970er Jahren werden zudem Zeilenbauten in hoher baulicher Dichte in den „Großwohnsiedlungen“ in Westdeutschland und den „Plattenbauten“ in Ostdeutschland errichtet. Ab den 1960er Jahren bis heute werden zudem fortwährend Reihenhäuser in ein bis dreigeschossiger Bauweise in allen Regionen Deutschlands errichtet.

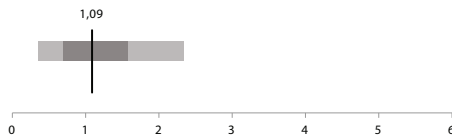


Abb. 101:
Bandbreiten der Geschossflächenzahl (GFZ)
Quelle: Eigene Darstellung

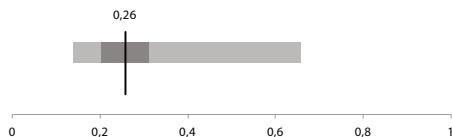


Abb. 102:
Bandbreiten der Grundflächenzahl (GRZ)
Quelle: Eigene Darstellung

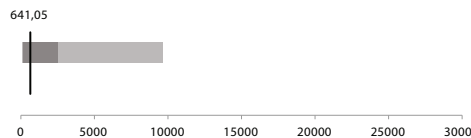


Abb. 103:
Bandbreiten der Bruttogrundfläche (BGF)
Quelle: Eigene Darstellung

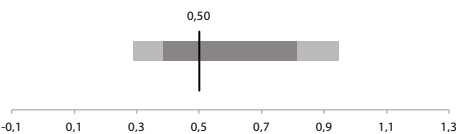


Abb. 104:
Bandbreiten der Kompaktheit (A/V)
Quelle: Eigene Darstellung

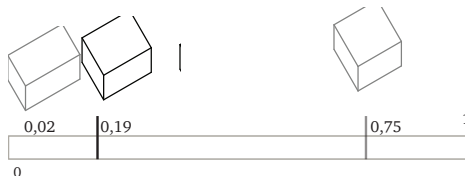


Abb. 105:
Typische Länge zu Breite des Baukörpers
Quelle: Eigene Darstellung

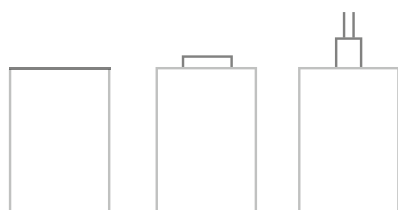


Abb. 106:
Typische Dachformen und Aufbauten
Quelle: Eigene Darstellung

4.5.1. Baustrukturelle Eigenschaften

Umgebung

Reihenhäuser und kleinere bis mittlere Mehrfamilienhauszeilen finden sich meistens in Zwischen- und Randstadtbereichen wieder. Die Umgebung ist hierbei in der Regel von ähnlichen Bauten geprägt. Größere Mehrfamilienhauszeilen finden sich hingegen auch des Öfteren als Kriegersatzbauten in Kernstadtbereichen ostdeutscher Städte. Als Beispiele hierfür können die flankierenden Zeilen am Berliner Alexanderplatz, der Juri-Gagarin-Ring in Erfurt sowie der Sankt-Petersburger-Straße in Dresden genannt werden. Hier ist die Umgebung meistens deutlich heterogener und mit unterschiedlichen Bauformen versehen.

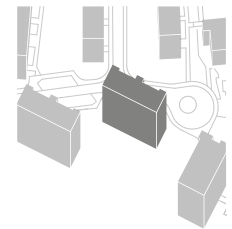


Abb. 107:
Typische Umgebung
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 108:
Typische Bauform / Volumen
Quelle: Eigene Darstellung

Volumen und Baukörper

Die untersuchten Testgebäude weisen im Medianwert eine GFZ von 1,1 auf. Hier streuen sich die Werte sowohl nach oben, als auch nach unten. Der größte Anteil liegt in einem GFZ-Bereich von 0,5 bis 1,5. Je größer die Zeilenbauten werden, desto kompakter sind sie. Die untersuchten Testgebäude weisen einen Median zum Maß der Kompaktheit von 0,5 innerhalb einer größeren Bandbreite von 0,35 bis 0,75 (50% aller Testkörper) auf.

Fassade

Die Fassaden der Zeilen sind in der Regel mit einer eindeutigen Haupt- und einer Nebenfassade ausgestattet. Hauptfassaden sind je nach Baualterklasse oftmals in größere Balkonzonen untergliedert. Daneben werden speziell in Zeilenbauten der 1960er bis 1970er Jahren auch Erschließungskerne zur Gliederung vieler Zeilenbauten verwendet. Die untersuchten Testgebäude weisen einen Median zum Verhältnis Schmalseite zu Längsseite von 0,19 auf. Damit sind die untersuchten Testgebäude überwiegend stark gerichtet.

Dach

Je nach Baualterklasse finden sich ganz unterschiedliche Dachformen wieder. Während die „1950er Nachkriegszeile“ in der Regel ein einfaches Satteldach besitzt, sind die oberen Abschlüsse der 60er und 70er Jahre als Flachdach ausgeführt. Dort finden sich auch vereinzelt Dachterrassen. Im überwiegenden Fall sind Flachdächer jedoch nicht begehbar und mit einer einfachen Kiesschüttung versehen.



Abb. 109:
Gängige Dachausführungen
Quelle: Eigene Darstellung

4.5.2. Strahlungspotenziale der Dachflächen

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Dachflächen untersuchter Zeilenbauten weisen ein sehr hohes und nur unwesentlich reduziertes theoretisches Strahlungspotenzial auf. Das bedeutet, dass größere Höhenversprünge der Baukörper von Zeilen fast nicht zu finden sind und es somit zu fast keiner Eigenverschattung kommt. Bei Zeilenbauten finden sich im Median 2676 Quadratmeter hochexponierte Dachflächen pro Hektar Nettobauland.

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Unter Berücksichtigung der Umgebung und der Eigenverschattung durch untergeordnete Bauteile weisen 88% der Zeilenhäuser noch einen Strahlungsertrag größer als 750 kWh/(qm*a) auf. Dies entspricht 2328 Quadratmeter Dachfläche pro Hektar Nettobauland. Geringfügige Einbußen im Strahlungsertrag werden vor allem durch Aufbauten wie Schornsteine, Dachgauben oder Brandwandüberstände hervorgerufen. Die untersuchten Testgebäude weisen einen sehr geringen Anteil an Flächen mit reduzierter Strahlung von 76 Quadratmeter pro Hektar Nettobauland auf.

Bei den individuellen Kurven zu Strahlungsverläufen der untersuchten Testgebäude lässt sich eine gewisse Streuung bei Berücksichtigung von Eigen- und Fremdverschattung (RED2) identifizieren. Das bedeutet, es finden sich einzelne Bestandsgebäude mit durchaus stark verschatteten Dachaufbauten.

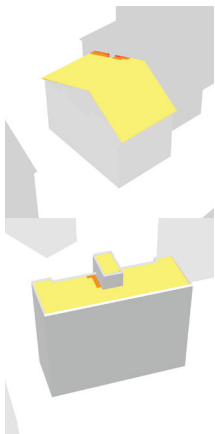


Abb. 112:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Dachflächen bei zeilenartigen Gebäuden
Quelle: Eigene Darstellung

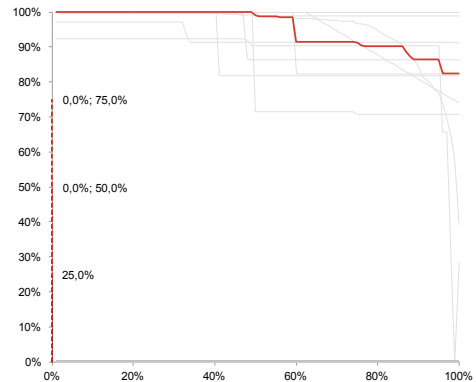


Abb. 110:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

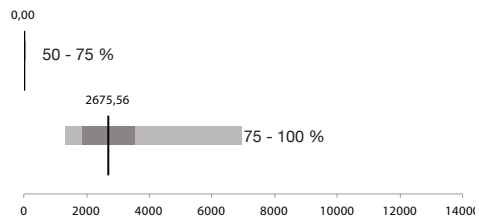


Abb. 111:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

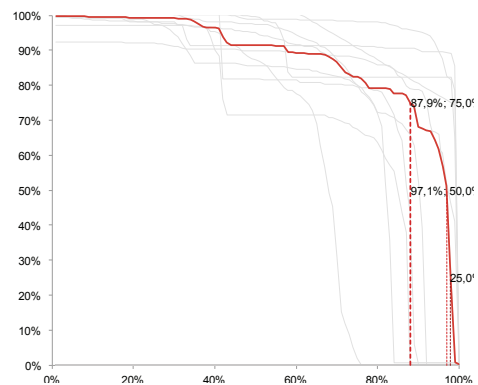


Abb. 113:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

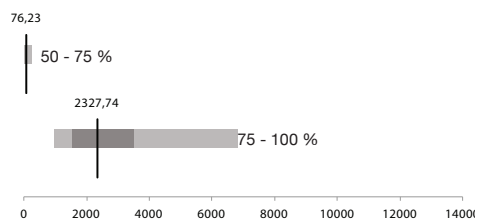


Abb. 114:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

4.5.3. Strahlungspotenziale der Fassadenflächen

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Die Fassaden der zeilenartigen Gebäude weisen einen gleichmäßig fallenden Median eines theoretischen Strahlungspotenzials auf. Insgesamt finden sich fast 40% aller Fassaden mit einem Strahlungsertrag von über 500 kWh/(qm*a) bis 650 kWh/(qm*a) wieder. Bezogen auf das Nettobauland sind das pro Hektar insgesamt 2.535 Quadratmeter Fassadenfläche. 6% der Fassaden sind stark verschattet und weisen lediglich mit einem Strahlungsertrag von unter 250 kWh/(qm*a) auf.

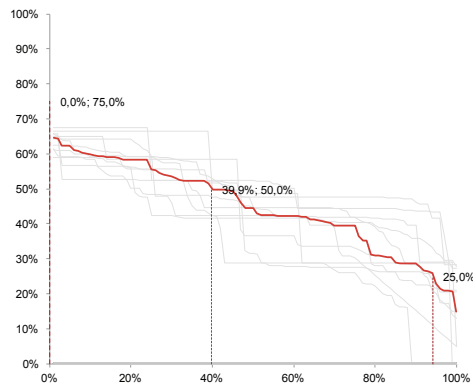


Abb. 115:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

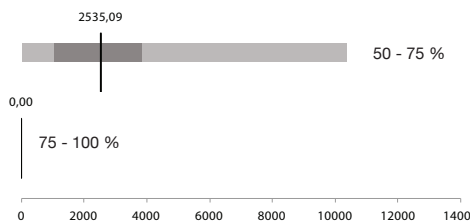


Abb. 116:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

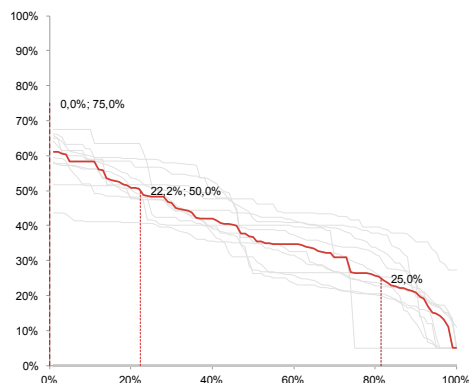


Abb. 117:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

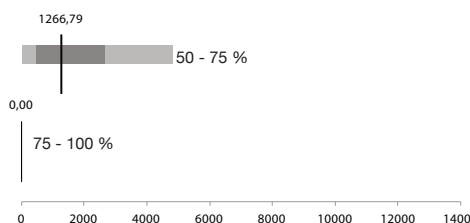


Abb. 118:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Im Gegensatz zum theoretischen Potenzial weist das reale Potenzial mit Berücksichtigung von Eigen- und Fremdverschattung sowie Verschattung durch untergeordnete Bauteile einen geringeren Anteil exponierter Flächen auf. So reduziert sich der Flächenanteil mit einem Strahlungsertrag von über 500 kWh/(qm*a) von 40% (RED 0) auf 22% (RED 2). Bezogen auf das Nettobauland finden sich bei zeilenartigen Bauten pro Hektar insgesamt 1266 Quadratmeter exponierter Fassade wieder.

16% der Fassaden sind mit einem Strahlungsertrag von unter 250 kWh/(qm*a) stark reduziert.

Die individuellen Strahlungsverläufe der untersuchten Testgebäude unterscheiden sich bei der Betrachtung des realen Strahlungspotenzials (RED 2) nur moderat voneinander.

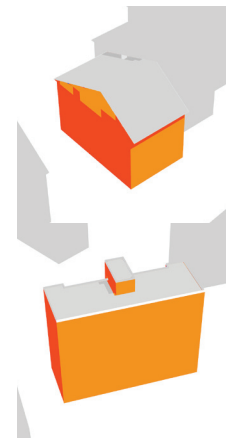


Abb. 119:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Fassadenflächen bei zeilenartigen Gebäuden
Quelle: Eigene Darstellung

4.5.4. Strahlungspotenziale der Gebäudehülle

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

In der zusammenfassenden Betrachtung aller Strahlungspotenziale der Gebäudehülle finden sich auf rund 31% aller Hüllflächen Strahlungswerte von über 750 kWh/(qm*a) wieder. Somit weist die Typologie der Zeile eine deutlich größere Summe an hoch exponierten Flächen auf, als die bisher untersuchten Typen. Bezogen auf das Nettobauland sind dies 2614 Quadratmeter pro Hektar.

Weitere 31% der Hüllflächen bieten noch einen Ertrag von 500 bis 750 kWh/(qm*a) und sind damit noch exponiert. Pro Hektar Nettobauland ist dies eine Fläche von 2570 Quadratmetern.

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Unter Berücksichtigung von Eigen- und Fremdverschattung sowie durch Abminderung weiterer untergeordneter Bauteile reduzieren sich die hoch exponierten und exponierten Bereiche in unterschiedlicher Weise. Es finden sich circa 28% hoch exponierte Flächen mit einem Strahlungsertrag von über 750 kWh/(qm*a). Das sind 2614 Quadratmeter pro Hektar Nettobauland.

Eigen- und Fremdverschattung wirkt sich vor allem im Bereich der Fassaden strahlungsreduzierend aus. Hier sind nur noch 20% exponiert und weisen einen Strahlungsertrag von 500 bis 750 kWh/(qm*a) auf. Bezogen auf das Nettobauland finden sich 1511 Quadratmeter exponierte Hüllflächen pro Hektar wieder.



Abb. 120:
Beispiele von Strahlungssituationen auf Baukörpern
Quelle: Eigene Darstellung

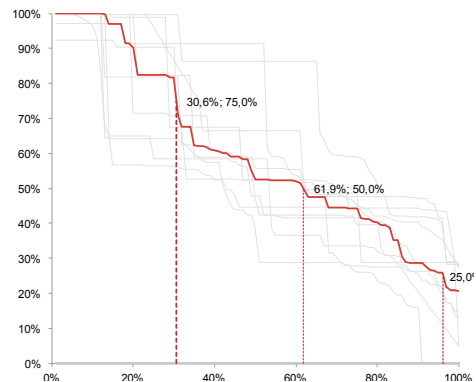


Abb. 121:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

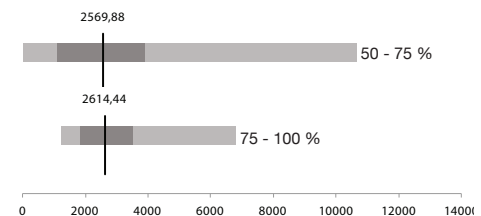


Abb. 122:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

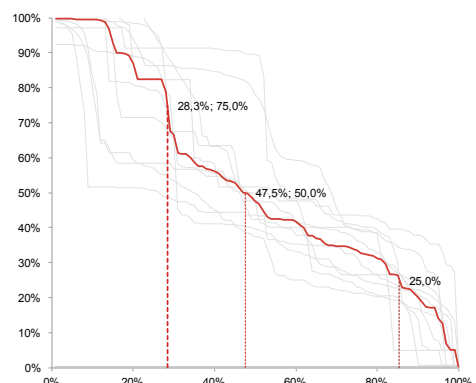


Abb. 123:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

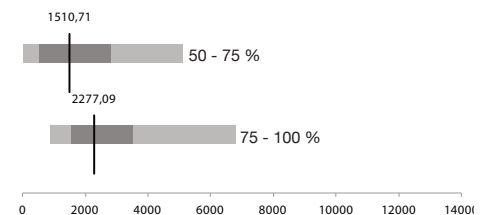


Abb. 124:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

4.5.5.Strategie zur Aktivierung von Dach und Fassaden bei Zeilenbauten

Der Typus der zeilenartigen Bebauung setzt sich aus kleineren Reihenhäusern über kleinere und größere Mehrfamilienhäuser sowie Bürozeilen zusammen. Somit weist dieser Typus unterschiedliche volumetrische Körnigkeiten, Konstruktionsweisen und Besitzverhältnisse auf. Ein Subtypus der Zeilenbebauung stellt das Reihnhaus dar. Dieses ist den vorangegangenen Untersuchungen nach der zweithäufigste Typus in der Anzahl aller Gebäude in Deutschland. In der Summe der Dachflächen rangiert dieser Subtypus auf Platz vier und in der Summe aller Fassadenflächen auf Platz fünf aller Gebäudetypen nach (Bürger; Hesse; Quack et al. 2016). Somit ist allein aus der Anzahl aller Reihenhäuser ein erhebliches Flächenpotenzial gegeben.

Solaraktivierter Dachausbau

Dachflächen zeilenartiger Gebäude bieten im Durchschnitt ein sehr hohes Strahlungspotenzial. Die vorangegangenen Untersuchungen haben jedoch auch gezeigt, dass einzelne Testgebäude stärkeren Eigen- und Fremdverschattungen unterliegen, als andere der gleichen Art. Somit ist bei einer elektrischen Aktivierung auch auf eine möglichst unverschattete Gesamtsituation in einer Einzelfassadenbetrachtung zu achten. Dachflächen von Reihenhäusern können in ähnlicher Weise wie die zuvor beschriebenen punktförmigen Gebäude solarenergetisch aktiviert werden. Da Reihenhäuser überwiegend in privater Hand sind, ist ein ähnliches Dachförderprogramm wie bei freistehenden Einfamilienhäusern anzuwenden.

Größere Zeilenbauten wiederum bieten neben der rein energetischen Aktivierung oftmals auch die Chance einer räumlichen Erweiterung durch einen Dachausbau. Insbesondere Zeilenbauten der Nachkriegszeit weisen oftmals nicht ausgebaute Dachstühle auf. Hier bietet sich ein räumliches Erweiterungspotenzial, welches mit einer energetischen Aktivierung der Dachfläche kombinieren lässt.

Raum- und Pufferzonen

Die Untersuchungen zum Strahlungspotenzial auf Fassaden einer zeilenartigen Bebauung haben ein hohes Potenzial mit moderater Eigen- und Fremdverschattung identifiziert. Durch die oftmals mit größeren Abständen errichteten Siedlungsstrukturen zeilenartiger Bebauung aller baulicher Dich-

ten finden sich in der Regel nur moderat verschattete Fassaden wieder.

In den Reihenhäusern finden sich potenzielle Verschattungen vor allem durch unkontrolliert gesetzte Vegetation und untergeordnete Bauteile wie Pergolen, Sichtschutzvorrichtungen oder dergleichen. Eine elektrische Aktivierung hat diese Einflussfaktoren zu berücksichtigen. Gerade bei Nord-Süd gerichteten Reihenhäusern kann eine elektrische Energiegewinnung die Energieausbeute im Winter deutlich verbessern und damit zu einer Erhöhung des Eigennutzungsgrades führen.

Bei mittleren und größeren Zeilenbauten bieten sich ebenfalls verschiedene Möglichkeiten der Einbindung einer Solarenergienutzung in die Fassade. Da die Grundrissgestaltung gerade von Zeilen der 1950er Jahre oftmals nicht mehr zeitgenössischen räumlichen Ansprüchen genügt, bieten sich hier Möglichkeiten der kombinierten energetischen und architektonischen Erweiterung. So können vorgesetzte Raumzonen als energetische Puffer ausgebildet werden und damit zu einer Verbesserung des Wärmeschutzes führen. Da mittlere und größere Zeilenwohnbauten oftmals im Besitz von Wohnungsbaugesellschaften liegen, besteht hierbei ein besonderes Handlungsfeld zur Realisation von solarenergetischen Maßnahmen.

4.6. Hofförmiger Bau



Abb. 125:
geschlossene Blockrandbebauung mit
innenliegendem Innenhof
Foto: Steffen Wurzbacher



Abb. 126:
Innenstädtisches Eckhaus mit
kommerzieller Nutzung
Foto: Steffen Wurzbacher



Abb. 127:
Innerstädtischer Blockrand
Wohn- und Bürobebauung
Foto: Christoph Drebes



Abb. 128:
Innerstädtischer Blockrandbebauung
verschiedlicher Nutzung und Baualter
Foto: Christoph Drebes



Abb. 129:
Blockrandbebauung mit Wohnnutzung
Foto: Steffen Wurzbacher



Abb. 130:
Innerstädtischer Blockrand
Bürobebauung
Foto: Christoph Drebes

4.5.6. Typologische Beschreibung

Die Typologie der hofförmigen Bauten findet sich primär in verdichteten Kernbereichen oder in älteren Dorfstrukturen wieder. Als hofförmig werden städtische Strukturen beschrieben, welche sich um einen Hof oder Innenbereich gruppieren, beziehungsweise in der Form eine stärkere „Verwinkelung“ aufweisen. Das Gebäude kann dabei Teil einer größeren hofförmigen Gebäudegruppe sein, oder als Ganzes entsprechende Form einnehmen. Beispiel hofförmiger Gebäudegruppen sind Wohnbauten der Gründerzeit. Hierbei werden Gebäude in geschlossener oder offener Bauweise zu einem Block gruppiert. Zusammen bilden Sie dabei den sogenannten Blockrand. Darüber hinaus werden stärker abgewinkelte Wohn- und Bürobauten an den 1960er Jahren ebenfalls dieser Typologie zugeschrieben. So werden im Rahmen der vorliegenden Analyse auch H-, T-, oder kammartige Formen als hofförmige Bauten definiert.

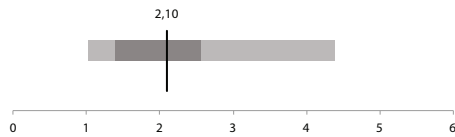


Abb. 131:
Bandbreiten der Geschossflächenzahl (GFZ)
Quelle: Eigene Darstellung

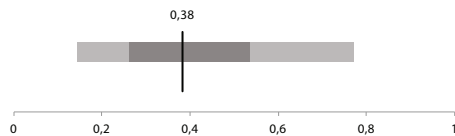


Abb. 132:
Bandbreiten der Grundflächenzahl (GRZ)
Quelle: Eigene Darstellung

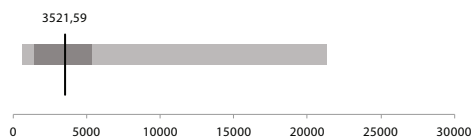


Abb. 133:
Bandbreiten der Bruttogrundfläche (BGF)
Quelle: Eigene Darstellung

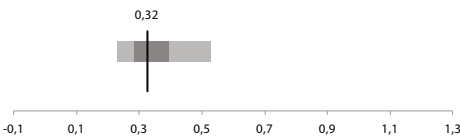


Abb. 134:
Bandbreiten der Kompaktheit (A/V)
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 135:
Typische Länge zu Breite des Baukörpers
Quelle: Eigene Darstellung

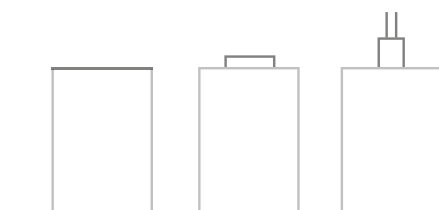


Abb. 136:
Typische Dachformen und Aufbauten
Quelle: Eigene Darstellung

4.6.1. Baustrukturelle Eigenschaften

Umgebung

Viele der historisch gewachsenen hofförmigen Stadtstrukturen wurden im Laufe der Zeit durch Bebauung des Innenbereichs stark nachverdichtet. Üblicherweise finden sich in Höhe und Fassadengestalt ähnliche Gebäude wieder. Durch das oftmals höhere Alter dieser Typologie sind Gebäudeabstände oftmals sehr gering und es kommt zu größeren Verschattungssituationen untereinander.

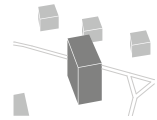


Abb. 137:
typische Umgebung
Quelle: Eigene Darstellung

Volumen und Baukörper

Die ermittelte bauliche Dichte der im Rahmen dieser Arbeit analysierten Testgebäude gleicht in etwa den Dichten eines typischen Gründerzeitblocks (z.B. Berlin Kreuzberg, Friedrichshain). Dort finden sich bauliche Dichten mit einer GFZ von 2,0 bis 3,0, vielfach sogar bis zu 5 wieder. Die untersuchten Testkörper weisen einen Medianwert einer GFZ von 2,1 auf. Die Bandbreite schwankt dabei zwischen einer GFZ von 1,0 bis 4,5. Neben der hohen baulichen Dichte lässt sich ebenfalls ein hoher Überbauungsgrad feststellen. Hier wird ein Medianwert einer GRZ von 0,38 ermittelt. Die Baukörper sind mit einem A/V Wert von 0,32 im Median sehr kompakt. Die Bandbreite ermittelter Kompaktheit schwankt dabei von 0,25 bis 0,55.

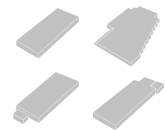


Abb. 138:
typische Bauform /
Volumen
Quelle: Eigene Darstellung

Fassade

Durch die in allen Baualtersklassen vertretene Typologie der hofförmigen Bauten finden sich entsprechend vielfältige Fassadengestaltungen wieder. Bauten vor 1918 sind in der Regel mit Massivbau mit einer tragenden Fassade errichtet. Diese kann in Sichtmauerwerk oder verputzt ausgebildet sein. Vielfach finden sich Ornamentierungen und Mittel zur Fassadengliederung wieder. Eindeutige Haupt- und Nebenfassaden lassen sich nur bei den älteren Gebäuden mit Unterscheidung einer Straßen- und Hoffassade erkennen. Die untersuchten Testgebäude sind im Verhältnis Schmalseite zu Längsseite mit einem Medianwert von 0,79 eher ungerichtet.



Abb. 139:
gängige
Dachausführungen
Quelle: Eigene Darstellung

Dach

Typische Dachformen hofförmiger Bauten sind neben dem Flachdach bei neueren Gebäuden finden sich in älteren Beständen vielfach Satteldächer oder Mansarddächer wieder. Sofern das Dachgeschoss einer regelmäßigen Nutzung unterzogen ist, finden sich auf dem Dach eng gestellte Gauben oder Dachfenster wieder. Ältere Bauwerke haben gerade in innerstädtischen Lagen zudem oftmals höhere Brandwandüberstände, die sich maßgeblich auf Verschattungssituationen auswirken können.

4.6.2. Strahlungspotenziale der Dachflächen

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Aufgrund des großen Anteils Dachflächen an der gesamten Gebäudehülle weisen im Median rund 96% aller Dachflächen hoförmiger Gebäude hoch exponierten Strahlungswerten von über 750 kWh/(qm*a) auf. Das bedeutet, dass es nur geringfügige Eigenverschattungen durch Baukörpergliederungen oder Höhenversprünge in den untersuchten Testgebäuden zu finden sind. Bezogen auf das Nettobauland finden sich pro Hektar 3046 Quadratmeter hoch exponierte Dachflächen wieder. Die Streuung von 50% aller Testgebäude (1. bis 3 Quartil) verläuft dabei jedoch zwischen 2617 und 4320 Quadratmetern.

Bei näherer Betrachtung der Strahlungsprofile lässt sich eine deutliche Spreizung innerhalb des Feldes untersuchter Testgebäude erkennen. Das bedeutet, dass in Bestandssituationen im Einzelfall doch strahlungsvermindernde Einflüsse zu erwarten sind. Hier ist eine dezidierte Einzelbetrachtung notwendig.

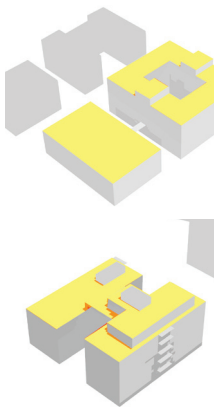


Abb. 142:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Dachflächen bei hoförmigen Gebäuden
Quelle: Eigene Darstellung

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Bei der Berücksichtigung von Fremdverschattung und Abminderung durch untergeordnete Bauteile reduziert sich der Anteil hoch exponierter Dachflächen auf 81%. Insgesamt wirkt sich diese Art von Verschattung eher in den ohnehin strahlungsreduzierten Bereichen aus. Die hoch exponierten Strahlungsbereiche finden sich auf insgesamt 2894 Quadratmeter Dachfläche pro Hektar Nettobauland. Auch hier ist eine größere Spreizung der Einzelwerte zu beobachten. 50% aller Testgebäude haben zwischen 2123 bis 3608 Quadratmeter hoch exponierte Dachflächen auf.

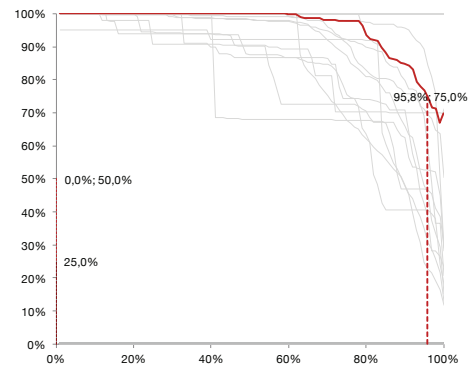


Abb. 140:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

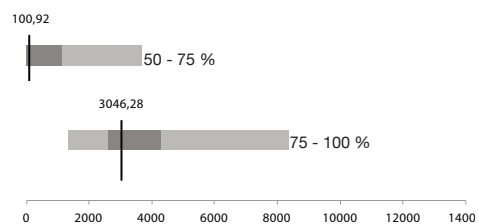


Abb. 141:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

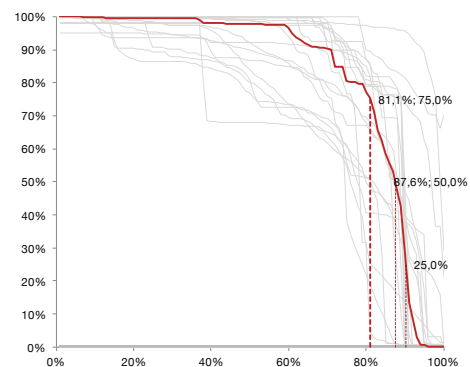


Abb. 143:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

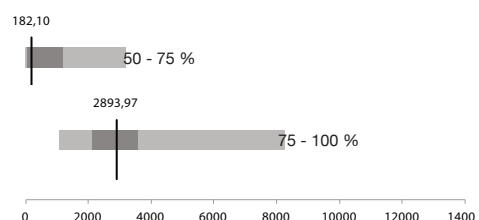


Abb. 144:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

4.6.3. Strahlungspotenziale der Fassadenflächen

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Die Fassadenflächen hofförmiger Gebäude weisen ein theoretisches Potenzial von 37% exponierter Dachflächen mit Strahlungswerten von 500 bis 750 kWh/(qm*a) auf. Der weitaus größere Teil von 63% der Fassadenflächen ist stark strahlungsreduziert. Wie schon bei den Dachflächen beobachtet, fällt auch bei den Fassadenflächen die Streuung der Strahlungsprofile einzelner untersuchter Testgebäude recht groß aus. Bezogen auf das Nettobauland finden sich 4452 Quadratmeter exponierte Fassadenflächen wieder. Die Streuung zwischen 1. und 3. Quartil reicht von 3816 bis 6096 Quadratmeter.

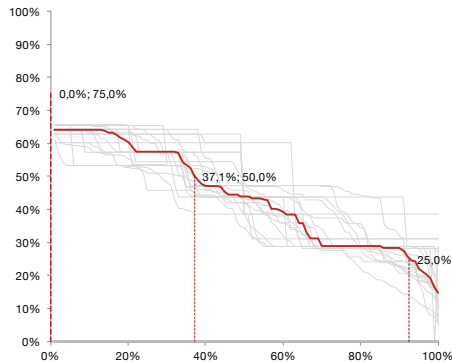


Abb. 145:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

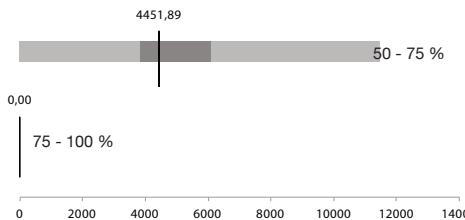


Abb. 146:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

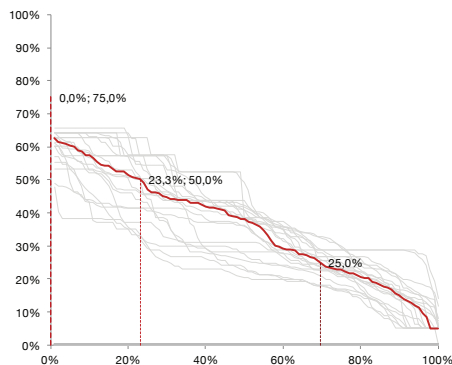


Abb. 147:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

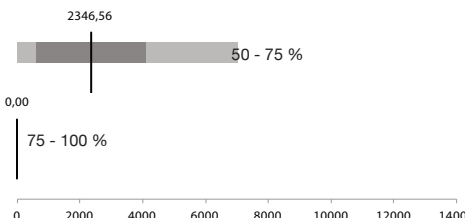


Abb. 148:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Fremdverschattung durch umliegende Baukörper sowie weitere strahlungsreduzierende untergeordnete Bauteile mindern den realen Strahlungsertrag von Fassaden hofförmiger Gebäude nochmals deutlich. Lediglich 23% der Fassadenflächen sind im Median mit einer Strahlung von 500 bis 750 kWh/(qm*a) versehen. 25% der Fassaden sind im Strahlungsertrag mit spezifischen Werten unterhalb von 250 kWh/(qm*a) zudem stark reduziert. Bezogen auf das Nettobauland weisen hofförmige Gebäude circa 2347 Quadratmeter exponierte Fassadenfläche mit Werten zwischen 500 und 750 kWh/(qm*a) auf. Die Streuung zwischen 1. und 3. Quartil erstreckt sich von 608 bis 4107 Quadratmetern.

Insgesamt führt die Streuung innerhalb der untersuchten Testgebäude zu stärker voneinander abweichenden spezifischen Strahlungswerten. Somit ist bei der Bestimmung zu erwartender Potenziale eine genauere Einzelfallbetrachtung notwendig.

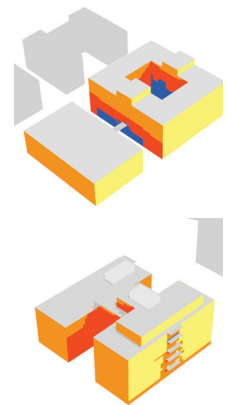


Abb. 149:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Fassadenflächen bei hofförmigen Gebäuden
Quelle: Eigene Darstellung

4.6.4. Strahlungspotenziale der Gebäudehülle

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

In der zusammenfassenden Betrachtung aller Hüllflächen hofförmige Gebäude werden im Median 24% aller Flächen mit einem theoretischen Strahlungspotenzial von 750 bis 1000 kWh/(qm*a) identifiziert. Rund 30% der Hüllflächen sind exponiert und weisen einen Strahlungsertrag von 500 bis 750 kWh/(qm*a) auf. Bezogen auf das Nettobauland finden sich pro Hektar 2774 Quadratmeter hoch exponierte und 5243 Quadratmeter exponierte Hüllflächen wieder. Wie bereits bei der Einzelbetrachtung zur Dach- und Fassadenfläche jeweils benannt, weisen die Ergebnisse eine stärkere Spreizung auf. In der Nettobaulandbetrachtung ordnen sich somit 50% aller identifizierten hochexponierten Flächen in einem Bereich von 2610 bis 4223 Quadratmeter an. 50% der exponierten Flächen finden sich in einem Bereich von 3847 bis 6746 Quadratmeter.



Abb. 150:
Beispiele von Strahlungssituationen auf Baukörpern
Quelle: Eigene Darstellung

4.6.5. Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Strahlungsmindernde Einflüsse der Umgebung und durch untergeordnete Bauteile wirken sich verstärkt in den weniger exponierten Bereichen aus. Unter Betrachtung des realen Potenzials finden sich 18% hochexponierte und weitere 21% exponierte Flächen wieder. Dies entspricht im Median einer Fläche von 2681 Quadratmeter hochexponierter und 3185 Quadratmeter exponierter Hüllflächen pro Hektar Nettobauland. 50% der hochexponierten Flächen ordnen sich dabei in einem Bereich von 2091 bis 3573 Quadratmeter an. Der Bereich der exponierten 50% verläuft von 1471 bis 4673 Quadratmeter.

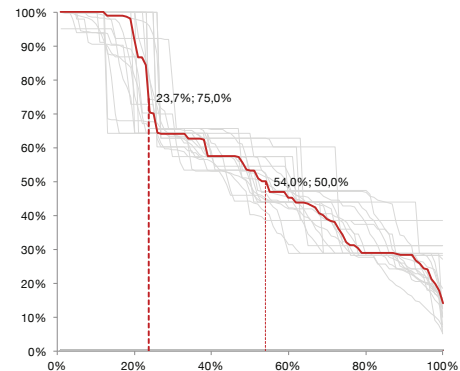


Abb. 151:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

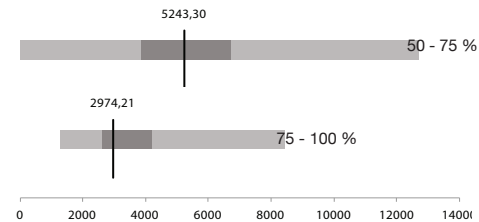


Abb. 152:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

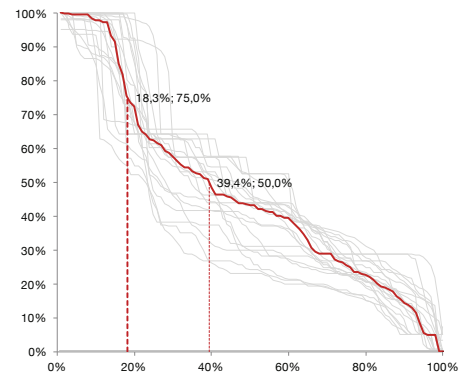


Abb. 153:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

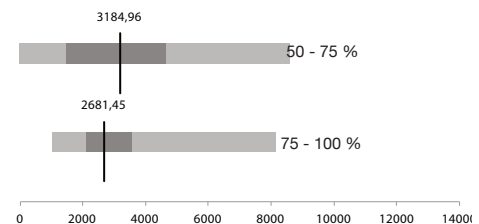


Abb. 154:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

4.6.6.Strategie zur Aktivierung von Dach und Fassaden bei hofförmigen Bauten

Der Typus einer hofförmigen Bebauung erweist sich den vorangegangenen Untersuchungen nach als vergleichsweise heterogen in der Beschaffenheit seiner Form und Struktur. Tendenziell lassen sich viele innerstädtische geschlossene Bauformen diesem Typus zuweisen. Diese reichen von historischen dörflichen Strukturen, über die gründerzeitlichen Erweiterungen bis hin zu neuen verdichteten Gewerbe- und Wohngebiete. Die beschriebene Heterogenität erweist sich bei der Aktivierung von Oberflächen als größtes Hemmnis. So haben sowohl die Untersuchungen zu Strahlungspotenzialen von Dach- als auch von Fassadenflächen sehr unterschiedliche Verschattungssituationen identifiziert.

Punktuelle Fassadenaktivierung im Neubau

Eine Aktivierung von Fassadenflächen kann in vielen Bereichen diesen Typus im Gebäudebestand nicht empfohlen werden. Grund hierfür liegt in der starken Eigen- und Fremdverschattung der oftmals engstehenden blockartigen Bebauung. Auch lassen sich mit den derzeit vorliegenden solaren Technologien viele historische Bestandsbauten nur unter starker Veränderung des bisherigen architektonischen Ausdrucks umsetzen. Möglich erscheint eine Integration von Solarsystemen in der Fassade jedoch durchaus in neueren blockartigen Büro- und Wohnbauten, sofern diese mit entsprechenden Abständen zueinander errichtet sind. Gerade im Neubau von Gewerbe und Bürobauten wurden in den Untersuchungen verschiedene freistehend gewinkelte Kamm- oder Mäanderstrukturen analysiert, deren Umgebung als eher aufgelockert beschrieben werden kann. Hier könnte eine Integration in exponierte Bereiche einer Fassade durchaus einen energetischen Mehrwert generieren.

Aktivierte Aufstockung

Im Gegensatz zu den vielfach verschatteten Fassadenflächen bieten die Dächer hofförmiger Bauten ein großes Potenzial zur solaren Aktivierung. Dies liegt an der tendenziell eher flächigen Bauform dieses Typus. Wie die vorangegangenen Untersuchungen gezeigt haben, weisen hofförmige Gebäude im Vergleich zu anderen Formen einen höheren Anteil an Dachflächen an der gesamten Hüllfläche auf. Auch sind die Höhenunterschiede zwischen einzelnen Baukörpern aufgrund von baulichen Regelungen (z.B.

Traufhöhen in Bebauungsplänen, etc.) oftmals eher einheitlich. Dadurch verschatten sich Gebäude untereinander im Dachbereich insgesamt weniger. Ein wesentlicher Einfluss auf die solare Nutzung größerer Flächen üben hingegen untergeordnete Bauteile wie Dachgauben, Brandwandüberstände oder Schornsteine aus. Daneben konkurrieren solaraktivierte Dächer in den ohnehin stark versiegelten innerstädtischen Flächen mit Gründächern. Eine weitere Herausforderung bei hofförmigen Mehrfamiliengebäuden liegt in den oftmals heterogenen Eigentümerstrukturen, innerhalb welcher bei allen Maßnahmen Mehrheiten zu finden sind. Trotzdem bietet gerade der innerstädtische Bestand große Potenziale zur energetisch-räumlichen Entwicklung des Dachbereichs, zum Beispiel durch Aufstockung mit Integration solarer Systeme in die neue Dachhaut.

4.7. Hallenbau



Abb. 155:
gläsernes Bahnhofdach
Foto: Christoph Drebes



Abb. 156:
Freistehende Logistikhalle
Foto: Christoph Drebes



Abb. 157:
Alte Fabrikhalle
Foto: Christoph Drebes



Abb. 158:
Museumshalle Vitramuseum
Foto: Christoph Drebes



Abb. 160:
Gewerbehalle
Foto: Christoph Drebes



Abb. 159:
Baumarkthalle
Foto: Christoph Drebes

4.6.7. Typologische Beschreibung

Als Hallenbauten werden im Rahmen dieser Arbeit typische Gewerbe- und Industriebauten bezeichnet. Sonderbauten wie Schwimmbäder, Turnhallen oder Sakralbauten (z.B. Aussegnungshallen, etc.) werden hierbei nicht betrachtet. Typische Gewerbehallen werden heutzutage üblicherweise in zwei unterschiedlichen Varianten ausgeführt. So finden sich Logistikhallen, welche in der Regel nicht klimatisch konditioniert und Produktionshallen, welche üblicherweise im Winter geheizt und gegebenenfalls im Sommer gekühlt werden. In den folgenden Analysen werden beiden Typen zusammen betrachtet. Eine Unterscheidung findet nicht statt, da sich Wand- und Deckenaufbauten bei beheizten und unbeheizten Hallen zwar voneinander unterscheiden, die Raumkonditionierung sich jedoch nicht auf die prinzipielle Grundform des Volumens auswirkt.

Insbesondere Produktions- und Logistikhallen finden sich in allen Baualtersklassen wieder. Im Laufe der Zeit haben sich Form und Konstruktion jedoch sehr stark verändert. Die früher oft in einer Mischung aus Stahl (innere Tragstruktur, Dach) und Backstein (Außenwand) errichteten Hallen hatten vielfach neben funktionalen Aspekten auch noch repräsentative Wirkung für das jeweilige Unternehmen.

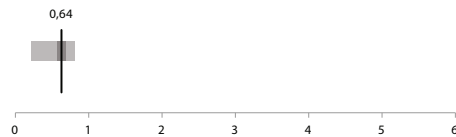


Abb. 161:
Bandbreiten der Geschossflächenzahl (GFZ)
Quelle: Eigene Darstellung

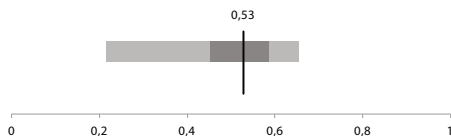


Abb. 162:
Bandbreiten der Grundflächenzahl (GRZ)
Quelle: Eigene Darstellung

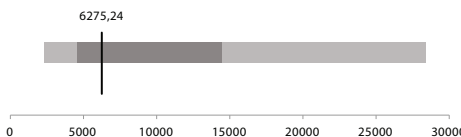


Abb. 163:
Bandbreiten der Bruttogrundfläche (BGF)
Quelle: Eigene Darstellung

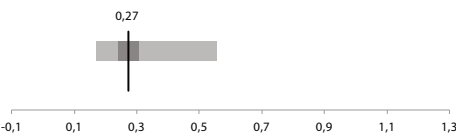


Abb. 164:
Bandbreiten der Kompaktheit (A/V)
Quelle: Eigene Darstellung

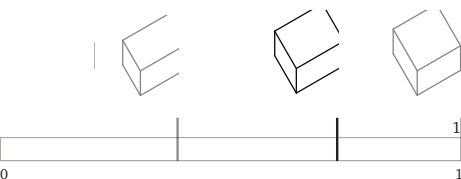


Abb. 165:
Typische Länge zu Breite des Baukörpers
Quelle: Eigene Darstellung

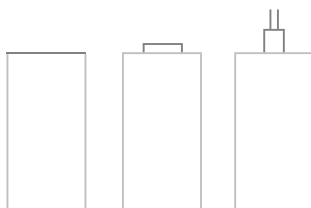


Abb. 166:
Typische Dachformen und Aufbauten
Quelle: Eigene Darstellung

4.7.1. Baustrukturelle Eigenschaften

Umgebung

Zeitgenössische Hallenbauten finden sich in der Regel in eigens ausgewiesenen Gewerbegebieten. Neben den Logistik- oder Produktionshallen werden oftmals weitere Verwaltungsbauten errichtet. Diese können direkt an die Halle angebaut oder in unmittelbarer Umgebung freistehend errichtet werden. Sofern diese in der Geschossigkeit den Hallenbau überragen, sind partielle Verschattungen der Fassaden oder Dächer zu erwarten. Die untersuchten Testgebäude weisen eine eher moderate bauliche Dichte mit einer GFZ von 0,64 und einer GRZ von 0,53 im Median auf. Generell sind gerade in Gewerbegebieten noch deutlich höhere Dichten (z.B. Hessen bis 2,4 GFZ und 0,8 GRZ) zulässig.

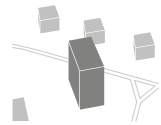


Abb. 167:
Typische Umgebung
Quelle: Eigene Darstellung

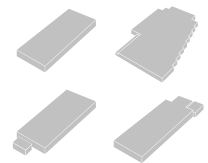


Abb. 168:
Typische Bauform / Volumen
Quelle: Eigene Darstellung

Volumen und Baukörper

Mit dem technologischen Fortschritt und der Industrialisierung des Bauwesens haben neue Fertigungstechniken zu Materialeinsparungen, größeren Rasterabständen und zur Vergrößerung der Grundfläche geführt. Heute werden Hallen mit einer Grundfläche von 30.000 Quadratmetern, teilweise sogar bis zu mehrere hunderttausend Quadratmeter verbaut. Die untersuchten Testgebäude fallen hierbei mit einer BGF von 6275 Quadratmetern deutlich kleiner aus.

Fassade

Historische Hallenbauten sind oftmals ornamentiert und aus Sichtmauerwerk errichtet. Neuere Hallen hingegen werden rein funktional gestaltet und ordnen sich den technischen und funktionalen Anforderungen unter. Es werden sowohl tragende, als auch nichttragende Fassaden in Stahl- oder Betonbauweise errichtet. Durch die großen Volumina von Hallen ergeben sich, trotz oftmals eingeschossiger Bauweise, sehr kompakte Gebäude. Die untersuchten Testgebäude weisen hierbei ein A/V Verhältnis von 0,27 im Median mit einer Bandbreite von 0,24 (1.Quartil) bis 0,31 (3.Quartil) auf.



Abb. 169:
Gängige Dachausführungen
Quelle: Eigene Darstellung

Dach

Die Dachkonstruktionen von Hallenbauten sind in der Regel auf das statische Minimum reduziert. Einer nachträglichen Aufnahme zusätzlicher Lasten (z.B. durch eine ballastierte Photovoltaikanlage) sind dadurch enge Grenzen gesetzt. Es finden sich je nach Nutzung unterschiedliche Formen wieder. Weite Verbreitung haben nach Norden orientierte Sheddächer und Flachdächer gefunden. Flachdächer können dabei je nach innenräumlicher Anforderung mit oder ohne Oberlichter ausgestattet sein.

4.7.2. Strahlungspotenziale der Dachflächen

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Hallendächer bieten sehr große Strahlungspotenziale durch die nach Süden geneigten Shed- oder die horizontal liegenden Flachdächer. 98% der Dachflächen untersuchter Testgebäude liegen dabei in dem hoch exponierten Bereich mit einem Strahlungsertrag von über 750 kWh/(qm*a). Eigenverschattung lässt sich bei diesem Typus nur minimal identifizieren. Bezogen auf das Nettobauland weisen Hallenbauten im Median 5132 Quadratmeter hochexponierte und 65 Quadratmeter exponierte Dachflächen pro Hektar auf.

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Berücksichtigt man Einflüsse der Umgebung und durch untergeordnete Bauteile, lassen sich bei den untersuchten Testgebäuden keinerlei Unterschiede zum theoretischen Potenzial (RED 0) feststellen. Somit wirken sich Dachaufbauten oder Gebäude in der Nachbarschaft nicht negativ auf die Höhe der Globalstrahlung aus. In der Realität können jedoch regelmäßige Dachaufbauten wie Oberlichter die Anordnung von Solarmodulen einschränken. Auch können kurzzeitige Schlagschatten (z.B. durch aufstehende Lüftungsauslässe, Schornsteine oder Antennen, etc.) den Ertrag einzelner Module oder Reihen beeinflussen.

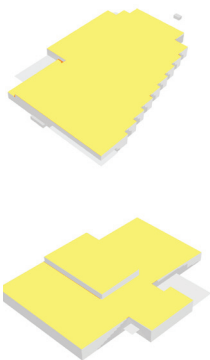


Abb. 172:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Dachflächen bei Hallengebäuden
Quelle: Eigene Darstellung

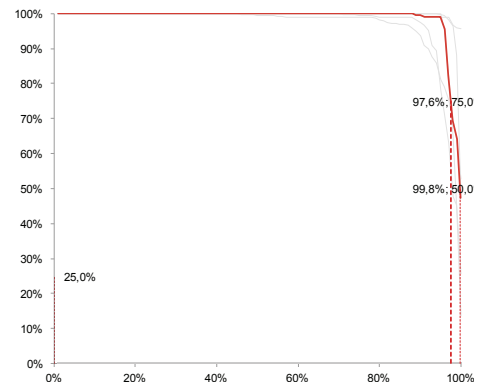


Abb. 170:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

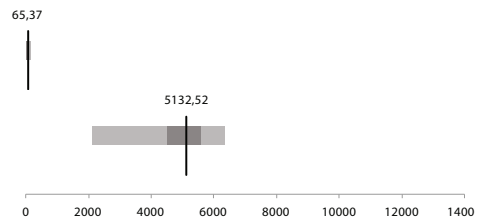


Abb. 171:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

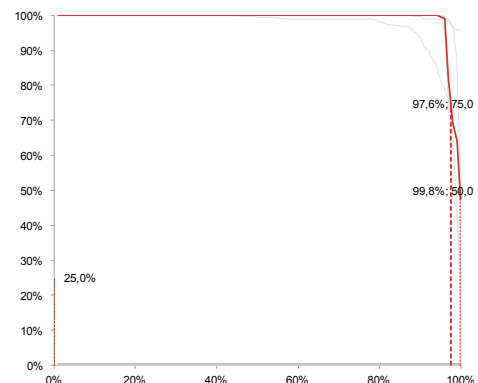


Abb. 173:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

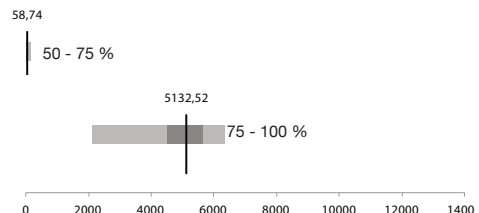


Abb. 174:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

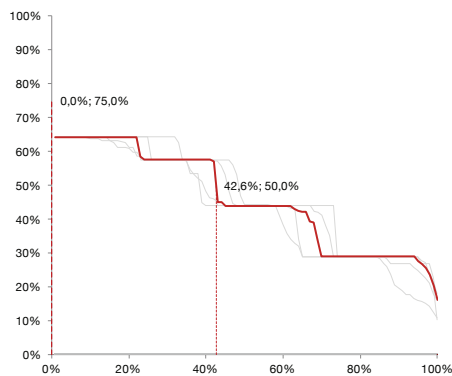


Abb. 175:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

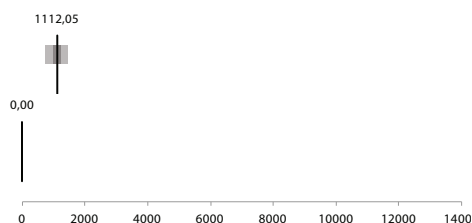


Abb. 176:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

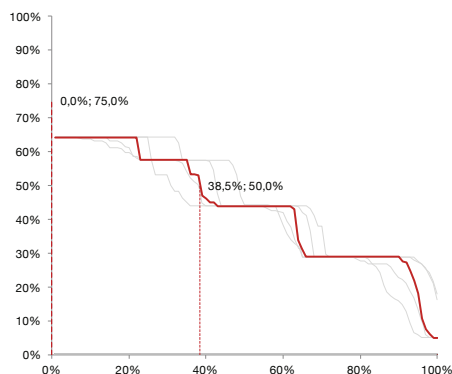


Abb. 177:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

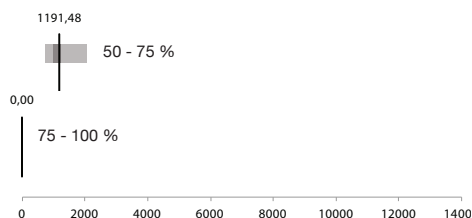


Abb. 178:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

4.7.3. Strahlungspotenziale der Fassadenflächen

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

Durch die oftmals vorliegende eingeschossige Bauweise von Hallenbauten, fällt das theoretische Strahlungspotenzial deutlich geringer aus. Die freistehenden und klar ausgerichteten Baukörper finden sich in den spezifischen Strahlungskurven als „stufenartiger“ Verlauf wieder. Insgesamt sind 43% aller Fassaden untersuchter Hallengebäude mit einem Strahlungspotenzial von 500 bis 750 kWh/(qm*a) versehen. Alle weiteren Flächen sind mit Werten von 250 bis 500 kWh/(qm*a) strahlungsreduziert. Pro Hektar Nettobauland finden sich 1112 Quadratmeter exponierte Fassadenflächen wieder. Die Werte untersuchter Hallengebäude verlaufen dabei in einer engen Bandbreiten zwischen 1006 (1.Quartil) bis 1235 (3.Quartil) Quadratmeter pro Hektar Nettobauland.

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Verschattung durch die Umgebung und untergeordnete Bauteile wirken sich auch bei den Fassadenflächen nur geringfügig aus. Die spezifischen realen Strahlungsprofile zeigen einen äquivalenten stufenförmigen Verlauf wie die zuvor beschriebenen Kurven des theoretischen Potenzials. Die einzelnen Stufen bilden dabei die vier Himmelsrichtungen ab. Auf den einzelnen Fassaden der untersuchten Testkörper finden sich somit nur geringe strahlungsmindernde Einflüsse. An den untersuchten Testgebäuden werden im Median 39% der Fassaden mit einem realen exponiertem Strahlungspotenzial von 500 bis 750 kWh/(qm*a) identifiziert. Dies entspricht 1191 Quadratmetern Fassadenfläche pro Hektar Nettobauland. Die Werte exponierter realer Strahlungspotenziale verlaufen in einer Bandbreite zwischen 980 (1.Quartil) bis 1235 (3.Quartil) Quadratmeter pro Hektar Nettobauland.

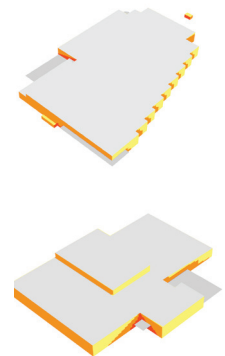


Abb. 179:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Fassadenflächen bei Hallengebäuden
Quelle: Eigene Darstellung

4.7.4. Strahlungspotenziale der Gebäudehülle

Theoretisches Strahlungspotenzial (RED 0)

In der zusammenfassenden Betrachtung zu spezifischen theoretischen Strahlungspotenzialen stechen deutlich die hoch exponierten Bereiche der Dachflächen hervor. Insgesamt weisen rund 59% aller Hüllflächen der betrachteten Hallen ein Strahlungspotenzial größer als 750 kWh/(qm*a) auf. Bezogen auf das Nettobauland finden sich pro Hektar 5081 Quadratmeter hoch-exponierte Hüllflächen. Die Bandbreite der Werte verläuft dabei in einem engen Korridor zwischen 4503 (1.Quartil) und 5621 (3.Quartil) Quadratmetern pro Hektar Nettobauland. Weitere 20% der Hüllflächen sind mit Werten zwischen 500 bis 750 kWh/(qm*a) immer noch exponiert. Dies entspricht 1242 Quadratmetern Hüllfläche pro Hektar Nettobauland. Auch hier sortieren sich die Werte innerhalb einer engen Bandbreite von 1003 (1.Quartil) bis 1350 (3.Quartil) Quadratmetern pro Hektar Nettobauland ein.

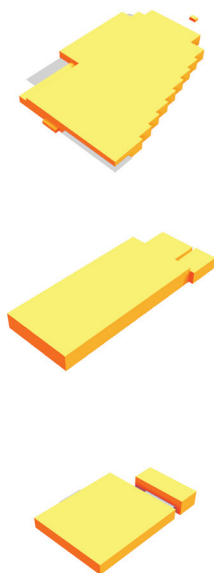


Abb. 180:
Beispiele von Strahlungssituationen auf Baukörpern
Quelle: Eigene Darstellung

Reales Strahlungspotenzial (RED 2)

Unter Berücksichtigung verschattender Einflüsse der Umgebung und untergeordneten Bauteilen werden bei den untersuchten Testgebäuden gleiche Strahlungsverläufe beobachtet, wie beim theoretischen Strahlungspotenzial. Abweichungen finden sich nur im Nachkommabereich. Das bedeutet, dass Fremdverschattung keinen messbaren Einfluss auf die Höhe simulierter Strahlungsmengen hat. Auch untergeordnete Bauteile an Fassade und Dach wirken sich nicht messbar aus. In der Realität ist jedoch sowohl im Dach- als auch im Fassadenbereich auf Einflüsse durch kurzzeitige Schlagschatten kleinerer Aufbauten zu achten.

Insgesamt wird das nutzbare Strahlungspotenzial in der Gebäudehülle hallenartiger Gebäude als sehr hoch und gut nutzbar bewertet.

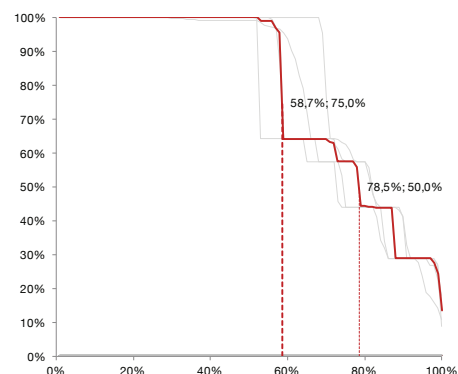


Abb. 181:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED0
Quelle: Eigene Darstellung

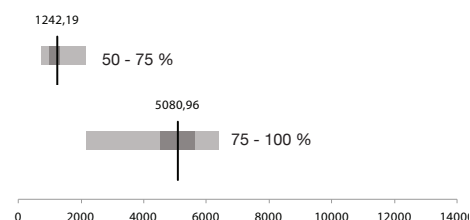


Abb. 182:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung

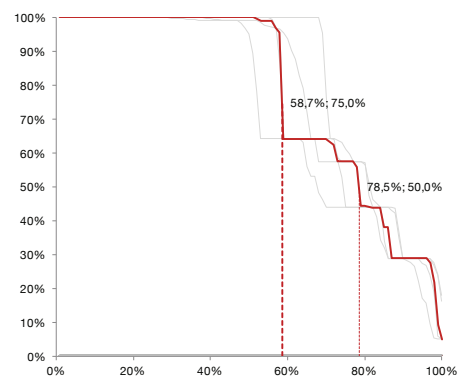


Abb. 183:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

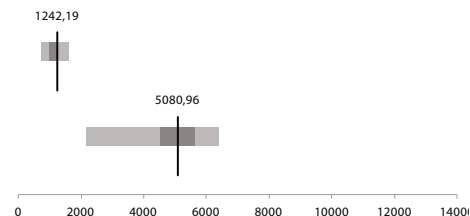


Abb. 184:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung

4.7.5.Strategie zur Aktivierung von Dach und Fassaden bei Hallenbauten

Thermische oder hybride solare Hallenfassaden

Die Fassade von Hallenbauten spielt in den vorangegangenen Untersuchungen nur eine untergeordnete Rolle. Zwänge bei der Integration von Systemen liegen in der oftmals geforderten Flexibilität in der Umgestaltung von Hallenfassaden mit dem Einbau von Türen, Toren oder weiteren Anbauten. Auch wird der unmittelbare Bereich vor Hallenfassaden oftmals als Abstell- oder Rangierfläche von Lastkraftwagen, Gütern oder Waren verwendet, welche eine nicht unerhebliche Teilverschattung evozieren können. Grundsätzlich bietet die Hallenfassade bei Neubauten das Potenzial einer thermischen oder partiell sogar einer hybriden solaren Aktivierung.

Elementiertes solaraktives Dachsystem

Die Aktivierung der Hüllflächen von Logistik- oder Produktionshallen wird als der wesentliche Schlüssel der Energiewende betrachtet. Der Grund hierfür liegt in den überproportional großen Anteilen der Dachflächen an der gesamten Gebäudehüllfläche. Die einleitend zu diesem Kapitel erfolgten Untersuchungen zur Häufigkeitsverteilung von Gebäuden zeigen, dass 16% aller Dachflächen im deutschen Gebäudebestand Hallen sind. Diesen systematisch zu aktivieren, birgt ein enormes regeneratives Energiepotenzial.

Hallendächer werden dabei entweder als südgeneigtes Sheddach oder als Flachdach errichtet. Somit weist dieser Typus eine ideale Ausrichtung und Zuschnitt für eine Solarenergienutzung auf. In der Praxis werden bereits viele bestehende Hallendächer mit solaren Systemen, insbesondere Photovoltaik, nachgerüstet. Hierbei treten oftmals jedoch bauliche Zwänge durch eine eingeschränkte Tragfähigkeit der bestehenden Dächer auf. Um Durchdringungen zu vermeiden werden oftmals Ballastierungen eingesetzt, welche die Solaranlage durch Gewicht auf dem jeweiligen Dach fixieren. Alle bisherigen Anwendungen sind rein additiv eingebunden. Eine Übernahme von Aufgaben der Gebäudehülle (z.B. Wetter-schutz, etc.) erfolgt dabei nicht.

Ein Ziel könnte es daher sein Systeme stärker zu integrieren und bisher oftmals notwendige Ballastierungen zu vermeiden. Eine Integration könnte zum Beispiel durch

einfache Foliensysteme oder sogar durch umfassend integrierte Elemente umgesetzt werden. Bei einer umfassenden Integration könnten aktive Systeme auch Aufgaben einer klassischen Dachkonstruktion übernehmen und gleichzeitig Energie produzieren. Diese könnten zu einem hohen Maße vorgefertigt und anschließend als fertiges Produkt vor Ort eingebaut werden. Die neue solare Dachhaut könnte dabei alle Aufgaben des Wetterschutzes übernehmen. Im Falle eines technischen Defektes könnten einzelne Dachelemente ausgetauscht und ersetzt werden.

Die Hallenfassade fällt im Anteil aller Fassadenflächen im Gegensatz zu den enormen Dachflächen eher gering aus. Anforderungen an Einfahrten, Toren, Fenstern, Anbauten und weiteren funktionalen Elementen schränken eine flächige Aktivierung weiter ein. Dementsprechend wird die Aktivierung einer Hallenfassade nur im Einzelfall empfohlen.

Dachflächen

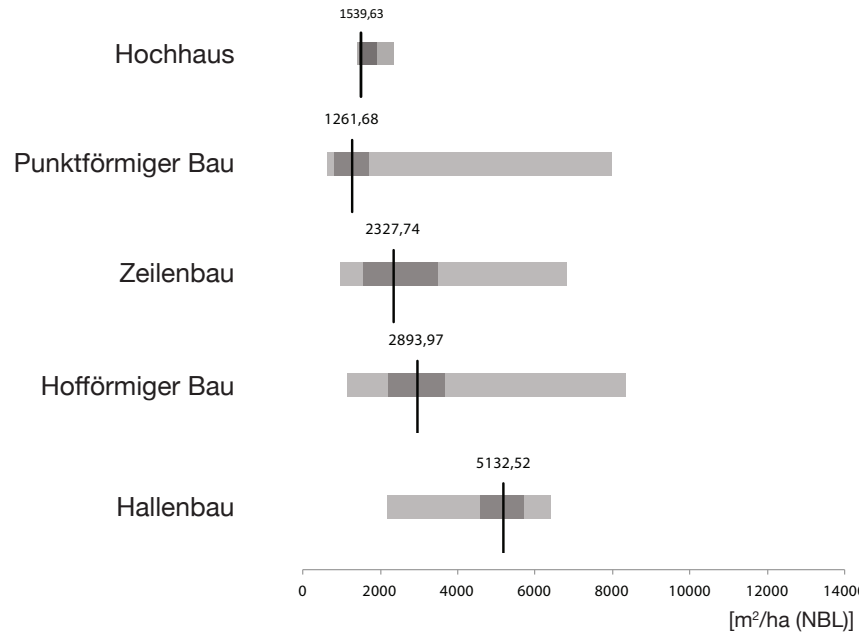


Abb. 186:
Hochexponierte Dachflächen pro Hektar Nettobauland (spezifische Strahlung von 750 bis 1000 kWh/(qm*a))
Quelle: Eigene Darstellung

Fassadenflächen

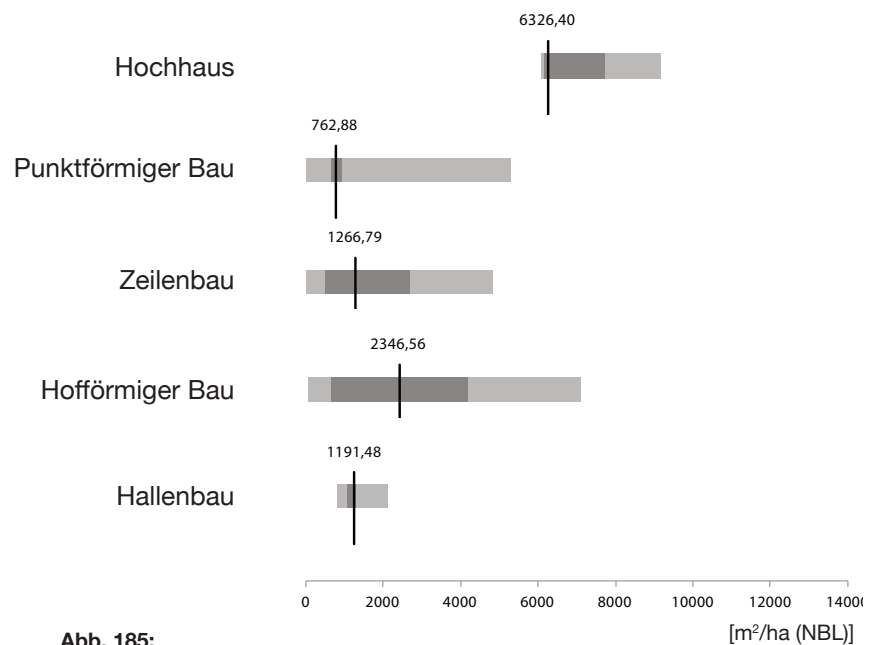


Abb. 185:
exponierte Fassadenflächen pro Hektar Nettobauland (spezifische Strahlung von 500 bis 750 kWh/(qm*a))
Quelle: Eigene Darstellung

4.8. Vergleichende Betrachtung verfügbarer Strahlungspotenziale nach Typologie

Im direkten Quervergleich zwischen den einzelnen Testgebäuden werden die variierenden Potenziale jeweiliger Dach- und Fassadenflächen nochmals deutlich sichtbar. So untermauern die nebenstehenden Grafiken die zuvor beschriebenen Potenzialbewertungen und Handlungsfelder. Aufgrund der betrachteten Menge sind die Untersuchungen statistisch nicht repräsentativ, dennoch geben sie eindeutige Tendenzen wieder.

Im Quervergleich zeigen sich bei den Dachflächenpotenzialen, dass Hallenbauten ein mit deutlichem Abstand größtes Potenzial aufweisen. Mit gewissem Abstand folgen hofförmige Bauten und Zeilengebäude. Das geringste Potenzial weisen den Untersuchungen nach Hochhäuser und punktförmige Bauten (vgl. nebenstehende obere Grafik: schwarze Markierungslinie des Medianwertes) auf.

Insgesamt liegen 50% aller analysierten Gebäude in engen Bandbreiten. Die größte Streuung hierbei weisen die untersuchten Zeilengebäude auf (vgl. nebenstehende obere Grafik: dunkelgrauer Bereich) auf. Bei den hofförmigen und punktförmigen Bauten lässt sich zudem eine größere Streuung der oberen 25% (3. Quartil) analysierter Testgebäude beobachten. Das bedeutet, dass innerhalb der untersuchten Testgebäude einzelne wenige Exemplare mit großen bis sehr großen Dachflächen pro Hektar Nettobauland zu finden sind. Die Streuung der unteren 25% (1.Quartil) analysierter Testgebäude hingegen verläuft bis auf die Werte der Hallen bei allen weiteren Gebäudetypen in einem engen Korridor.

Bei den Strahlungspotenzialen auf Fassaden zeigen Hochhäuser mit deutlichem Abstand den größten Medianwert. Den zweitgrößten Wert weisen hofförmige Bauten auf. Die weiteren Typen Zeilenbau und Hallenbau liegen mit einem niedrigen Median eng beieinander. Den niedrigsten Median weisen punktförmige Bauten auf. Die Werteverteilung der Fassadenpotenziale ist bei einigen Typen ebenfalls mit einer größeren Streuung versehen. So liegen 50% aller hofförmigen Bauten in einem breiten Wertekorridor. Auch Zeilenbauten zeigen eine vergleichsweise breitere Streuung (vgl. nebenstehende untere Grafik: dunkelgrauer Bereich) auf. Wie schon bei den Dachflächen beobachtet, brechen die Werte der oberen 25% (3.Quartil) auch hier bei mehreren Typen aus. So finden sich entsprechend große Korridore bei der punktförmigen Bebauung, hofförmigen Bauten und Zeilenbauten wieder.

Trotz beschriebener Unschärfen bilden sich eindeutige Tendenzen in der Höhe möglicher Strahlungspotenziale nach Gebäudetyp. So erscheinen Hallenbauten für eine systematische Aktivierung der Dachflächen besonders geeignet. Daneben finden sich große Potenziale bei hofförmigen Bauten und beim Zeilenbau. Eine Aktivierung von Dachflächen sollte demnach bei diesen Typen im besonderen Fokus stehen. In der solaren Fassadennutzung sticht das Hochhaus aus allen weiteren Gebäudetypen hervor. Weitere Eignungen finden sich auch hier bei hofförmigen Bauten und beim Zeilenbau.

5. Projektion und überschlägige Abschätzung zum Potenzial gebäudebezogener Solarenergienutzung

Die zuvor simulierten solaren Fingerabdrücke lassen sich mit der ebenfalls getätigten Recherche zur Häufigkeitsverteilung kombinieren. Ziel dabei ist es eine überschlägige Hochrechnung zur Quantifizierung des Solarenergiepotenzials des deutschen Gebäudebestandes zu erhalten. Aufgrund der vielen Unschärfen in der bisher zur Verfügung stehenden Datengrundlage soll dieses Verfahren als erste große Annäherung einer gebäudebasierten solaren Energiegewinnung und hierbei als Möglichkeitsraum verstanden werden.

Methode

Die Hochrechnung erfolgt anhand der Häufigkeitsverteilungen auf Datengrundlage von Bürger; Hesse; Quack (2016). Die in dieser Zusammenstellung beschriebenen Flächenangaben zu Dach- und Fassaden werden mit den Strahlungsverläufen der ermittelten solaren Fingerabdrücke kombiniert und zu einer Gesamtsumme hochgerechnet.

Sofern eine eindeutige Zuweisung der in dieser Arbeit verwendeten Gebäudetypen zu den Klassifizierungen von Bürger; Hesse; Quack (2016) möglich ist, werden den angegebenen Dach- und Fassadenflächen jeweilige solare Fingerabdrücke zugewiesen. Da ein größerer Anteil der in der Literatur beschriebenen Gebäude nicht eindeutig zugewiesen werden kann, wird ein synthetischer solarer Fingerabdruck generiert, welcher in allen Bereichen den negativsten Strahlungsverlauf aufweist. Hierbei wird sichergestellt, dass die getätigten Hochrechnungen eher konservativ bilanziert werden.

Einen weiteren großen Einflussfaktor auf die Höhe der Solarpotenziale bildet das Belegungsmaß aktiver Systeme auf Fassaden- und Dachflächen. Je umfangreicher Hüllflächen belegt werden, desto höher fällt folglich auch das Strahlungspotenzial aus. Begrenzender Faktor einer maximalen Belegung sind in der Realität Anforderungen aus der Konstruktion und Tragstruktur sowie vor allem aus baukulturellen Gründen. Deshalb werden die Berechnungen in ein „unteres“ und „oberes“ Potenzial unterschieden. Das „obere“ Potenzial stellt dabei einen theoretischen Wert dar, der nur bei einer Belegung von 80% aller Dachflächen und 60% aller Fassadenflächen erreicht würde. Demgegenüber wird ein „unteres“ Potenzial gestellt, welches lediglich eine Nutzung von 10% der Dach- und Fassadenflächen vorsieht. Dieser Wert wird als durchaus realistisch in der Umsetzung erachtet.

Nach einer Berechnung des oberen und unteren Strahlungspotenzials werden mögliche solare Strom- und Wärmeerträge bestimmt. Hierfür werden typische Umwandlungskennwerte von 10% Systemwirkungsgrad für Photovoltaik und 80% Systemwirkungsgrad für Solarthermie hinterlegt. Beide Erträge werden im Anschluss mit Kennwerten zum deutschen Nettostrombedarf sowie zum gebäudebezogenen Wärmebedarf überlagert. Werte hierfür sind den Datensammlungen von statista.de (2017) für den Nettostrombedarf (2017) und BMWi (2015) für den Nutzwärmebedarf (2013) entnommen.

Ergebnisse

Die beschriebene Analyse hat ein enormes theoretisches Potenzial einer solaren Energienutzung im deutschen Gebäudebestand identifiziert. Sowohl bei der solaren Strom-, als auch bei der Wärmeproduktion können wesentliche Anteile des Nettostrom-, beziehungsweise Nutzwärmebedarfs gedeckt werden. Bei der Betrachtung des oberen Potenzials lassen sich bei einer kombinierten Dach- und Fassadenaktivierung bis zu 78% des Nettostrombedarfs und ein Vielfaches des Nutzwärmebedarfs decken. Da sich dieser Wert aus vielfältigen Einschränkungen in diesem Maße nicht umsetzen lassen wird, wird ein unteres Potenzial ausgewiesen. Selbst bei einer reduzierten Aktivierung des Bestandes lassen sich bis zu 11% des deutschen Nettostrombedarfs und bis zu 57% des Nutzwärmebedarfs decken. In welchem Bereich zwischen unterem und oberem Potenzial sich langfristig ein Ausbau der solaren Energiegewinnung einpendelt, kann bisher noch nicht beurteilt werden. Trotzdem zeigen die Ergebnisse, dass die solare Aktivierung des Gebäudebestandes einen signifikanten Beitrag zur Umsetzung der Energiewende leisten kann. Sie bildet dabei eine wichtige Säule innerhalb des Transformationspfades hin zu einer regenerativen Energieerzeugung.

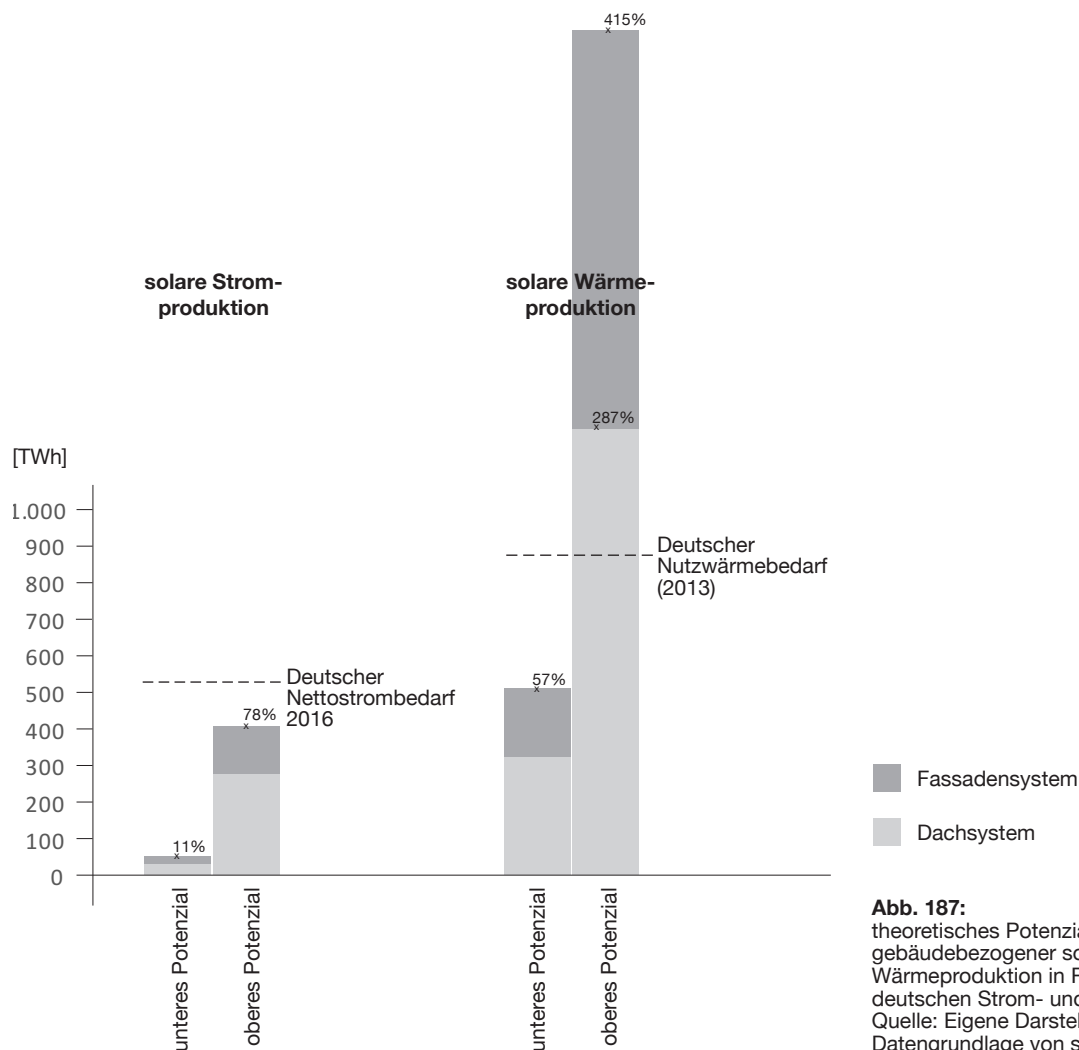


Abb. 187: theoretisches Potenzial gebäudebezogener solarer Strom- und Wärmeproduktion in Relation zum deutschen Strom- und Wärmebedarf; Quelle: Eigene Darstellung auf Datengrundlage von statista.de (2017) und BMWi (2015)

Literaturverzeichnis

BMVBS (2011)

BMVBS: Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland; 2011; abgerufen von: <http://www.irbnet.de/daten/baufo/20118035380/Endbericht.pdf>; Zugriff am: 22.07.2016

BMVBS (2013)

BMVBS: Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude
Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen; 2013; abgerufen von: http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2013/DL_ON272013.pdf?__blob=publicationFile&v=4; Zugriff am: 12.08.2016

BMWi (2015)

BMWi: Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi; 2015; abgerufen von: <https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/energiedaten-gesamtausgabe.html>; Zugriff am: 2015

Bürger; Hesse; Quack (2016)

Bürger, Veit; Hesse, Tilman; Quack, Dietlinde: Klimaneutraler Gebäudebestand; 2016; abgerufen von: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_06_2016_klimaneutraler_gebaeudebestand_2050.pdf; Zugriff

Bürger; Hesse; Quack et al. (2016)

Bürger, Veit; Hesse, Tilman; Quack, Dietlinde; Palzer, Andreas; Köhler, Benjamin; Herkel, Sebastian; Engelmann, Peter: Klimaneutraler Gebäudebestand 2050; 2016; abgerufen von: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_06_2016_klimaneutraler_gebaeudebestand_2050.pdf; Zugriff am 20.06.2017

Deilmann; Bickenbach; Pfeiffer (1977)

Deilmann, Harald; Bickenbach, Gerhard; Pfeiffer, Herbert: Wohnbereiche Wohnquartiere - Housing Groups - Zones d'habitat; Stuttgart 1977

Destatis (2015)

Destatis: Zensus 2011
Gebäude- und Wohnungsbestand in Deutschland; 2015; abgerufen von: https://www.zensus2011.de/SharedDocs/Downloads/DE/Publikationen/Aufsaeetze_Archiv/2015_12_NI_GWZ_endgueltig.pdf?__blob=publicationFile&v=4; Zugriff am: 08.08.2016

Diefenbach (2013)

Diefenbach, Nikolaus: Basisdaten für Hochrechnungen mit der Deutschen Gebäudetypologie des IWU: Neufassung Oktober 2013; 2013; abgerufen von: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/FI%3%A4chen_Geb%3%A4udetypologie_Okt_2013.pdf; Zugriff am: 11.08.2016

Diefenbach; Cischinsky; Rodenfels et al. (2010)

Diefenbach, Nikolaus; Cischinsky, Holger; Rodenfels, Markus; Clausnitzer, Klaus-Dieter: Datenbasis Gebäudebestand
Datenerhebung zur energetischen Qualität und zu den Modernisierungstrends im deutschen Wohngebäudebestand; 2010; abgerufen von: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Endbericht_Datenbasis.pdf; Zugriff am: 09.08.2016

Everding (2007)

Everding, Dagmar: Projekte, Lösungsmodelle und Anforderungsprofile eines solaren Städtebaus; In: Everding, Dagmar (HG.): Solarer Städtebau Stuttgart 2007

Hegger; Dettmar; Martin et al. (2012)

Hegger, Manfred; Dettmar, Jörg; Martin, Alexander; Meinberg, Thomas; Boczek, Barbar; Drebes, Christoph; Greiner, Mirka; Hesse, Ulrike; Kern, Tobias; Mahlke, Debora; Najjar, Anton Al; Schoch, Christiane; Schulze, Joachim; Sieber, Sandra; Stute, Volker; Sylla, Ousmane; Wurzbacher, Steffen; Zelmer, Andrea: Eneff:Stadt | Forschungsprojekt „UrbanReNet“ Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum - Schlussbericht (Schlussbericht); Darmstadt 2012

Institut Wohnen und Umwelt GmbH (2005)

Institut Wohnen und Umwelt GmbH: Deutsche Gebäudetypologie Systematik und Datensätze; 2005; abgerufen von: http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/klima_altbau/Gebaudetypologie_Deutschland.pdf; Zugriff am: 20.08.2012

Loga; Stein; Diefenbach et al. (2015)

Loga, Tobias; Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf: Deutsche Wohngebäudetypologie
Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden; 2015; abgerufen von: http://www.building-typology.eu/downloads/public/docs/brochure/DE_TABULA_TypologyBrochure_IWU.pdf; Zugriff am: 08.08.2016

Meteotest Genossenschaft (2017)

Meteotest Genossenschaft: meteonorm 7 Globale meteorologische Datenbank für Ingenieure, Planer und Ausbildung; 2017; abgerufen von: <http://www.meteonorm.com/>; Zugriff am: 13.07.2017,

Oschatz; Rosenkranz; Mailach et al. (2012)

Oschatz, Bert; Rosenkranz, Jens; Mailach, Bettina; Gritzki, Ralf; Kaiser, Jens; Perschk, Alf; Rösler, Markus; Seifert, J.; Otto, Frank: Gesamtanalyse Energieeffizienz von Hallengebäuden; 2012; abgerufen von: <http://www.irbnet.de/daten/rswb/12079004342.pdf>; Zugriff am: 28.10.2016

Reinhardt; Trudel (1979)

Reinhardt, Walter; Trudel, Helmut: Wohndichte und Bauungsformen : praktische Entscheidungshilfen für die kommunale Planung; Stuttgart 1979

Roth (1980)

Roth, Ueli: Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen : Forschungsprojekt BMBau RS II 4-704102-77.10 (1980); Bonn 1980

Schlomann; Dütschke; Gigli et al. (2011)

Schlomann, Barbara; Dütschke, Dr. Elisabeth; Gigli, Michaela; Steinbach, Jan; Kleeberger, Heinrich; Geiger, Dr. Bernd; Linhardt, Antje; Gruber, Edelgard; Mai, Michael; Gerspacher, Andreas; Schiller, Werner: Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2007 bis 2010
Bericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi); 2011; abgerufen von: http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/e/de/publikationen/GHD-Erhebung_Bericht_Energieverbrauch_2006-2010.pdf;
Zugriff am: 12.08.2016

statista.de (2017)

statista.de: Nettostromverbrauch in Deutschland in den Jahren 1991 bis 2014 (in Terawattstunden); 2017; abgerufen von: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/164149/umfrage/netto-stromverbrauch-in-deutschland-seit-1999/>; Zugriff am: 11.09.2015

Wurzbacher (2017)

Wurzbacher, Steffen: Zum Verhältnis urbaner Bebauungstypen und Energie - Analysen zu Interdependenzen von Orientierung, Form- und Struktureigenschaft urbaner Bebauungstypen und einer solaren Strombereitstellung unter den Paradigmen, Leistung' und ,Energie'; Lemgo 2017

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn

Dynamische Betrachtungen solaradaptiver polyfunktionaler Fassaden (Teil 4)

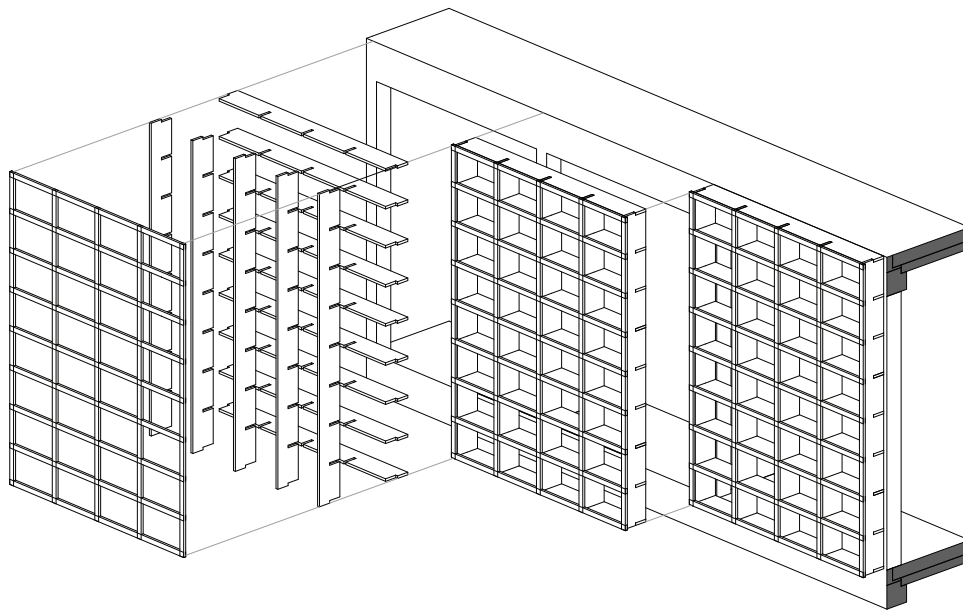
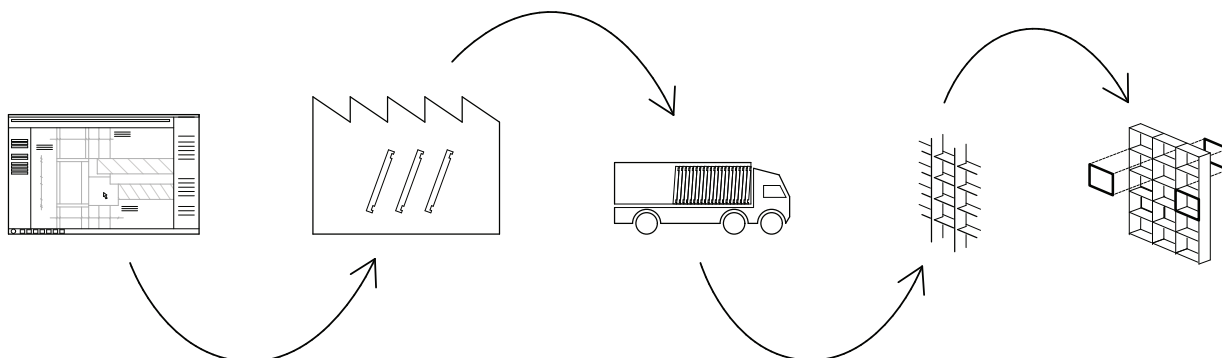


Abb. 188:
Die Flexibilisierung der Produktion
und Anwendung technischer
Solarenergiesysteme durch hohen
Vorfertigungsgrad projektspezifischer
Anwendungen
Quelle: Eigene Darstellung



Detailplanung

Fassadenplanung
mit Anpassung von
Rastermaßen und
Öffnungen nach
Anforderungen der
Baufaufgabe

Vorfertigung

Weitestgehende
Vorfertigung der
Fassadenbauteile im
Werk auf Grundlage
der spezifische
Objektplanung

Transport

Dimensionierung der
Fassadenelemente als
stapelbare Konstruktion
zum einfachen Transport
der Bauteile zum
Errichtungsort

Errichtung

Konstruktionsprinzip
aus passgenauen
Steckverbindungen zur
schnellen Errichtung vor
Ort

Abb. 189:
Integraler Planungs-, Vorfertigungs-
und Errichtungsprozess
Quelle: Eigene Darstellung

1. Prinzip polyfunktionaler solaradaptiver Fassaden

Die vorangestellten gebäudetypologischen Untersuchungen zu Solarenergieerträgen der Gebäudehülle haben gezeigt, wie differenziert die Bereiche von Gebäudeoberflächen in unterschiedlichen Morphologien durch direkte und indirekte Solarstrahlung beschienen werden. Die solaren Fingerabdrücke drücken entsprechend stark schwankenden Flächenanteilen solar hoch exponierter Bereiche in den Hüllflächen von Gebäuden aus. Diese Tatsache bedingt in der Entwicklung von solaraktiven Hüllbauteilen ein Hüll- und Funktionsprinzip, dass die Möglichkeit schafft flexibel und situativ Bereiche zur Nutzung von Solarenergie mit konventionellen Konstruktionsformen zu kombinieren. Adaptiv müssen daher nach gebäudetypologischer Eignung von Bereichen der Fassade oder des Daches solarenergie-nutzende Funktionen in das Regelbauteil bedarfsgerecht integrierbar sein.

Dabei haben die vorgangegangenen Analysen gezeigt, dass ein im Stadtbild sichtbar werdendes und großflächig Anwendung findendes System eine hohe Flexibilität in gestalterischer und ausdrucksgebender Hinsicht zu erfüllen hat. Architektonisch gewünschte spezifische Ausdrucksformen sind dabei ebenso zu bieten, wie Lösungen zur Integration untergeordneter Bauteile, Ein- und Aufbauten und Übergängen an Ecksituationen von Gebäuden. Der daraus resultierende und notwendige integrale Planungsprozess bedingt einerseits einen hohen Sachverstand der beteiligten Gewerke und Planer aber ermöglicht zudem bei heutigen Fertigungstechniken planungsspezifische und passgenaue Lösungen zu erreichen.



Abb. 190:
Flexibles Raster als vorgehängtes
Element und Tragstruktur solaraktiver
Systeme
Foto: FG ENB, Luica Kulinsky

1.1. Anforderungen und Aufgaben einer solaradaptiven Fassade

Eine selbstverständliche Einbindung von Solarenergie in künftigen Gebäudekonzepten bedarf des integralen Planungsprozesses. In den frühen Leistungsphasen der Gebäudeplanung sind die Aspekte der Solarenergienutzung bereits zu konzeptionieren um architektonische Umsetzungen zu erreichen. Ein möglichst flexibler Umgang zur Verwendung von Solarenergie am Gebäude ist daher Grundvoraussetzung, bietet jedoch andererseits die Chance nutzungsspezifische Lösungen zu erreichen. Typgebäude- und nutzungsspezifische Lösungen werden dazu beitragen eine vielfältigere und dadurch breitere Anwendungsmöglichkeit und Ausdrucksform im baulichen Kontext zu erhalten. Im Rahmen des hiesigen Forschungsprojektes wurde sich zur Betrachtung der Möglichkeiten in der Nutzung von Solarenergie auf die gestalterisch sensiblen Bereiche der Fassade konzentriert (auf Grund deren Einsehbarkeit und unmittelbare Wirkung auf das umgebende Stadtbild). Die nachfolgenden Seiten zeigen einen möglichen Ansatz des zukünftigen Umgangs mit Fassaden, der in weiterführenden Forschungen auch im Bereich des Daches oder in untergeordneten Bauteilen Anwendung finden könnte.

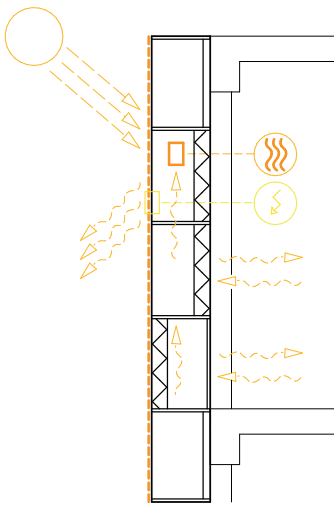


Abb. 191:
Aktive und passive energetische
Funktionen der Fassade
Quelle: Eigene Darstellung

Das hier entwickelte Fassadenprinzip bedient sich dabei heutiger Planungs- und Produktionsmöglichkeiten zur Realisierung eines objektspezifischen Fassadenbauteils. Die daraus entstehende Abhängigkeit zwischen Fertigung und Planung benötigt die frühzeitige Abstimmung der architektonischen und energetischen Vorstellungen und Abhängigkeiten zwischen Architekt und produzierendem Gewerk.

Das entwickelte Prinzip der Polyfassade (Px-Fassade) geht von einer konstruktiven Grundstruktur aus (konstruktiver Rost oder kleinteiliges, sich wiederholendes Element), die entsprechend der Gebäudenutzung bedarfsgerecht neben klassischen Aufgaben von Hüllflächen solarenergiegewinnende Funktionen adaptieren kann. Erste konstruktiv ausformulierte Anwendungsbeispiele und deren energetische Verhaltensweisen finden sich auf den nachfolgenden Seiten.

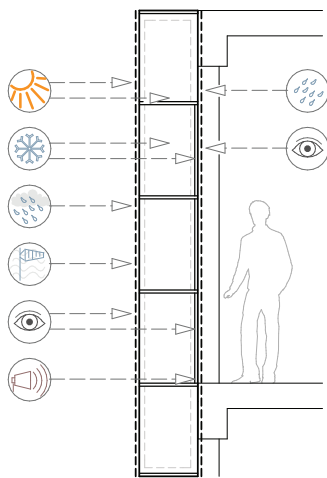


Abb. 192:
Schutz- und Kommunikationsfunktionen
der Fassade
Quelle: Eigene Darstellung

Der integrale Ansatz unter frühestmöglicher Einbeziehung der produzierenden Gewerke in den Planungs- und Entwicklungsprozess können passgenaue solaraktive Lösungen für individuelle Gebäudeplanung ermöglichen. Nach ersten Aussagen beteiligter Industrieunternehmen im Rahmen der vorangestellten Studie zeigte sich, dass dieser Ansatz auch aus produktionstechnischer Sicht eine denkbare Herangehensweise wäre (Hegger et al. 2015). Der daraus folgende optimierte Bauablauf - bei gleichzeitiger konstruktiver, wie technischer Ausschöpfung der Möglichkeiten solarenergiegewinnender Systeme - lässt ökonomische Skalen- und Einsparungseffekte erwarten, die anfallende Mehrkosten perspektivisch im Hinblick auf zukünftige Energiestandards substituieren könnten. Die begleitend betrachteten Lebenszykluskosten der auf den folgenden Seiten dokumentierten und untersuchten Bauteile zeigt einige Möglichkeiten der langfristigen Deckung von Mehrkosten gegenüber gleichwertigen Regelfassaden- und Dachlösungen auf.

Dabei bietet der Grundansatz polyfunktionaler Fassaden durch die bedarfsgerechte, adaptive Einbindung von passiven und aktiven energetischen Funktionen attraktive Potenziale zur Materialersparnis und Kostensenkung. Ausgehend von klassischen Aufgaben der Fassade zum visuellen, thermischen, akustischen und energetischen Schutz vor äußeren Einflüssen, der Aufnahme konstruktiver Eigenschaften für Fassade oder Gebäude, sowie der architektonischen und innenräumlichen Erscheinung und des Ausdrucks, bietet die ergänzende Einbindung energetischer Aspekte die Chance, Fassadenaufbauten künftig durch Wegfall oder Reduktion bisher gängiger Materialien zu vereinfachen.

Mit dem Prinzip der polyfunktionalen Fassade wird die Solarenergienutzung als integrale Anforderung der Gebäudehülle definiert und bietet im Vorgriff auf zukünftige Energiestandards eine gebäudenahere regenerative Energienutzung mit gestaltungsflexibler Anwendbarkeit. Die ganzheitliche Integration energetischer Potenziale in Fassaden könnte im Bestand ebenso, wie auch in neu entwickelten Fassaden ermöglichen, diese energetisch und bauphysikalisch zu optimieren beziehungsweise Materialien oder den Grad der Komplexität zu reduzieren.

Die polyfunktionale Fassade gliedert sich in drei wesentliche aufeinander aufbauende Schichten, die unterschiedliche Funktionen der Fassade übernehmen und je nach innerer Nutzungsanforderung variabel konfigurierbar sind. Die äußere und innere Schicht als gebäude- und raumabschließende Ebenen bedingen neben Schutzfunktionen der Unterkonstruktion und des Inneraums durch die Einsehbarkeit eine möglichst hohe Varianz und Flexibilität in der Ausformulierung der Oberfläche. Über dies hinaus bietet insbesondere die äußere Schicht die Möglichkeit zur bedarfsgerechten Adaption energiegewinnender Systeme wie Photovoltaik oder Solarthermie. Entsprechend eignet sich die innere Schicht bevorzugt zur Ausbildung der thermischen Ebene.

Getragen werden die bekleidenden Fassadenschichten durch einen inneren konstruktiven, in hoher Genauigkeit vorgefertigten Rost aus ineinander gesteckten Pfosten und Riegeln. Dessen variable Dimensionierung und konstruktiver Aufbau ermöglicht es, verschiedenartige Funktionen aufzunehmen und nutzungsgerecht zu optimieren.

Entsprechend vorliegender Bedarfe des Gebäudes, resultierend aus Kubatur, Orientierung oder der Nutzung, können die Bauteile bedarfsgerecht konfiguriert und unterschiedliche aktive und passive energetische Eigenschaften aufnehmen.

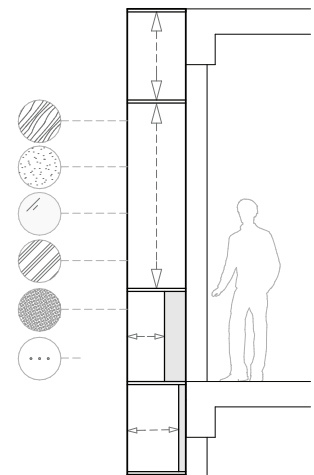


Abb. 193:
Variabilität in Dimension, Materialität
und Ausführung
Quelle: Eigene Darstellung

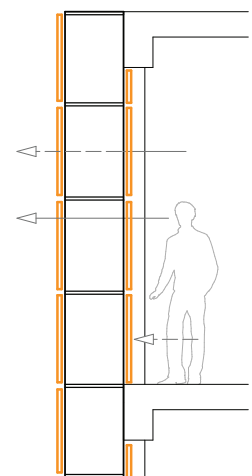


Abb. 194:
Gestaltungsvarianz für einsehbare
gebäude- und raumabschließende
Bauteilschichten bieten, in teil-
transparenten Bauteilen auch
einsehbare innere Oberflächen
beachten
Quelle: Eigene Darstellung

1.2. Übersicht integrierbarer Photovoltaiksysteme

Die Photovoltaik bietet heutzutage durch die mittlerweile verfügbare dritte Generation an photovoltaischen Systemen zur Erzeugung von elektrischer Energie aus Solarstrahlung variantenreiche Ausdrucksformen in Form, Farbe, Transparenzgrad oder Größe. Dabei zeigt sich bei genauerer Betrachtung, dass entgegen ursprünglicher Entwicklungen die im Fokus der Optimierung von Wirkungsgraden standen, mittlerweile Produkte angeboten werden, die auf Grund ihrer spezifischen Eigenschaften auch im Gebäudesektor als Hüllmaterialien eingesetzt werden. Wie die Vorgängerstudie benefit E1 zeigte, findet Photovoltaik seit einigen Jahren mit dominierendem Anteil der neu installierten Anlagen bereits im gebäudebezogenen Kontext Anwendung und bedingt in diesem Zusammenhang eine notwendige Vielfalt an Ausdrucksformen (Hegger; Drebes; Wurzbacher 2015 S.13 ff.).

1.2.1.Organische- und Farbstoff-Photovoltaik

Die dritte und aktuellste Generation an Photovoltaik befindet sich weiterhin in der Entwicklungsphase, aber zeigt in ersten Pilotanwendungen vielversprechende Möglichkeiten zur Erweiterung des Gestaltungsraums im Umgang mit stromerzeugenden Hüllmaterialien. Dabei bietet die auf Kohlenwasserstoffbasis beruhende Technologie durch Ergänzung mit Farbpartikeln die Möglichkeit unterschiedliche Farbigkeiten und Transparenzgrade zu erreichen. Gleichzeitig lassen sich flächige, homogene Erscheinungsbilder erreichen. Die zur elektronischen Verschaltung notwendige Trennlinienführung der einzelnen Zellen erlaubt, nach individuellen Vorgaben gelaserte Musterungen beziehungsweise durch mögliche Filigranität der Linien eine annähernd flächige Optik zu erreichen. Von Herstellerseite wird ein gutes Schwachlichtverhalten und eine relative Unempfindlichkeit gegenüber erhöhten Modultemperaturen propagiert. Dabei lassen diese Module auf Grund des Entwicklungsstandes und der Technologie zugrundeliegender Randbedingungen im Verhältnis zu anderen Photovoltaik Technologien einen niedrigeren Wirkungsgrad erwarten.

1.2.2.Dünnschicht-Photovoltaik

Die Dünnschichttechnologie als 2.Generation an Photovoltaik auf Basis amorphen Siliziums stellt seit Jahren bereits ein ausgereiftes System mit vergleichsweise hohen Wirkungsgraden dar. Dabei zeigt diese Technologie sowohl im Schwachlichtverhalten, wie auch bei erhöhten Modultemperaturen Einbußen im Wirkungsgrad. Durch Bedampfung der aktiven Fläche auf ein Trägermaterial lassen sich ebenfalls homogene Flächen erzeugen. Entgegen den organischen Zellen ist die Dünnschichtzelle standardmäßig opak im dunklen bis grünlichen Farbspektrum. Durch Siebdruckverfahren lassen sich unter Einbußen im Wirkungsgrad Oberflächen mit unterschiedlichen Farbigkeiten erreichen. Andererseits können durch Fräsung der aktiven Fläche unterschiedliche Transparenzgrade ermöglicht werden, die in Form von Kreis- oder Streifenrastern die Optik der Modulfläche gliedern.

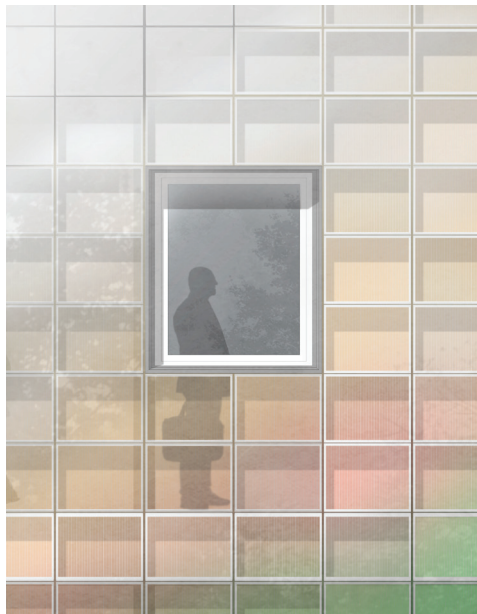


Abb. 195:
Organischer Photovoltaik;
Ausdrucksformen in Farbe, Struktur
und Wirkung
Quelle: Eigene Darstellung

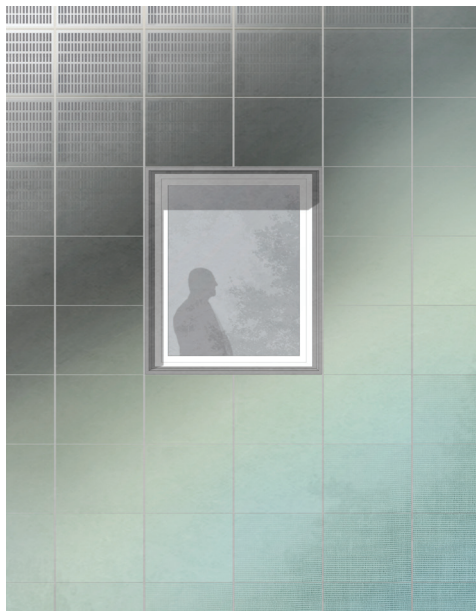


Abb. 196:
Dünnschicht Photovoltaik;
Ausdrucksformen in Farbe, Struktur
und Wirkung
Quelle: Eigene Darstellung

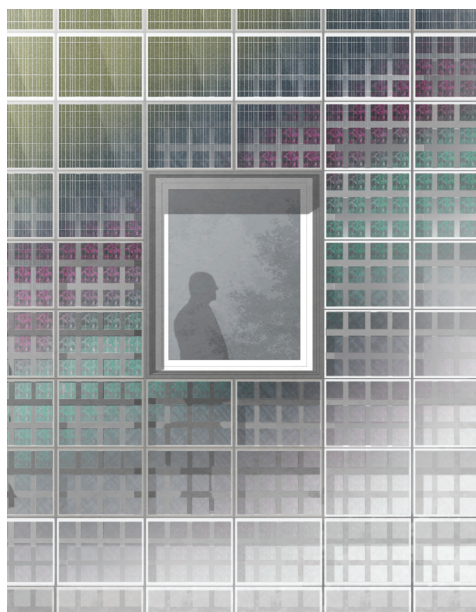


Abb. 197:
Kristalline Photovoltaik;
Ausdrucksformen in Farbe, Struktur
und Wirkung
Quelle: Eigene Darstellung

1.2.3. Kristalline Photovoltaik

Die kristalline Technologie ist ähnlich der Dünnschichttechnologie als ausgereiftes System mit sehr hohen Wirkungsgraden am Markt etabliert. Die Optik wird geprägt durch das sich wiederholende Muster an meist kristallin schimmernden Zellwafern. Dabei haben sich in den vergangenen Jahren eine Vielzahl von Farben, Größen und Formen durch Weiterentwicklung des Herstellungsverfahrens entwickeln können. Indem im Modul die einzelnen Wafer auf Abstand gesetzt werden lassen sich auch mit dieser Generation Transparenzen erreichen. Einige wenige, wie die aus architektonischer Sicht interessante Zellart ursprünglicher, reiner Siliziumzellen mit silbrig-grauer Erscheinung und kleineren, quadratischen Zellformat werden auf Grund geringerer Wirkungsgrade heutzutage jedoch nicht mehr verbaut. Die kristalline Struktur erreicht einen hohen Wirkungsgrad bei direkter Einstrahlung, erfährt jedoch Ertragseinbußen beziehungsweise Ertragsausfall bei Schwachlichteinfall oder erhöhten Modultemperaturen.

1.3. Integrierte solarthermische Nutzung

Die Nutzung von Wärmeenergie aus Solarstrahlung findet mit dem Einsatz unterschiedlicher Kollektortypen, häufig sole- oder wasser- aber auch luftgeführt, bereits in unterschiedlichen Bereichen Anwendung. Bis zum Jahr 2009 dominierte der Ausbau zur Nutzung von solarthermischen Systemen den Bereich regenerativer Energiegewinnung (Hegger; Drebes; Wurzbacher 2015 S.13 ff.). Seit dem stark gewachsenen Zuwachs jährlich installierter Leistung regenerativ erzeugtem Stroms ist die Anzahl neu installierter thermischer Anlagen moderater gewachsen. Dennoch zeigt sich auch weiterhin ein konstanter Zuwachs. Insbesondere in hybrider Anwendung in Kombination zwischen elektrischer und thermischer Energie zeigen sich auch zukünftig verschiedene Anwendungs- und Nutzungsmöglichkeit, sodass auch weiterhin die Behandlung des Wärmesektors im Gebäude von Interesse bleiben sollte. Aus diesem Grund bildet die synergetische, energetische Nutzung von Solarenergie im Gebäude auch in dem betrachteten Ansatz der polyfunktionalen Fassade den grundlegenden Ansatz zur ganzheitlichen Einbindung von Solarenergie in die energetische Betrachtung von Gebäuden.

1.3.1. Solarthermischer Kollektor (Luftkollektor)

Die nachfolgenden Bauteilausführungen des polyfunktionalen Prinzips als solarthermischer Kollektor schaffen die Möglichkeit, die in der Gebäudehülle gewonnene thermische Energie durch eine geführte Durchströmung innerhalb der Fassade bei Bedarf aktiv zu nutzen. Bei Gebäuden mit ganzjährigem oder erhöhtem Wärmebedarf könnte die gewonnene thermische Energie in den Energiekreislauf des Gebäudes eingebunden werden.

1.3.2. Solarthermische Dämmung

Mit dem Ansatz der solarthermischen Dämmung ist im Rahmen des Forschungsprojektes ein Prinzip gemeint, in dem mittels gekapselter Bauweise stehende Luftschichten innerhalb des Fassadenaufbaus als Pufferzonen erzeugt werden. Diese kleinteiligen Luftschichten ermöglichen es zwischen Innenraum- und Außenraumklima passiv durch Aufnahme von Solarenergie den Temperaturgradienten zu optimieren.

Photovoltaik

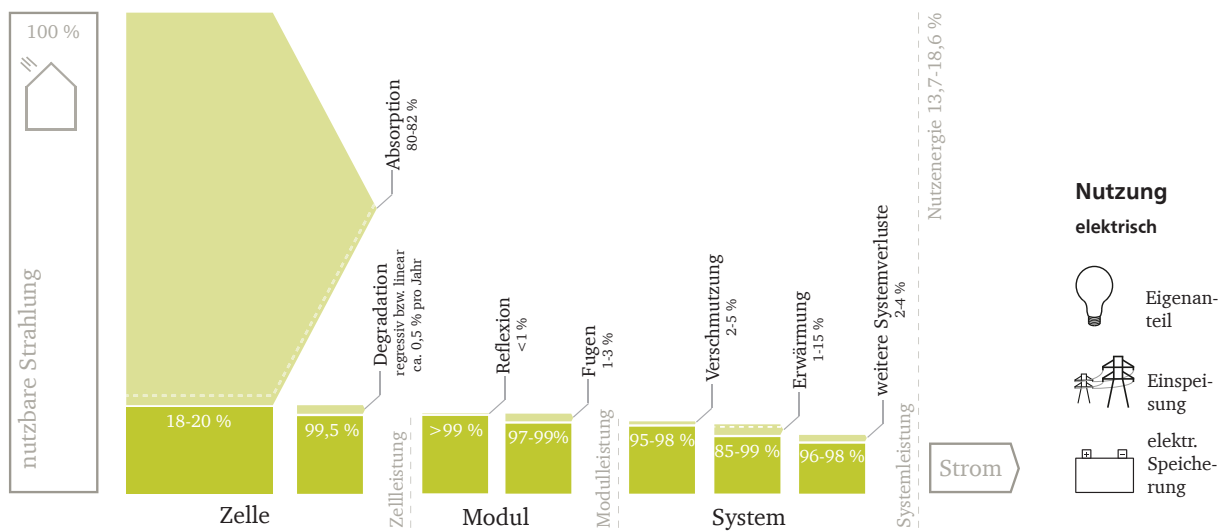


Abb. 198: Systemschema der Photovoltaik von der nutzbaren Solarstrahlung bis zur Systemleistung
Quelle: benefit E1

Luftkollektor

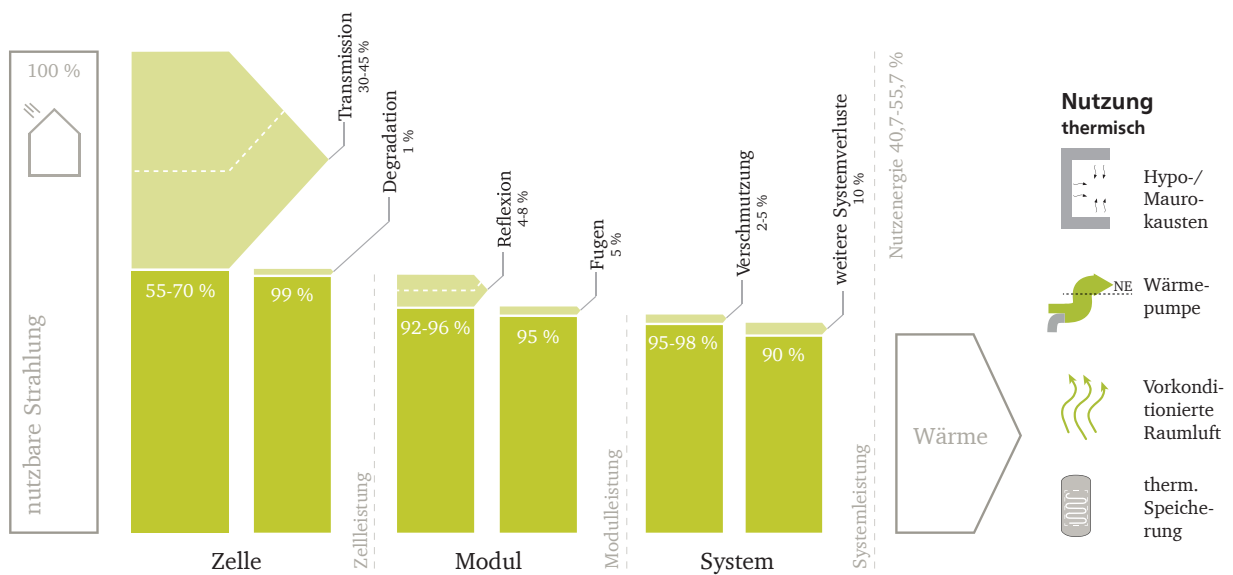
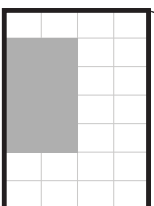
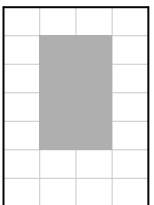
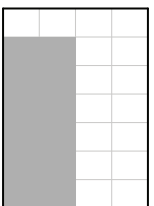
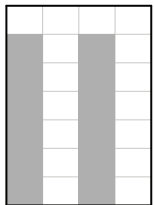
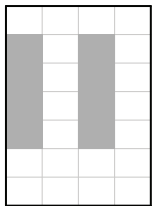
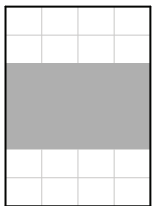
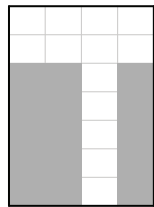


Abb. 199: Systemschema des Luftkollektors von der nutzbaren Solarstrahlung bis zur Systemleistung
Quelle: benefit E1



1.4. Strukturelle Anforderung und Gliederungsoptionen

In Anlehnung an die vorangestellten energetischen Erwartungen des polyfunktionalen Fassadenprinzips wurde dieses am Beispiel einer Büronutzung exemplarisch in Form eines im Maßstab M1:5 realisierten Mock-Ups entwickelt und realisiert.

Ausgehend von brandschutztechnischen Grundanforderungen für Bürofassaden und Überlegungen zu Anschlussmöglichkeiten von Bürotrennwänden beziehungsweise Decken- und Bödenanschlüssen an die Fassade wurde eine Studie zu Gliederungsmöglichkeiten eines Fassadensystemmoduls erstellt. Unter Einbeziehung gängiger Büroraster wurde ein Modulachsmaß von 3,675m Höhe zu 2,70m Breite gewählt. Innerhalb des Moduls strukturiert sich das für die weitere Planung des Mock-Ups und die nachfolgenden bauteilbezogenen dynamischen Betrachtungen als Grundlage dienende Raster in vier horizontale und sieben vertikale Bauteilachsen (Box/Wabe). Daraus ergibt sich eine Gesamtanzahl von 28 Waben/Boxen je Modul.

Diese Grundstruktur wurde unter anderem gewählt, um gängige Größen an Öffnungsflügeln in die Fassade einbinden zu können, so das bei Bedarf unter anderem ein 2.Rettungsweg über die Fassade realisiert oder weitere An- und Einbauten ermöglicht werden können.

Vertikale Stoßfugen auf Höhe der Geschossdecken dienen dabei zur geschossweisen Trennung der einzelnen Fassadenmodule. Es bietet sich so die Möglichkeit, energetisch-technische Funktionen in den Fugenzwischenräumen zu integrieren, aber auch die vertikale Definition von Brandabschnitten zu gewährleisten. Technische Fragen, unter anderem der Leitungsführung, beziehungsweise der Integration von Lüftungsfunktionen zur Erhöhung des Adaptiongrades des Fassadensystems können so ebenfalls realisiert werden.

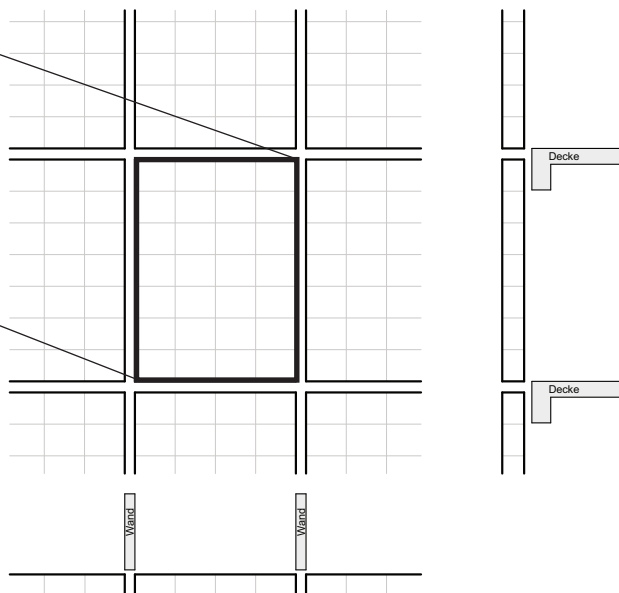


Abb. 200:
Umgangsmöglichkeiten mit dem
Grundraster als determinierende
Variable in der Fassadenkonstruktion
Quelle: Eigene Darstellung

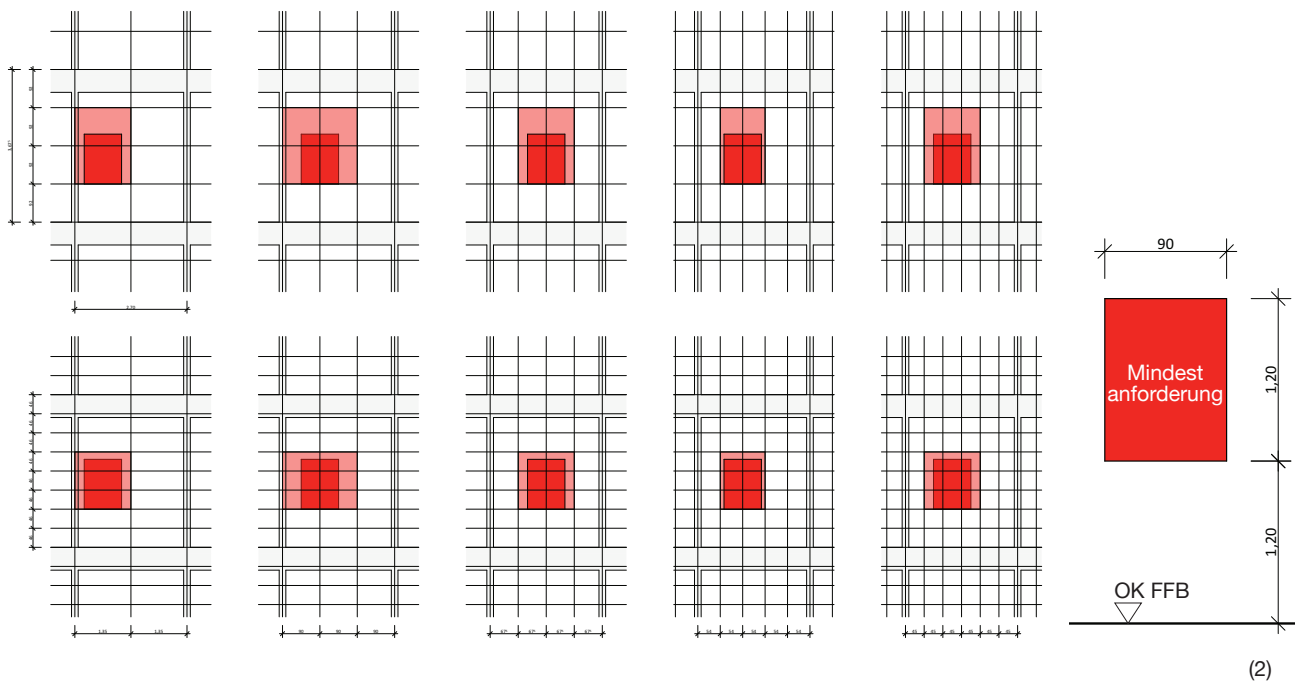
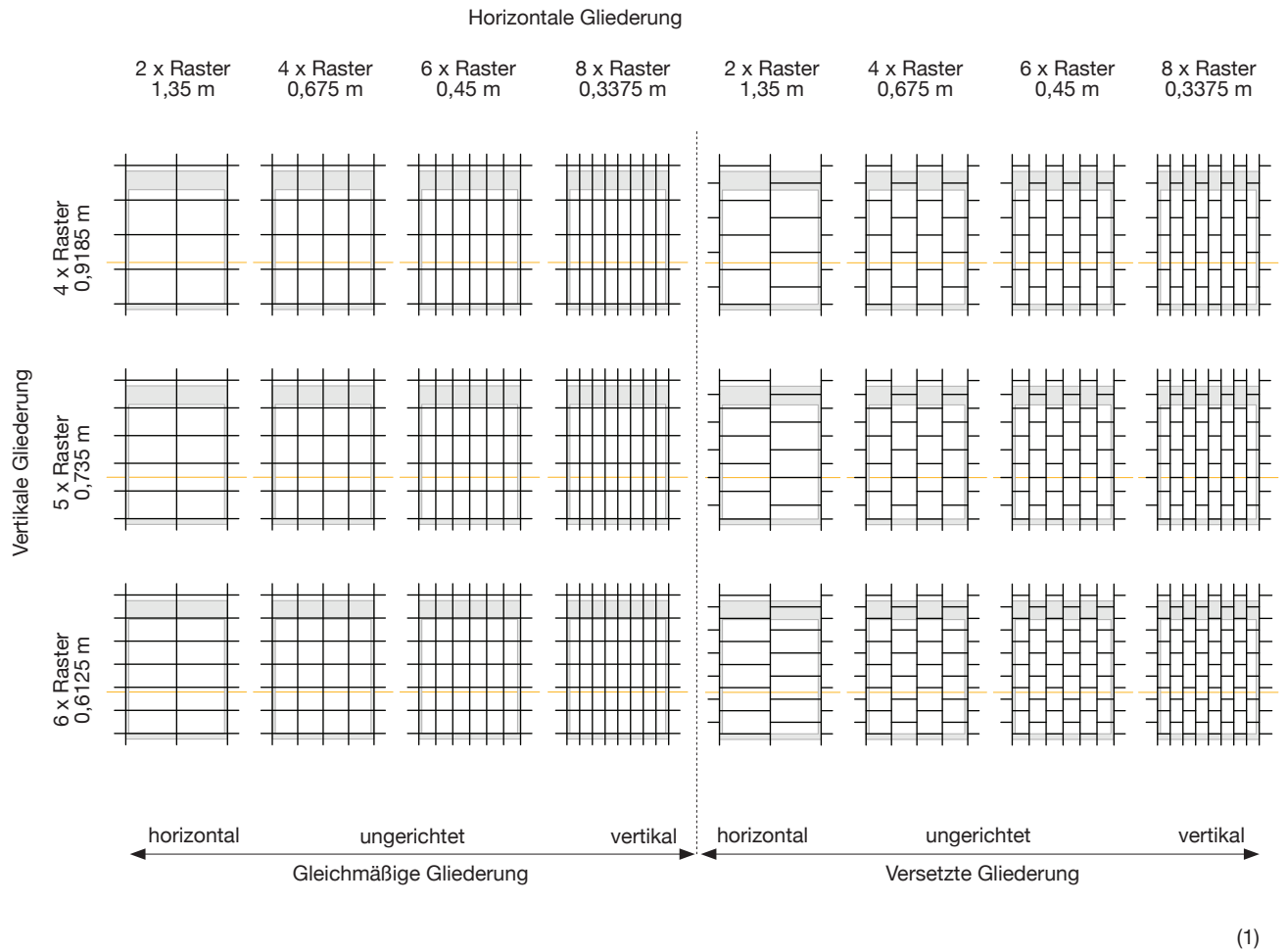


Abb. 201:
Studien zur Auswahl möglicher
Gliederungen von Fassaden zur
konzeptionellen Einbindung (1)
gängiger Maße und (2) Mindest-
anforderungen des Bürobaus
zur Einbindung von Fenstern
oder Anschlußmöglichkeiten von
Innenwänden
Quelle: Eigene Darstellung

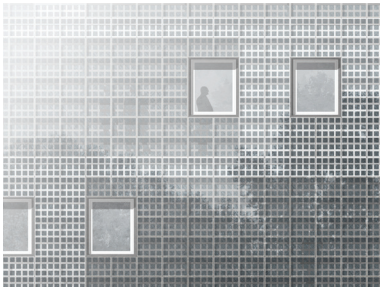


Abb. 202:
Monokristalline Wafer auf transparentem Trägermaterial vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen
Quelle: Eigene Darstellung

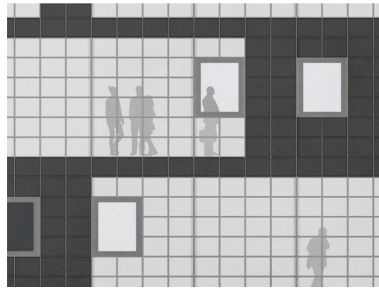


Abb. 213:
Organische Photovoltaik auf transparentem Trägermaterial vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen bei Nacht
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 204:
Transparente organische Photovoltaik vor Festverglasung mit sichtbarem konstruktiven Rost aus Funierschichtholz
Quelle: Eigene Darstellung

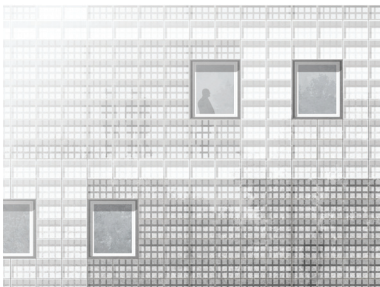


Abb. 210:
Monokristalline Wafer (weiß) auf transparentem Trägermaterial vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen
Quelle: Eigene Darstellung

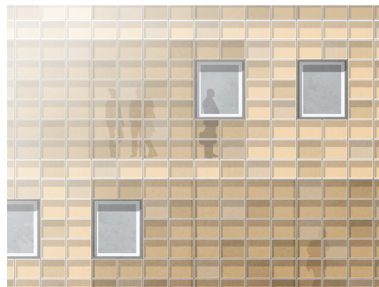


Abb. 203:
Organische Photovoltaik farbig auf transparentem Trägermaterial und Antiflex-Deckglas vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen
Quelle: Eigene Darstellung

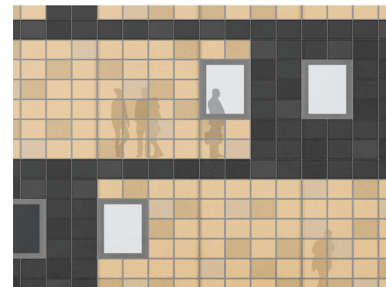


Abb. 208:
Organische Photovoltaik farbig auf transparentem Trägermaterial und Antiflex-Deckglas vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen bei Nacht
Quelle: Eigene Darstellung

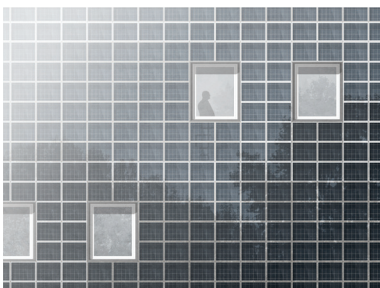


Abb. 211:
Polykristalline Photovoltaik-Elemente, exemplarisch in blauer Einfärbung als opake Fläche
Quelle: Eigene Darstellung

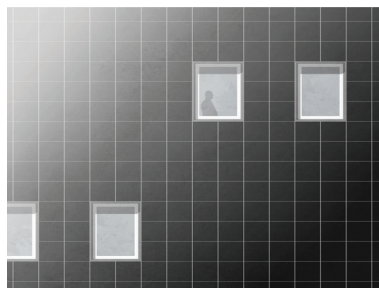


Abb. 206:
Dünnschicht-Photovoltaik opak
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 205:
Transluzente organische Photovoltaik farbig vor Festverglasungen
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 212:
Organische Photovoltaik auf transparentem Trägermaterial und Antiflex-Deckglas vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen
Quelle: Eigene Darstellung

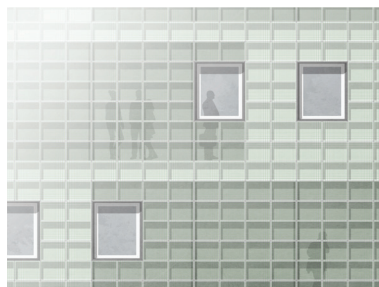


Abb. 209:
Farbige organische Photovoltaik individuell geätzt auf transparentem Trägermaterial mit Antiflex-Deckglas vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen
Quelle: Eigene Darstellung

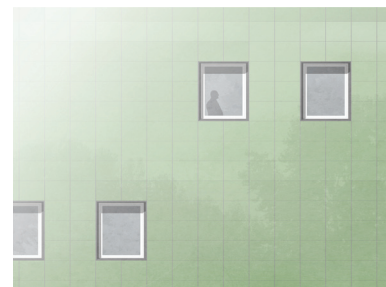


Abb. 207:
Farbiges Ausführungsbeispiel der Dünnschicht-Photovoltaik durch eingefärbtes Deck-Glas, opak
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 214:
Kombination schmaler, hochformatiger
Fensterelemente mit kleinteiliger,
opaker und farbiger Dünnschicht-
Photovoltaik
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 215:
Kombination schmaler, hochformatiger
Fensterelemente mit kleinteiliger,
transluenter organischer Photovoltaik
und einsehbarem Holzrost
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 216:
Einbindung breiter, geschosshoher
Fensterelemente in großformatigen,
organischen Photovoltaik-Modulen mit
Fräsung und differenzierter, farblicher
Ausbildung
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 223:
Schmale, geschosshohe
Fensterelemente kombiniert mit
schmalen geschosshohen Modulen aus
Dünnschicht-Photovoltaik (farbig-opak)
Quelle: Eigene Darstellung

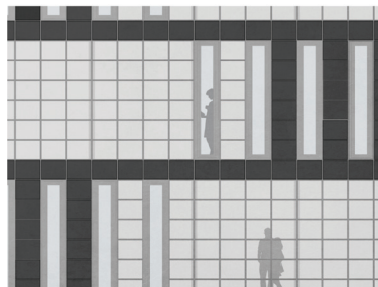


Abb. 220:
Kleinteilige, organische
Photovoltaik-Modulen transluzent
vor Festverglasungen und opaken
Polyboxelementen bei Nacht
kombiniert mit Fensterelementen
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 217:
Ausbildung von Fensterband-Fassaden
kombiniert mit liegendem Px-Format
und organischer Photovoltaik auf
transparentem Trägermaterial für
transparente Festverglasungs- und
opake Fassadenbereiche
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 224:
Schmale, geschosshohe
Fensterelemente kombiniert mit
schmalen, geschosshohen Modulen
aus Dünnschicht- bzw. organischer
Photovoltaik (opak bzw. transluzent)
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 221:
Großformatige, geschosshohe
Fensterelemente kombiniert mit
großformatigen Dünnschicht-
Photovoltaik-Paneeellen als opake
Flächen
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 218:
Fensterband-Typologie mit
Sonnenschutzelementen eingebunden
in liegendem Px-Fassadenraster
mit organischer Photovoltaik auf
transparentem Trägermaterial
Quelle: Eigene Darstellung

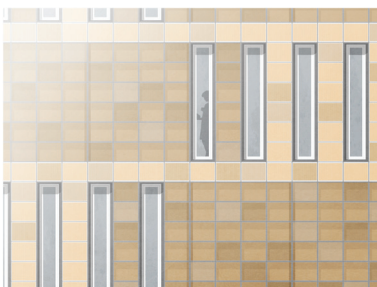


Abb. 225:
Schmale, geschosshohe
Fensterelemente eingebunden in
kleinteilige, organische Photovoltaik-
Module (farbig transluzent)
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 222:
Monokristalline Wafern in weiß
auf großformatigem opaken bzw.
transparentem Trägermaterial
kombiniert mit hochformatigen
Fensterelementen
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 219:
Fensterband-Typologie mit organischer
Photovoltaik auf transparentem
Trägermaterial vor Festverglasung bzw.
opaken Fassadenbereichen bei Nacht
Quelle: Eigene Darstellung

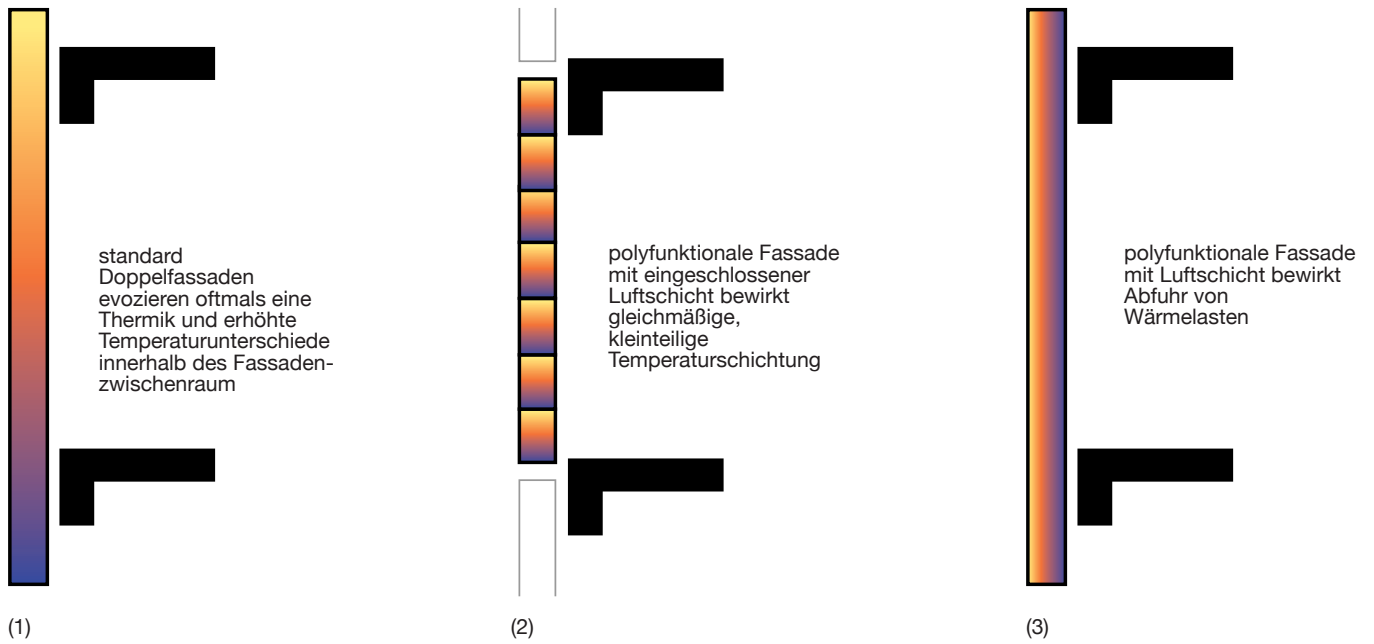


Abb. 226: Erwartetes thermisches Verhalten der homogenisierenden Wirkung der kleinteiligen Fassadenstruktur von (1) Px-Fassaden im Vergleich zum Verhalten geschoss- oder gebäudehoher (2) Doppelfassaden
Quelle: Eigene Darstellung

1.5. Exemplarische Anwendungen des polyfunktionalen Fassadenprinzips (Px-Fassade) als Polybox und Polykollektor

Ausgehend von einer konstruktiven Grundstruktur eines Rostes bekleidet durch eine raumseitig oberflächenfertige Bekleidung und eine äußere Bekleidungsebene werden zwei Grundtypen in den nachfolgenden thermischen Simulationen untersucht. Die unter den Begriffen des Polykollektors und der Polybox geführten Varianten sind hinsichtlich ihrer bauteilspezifischen Eigenschaften beschrieben worden.

Polybox

Die Ausführung des Fassadenprinzips als Polybox beschreibt eine hybride Solarenergienutzung aus erzeugter elektrischer Energie mit gekapselten Luftschichten zur Nutzung der Fassade als thermische Dämmung.

Polykollektor

Die Ausführung als Polykollektor erzeugt ebenfalls elektrische Energie durch Nutzung der Solarstrahlung aber ermöglicht zudem durch eine durchströmbare Luftschicht innerhalb der Fassade, die generierte thermische Energie abzuführen beziehungsweise aktiv zu nutzen.

Die Kleinteiligkeit des Rostes mit der projektspezifisch angenommenen Größe der Bauteile (Boxen) von 63,5 cm Breite auf 50 cm Höhe wurde gewählt um innerhalb des Fassadenmoduls eine möglichst homogene thermische Schichtung zu erzielen (Abb. 226). Dabei wurde in den nachfolgenden Simulationen auf Grund des präzisen Vorfertigungsgrades und der Eigenschaft eines nachwachsenden Rohstoffes dieser als Funierschichtholz ausgebildet. Die erzielbare hohe Präzision durch werksseitige Vorfertigung dieses Rostes ermöglicht es geschlossene, „gestapelte Boxen“, als auch durch Einbindung von Durchströmungsöffnungen konvektionsoffene Strukturen zu schaffen.

Zur ersten Annäherung an die Flexibilität polyfunktionaler Fassaden sind im Rahmen der Projektphase neben ersten Betrachtungen zu den genannten Ansätzen durch weitere gezielte Sonderausführungen exemplarisch die spezifischen energetischen Verhaltensweisen untersucht worden.

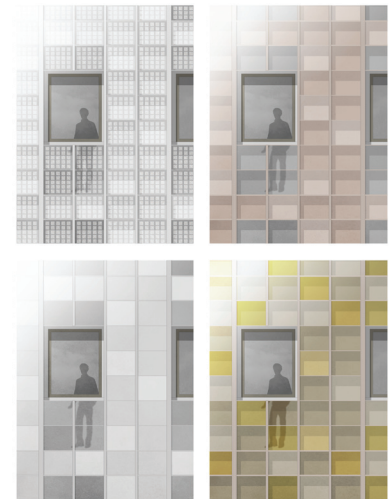


Abb. 227: Beispielhafte Ausdrucksformen des Px-Fassade unter Verwendung verschiedener Photovoltaikgenerationen als Oberflächen-“Material“
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 228:
solaradaptive Bürofassade "Polybox"
Foto: FG ENB, Sarah Papperitz

1.6. Konstruktiver Aufbau

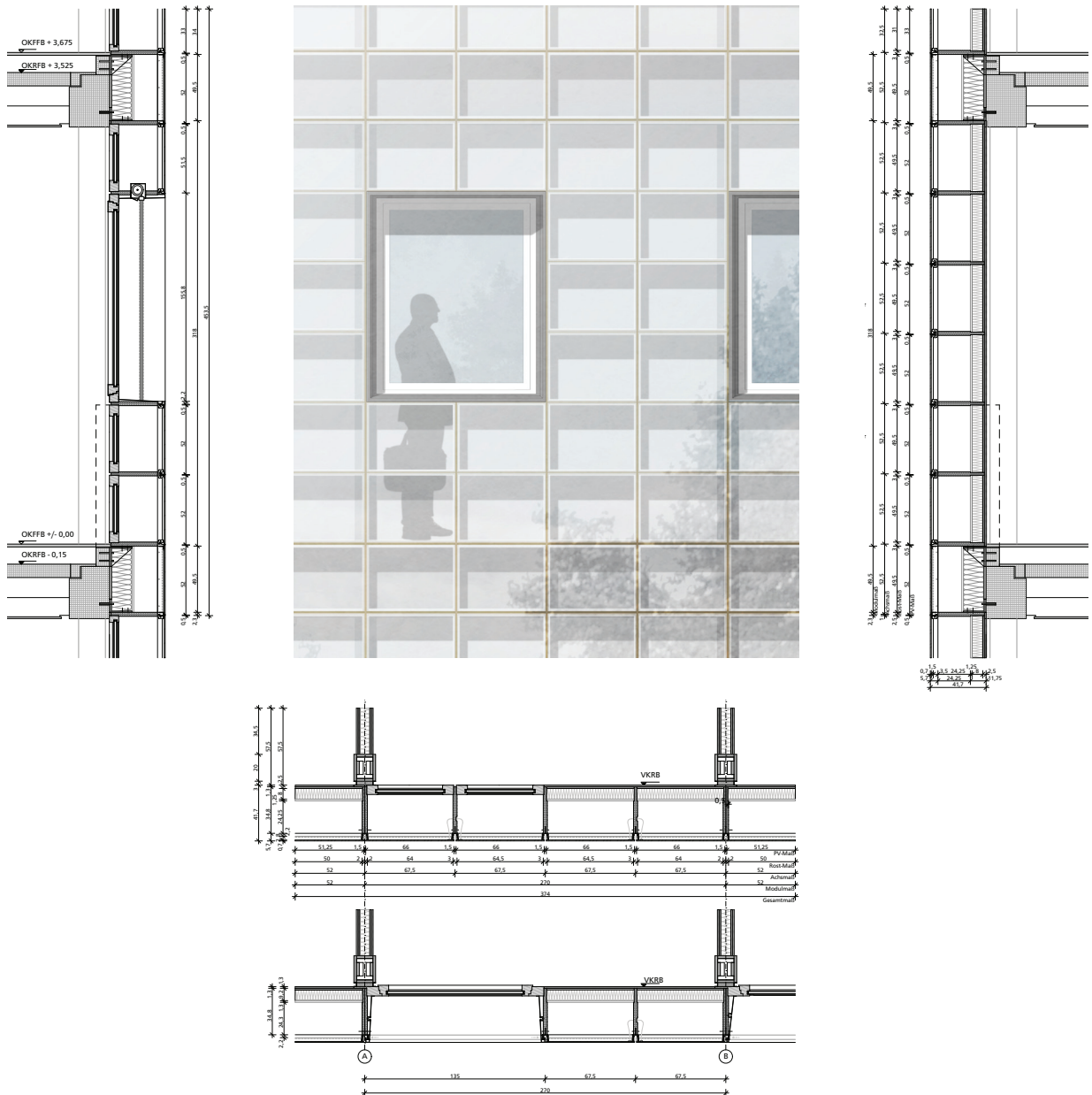


Abb. 229:
Exemplarischer konstruktiver Aufbau
der Polybox (Maßstab 1:50)
Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 230:
solaradaptive Bürofassade "Polybox"
Foto: FG ENB, Sarah Papperitz



Abb. 233:
Raumeindruck aus dem Büro
Foto: FG ENB, Sarah Papperitz



Abb. 231:
Detail des Fensteranschlusses
Foto: FG ENB, Sarah Papperitz



Abb. 232:
Schnitt mit Anschluss Dämmpaket und
Festverglasung
Foto: FG ENB, Sarah Papperitz

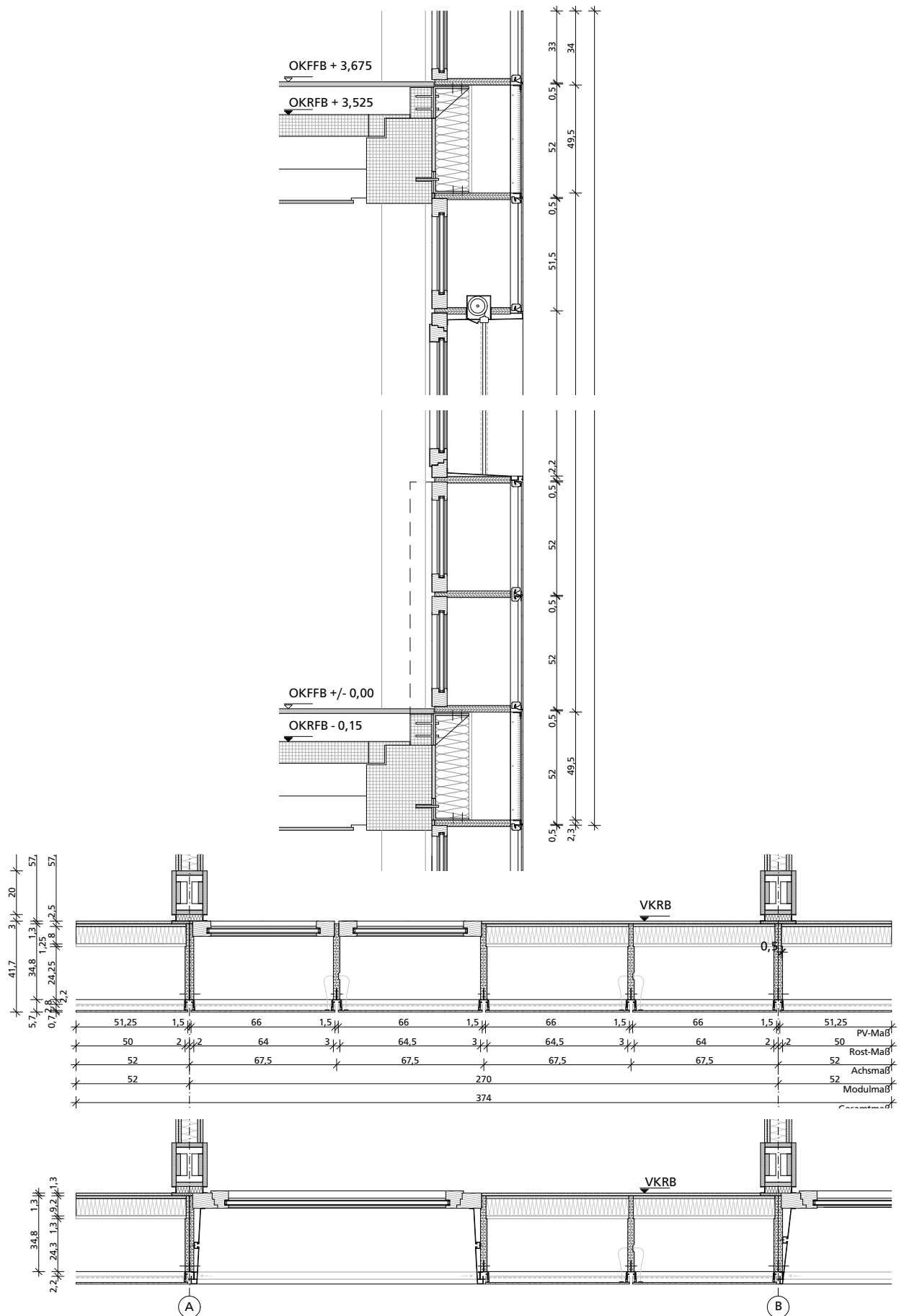


Abb. 234:
Planungsauszug des exemplarischen
konstruktiven Aufbaus der Polybox
(Maßstab 1:20)
Quelle: Eigene Darstellung

2. Dynamische Bauteilbetrachtungen (Methodischer Teil der energetischen Simulationen)

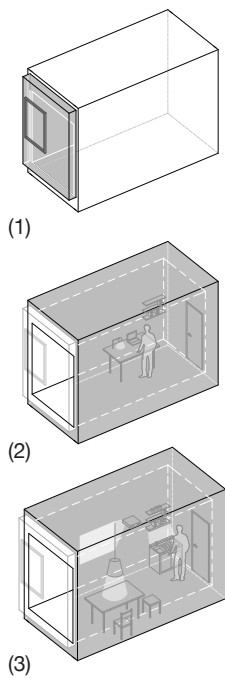


Abb. 235:
Elemente der dynamischen Simulation:
(1) Fassadenmodul, (2) Musterraum
Arbeiten, (3) Musterraum Wohnen
Quelle: Eigene Darstellung

Die dynamischen Betrachtung von Fassadenbauteilen und den angrenzenden Innenräumen sind unter Einsatz der Software Equa IDA ICE Version 4.7 untersucht worden. Im Sinne der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf ein Gesamtgebäude oder die in Teil 3 betrachteten Gebäude-Typen erfolgten die dynamischen Simulationen anhand definierter und gleichbleibender Rahmenbedingungen. Dabei wurden beim Außenraumklima, der bauphysikalischen Ausbildung des angelagerten Musterraums und der Ausstattung sowie Benutzung dieses Raums einheitlich angesetzte Einstellungen getroffen.

Die kombinierten Zonen aus Musterraum und angrenzendem, variabel konfigurierbarem Fassadenmodul (Abb. 21) wurden jeweils im Jahresgang und in den vier Himmelsrichtungen (Norden, Osten, Süden, Westen) simuliert. Die Ergebnisse der dynamischen Betrachtungen ermöglichen im Bezug zur Referenzsimulation mit einer Standardfassade als Metallkassette mit 16 cm Steinwolle Dämmung bereits auf Bauteilebene erste unmittelbare Vergleichsmöglichkeiten der energetischen Verhaltensweisen.

2.1. Standort und Orientierung

Die Simulationen erfolgten unter den klimatischen Bedingungen des seit der Energieeinsparverordnung 2014 gültigen Referenzstandorts Potsdam. Dabei wurden die der Software IDA ICE 4.7 zu Grunde liegenden Wetterdatensätze zum Standort, nach ASHRAE Standard 2013, verwendet. Eingebunden in die standortbezogenen, klimatischen Bedingungen von Potsdam wurden die Modellvarianten aus Fassaden- und Musterraummodul in der Ausrichtung nach Norden, Osten, Süden und Westen in einzelnen Simulationen auf ihr energetisches Verhalten untersucht (Abb. 236).

2.2. Modellierung

Die simulierten Modelle gliederten sich in drei strukturelle Elemente. Eingebunden in einen Gebäudegrundkörper (Abb. 235 (1)) als Simulationsumgebung, in IDA ICE als „building body“ bezeichnet, besteht das spezifische simulierte Modell aus einer energetischen Zone des Musterraums (2) mit einer dem Außenraum zugewandten, vorgelagerten zweiten energetischen Zone, dem Fassadenmodul (3).

Ziel der Simulationen ist es die energetische Einflussnahme verschiedener untersuchter Fassadenmodule auf den Musterraum zu analysieren und zu bewerten. Das Gebäude-Zonenmodell ist so konzipiert, dass an Innenräume angrenzende Oberflächen des Fassadenmoduls und Musterraums thermisch getrennt sind vom Außenraumklima. Ein energetischer Austausch zwischen Innen- und Außenraum erfolgt daher nur über das spezifische Fassadenmodul.

Fassadenmodul

Das Fassadenmodul besteht aus einem immer gleich gewähltem Öffnungsflügel mit außenliegendem Lamellen Sonnenschutz und Bereichen mit Px-Fassade. Die Bereiche der Px-Fassade sind je nach betrachtetem Fassadenbauteil unterschiedlich ausgebildet. In allen Simulationen ist die raumseitige Bauteiloberfläche der Px-Fassadenbereiche vollflächig opak angesetzt.

Musterraum

Der Musterraum ist in der Nutzung definiert als Büroraum mit gängiger Belegungszeit und Belegungsdichte. Während der regulären Betriebszeiten eines Büros werktags zwischen 8:00 bis 19:00 Uhr wird der Raum durch eine Person mit typischer, mittlerer Bekleidung für Innenräume belegt ($\text{clo}=0.85 \pm 0.25$). Dabei verfügt der Büronutzer des Musterraums zum Arbeiten über gängige EDV-Technik bestehend aus Computer und Drucker. Ergänzt durch ein sich an dem Tageslichtangebot orientierendes Leuchtmittel sind die Ausstattungen während der Bürozeiten in Betrieb und definieren dadurch den Anteil intern auftretender Lasten. Die gebäudetechnische Ausstattung und deren Leistungsangaben wurde in den Simulationen gemäß der 5 „Projektion und überschlägige Abschätzung zum Potenzial gebäudebezogener Solarenergienutzung“ angenommen und simuliert. Während der Arbeitszeit ist eine einstündige Mittagspause eingebunden, durch die interne Lasten auf Grund abwesender Personen und teilweise ausgeschalteter Geräte reduziert sind.

Die Belüftung des Innenraums erfolgt über eine Fensterlüftung. Es wurde zur Vereinfachung der Lüftungsregelung bewusst auf den Einsatz einer raumluftechnischen Anlage verzichtet. Der im Fassadenmodul integrierte Fenster-Öffnungsflügel wird in den Simulationen nach definiertem Lüftungsplan während der Sommermonate (Mai bis September) zu 100% für fünf Minuten pro Stunde und in den Wintermonaten (Oktober bis April) zu 50% für jeweils fünf Minuten pro Stunde während der Arbeitszeiten geöffnet.

Am Wochenende sind die simulierten Büroräume nicht in Benutzung, weshalb keine internen Lasten durch Personen oder Geräte anfallen.

Betriebszeiten Büro	8:00 – 19:00; Montag – Freitag	Kein Urlaub
Beleuchtung	12W/m ²	On/off, Präsenz; am Wochenende keine Nutzung.
Elektrogeräte	Pro Person 110 Watt + je Raum ein Drucker @40 W	z. B. Laptop 65W + TFT 45W; am Wochenende keine Nutzung.
Personen	Pro Person 70 W sensibel und 45 W latent	am Wochenende keine Nutzung.
Infiltration	Undichtigkeiten	0,1h ⁻¹ immer

Tab. 3:
Annahmen zur Ausstattung von Büroräumen;
Quelle: Eigene Darstellung

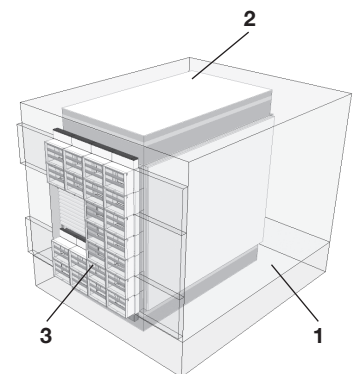
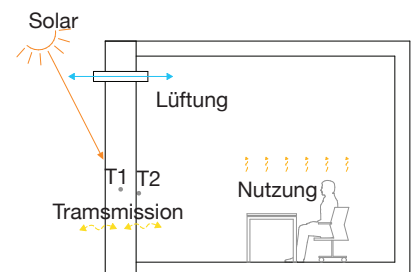
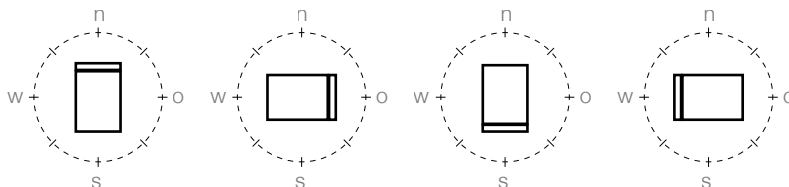


Abb. 236:
Übersicht der Simulationsumgebung bestehend aus dem (1) Gebäudekörper, (2) Musterraum, sowie einem exemplarisch gewählten Fassadenmodul (3). Zudem zeigt die Abbildung schematisch die simulierten Orientierungen der Simulationsmodelle
Quelle: Eigene Darstellung



2.3. Aufbau und Simulation der Fassadenkonfigurationen

Ausgehend von der Referenzsimulation des Musterraums mit Fassaden aus marktüblichen, gedämmten Vorhang-Metallkassetten montiert auf einer 10 cm innenliegenden Betonwand werden Referenzwerte ermittelt, die den Simulationen der Px-Fassadenmodule, der in Abb. 235 gezeigten Bauteile, als Vergleich dienen.

Der in Abb. 242 schematisch dargestellte Bauteilaufbau der Referenzfassade gliedert sich dabei in ein Metallkassetten-dämmpaneel mit einer maximal ausgelegten Dämmstärke von 160 mm Steinwolle, montiert auf eine raumseitig vorgesehene Betonwand. Nach Angaben des Systemherstellers wird durch diesen Wandaufbau ein Wärmedurchgangskoeffizient von $U=0,2147 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht. Die simulierten stündlich und jahresbilanziell vorliegenden Werte für Wärme und Strom werden ins Verhältnis zu den simulierten polyfunktionalen Fassaden gesetzt um Aussagen über die Leistungsfähigkeit der betrachteten Variante treffen zu können.

Energetisch ermöglicht das Px-Fassadenprinzip sowohl elektrische, wie auch thermische Energie bedarfsgerecht zu erzeugen und zu nutzen. Der vorgestellte Ansatz bietet dabei durch seinen ganzheitlichen integralen Ansatz die Möglichkeit, entgegen bisher gängiger Systeme Solarenergie nach gebäudebezogenem Anspruch multifunktional einzusetzen. So kann insbesondere im Umgang mit der generierten thermischen Energie, diese sowohl aktiv (strömungsbasierte Px-Fassade, beschrieben unter dem Begriff des thermischen Kollektors oder nachfolgend Polykollektor genannt), wie auch passiv als thermische Dämmung (Polybox) bei Bedarf in den Energiehaushalt des Gebäudes einbezogen werden.

Polykollektor

Die simulierten Module in Form des Polykollektors sind durch eine temperaturregulierte Steuerung mit Zuström- und Abströmklappe innerhalb des Fassadenmoduls versehen. Diese Anwendung bietet die Möglichkeit die Fassade mit Außenluft zu durchströmen, wodurch verschiedenartige energetische Effekte in der Gebäudehülle und im Innenraum erreicht werden können (Abb. 237). Insbesondere in Gebäudetypen und Gebäudenutzungen mit vermehrtem Kühlbedarf oder reduziertem Heizbedarf und in Klimazonen mit großen jahreszeitlichen Temperaturschwankungen bietet dieses Funktionsprinzip potenzielle Einsatzmöglichkeiten.

Polybox

Die zweite im Rahmen des Projektes betrachtete Variante polyfunktionaler Fassaden bilden die Ausführungen als Polybox. Gleichzusetzen mit anderen kleinteiligen Fassadensystemen wird von einem sich wiederholenden Element ausgegangen, dass in sich geschlossene Luftkammern beinhaltet, wodurch eine homogene Temperatur der Fassadenoberflächen in der Höhe erreicht werden soll. Bauteile mit dieser als „(solar-)thermische Dämmung“ bezeichneten Eigenschaft werden primär in wärmenachragenden Gebäudetypen und -Nutzungen Anwendung finden.

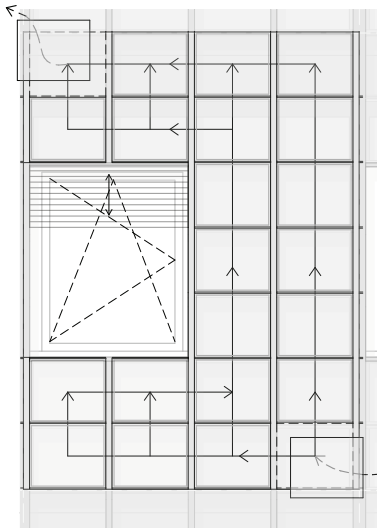


Abb. 237:
Zirkulationsschema temperatur-geregelter, durchströmter Px-Fassade (Polykollektor)
Quelle: Eigene Darstellung

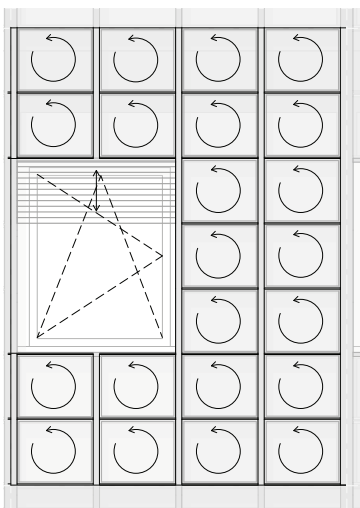


Abb. 238:
Zirkulationsschema Px-Fassade mit Temperaturschichtung als thermische Dämmung (Polybox)
Quelle: Eigene Darstellung

2.4. Energetische Auswertungen der Simulationen

In der energetischen Bewertung der Simulationsergebnisse wurde sich auf die thermischen und elektrischen Potenziale und das gesamtenergetische Verhalten der Bauteile konzentriert. Dabei wurden sowohl die energetischen Eigenschaften innerhalb der Fassade, wie auch die Beeinflussung der Innenraumbedingungen ausgewertet.

Heiz- und Kühllast des Innenraums

Der erste Indikator der Tragfähigkeit des betrachteten Bauteils gegenüber einer Standardausführung stellt die Auswertung der benötigten Heiz- und Kühlenergie zur ganzjährigen Konditionierung des Innenraums dar. Ins Verhältnis gesetzt erhält man in den nachfolgenden Systembeschreibungen erste Aussagen hinsichtlich der energetischen Effizienz des betrachteten Hüllbauteils.

Temperaturen im Innenraum

Ein wesentlicher Aspekt zur Bewertung der Potenziale betrachteter Fassadenbauteile ist das thermische Verhalten des Innenraums im Jahresgang. Hierzu wurden in dem zu Grunde gelegten Klimadatensatz repräsentative Typwochen für den Sommer, Winter und die Übergangszeit (Frühjahr, Herbst) festgelegt, die typische Eigenschaften des Außenraumklimas aufweisen.

Thermische Gewinne und Verhaltensweisen der Fassade

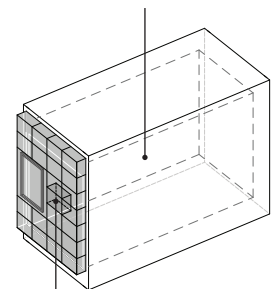
Im direkten Zusammenhang mit der Entwicklung der Innenraumtemperatur steht immer auch die Entwicklung der Temperatur in der Luftschicht der Fassade, die je nach Ausbildung des gesamten Fassadenbauteils einen unmittelbaren Einfluss auf die Entwicklung der Innenraumtemperatur haben kann beziehungsweise passiv durch erhöhte Dämmwirkung diese beeinflusst. Geregelt durch den unterschiedlichen Umgang mit der Luftschicht als thermische Dämmung beziehungsweise thermischer Kollektor.

Elektrische Gewinne der Fassade

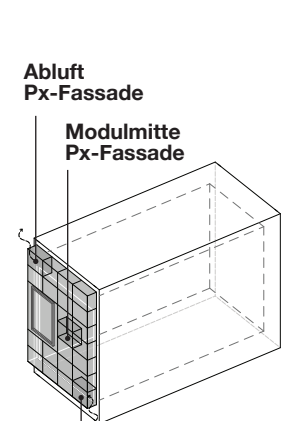
Über die thermischen Verhaltensweisen hinaus werden Erträge elektrischer Energie ermittelt und durch definierte Belegungsgrade von Fassaden als Gesamtertrag im bE2 Gebäudeenergiemodell (Einbindung solaradaptiver Fassaden in das Gebäudeenergiesystem (Teil 5) (S. 173ff)) in die Gesamtbilanz mit eingerechnet.

In den Simulationen wird die Einbindung von Photovoltaik in der gebäudeabschließenden äußersten Ebene des Bauteils durch eine fest eingestellte Transparenz der äußersten Bauteilschicht von 50% hinsichtlich der Einstrahlung auf die meist dahinter angelagerte Fassadenluftschicht pauschal berücksichtigt (Belegungsgrad der Photovoltaik von 50%). Dabei ergibt sich eine gewisse Ungenauigkeit der Ergebnisse auf Bauteilebene wie auch in der Gebäudegesamtbilanz, da Effekte erwärmter Photovoltaik auf dessen Wirkungsgrad beziehungsweise auf den thermischen Luftraum ausgeklammert werden.

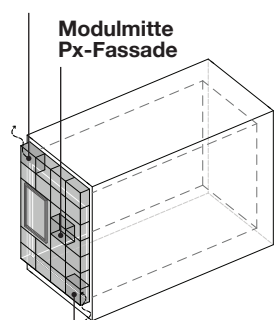
Mittlere Temperatur
Muster-/Referenzraum



Mittlere Temperatur
Px-Fassade



Abluft
Px-Fassade



Zuluft
Px-Fassade

Abb. 239:
Begriffliche Definitionen
zur Systematisierung der
Simulationsergebnisse
Quelle: Eigene Darstellung

3. Systemkatalog solaradaptiver Fassaden

3.1. Übersicht untersuchter Varianten

Die betrachteten Bauteile und deren spezifischen, energetischen Eigenschaften gliedern sich in drei Hauptgruppen:

1. Bauteile mit gekapselter, stehender Luftschicht (Polybox)
2. Bauteile mit durchströmter Luftschicht (Polykollektor)
3. Sonderbauteile

Insgesamt wurden elf unterschiedliche Bauteile simuliert und in nachfolgend aufgeführten Bauteilsteckbriefen zusammenfassend dokumentiert.

Die simulierten Bauteile mit Aufbauten gekapselter, stehender Luftschicht sind nachfolgend unter den Namen Px0 V1, Px5 V9, Px10 V2, Px16 V3 zu finden.

Die simulierten Bauteile mit durchströmter Luftschicht lauten Bauteil Px0 V4, Px10 V5, Px10 V8, Px16 V6. Die zwei exemplarischen Bauteile mit alternativen Aufbauten sind unter den Namen Px10 V11, Px16 V7 beschrieben.

Die Benennung der Bauteilvarianten resultiert aus der im Bauteil angesetzten Dämmstärke die in den Px-Varianten aus Zellulose und in der Referenzvariante aus Steinwolle besteht. Ergänzt werden die Bauteile durch eine fortlaufende Nummerierung die sich aus der Bearbeitung der Varianten ergeben hat (Abb. 241).

Das als Vergleichswert angenommene Referenzbauteil mit dem in Abb. 242 schematisch dargestellten Fassadenaufbau bestehend aus einer 100 mm Betonwand mit vorgehängter Metall-Dämmkassette mit integrierter 16 cm Steinwolle.

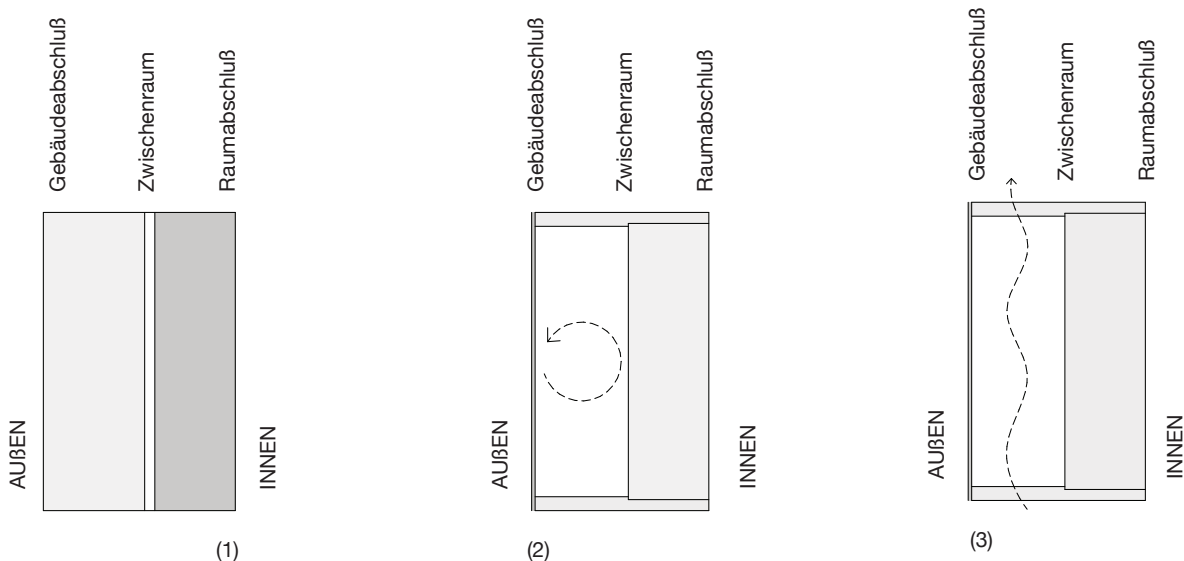


Abb. 240:
piktogramatische Darstellungen der
Grundsysteme: Referenzsystem (1)
Polybox (2), Polykollektor (3)
Quelle: Eigene Darstellung

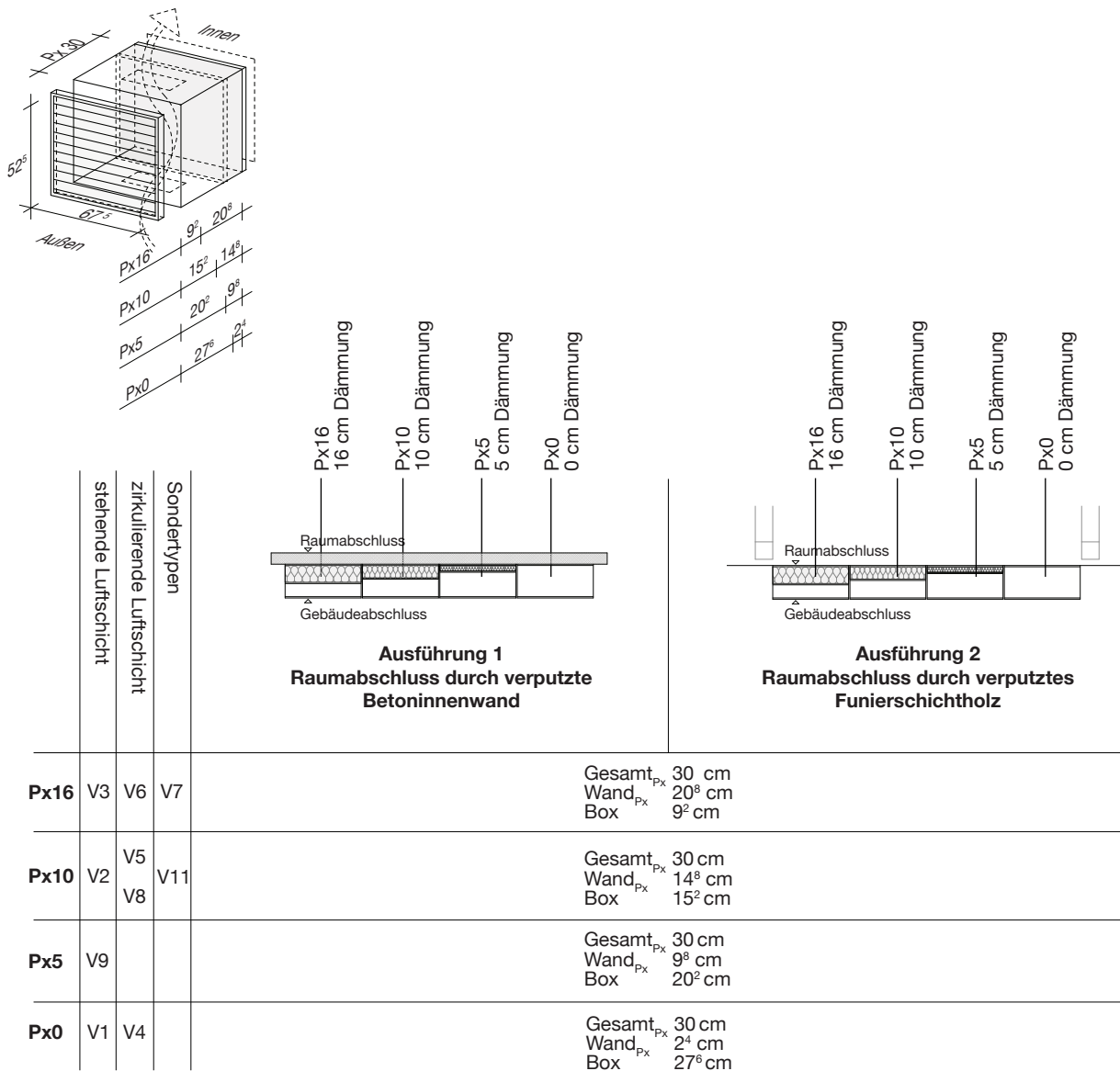
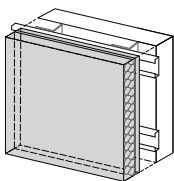


Abb. 241:
Schematische Darstellung und
Abmessungen der simulierten Varianten
des Px-Fassadenprinzips
Quelle: Eigene Darstellung



Aufbau der vergleichenden Referenzfassade als Massivbau mit vorgehängtem Metallkassetten-Panel:

Den Gebäudeabschluss (GA-Schicht) bildet ein vorgehängtes, gedämmtes Metallkassette-Sandwich. Die als 160 mm Steinwolle angenommene Dämmung ist gefasst durch eine 3 mm Blechummantelung als Fassadenoberfläche. Durch die Montagekonstruktion der Paneele an dem Rohbau entsteht zwischen Fassadenpaneel und Rohbau eine 67 mm Hinterlüftungsebene. Der Rohbau ist als 100 mm bewehrte Betonwand angesetzt, die als Raumabschluss (RA-Schicht) raumseitig durch einen Oberputz verkleidet ist.

Abb. 242:
Schematische Darstellung der
Referenz-Fassade als Metallkassette
Quelle: Eigene Darstellung

Architektonische Funktionen



Wahrnehmung und Einsehbarkeit vom Straßenraum und Innenraum mit Abhängigkeiten zur Oberfläche

Energetische Funktionen



Das benannte Ebene bietet die Möglichkeit zur regenerativen Erzeugung von elektrischer Energie



In der markierten Bauteilschicht besteht die Möglichkeit zur aktiven oder passiven Nutzung in der Fassadenluftschicht vorhandener thermischer Energie

Schützende Funktionen



Primäre Bauteilschicht zur thermischen Isolierung



Statisch-konstruktiv relevante Bauteilschicht



Tageslicht- oder sonnenschutzrelevante Ebene des Bauteils



Ebene zur Regulierung der Winddichtigkeit



Schallschutzeigenschaften innerhalb eines Bauteils



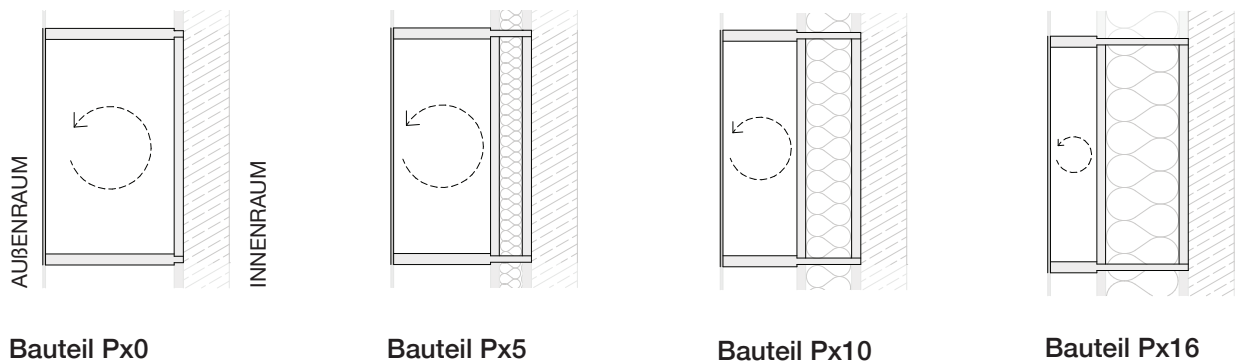
Schutz vor Feuchtigkeitseinwirkung vom Aussenraum- oder Innenraumklima



Visueller Schutz zwischen Innen- und Aussenraum

3.2. Fassadenbauteile mit gekapselter, stehender Luftschicht

Die Betrachtungen des energetischen Verhaltens des polyfunktionalen Fassadenprinzips als geschlossene Waben/Boxen mit solarthermischer Dämmwirkung durch gekapselte Luftschichten wurde in den nachfolgend aufgeführten Ausführungen durch simulative Betrachtungen untersucht. Dabei beruhen alle simulierten Varianten auf dem zuvor beschriebenen konstruktiven Modulgrundraster ergänzt durch variierende Ausführungen der Dämmschicht und Dämmstärke.



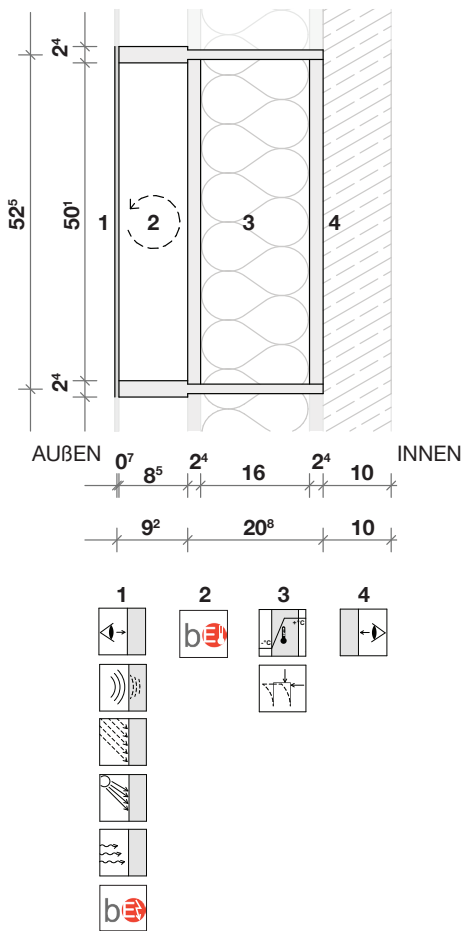


Abb. 243:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung

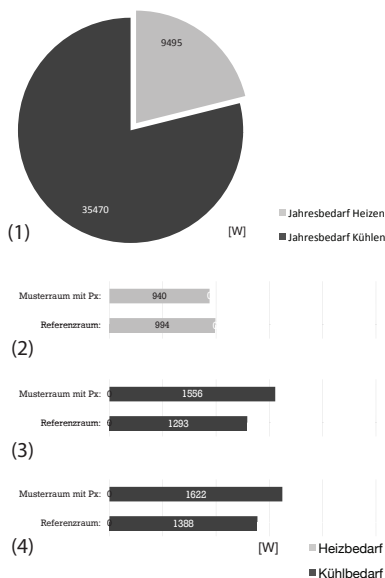


Abb. 244:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung

3.2.1. Bauteil Px16 V3

Gebäudeabschluss (1) b
Die äußere Fassadenschicht wird gebildet durch In-Glas-Photovoltaik gefasst von 2 x 3 mm Verbundglas. Der Belegungsgrad der Photovoltaik beträgt im simulierten Bauteil 50% (50% transparent, 50% opak).

Dämmung und Konstruktion (2/3) b
Die dämmenden Eigenschaften des Bauteils resultieren aus einer durch die 30 cm tiefe Rostkonstruktion geschaffene Kombination aus einer 8,2 cm starken, stehenden Luftschicht (2) ergänzt um ein 20,8 cm Dämmpaneel (3) aus 16 cm Zellulosedämmung umfasst von 2x2,4 cm Funierschichtholz. Durch die innenseitige Einbindung des Paneels in den 2,4 cm starken konstruktiven Rost aus Funierschichtholz (FSH) wird die gekapselte Luftschicht ausgebildet.

Raumabschluss (4)
Den innenseitigen Raumabschluss dieses Px-Bauteils bildet eine vorgelagerte Schicht aus Beton mit raumseitigem Oberputz. Diese Fassadenschicht ist optional und orientiert sich an typischen Fassadeneinbausituationen im Bestand und bei Massivbauten.

Das Bauteil Px16 V3 zeichnet sich aus durch eine äußere solaraktive Photovoltaikschrift gepaart mit einer Dämmung aus stehender, thermisch aktivierter Luftschicht und einem 16 cm Zellulose Dämmpaneel.

Energetisches Verhalten

Die hohen Dämmeigenschaften des Bauteils resultieren aus dem Dämmpaneel, kombiniert mit der vorgelagerten und durch die Ausführung als geschlossene Box, stehenden Luftschicht, die als thermischer Pufferraum wirkt. Die kombinierte Dämmfunktion führt zu einer hoch energieeffizienten Hülleigenschaft des Bauteils und lässt einen geringeren Heizenergiebedarf pro Jahr gegenüber Standard-Fassadenausführungen erwarten. Dabei lassen sich, wie das Diagramm Abb. 245 zeigt, gleiche Innenraumtemperaturen im Winter, wie in der Referenzausführung erreichen. Abb. 245 bis Abb. 235 zeigen sehr eindrücklich die thermischen Dämmeigenschaften der bauteilimmanenten stehenden Luftschicht. Selbst in den Wintertagen bewegt sich die Luft des Fassadenzwischenraumes annähernd durchgängig oberhalb der Frostgrenze. Der ablesbare Temperaturhub zwischen Außenluft und gekapselter Fassadenluftschicht wird daher zu einer weiteren Verbesserung des Wärmedurchlassgrads der Fassade führen.

Während der Übergangszeit und der Sommermonate zeigt sich, dass die stehende Luftschicht des Fassadenzwischenraums im Tagesgang Temperaturen deutlich oberhalb des Behaglichkeitsbereichs erzielt. Dieses thermische Potenzial könnte potenziell bei Bedarf aktiv gespeichert oder genutzt werden. Generell lässt diese überhöht, warme äußere Hüllschicht jedoch in den betroffenen Monaten vermuten, negativen Einfluss auf die Innenraumtemperatur zu haben. Dies äußert sich in den Balkendiagrammen der Abb. 242. Durch die 16 cm Zellulosedämmung zwischen Fassadenzwischenraum und Innenraum wird jedoch ein wesentlicher Wärmeeintrag in den Innenraum unterbunden. Dies belegen die in den Typwochen Abb. 236 und Abb. 235 gezeigten, ähnlichen Bedarfskurven an Kälteenergie des Musterraums gegenüber der vergleichenden Simulation des Referenzraums.

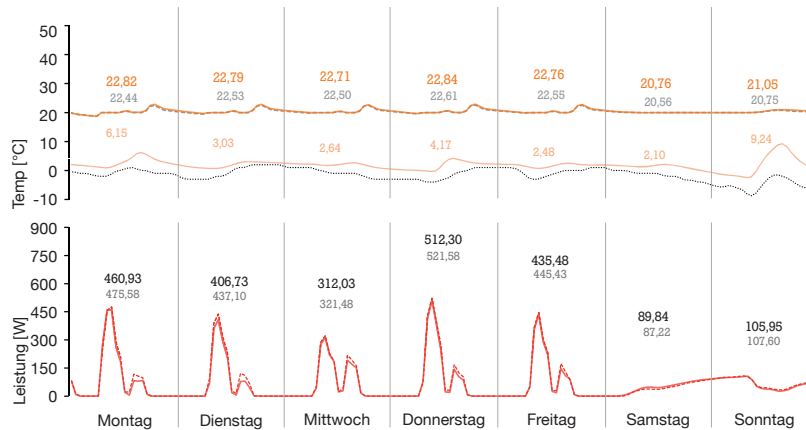


Abb. 245:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung

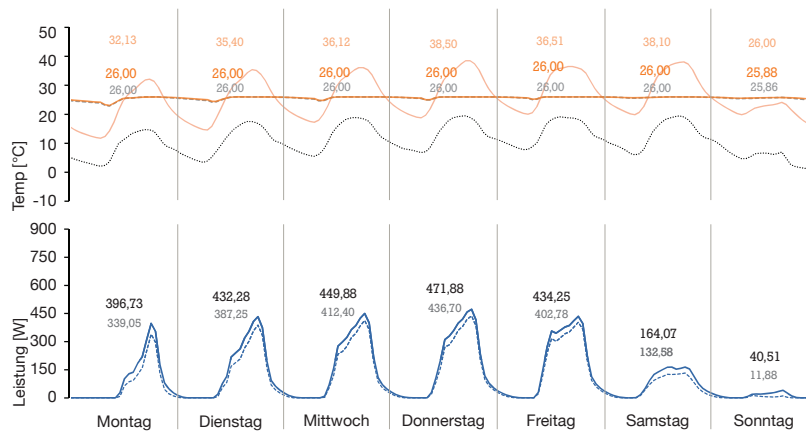


Abb. 246:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung

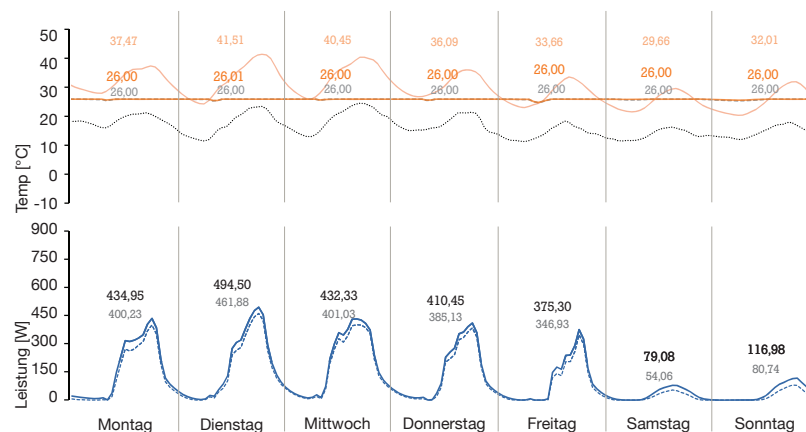


Abb. 247:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung

— Temperatur Musterraum (Px)
 — Temperatur Fassade (Px)
 - - - Temperatur Referenzraum
 Temperatur Aussenluft

— Kühllast Musterraum (Px)
 — Heizlast Musterraum (Px)
 - - - Kühllast Referenzraum
 Heizlast Referenzraum

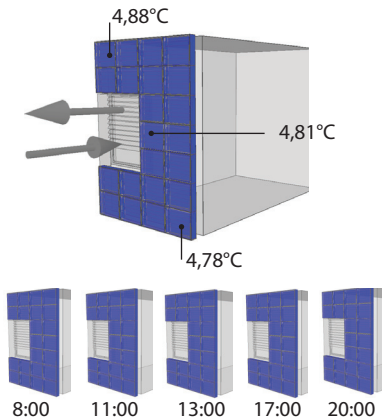


Abb. 248:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassade-Zwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

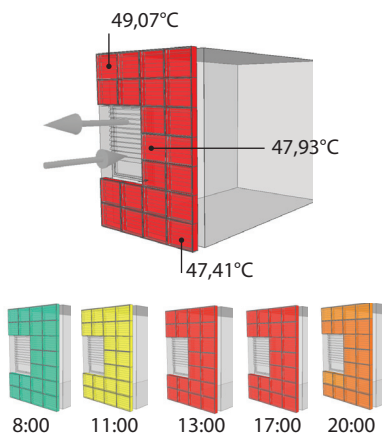


Abb. 250:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassade-Zwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

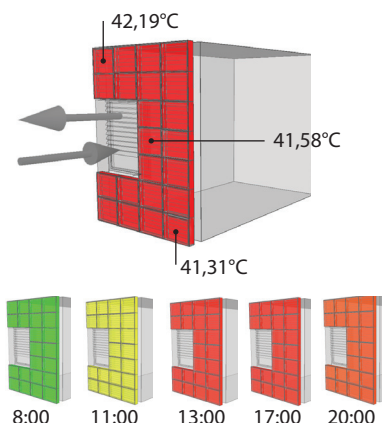


Abb. 249:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassade-Zwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung



Typwoche Winter

Die Ausbildung der Außenhaut als Einscheibenverbundglas führt dazu, wie Abb. 245, beziehungsweise Abb. 237 verdeutlichen, dass entsprechend des Temperaturverlaufs des Außenraumklimas die Temperaturen der Luftschicht des Fassaden-Zwischenraums je nach Orientierung der Fassade mit einem deutlicheren oder weniger deutlichen Temperaturhub reagieren. Wie das rechts dargestellte Diagramm Abb. 251 exemplarisch zeigt, bewegen sich die Temperaturen in der gekapselten Polyboxvariante auch in der ausgewählten typischen Winterwoche weitestgehend oberhalb der Frostgrenze. Dieses Verhalten lässt über die Heizperiode betrachtet geringere Heizbedarfe gegenüber der Standardausführung erwarten. Die betrachtete Typwoche zeigt, dass trotz winterkalter Außenlufttemperaturen die Lufttemperaturen des Zwischenraums auf Grund des solaren Eintrags nur selten unter die Frostgrenze fallen.

Typwoche Übergangszeit

In der Übergangszeit wird der beschriebene Effekt des Fassadenprinzips als thermischer Puffer zwischen innen und außen besonders deutlich. Sowohl in der exemplarischen Visualisierung (Abb. 250), wie auch in der Wochenbetrachtung der Temperaturverläufe in Abb. 252 zeigt sich, dass die Lufttemperaturen des Fassadenzwischenraums dem Sonnenverlauf folgend im Tagesgang Temperaturen bis über 50°C erreichen können und so eine dämpfende Wirkung des Innenraums gegenüber dem kühleren Außenraum erwirken. Durch die den Simulationen zu Grunde gelegte Büronutzung ergeben sich so schon während der Übergangszeit erhöhte Kühlbedarfe, um die Innenraumtemperatur in dem definierten Temperaturband zwischen 20° und 26°C zu halten. Die relativ schmal ausgebildete Luftschicht wirkt sich dabei gegenüber der nachfolgend behandelten Variante PX10 negativer hinsichtlich des benötigten Kühlbedarfs aus, so dass sich datieren lässt, dass eine Dämmung mit bis zu 16 cm Stärke keine Verbesserung des Innenraumklimas gegenüber einer 10 cm stark gedämmten Variante hat. Dabei übersteigen die Bedarfe an Kühlenergie der Px-Fassade zudem häufig die Bedarfe der vergleichenden Simulationen des Referenzraums. Zieht man eine andere Gebäudenutzung in Betracht, die unter anderem einen ganzjährigen Wärmebedarf erfordert, wäre dieses Bauteil aus energetischer Sicht gegebenenfalls eine denkbare Anwendung.

Typwoche Sommer

Während der Sommermonate reduziert sich der Kühlbedarf leicht gegenüber der Übergangszeit und nähert sich den Bedarfen der Referenzvariante an (Abb. 253), dennoch zeigt sich, dass auch während der Sommermonate der Bedarf an Kühlenergie weiterhin über dem Bedarf einer standardmäßig ausgeführten Fassade liegt.

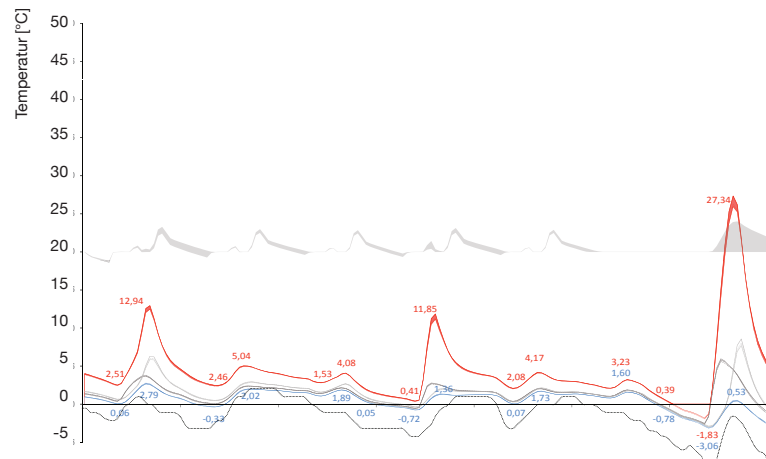


Abb. 251:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Px-Fassade nach Orientierung und während einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung

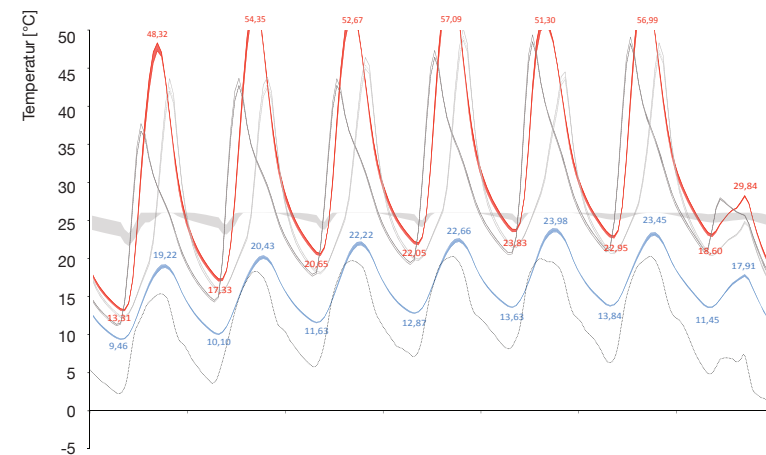


Abb. 252:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Px-Fassade nach Orientierung und während einer Übergangswoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

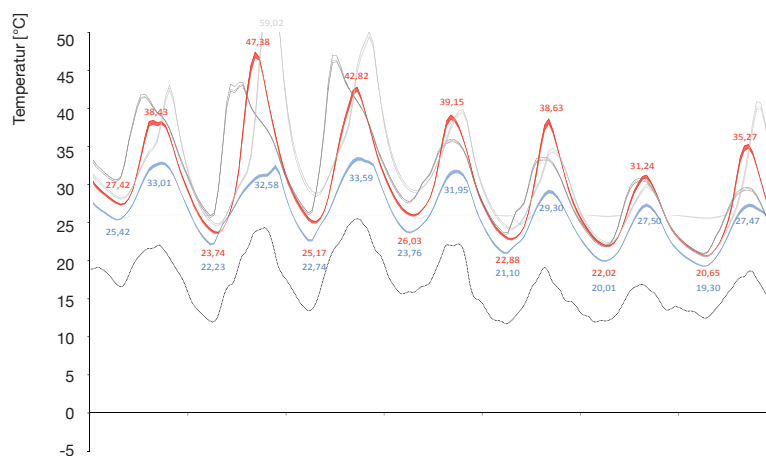
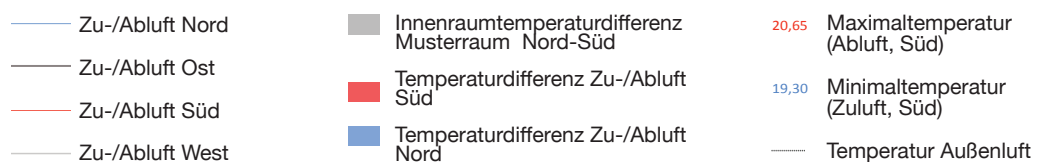


Abb. 253:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Px-Fassade nach Orientierung und während einer Sommerwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung



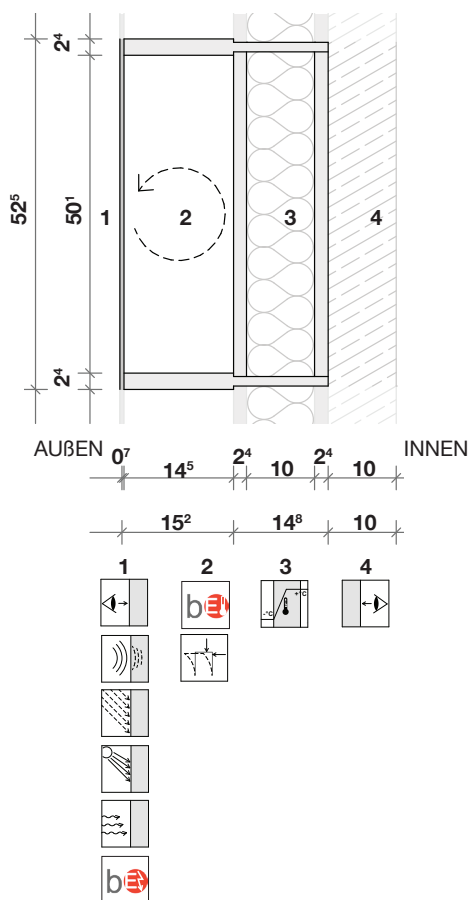


Abb. 254:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung

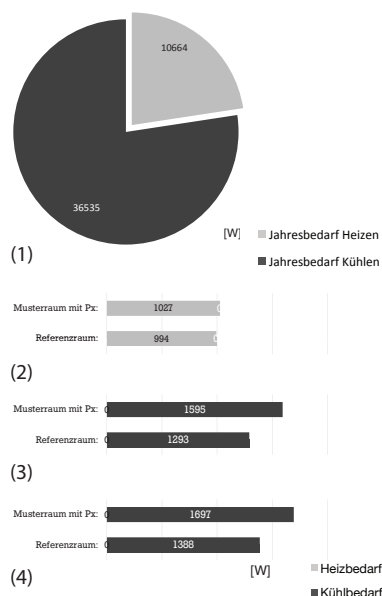


Abb. 255:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung

3.2.2. Bauteil Px10 V2

Gebäudeabschluss (1) Die äußere Fassadenschicht wird gebildet durch In-Glas-Photovoltaik gefasst von 2 x 3 mm Verbundglas. Der Belegungsgrad der Photovoltaik beträgt im simulierten Bauteil 50% (50% transparent, 50% opak).

Dämmung und Konstruktion (2/3) Die dämmenden Eigenschaften des Bauteils resultieren aus einer durch die 30 cm tiefe Rostkonstruktion geschaffene Kombination aus einer 15,2 cm starken, stehenden Luftschicht (2) mit einem 14,8 cm Dämmpaneel (3) aus 10 cm Zellulosedämmung umfasst von 2x2,4 cm Funierschichtholz. Durch die innenseitige Einbindung des Paneels in den 2,4 cm starken konstruktiven Rost aus Funierschichtholz (FSH) wird die gekapselte Luftschicht ausgebildet.

Raumabschluss (4)
Der innenseitige Raumabschluss dieser Px-Bauteils bildet eine vorgelagerte Schicht aus Beton mit raumseitigem Oberputz. Diese Fassadenschicht ist optional und orientiert sich an typischen Fassadeneinbausituationen im Bestand und bei Massivbauten.

Das Bauteil Px10 V2 zeichnet sich aus durch eine äußere solaraktive Photovoltaikschiicht gepaart mit einer Dämmung aus thermisch aktivierter Luftschicht in Kombination mit einem 10 cm Zellulose-Dämmpaneel.

Energetische Eigenschaften

Die Bauteilvariante Px10 mit gekapselter Luftschicht als thermischem Pufferraum zeigt, dass trotz der reduzierten Dämmstärke ein annähernd gleiches thermisches Verhalten während der Heizperiode erreicht werden kann, wie bei einer Standard-Ausführung der Fassade nach geltender Energieeinsparverordnung 2016. Gegenüber der Variante Px16 zeigt die Variante Px10 daher geringfügig höhere Heizlasten während der Winterzeit (Abb. 255).

Während der Typwochen der Übergangszeit sowie während der Sommerphase hingegen reagiert die Variante Px10 annähernd gleich gegenüber dem Bauteil Px16 V3 und bedarf auf Grund der gekapselten Luftschichten ebenfalls erhöhter Kühlbedarfe. Das mit 14,5 cm ausgebildete Luftvolumen je Box zeigt gegenüber der Variante Px16 V3 nochmals leicht erhöhte Werte an benötigter Kühlenergie, wie Abb. 255 zeigt.

Vergleicht man jedoch die Jahresbilanz an Kühlbedarfen in Abb. 255 mit den Jahresbilanzen der in den Dämmstärken variierenden Bauteile Px16 V3 und Px5 V9 so lässt sich erkennen, dass scheinbar aus den Schichtdicken von Dämmpaneel und Luftschicht des hier betrachteten Bauteils, eine für die zu Grunde gelegte Nutzung des Musterraums ungeeignetste Kombination gewählt ist. In der Gesamtbilanz, die neben der Betrachtung des Jahresgangs auch die Orientierung der Fassaden berücksichtigt, liegt der Jahresbedarf zum Kühlen des Musterraums 36 kW höher als seine Vergleichsbauteile Px 16 V3 und Px5 V9.

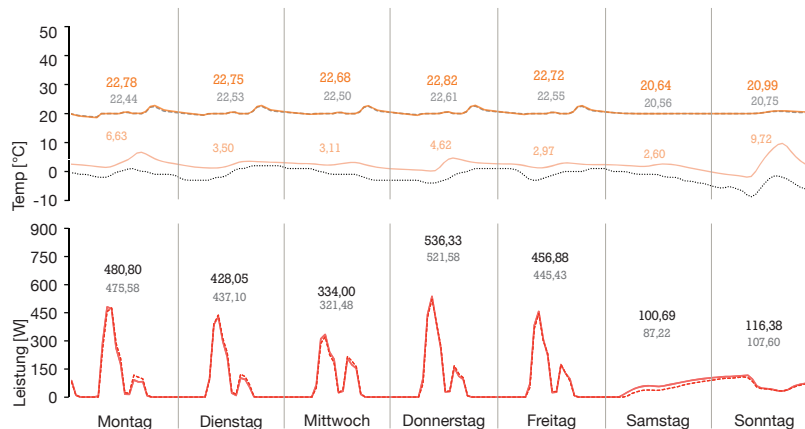


Abb. 256:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung

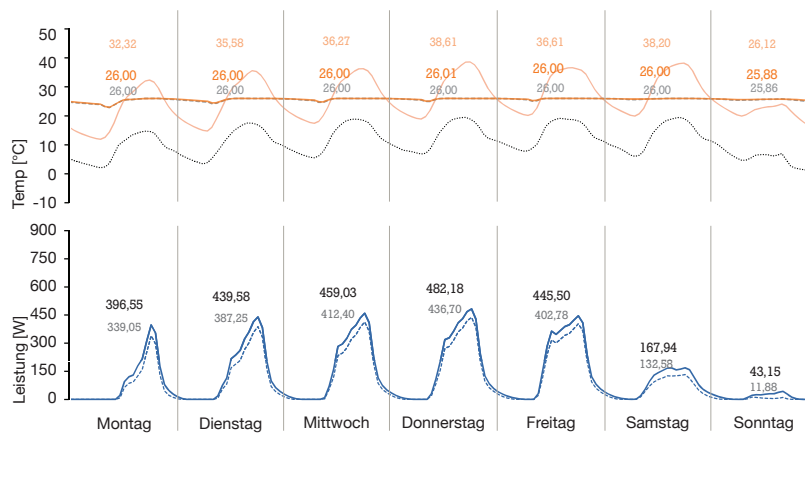


Abb. 257:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung

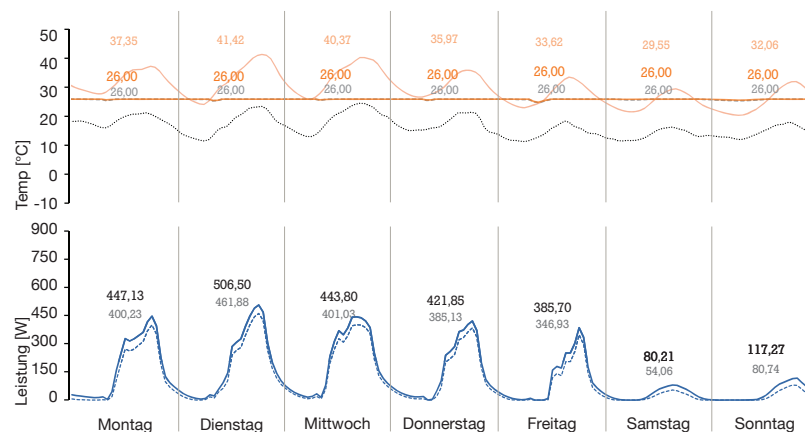


Abb. 258:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung

— Temperatur Musterraum (Px)
 — Temperatur Fassade (Px)
 - - - Temperatur Referenzraum
 Temperatur Aussenluft

— Kühllast Musterraum (Px)
 — Heizlast Musterraum (Px)
 - - - Kühllast Referenzraum
 Heizlast Referenzraum

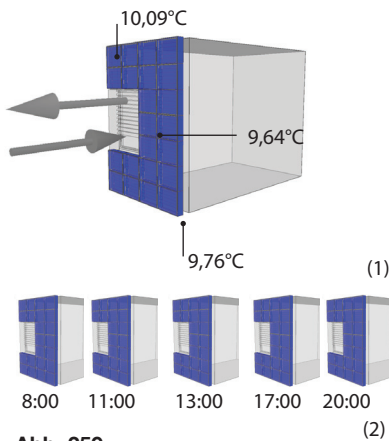


Abb. 259:
 (1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
 (2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
 Quelle: Eigene Darstellung

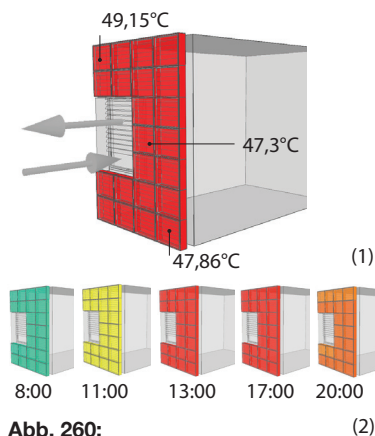


Abb. 260:
 (1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
 (2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
 Quelle: Eigene Darstellung

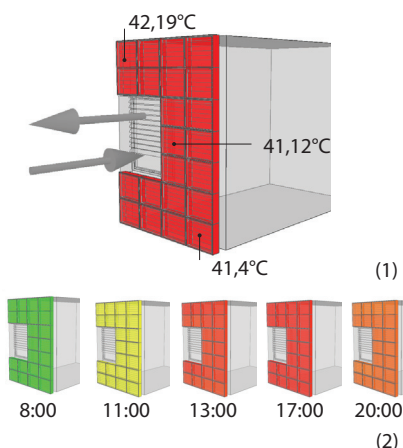


Abb. 261:
 (1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
 (2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
 Quelle: Eigene Darstellung



3.2.3. Typwoche Winter

Die Fassade zeigt, wie das Bauteil Px10 V2, während der Wintertage eine konstant über den Tag hin homogene, aber niedrige Temperatur im Fassadenzwischenraum bietet. Wie die beiden Abbildungen Abb. 259 und Abb. 262 zeigen, bietet die Einscheiben-Verbundglasscheibe mit angelagerter stehender Luftschicht trotz geringem Dämmwert des Materials ausreichend thermische Pufferung, dass selbst während der betrachteten Typwoche vom 16.01. bis 22.01.2017 mit wesentlichen Zeiträumen unter 0°C im Fassadenzwischenraum auf der Südseite Temperaturen bis +13 °C und auf der Nordseite noch bis zu +3°C erreicht werden. Nur selten fällt innerhalb dieses Zeitraums die gekapselte Lufttemperatur unter den Gefrierpunkt. Betrachtet man die Entwicklung der Innenraumtemperatur des angegliederten Musterraums während der Werktagen, zeigt sich in dem Wochengang der Abb. 262 sehr deutlich, dass durch die internen Lasten je nach Orientierung und die immer noch hohen dämmenden Eigenschaften des Bauteils, die Innenraumtemperatur zwischen 20-25°C schwankt. Der simulierte Sonntag lässt erkennen, dass durch vermutlich an diesem Tag bestandene hohe solare Einstrahlung trotz reduziertem Heizverhaltens an Wochenenden ebenfalls in dem nach Süden orientierten Raum im Winter Temperaturen bis circa 25°C erreicht werden können.

3.2.4. Typwoche Übergangszeit

Während der Übergangsphase verhält sich das betrachtete Bauteil annähernd entsprechend dem Bauteil mit 16 cm Dämmung. Durch die in der Übergangsphase tief stehende Sonne erwärmt sich der Fassadenzwischenraum auf den besonnten Fassadenseiten Ost, Süd und West sehr stark und erreicht Temperaturen deutlich oberhalb der 45°C. Die Abb. 263 verdeutlicht jedoch auch, dass durch die geringe, dämmende Eigenschaft der äußeren Bauteilschicht als Einscheibenverbundglas die Temperatur des Fassadenzwischenraums in den Abendstunden den Schwankungen der Außentemperatur folgend mit Temperaturen zwischen 13-24°C im Süden deutlich abkühlt. Die gekapselte Bauweise unterstützt jedoch mittelfristig, dass bei längeren Wärmeperioden sich die Temperaturen des Fassadenzwischenraums auf die Innenraumtemperatur auswirken. Gleichzeitig lässt sich festhalten, dass durch die dauerhaft „erwärmte Außenhaut“ während der Übergangszeiten, die auch auf der Nordseite Temperaturen zwischen 9-24°C erreichen, der Heizbedarf bei Gebäudenutzungen mit ganzjähriger Wärmenachfrage reduziert werden dürfte. In der Simulation zu Grunde gelegten Büronutzung äußert sich der Einsatz dieses Bauteils jedoch in relativ hohen Kühlbedarfen. Diese sind jedoch weiterhin geringer, als die Kühlbedarfe der Variante Px16 V3 im selben Betrachtungszeitraum.

3.2.5. Typwoche Sommer

In den Sommertagen kommt entsprechend des einführend beschriebenen energetischen Verhaltens der erhöhte Kühlbedarf zum Tragen. Betrachtet man Abb. 258 lässt sich erkennen, dass während der Werktagen die Kühlbedarfe täglich über denen der vergleichenden Variante liegen.

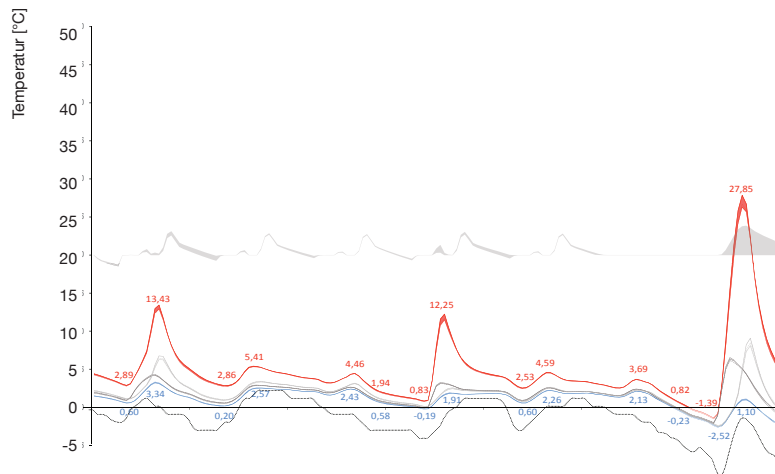


Abb. 262:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Winterzeit zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.1.-22.1.17)
Quelle: Eigene Darstellung

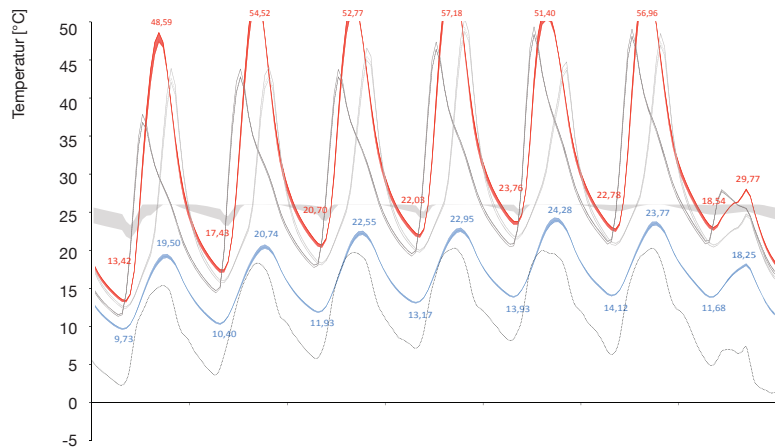


Abb. 263:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

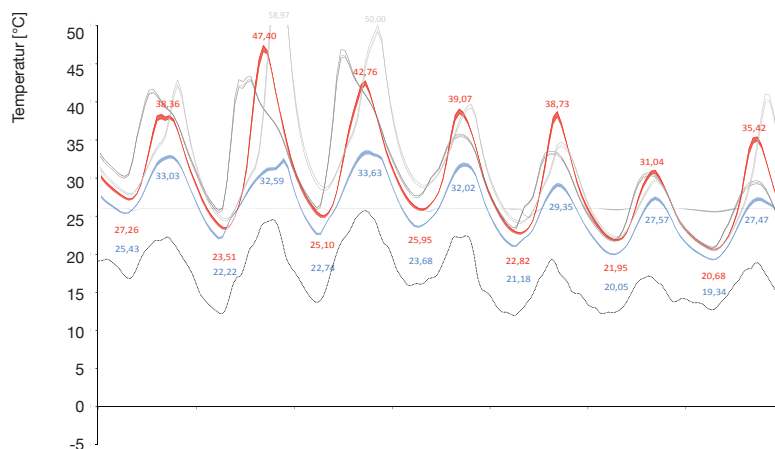


Abb. 264:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.17)
Quelle: Eigene Darstellung

— Zu-/Abluft Nord
— Zu-/Abluft Ost
— Zu-/Abluft Süd
— Zu-/Abluft West

■ Innenraumtemperaturdifferenz Musterraum Nord-Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Nord

20,65 Maximaltemperatur (Abluft, Süd)

19,30 Minimaltemperatur (Zuluft, Süd)

— Temperatur Außenluft

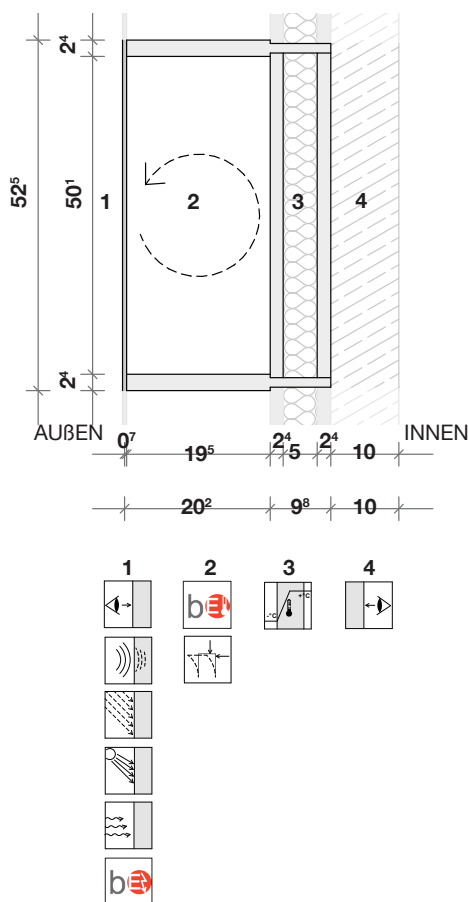


Abb. 265: Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung

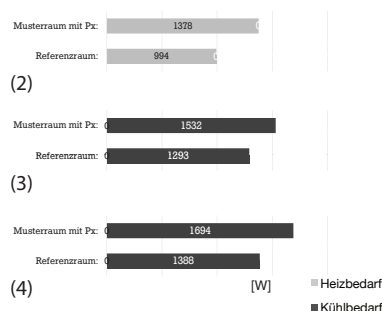
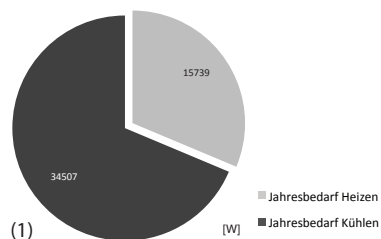


Abb. 266: Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung

3.2.6. Bauteil Px5 V9

Gebäudeabschluss (1) b

Die äußere Fassadenschicht wird gebildet durch In-Glas-Photovoltaik gefasst von 2 x 3 mm Verbundglas. Der Belegungsgrad der Photovoltaik beträgt im simulierten Bauteil 50% (50% transparent, 50% opak).

Dämmung und Konstruktion (2/3) b

Die dämmenden Eigenschaften des Bauteils resultieren aus einer durch die 30 cm tiefe Rostkonstruktion geschaffene Kombination aus einer 20,2 cm starken, stehenden Luftschicht (2) mit einem 9,8 cm Dämmpaneel (3) aus 5 cm Zellulosedämmung umfasst von 2x2,4 cm Funierschichtholz. Durch die innenseitige Einbindung des Paneels in den 2,4 cm starken konstruktiven Rost aus Funierschichtholz (FSH) wird die gekapselte Luftschicht ausgebildet.

Raumabschluss (4)

Der innenseitige Raumabschluss dieses Px-Bauteils bildet in diesem Fall eine vorgelagerte Schicht aus Beton mit raumseitigem Oberputz. Diese Fassadenschicht ist optional und orientiert sich an typischen Fassadeneinbausituationen im Bestand und bei Massivbauten.

Das Bauteil Px5 V9 zeichnet sich aus durch eine äußere solaraktive Photovoltaikschiicht gepaart mit einer Dämmung aus thermisch aktivierter, gekapselter Luftschicht in Kombination mit einem 5 cm Zellulose-Dämmpaneel.

Energetische Eigenschaften

Die in diesem Bauteil bereits deutlich reduzierte Stärke konventioneller Dämmung auf nur 5 cm Zellulose gegenüber heute gängigen Dämmstärken von Außenwänden lässt sich deutlich in dem daraus resultierenden, um annähernd 50% angestiegenen Heizwärmebedarf erkennen. Während der Heizwärmebedarf der Variante Px10 noch 10,6 kW pro Jahr betrug, liegt dieser, wie Abb. 268 verdeutlicht, mit 15,7 kW pro Jahr deutlich höher. Dadurch macht der Heizenergiebedarf dieser Fassadenausführung in der Gesamtbilanz trotz der zu Grunde gelegten internen Lasten einer Büronutzung mehr als 1/4 des Gesamtbedarfes aus und liegt damit deutlich über dem Bedarf an Wärmeenergie, die nötig wäre bei einer Ausführung der Fassade mit einer konventionellen Metallkassette.

Gepaart mit den erkannten Effekten eines erhöhten Kälteenergiebedarfes aus den zuvor beschriebenen Bauteilen (Px10, Px16) erscheint diese Ausführung des polyfunktionalen Fassadensystems in der angewendeten Umgebung wenig geeignet.

Bemerkenswert ist jedoch der Vergleich der Energiebedarfe zur Konditionierung des Innenraums während der Übergangs- und Sommerzeit, denn wie die Diagramme Abb. 270 und Abb. 271 zeigen, liegen in beiden Typwochen die Kältebedarfe unterhalb den Kälteenergiebedarfen der Vergleichswochen von Bauteil Px16 und Px10. Deutlich zum Tragen kommt dieser Effekt im Vergleich der betrachteten Übergangszeiten. Es besteht die Vermutung, dass die geringere Dämmstärke, gestützt durch das daraus resultierende größere Luftvolumen, eine Luftzirkulation innerhalb der einzelnen Waben auslöst, die eine erhöhte Wärmeabgabe an die Außenluft erreicht, wodurch das bilanzielle Delta der Temperaturen zwischen Innen- und Fassadenzwischenraum reduziert wird (siehe Abb. 268).

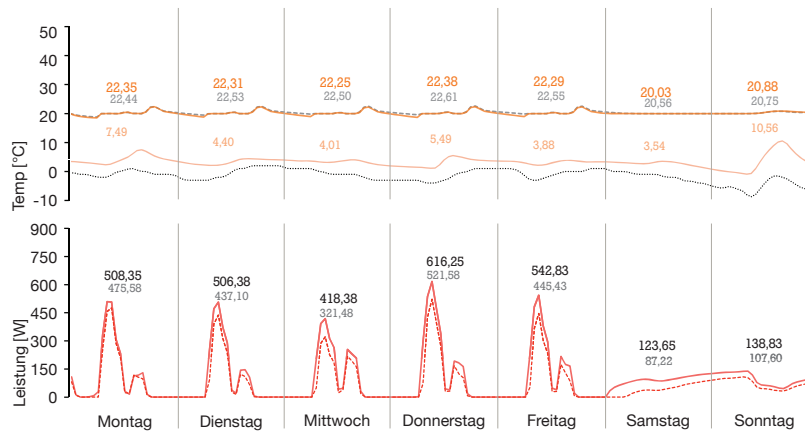


Abb. 267:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung

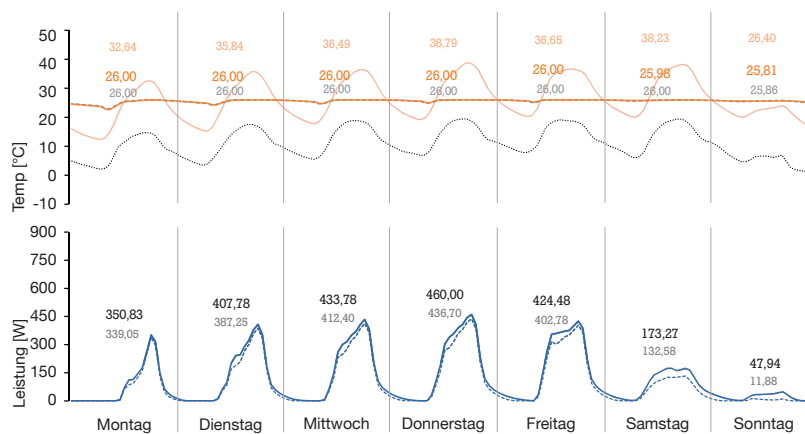


Abb. 268:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation
Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung

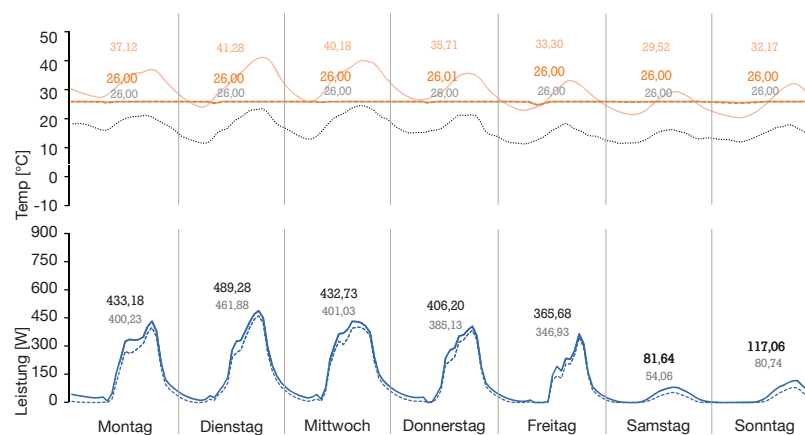


Abb. 269:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung

— Temperatur Musterraum (Px)
— Temperatur Fassade (Px)
--- Temperatur Referenzraum
..... Temperatur Aussenluft

— Kühllast Musterraum (Px)
— Heizlast Musterraum (Px)
--- Kühllast Referenzraum
..... Heizlast Referenzraum

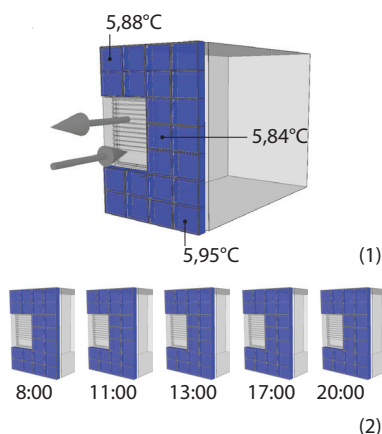


Abb. 270:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

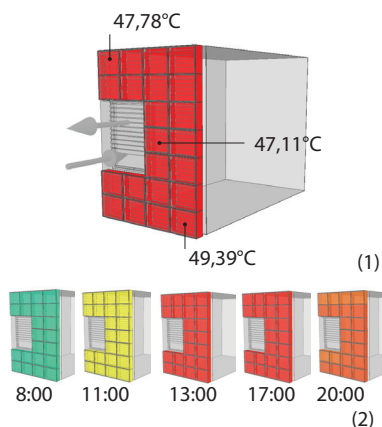


Abb. 271:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

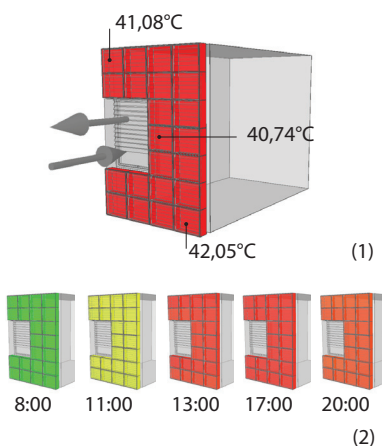


Abb. 272:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung



3.2.7. Typwoche Winter

Die Visualisierungen zum Temperaturverlauf des Fassadenzwischenraums eines gängigen Wintertages in Abb. 270 verdeutlichen exemplarisch das Verhalten des Bauteils während der Winterzeit. Einerseits beeinflusst die Ausführung des Bauteils, wie im Abschnitt energetische Eigenschaften beschrieben, negativ die energetische Bilanz des Heizwärmebedarfs angegliederter Räume, andererseits zeigen die Abbildungen der stündlichen Temperaturentwicklung im Fassadenzwischenraum (FZR), dass trotz erwartungsgemäßen geringen Außenraumtemperaturen der betrachteten Jahreszeit die Temperatur des Fassadenzwischenraum durch den solaren Eintrag oberhalb der Frostgrenze liegt, mit circa 5°C selbst auf der Nordseite eines Gebäudes. Es besteht die Vermutung, dass bei genauerer Betrachtung erkennbar wird, dass die Reduktion der Temperaturdifferenz durch vorkonditionierte Luft im FZR den Bedarf an Wärmeenergie trotz des sehr geringen statischen Wärmedämmwerts des Bauteils reduzieren ließ.

3.2.8. Typwoche Übergangszeit

Entsprechend den vorangestellten Ausführungen zum ablesbaren positiven Effekt geringfügig niedrigerer Kühlbedarfe dieses Bauteils gegenüber den in Absatz 3.2.1 „Bauteil Px16 V3“ und 3.2.2 „Bauteil Px10 V2“ beschriebenen Bauteilen lohnt sich der Blick insbesondere auf die Temperaturen während der Nachtstunden der Typwoche in Abb. 274. Durch die im Betrachtungszeitraum nachts deutlich absinkenden Aussenraumtemperaturen läßt sich der FZR durch die schlechten isolierenden Eigenschaften der Einscheibenverglasung der äußeren Schicht ebenfalls auf Temperaturen deutlich unterhalb der definierten Behaglichkeitsgrenzen der Innenraumtemperatur absenken, wodurch auf Grund der reduzierten Schicht an Zellulosedämmung ein deutlicher Temperaturaustausch mit dem Innenraum zu erkennen ist.

3.2.9. Typwoche Sommer

Die während der Übergangszeit beschriebenen Beobachtungen werden in der Betrachtung des Sommerzeitraums nochmals bekräftigt. Die sich zeigenden typischen Außenraumtemperaturen der Typwoche führen dazu, dass sich die oberhalb des Behaglichkeitsniveaus bewegenden Zwischenraumtemperaturen auch während der nächtlichen Stunden nicht mehr in dem Umfang abkühlen lassen wie dies während der Frühjahrs- und Herbstzeiten möglich ist. Dadurch zeigt sich auch der ermittelte Kühlenergiebedarf während der Sommertage nur bedingt niedriger gegenüber den vorab beschriebenen Bauteilen.

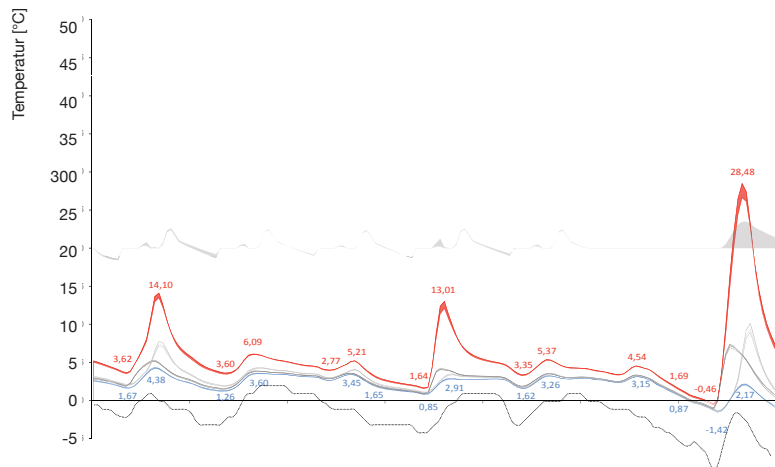


Abb. 273:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung

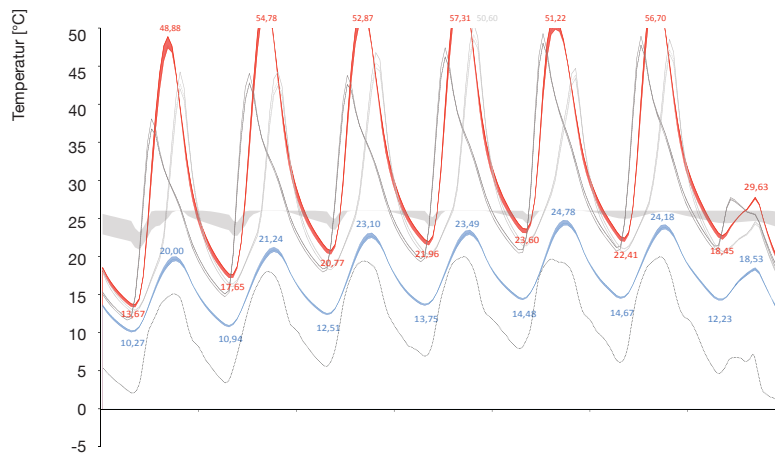


Abb. 274:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

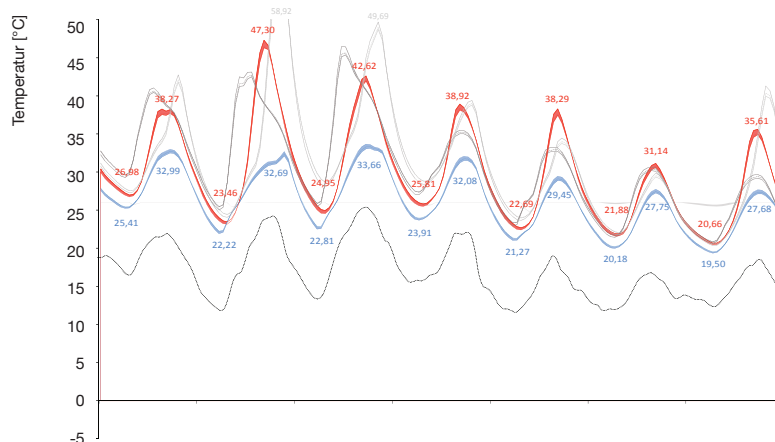


Abb. 275:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung

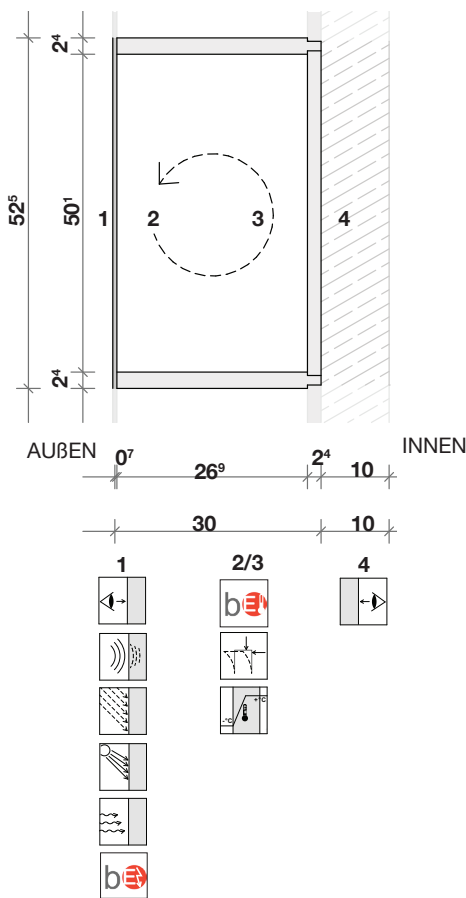
— Zu-/Abluft Nord
— Zu-/Abluft Ost
— Zu-/Abluft Süd
— Zu-/Abluft West

■ Innenraumtemperaturdifferenz Musterraum Nord-Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Nord

20,65 Maximaltemperatur (Abluft, Süd)

19,30 Minimaltemperatur (Zuluft, Süd)

— Temperatur Außenluft



3.2.10. Bauteil Px0 V1

Gebäudeabschluss (1) b

Die äußere Fassadenschicht wird gebildet durch In-Glas-Photovoltaik gefasst von 2 x 3 mm Verbundglas. Der Belegungsgrad der Photovoltaik beträgt im simulierten Bauteil 50% (50% transparent, 50% opak).

Dämmung und Konstruktion (2/3) b

Die dämmenden Eigenschaften des Bauteils resultieren alleine aus der mit 26,9 cm maximal möglichen stehenden Luftschicht (2) des betrachteten Bauteilaufbaus. Der eingeschlossene Luftraum bietet durch das Fehlen eines weiteren Dämmstoffes daher die unmittelbarste Möglichkeit zur Betrachtung der thermischen Effekte.

Raumabschluss (4)

Innenseitig wird die Luftschicht innerhalb der FSH-Konstruktion durch ein 2,4 cm starke FSH Abdeckung eingeschlossen. Überdeckt wird die Oberfläche dieses Px-Bauteils durch eine vorgelagerte Schicht aus Beton mit raumseitigem Oberputz. Diese Fassadenschicht ist optional und orientiert sich an typischen Fassadeneinbausituationen im Bestand und bei Massivbauten.

Die Ausführung des Bauteils Px0 V1 als Polybox mit gekapselter Luftschicht ohne Einsatz zusätzlicher Dämmmaterialien bietet die Möglichkeit das thermische Verhalten des Fassadenprinzips zur Einbindung solarthermischer Dämmung zu untersuchen.

Energetische Eigenschaften

Die Jahresbilanz der Heizenergiebedarfe unter Verwendung des Bauteils Px0 V1 verdeutlicht im Verhältnis zur Vergleichssimulation des Referenzraums, dass unter Einsatz der gewählten Gegebenheiten hinsichtlich verwendeter Materialien, Dimensionierung von Bauteilschichten und Behaglichkeitsanforderungen des Innenraums eine vollständige thermische Isolation nur durch solarthermische Gewinne nicht ausreicht werden kann.

Der Heizenergiebedarf in dieser Bauteilvariante macht daher, wie in Abb. 277 zu sehen, annähernd die Hälfte der benötigten Energie des Jahres aus und das, obwohl durch die zu Grunde gelegte Büronutzung verhältnismäßig hohe interne Wärmelasten vorhanden sind.

Dies zeigt sich unter anderem auch in den ebenfalls höheren Bedarfen an Kälteenergie, die darauf zurück zu führen sind, dass durch die fehlende statische Dämmung in Kombination mit den internen Wärmelasten die sehr hohen Temperaturen im FZR während der Sommer- und Übergangsmonate sich negativ auf die Innenraumtemperatur des Musterraums auswirken.

Abb. 276:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung

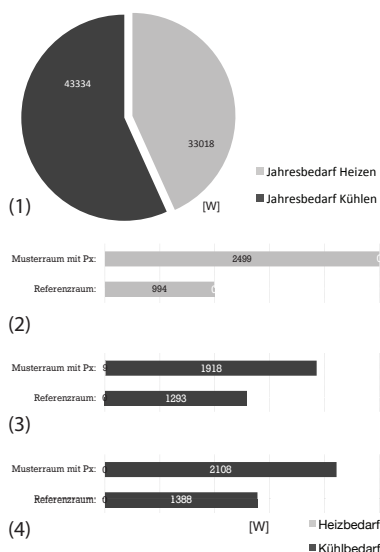


Abb. 277:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung

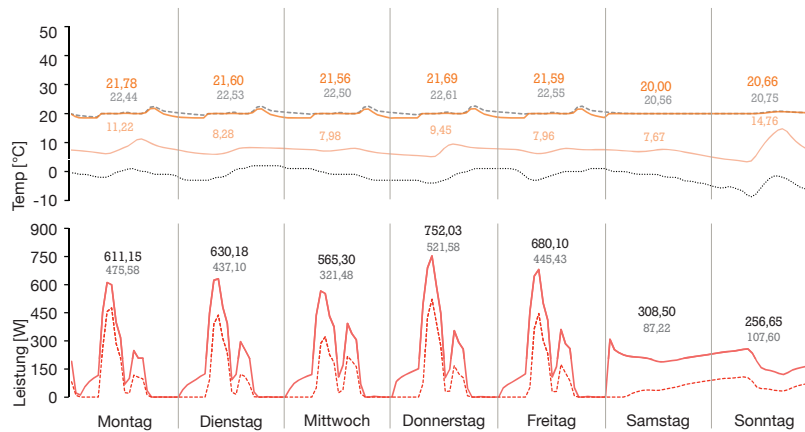


Abb. 278:
mittlerer Temperaturverlauf und
Energiebedarf im Musterraum bei
Typwoche Winter
(Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung

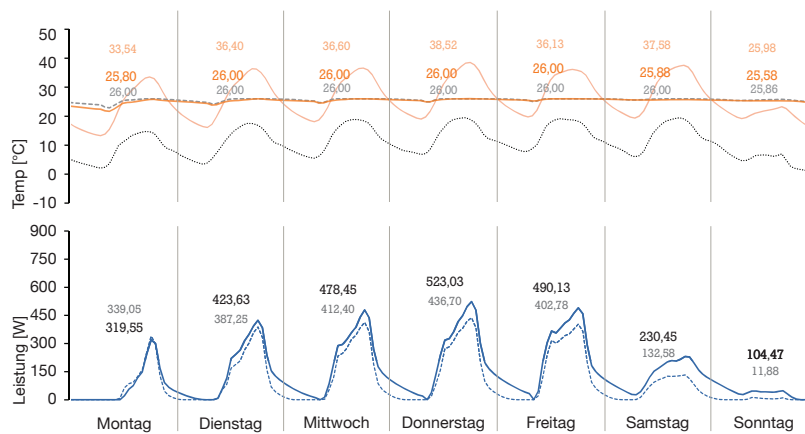


Abb. 279:
mittlerer Temperaturverlauf und
Energiebedarf im Musterraum bei
Typwoche Frühjahr
(Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

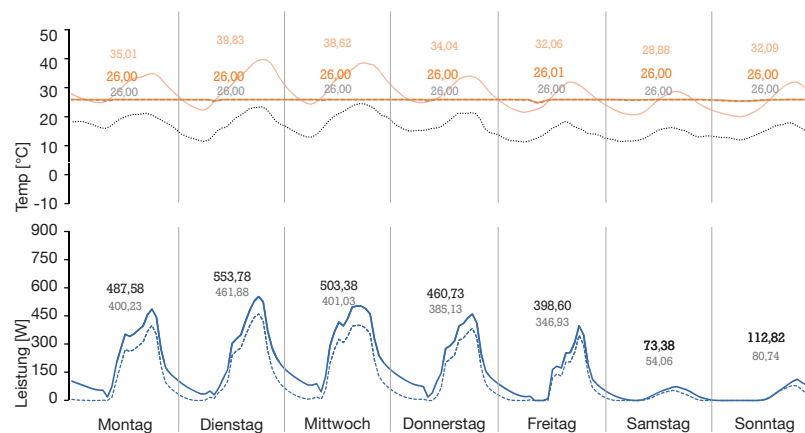


Abb. 280:
mittlerer Temperaturverlauf und
Energiebedarf im Musterraum bei
Typwoche Sommer
(Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung

— Temperatur Musterraum (Px)
— Temperatur Fassade (Px)
--- Temperatur Referenzraum
..... Temperatur Aussenluft

— Kühllast Musterraum (Px)
— Heizlast Musterraum (Px)
--- Kühllast Referenzraum
..... Heizlast Referenzraum

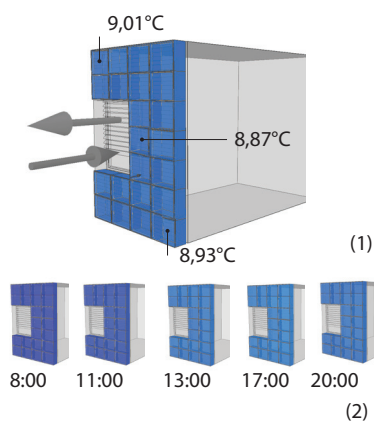


Abb. 281:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

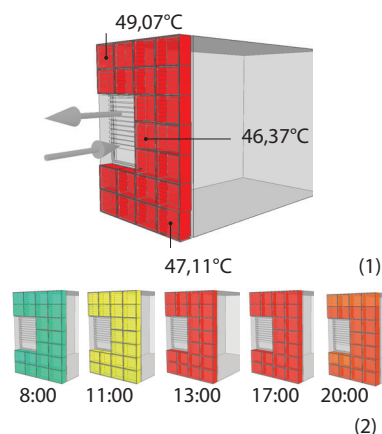


Abb. 282:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

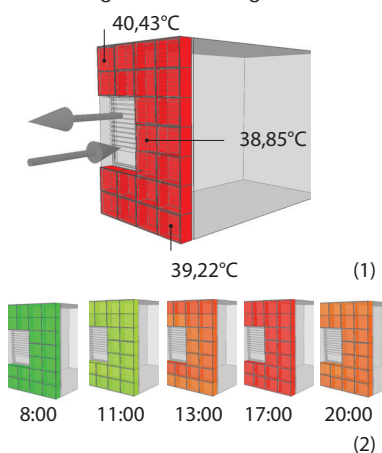


Abb. 283:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung



3.2.11. Typwoche Winter

Auffällig ist, dass die abgebildeten Werte der Lufttemperaturen im Fassadenzwischenraum in Abb. 281 mit 9°C mehr als 3°C höher liegen als die Temperatur unter anderem in Bauteil Px5. Dieser Effekt lässt sich auf das, gegenüber den vorab betrachteten Bauteilen, fehlende Sandwich-Dämmpaneel zurückführen, wodurch der wärmeren Innenraumtemperatur auf Grund des stetig nachheizendem in der Simulation zu Grunde gelegten Heizsystems Wärmeenergie entzogen wird. Diese Beobachtung unterstreicht noch einmal den zuvor attestierten, deutlich erkennbaren erhöhten Bedarf an Wärmeenergie der hier betrachteten Fassadenausführung.

3.2.12. Typwoche Übergangszeit

Insbesondere in der Übergangsphase werden die Unterschiede im energetischen Verhalten des Bauteils Px0 V1 gegenüber den funktional gleichen Bauteilen Px16, Px10 und Px5 mit ebenfalls stehenden Luftschichten im Fassadenzwischenraum deutlich. Betrachtet man Abb. 285, erkennt man, dass eine deutlich höhere Temperaturspreizung der Innenraumtemperatur zwischen einem nach Norden beziehungsweise einem nach Süden orientierten Musterraum gegeben ist. Diese Temperaturunterschiede bekräftigen die minimierten, dämmenden Eigenschaften des gewählten Aufbaus und die daraus resultierenden unmittelbaren Auswirkungen bei sich ändernden Außenraumbedingungen auf die Innenraumtemperatur und den Komfort.

3.2.13. Typwoche Sommer

Durch die bereits erwähnte fehlende dämpfende Wirkung des Fassadenaufbaus und eine Nachtabsenkung der Außenraumtemperatur im Betrachtungszeitraum von nicht unter 10°C besteht ein ganztägiger Kühlbedarf des Innenraums, ähnlich den vorab betrachteten Bauteilen. Es besteht jedoch auf Grund der speziellen, gekapselten Bauweise ohne weitere konstruktive Dämmebene zwischen Innen- und Außenraum ein zusätzlicher Wärmeeintrag über die gesamte Fassadenfläche. Die gekapselte Bauweise des Fassadenbauteils wirkt dabei über den Tag hin als Pufferung der thermischen Solarenergie, die dadurch während der aktiven Kühlung des Innenraums stetig nachströmt und die Innenraumtemperatur erneut erhöht. Dieser Umstand führt dazu, dass insbesondere während der Sommertage aber auch in der Übergangsphase der Bedarf an Energie zum Kühlen des Innenraums deutlich über den Bedarfen der vergleichenden Bauteilaufbauten liegt (siehe Abb. 277).

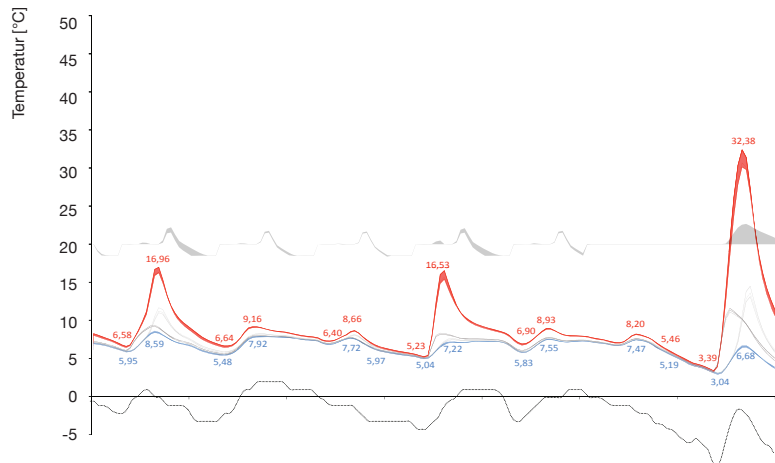


Abb. 284:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung

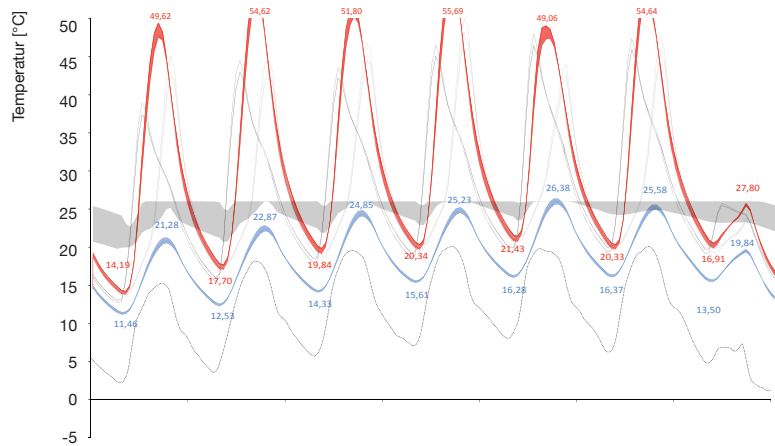


Abb. 285:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

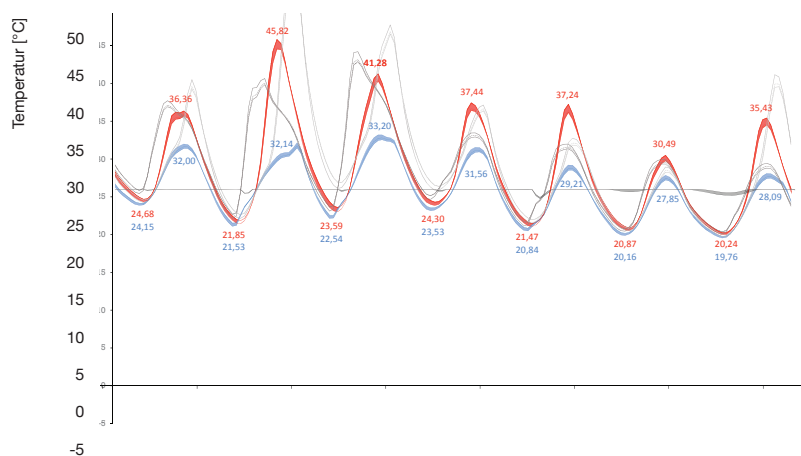


Abb. 286:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung

— Zu-/Abluft Nord
— Zu-/Abluft Ost
— Zu-/Abluft Süd
— Zu-/Abluft West

■ Innenraumtemperaturdifferenz Musterraum Nord-Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Nord

20,65 Maximaltemperatur (Abluft, Süd)

19,30 Minimaltemperatur (Zuluft, Süd)

— Temperatur Außenluft

Architektonische Funktionen



Wahrnehmung und Einsehbarkeit vom Straßenraum und Innenraum mit Abhängigkeiten zur Oberfläche

Energetische Funktionen



Das benannte Ebene bietet die Möglichkeit zur regenerativen Erzeugung von elektrischer Energie



In der markierten Bauteilschicht besteht die Möglichkeit zur aktiven oder passiven Nutzung in der Fassadenluftschicht vorhandener thermischer Energie

Schützende Funktionen



Primäre Bauteilschicht zur thermischen Isolierung



Statisch-konstruktiv relevante Bauteilschicht



Tageslicht- oder sonnenschutzrelevante Ebene des Bauteils



Ebene zur Regulierung der Winddichtigkeit



Schallschutzeigenschaften innerhalb eines Bauteils



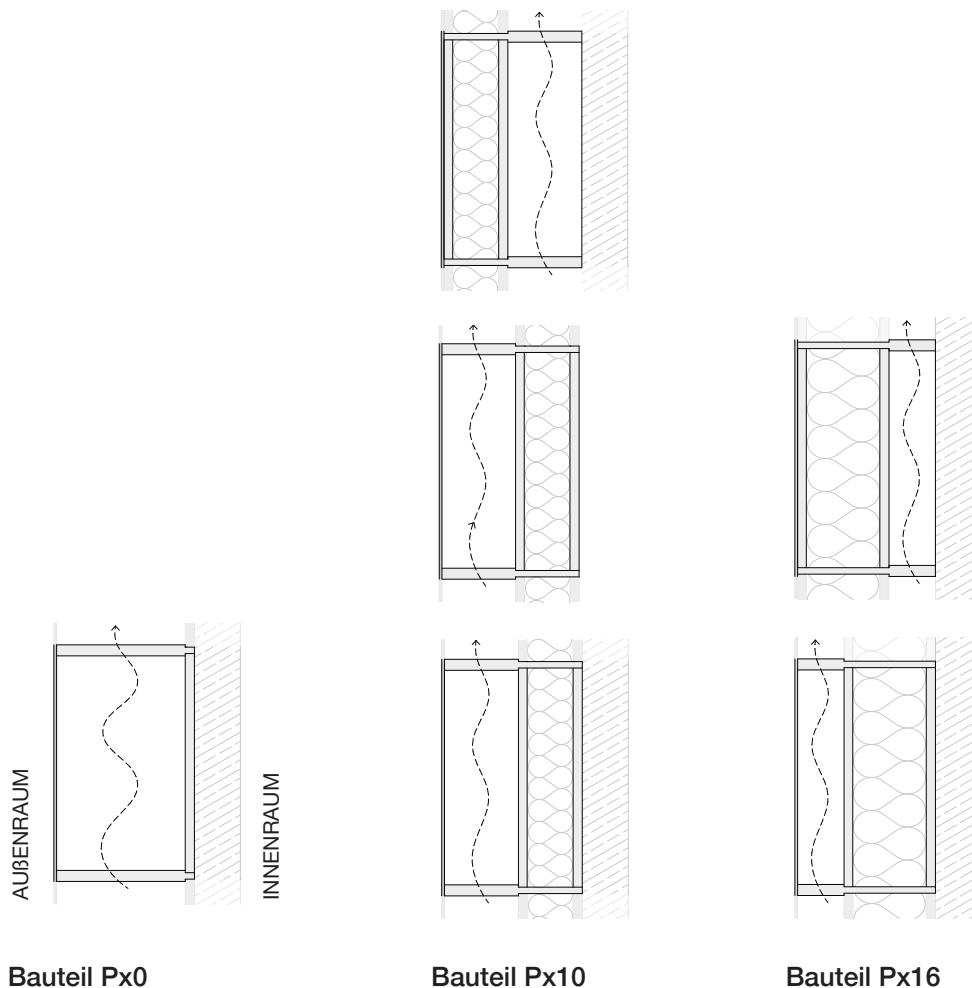
Schutz vor Feuchtigkeitseinwirkung vom Aussenraum- oder Innenraumklima



Visueller Schutz zwischen Innen- und Aussenraum

3.3. Fassadenbauteile mit durchströmter Luftschicht

Die Betrachtungen des energetischen Verhaltens des polyfunktionalen Fassadenprinzips als Kollektor solarthermischer Energie zur aktiven oder passiven Nutzung im und am Gebäude wurde projektintern anhand der nachfolgend beschriebenen Ausführungen untersucht. Bei gleichbleibendem konstruktiven Grundraster wurde in den Bauteilvarianten ebenfalls mit variierenden Ausführungen der zirkulierenden Luftschicht und Dämmstärke gearbeitet.



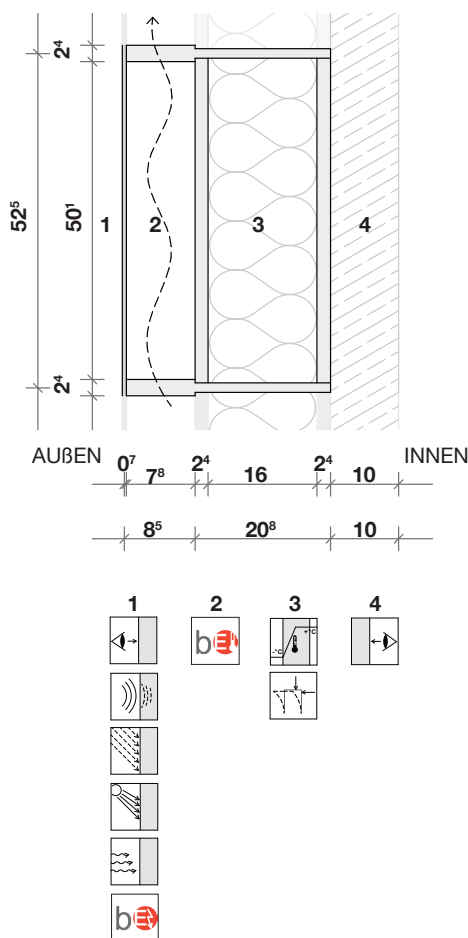


Abb. 287:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung

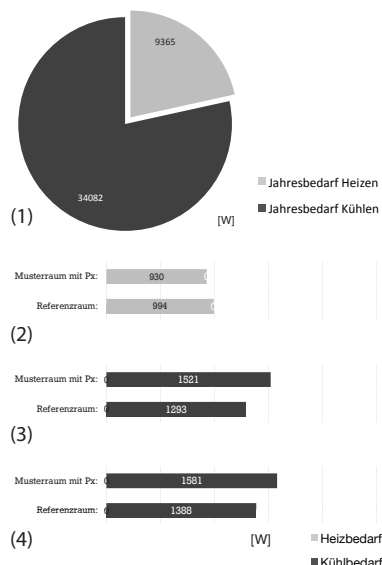


Abb. 288:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung

3.3.1. Bauteil Px16 V6

Gebäudeabschluss (1) Die äußere Fassadenschicht wird gebildet durch In-Glas-Photovoltaik gefasst von 2 x 3 mm Verbundglas. Der Belegungsgrad der Photovoltaik beträgt im simulierten Bauteil 50% (50% transparent, 50% opak).

Dämmung und Konstruktion (2/3) Die dämmenden Eigenschaften des Bauteils resultieren aus einer durch die 30 cm starke Konstruktion geschaffene Kombination einer 8,5 cm dicken, temperaturgeregelt durchströmten Luftschicht (2) unterstützt durch ein 20,8 cm Dämmpaneel (3) aus 16 cm Zellulosedämmung umfasst von 2x2,4 cm Furnierschichtholz. Das Paneel ist innenseitig in den konstruktiven Rost aus Furnierschichtholz (FSH, 2,4 cm Stärke) eingelassen.

Raumabschluss (4)
Den innenseitigen Raumabschluss dieses Px-Bauteils bildet eine vorgelagerte Schicht aus Beton mit raumseitigem Oberputz. Diese Fassadenschicht ist optional und orientiert sich an typischen Fassadeneinbausituationen im Bestand und bei Massivbauten.

Das Bauteil Px16 V6 unterscheidet sich gegenüber dem Bauteil Px16 V3 durch die Möglichkeit einer temperaturgesteuerten Luftdurchströmung des Fassadenzwischenraums. Bei mittel- bis längerfristig erwarteten Außenraumtemperaturen, sowie Temperaturen der Fassaden- wie auch Innenraumzonen oberhalb des zu Grunde gelegten Behaglichkeitsbereichs für Innenräume werden Lüftungsklappen innerhalb des simulierten Fassadenmoduls geöffnet und die angestaute Wärme im FZR durch Thermik abgeführt.

Energetisches Verhalten

Das Bauteil reagiert auf Grund seiner hohen Dämmeigenschaften und der dadurch vom Innenraum energetisch weitestgehend entkoppelten durchströmten Luftschicht, wie in Abb. 287 in Bauteilebene 2 zu erkennen, ähnlich dem Bauteil Px16 V3. Dies zeigen die jahresbilanziellen Energiebedarfe zur Konditionierung des Innenraums aus Abb. 288. Es findet, vergleicht man die Energiebedarfe zum Heizen und Kühlen zwischen der Referenzvariante und den Ergebnissen der Bauteilbetrachtung, sowohl während der Heizperiode, wie auch während Tagen mit warmen Außenraumtemperaturen nur ein begrenzter Wärmeaustausch zwischen Fassadenzwischenraum und Innenraum statt. Die leicht erhöhten Kältebedarfe der Bauteilbetrachtung in Abb. 288 gegenüber der Referenzvariante zeigt, wie auch in Bauteil Px16 V3 beobachtet und beschrieben, dass ein gewisser Wärmeeintrag des Fassadenzwischenraums in den Innenraum dennoch erfolgt. Die aktive Kontrollmöglichkeit der Zwischenraumtemperaturen dieses Bauteils gegenüber der Variante mit gekapselter Luftschicht sollte jedoch die Möglichkeit bieten, den erhöhten Kältebedarf in Sommer- und Übergangszeiten zu reduzieren. Es wird vermutet, dass in den erstellten Simulationen durch die gewählte Größe der Überströmöffnungen und der geringen Dimension der Luftschicht mit nur 7,8 cm des Bauteils, die thermische Energie durch den sich einstellen Luftwechsel bei geöffneten Entlüftungsklappen nicht ausreicht diese zeitgerecht abzuleiten.

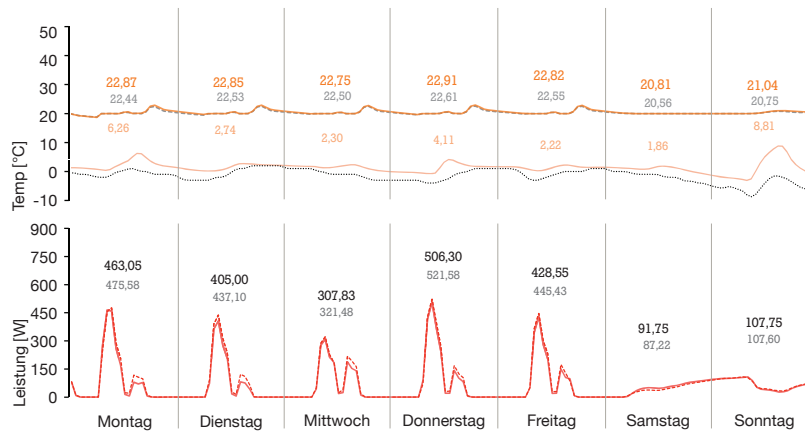


Abb. 289:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung

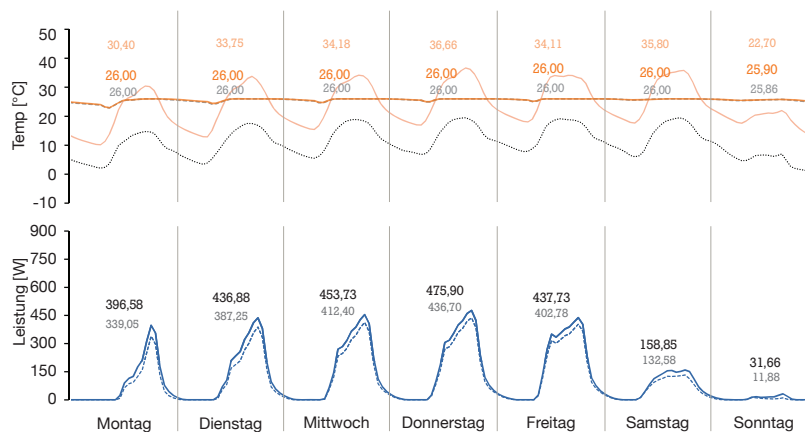


Abb. 290:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation
Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung

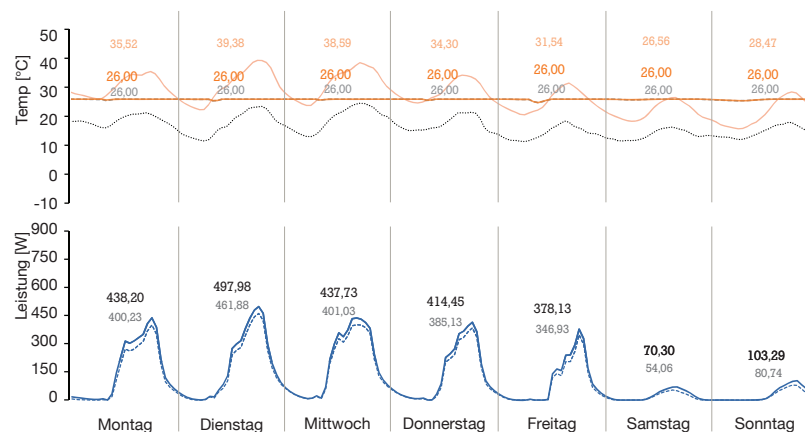


Abb. 291:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung

— Temperatur Musterraum (Px)
— Temperatur Fassade (Px)
--- Temperatur Referenzraum
..... Temperatur Aussenluft
— Kühllast Musterraum (Px)
— Heizlast Musterraum (Px)
--- Kühllast Referenzraum
--- Heizlast Referenzraum

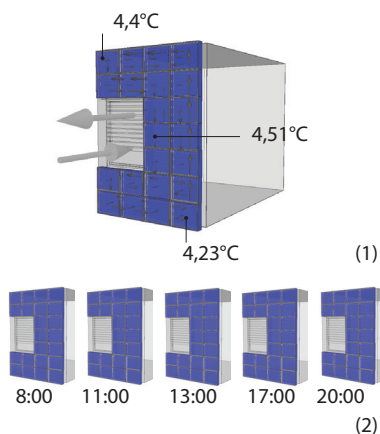


Abb. 292:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

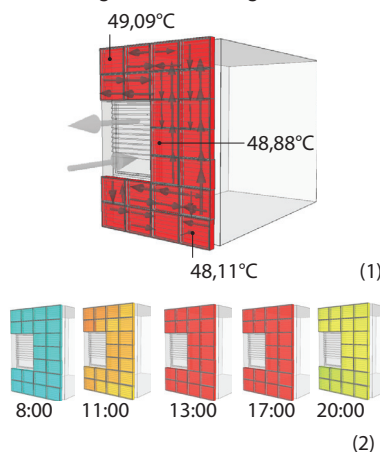


Abb. 293:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

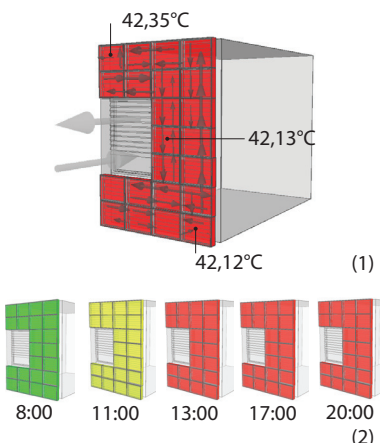


Abb. 294:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung



Typwoche Winter

Durch die Lüftungssteuerung des Fassadenzwischenraums sind die Lüftungsclappen der Fassade während der gesamten Winterzeit, sowie bei erwarteten, längeren Zeitperioden mit einer Außenraumtemperatur unter 12°C geschlossen. Dadurch reagiert die Fassade des Bauteils Px16 V6 während der Typwoche Winter entsprechend ihrem Pendant mit gekapselter Luftschicht. Die Temperatur des Fassadenzwischenraums folgt durch die Einscheibenverglasung der äußeren Schicht dem Temperaturverlauf des Aussenraumklimas, wie in Abb. 292 zu erkennen. Dabei zeigen die Temperaturen der Luftschicht des FZR je nach Orientierung der Fassade einen deutlicheren oder weniger deutlichen Temperaturhub gegenüber der Aussenraumtemperatur. Die geringen thermischen Isolationseigenschaften der Einscheibenverglasung erreicht jedoch, dass die Temperatur im FZR weitestgehend oberhalb der Frostgrenze bleibt. Dies äußert sich z.B. in den während der Heizperiode ablesbaren geringeren Heizbedarfe in Abb. 288.

Typwoche Übergangszeit

Es zeigt sich auch während der Übergangszeiten, dass der erwartete Durchströmungseffekt des simulierten Bauteils in der vorliegenden Ausführung nicht ideal funktioniert, denn entsprechend der Simulation mit gekapselten Luftschichten verdeutlichen die exemplarischen Visualisierungen in Abb. 293 einen ähnlichen Verlauf im Tagesgang. Bei genauerer Betrachtung lassen sich jedoch insbesondere in den Abend- und Morgenstunden durch die temperaturgeregelten Lüftungsclappen des Fassadenmoduls kühlere Temperaturen erreichen. Bestätigt wird diese Beobachtung im Vergleich der resultierenden Temperaturwerte je Orientierung aus Abb. 244 mit den Temperaturen der Bauteils Px16 V3 mit gekapselten Luftschichten. Man erkennt, dass durchgängig die Temperaturen des Bauteils Px16 V6 unter den Temperaturen von Bauteil Px16 V3 liegen.

Typwoche Sommer

Während der Sommertage zeigt das Bauteil ebenfalls ein ähnliches Verhalten, wie während der Übergangszeit, mit relativ hohen Temperaturen der Luftschicht ab den Mittagsstunden und einer Abkühlung der Lufttemperaturen des FZR über die Nacht. Dadurch werden während der Morgenstunden Lufttemperaturen in der Fassade zwischen 20 bis 25°C erzielt. Bis zu den frühen Nachmittagsstunden erhöhen sich die Temperaturen in der Fassade je nach Orientierung bis auf Maximalwerte von 30 bis 45°C. Auch in diesem Betrachtungszeitraum bewirkt die Lüftungssteuerung erkennbare, niedriger Temperaturen der Fassade im Vergleich zu Bauteil Px16 V3. Auffällig in Abb. 297 ist die sich ausweitende Temperaturdifferenz zwischen der in die Fassade nachströmenden Luft und der mit erhöhter Temperatur entweichenden Luft am Auslass des simulierten Fassadenmoduls an Wochenenden (siehe Abb. 297). Da gemäß Simulation der Büroraumnutzung nach Feierabend am Freitag keine natürliche Lüftung über das Öffnen des Fensterflügels erfolgt, erwärmt sich an Wochenenden der Innenraum je nach Orientierung und Einstrahlungsintensität mehr oder weniger stark. Über das Steuerungssignal werden dann entsprechend die Lüftungsclappen der Fassade geöffnet und durch die Durchströmung überschüssige Wärmeenergie abgeführt.

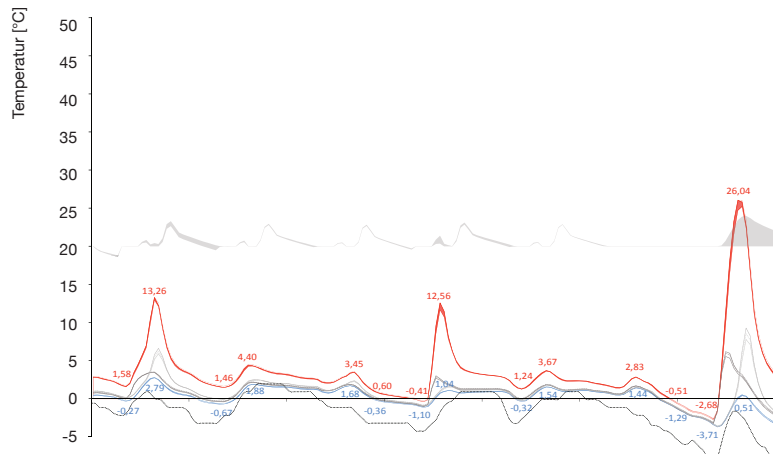


Abb. 295:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)

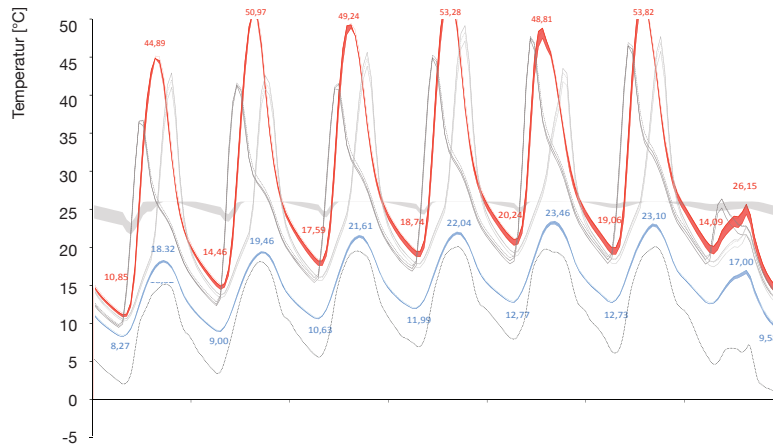


Abb. 296:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

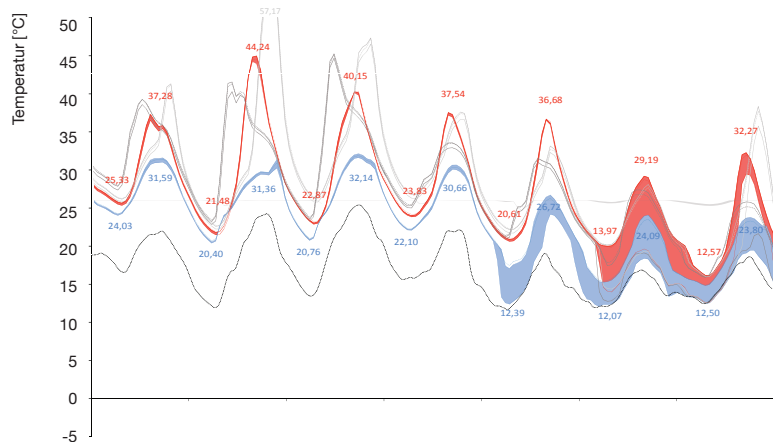


Abb. 297:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung

— Zu-/Abluft Nord
— Zu-/Abluft Ost
— Zu-/Abluft Süd
— Zu-/Abluft West

■ Innenraumtemperaturdifferenz Musterraum Nord-Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Nord

20,65 Maximaltemperatur (Abluft, Süd)

19,30 Minimaltemperatur (Zuluft, Süd)

— Temperatur Außenluft

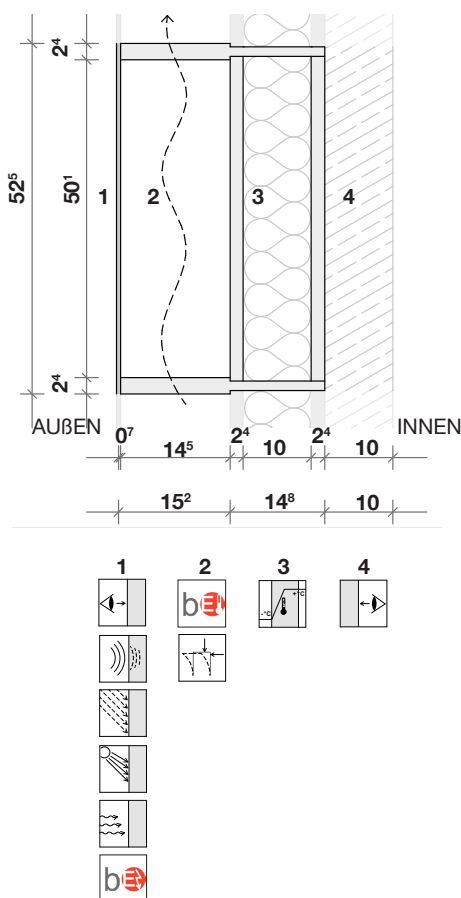


Abb. 298:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung

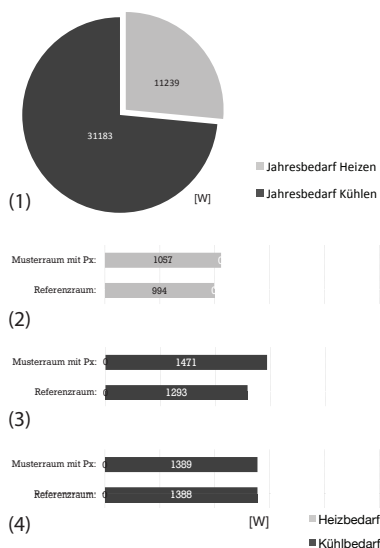


Abb. 299:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung

3.3.2. Bauteil Px10 V5

Gebäudeabschluss (1) b

Die äußere Fassadenschicht wird gebildet durch In-Glas-Photovoltaik gefasst von 2 x 3 mm Verbundglas. Der Belegungsgrad der Photovoltaik beträgt im simulierten Bauteil 50% (50% transparent, 50% opak).

Dämmung und Konstruktion (2/3) b

Die dämmenden Eigenschaften des Bauteils resultieren aus einer durch die 30 cm starke Konstruktion geschaffene Kombination einer 14,5 cm dicken, temperaturgeregelt durchströmten Luftschicht (2) unterstützt durch ein 14,8 cm Dämmpaneel (3) aus 10 cm Zellulosedämmung umfasst von 2x2,4 cm Furnierschichtholz. Das Paneel ist innenseitig in den konstruktiven Rost aus Furnierschichtholz (FSH, 2,4 cm Stärke) eingelassen.

Raumabschluss (4)

Den innenseitigen Raumabschluss dieses Px-Bauteils bildet eine vorgelagerte Schicht aus Beton mit raumseitigem Oberputz. Diese Fassadenschicht ist optional und orientiert sich an typischen Fassadeneinbausituationen im Bestand und bei Massivbauten.

Das simulierte Modul, bestehend aus dem Bauteil Px10 V5, beinhaltet eine temperaturgesteuerte Durchströmung des Fassadenzwischenraums. Bei mittel- bis längerfristig erwarteten erhöhten Außenraumtemperaturen sowie Temperaturen der Fassaden- wie auch Innenraumzonen oberhalb des zu Grunde gelegten Behaglichkeitsbereichs für Büroräume werden Lüftungsklappen innerhalb des Fassadenmoduls geöffnet, um die angestaute Wärme im FZR durch Thermik zu entlüftet.

Energetisches Verhalten

Entsprechend Bauteil Px10 V2 mit gekapselten Luftschichten zeigt auch das Bauteil Px10 V5, dass trotz der reduzierten statischen Dämmung von nur 10 cm Zellulosedämmung ein annähernd gleicher Anspruch an Heizenergie gegenüber der vergleichenden Referenzsimulation zu erwarten ist. In den Energiebedarfen zum Kühlen des Innenraums der Übergangs- wie auch Sommerzeit sieht man in Abb. 299, dass sich durch die Lüftungs- und Durchströmungsfunktion des Bauteils das Verhalten der Fassade hinsichtlich des Bedarfs an Kühlenergie erkennbar deutlich verbessern lässt, jedoch jahresbilanziell immer noch geringfügig höhere Kühlbedarfe induziert als sie bei einer vergleichsweise ausgebildeten konventionellen Fassade anfallen würden. Es besteht die Vermutung, dass durch einen Optimierungsprozess der Dimensionierung der Überströmöffnungen des Fassadenmoduls und einer weiter verfeinerten Regelung der Selbigen, der Bedarf an Kühlenergie weiter reduziert werden kann.

Des Weiteren verdeutlicht die Spreizung der Temperaturen im Fassadenzwischenraum auf Grund der Durchströmung des Moduls, insbesondere im Diagramm Abb. 308 zu sehen, und den sich dadurch einstellenden deutlich geringeren Lufttemperaturen, dass Übertemperaturen aktiv unterbunden werden können. Neben den positiven Effekten für das Innenraumklima begünstigt dieses Verhalten unter anderem bei Einsatz temperatursensibler Photovoltaik in der vorgelagerten, gebäudeabschließenden Ebene eine Minderung des Wirkungsgrades zu verhindern. Zudem wäre bei nutzungsbezogenem Bedarf denkbar, die abgeführte Wärme anderweitig kombiniert mit weiteren technischen Systemen gebäudeintern zu nutzen.

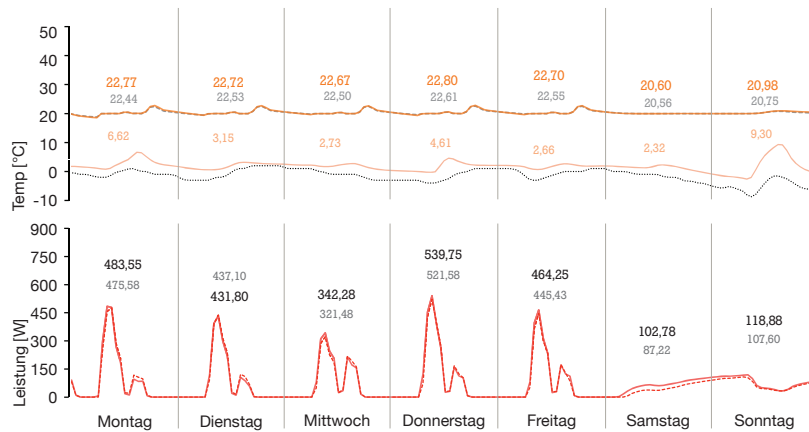


Abb. 300:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung

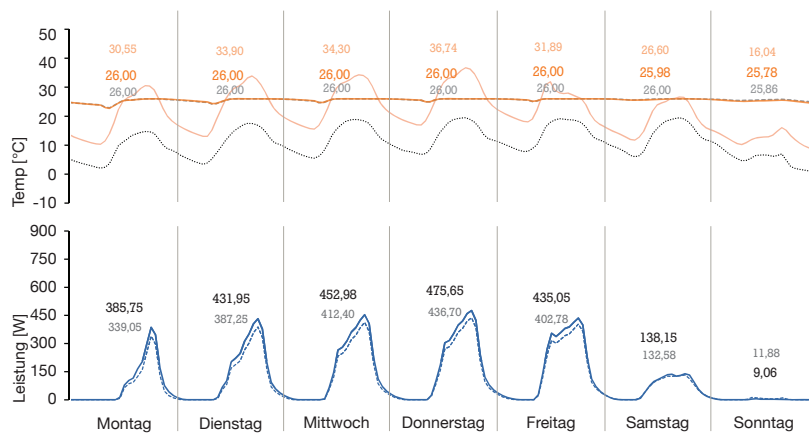


Abb. 301:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation
Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung

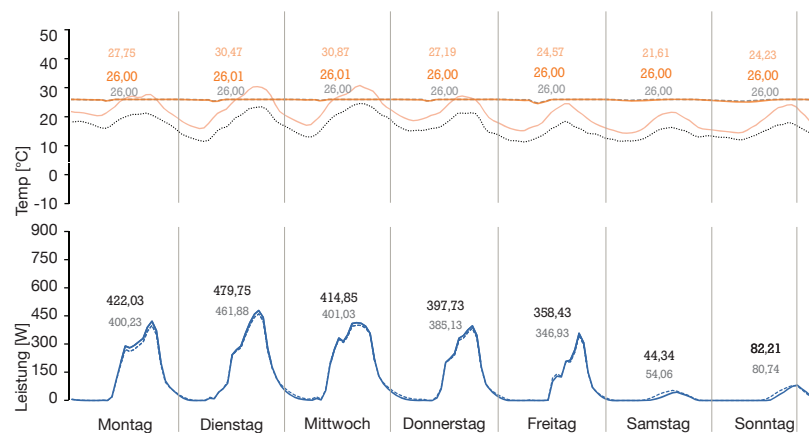


Abb. 302:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung

— Temperatur Musterraum (Px)
 — Temperatur Fassade (Px)
 - - - Temperatur Referenzraum
 . . . Temperatur Aussenluft

— Kühllast Musterraum (Px)
 — Heizlast Musterraum (Px)
 - - - Kühllast Referenzraum
 . . . Heizlast Referenzraum

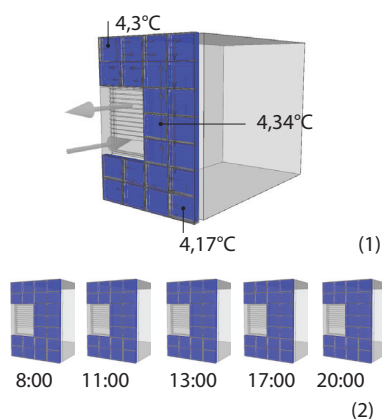


Abb. 303:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

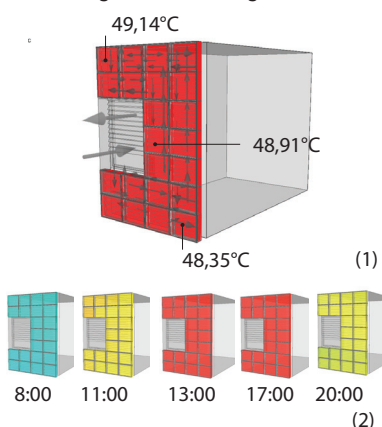


Abb. 304:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

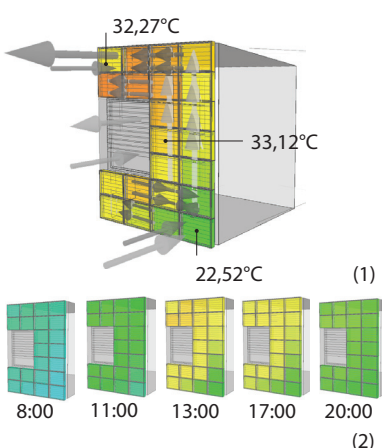


Abb. 305:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung



3.3.3. Typwoche Winter

Mit leichten Temperaturunterschieden zu den Simulationsergebnissen der Bauteilbetrachtung Px10 V2 reagiert ansonsten das Bauteil Px10 V5 annähernd entsprechend einem Bauteil mit gekapselten Luftschichten, da während der Heizperiode ein Öffnen der Lüftungsklappen des Fassadenmoduls durch die Regelungssteuerung unterbunden wird, um den maximalen Solarenergieertrag zu nutzen.

3.3.4. Typwoche Übergangszeit

Die reduzierte Dämmstärke des Bauteils führt bei der Simulation des Moduls mit Bauteilen des Typs Px10 V5 bereits während der Übergangsphase dazu, dass an Wochenenden auf Grund sich einstellender erhöhter Innenraumtemperaturen durch fehlendes Lüften der Nutzer das adaptive Fassadensystem auf die überhöhten Innenraumtemperaturen reagiert. Durch Überschreitung des Regelungssignals zur Öffnung der Lüftungsklappen des Fassadenmoduls werden diese auch während der Wochenenden automatisiert geöffnet und ein Abströmen der fassadeninternen Wärmeenergie erzielt. Mittels der thermisch sensiblen Verhaltensweise reagiert die Fassade unmittelbar auf nutzungsspezifische Umstände beziehungsweise kann nutzerbezogene Fehlverhalten ausgleichen.

3.3.5. Typwoche Sommer

Während der Sommermonate kommt unter Anwendung des hier betrachteten Bauteils die erwartete energetische Leistungsfähigkeit des polyfunktionalen Fassadenprinzips mit Durchströmungsoption zum Tragen. Abb. 305 in Kombination mit Abb. 308 zeigen sehr eindrücklich die Potenziale des gewählten Fassadenmoduls bei der zu Grunde gelegten Büronutzung. Durch eine ganztägige Außenraumtemperatur oberhalb der Regelungsgrenze der Lüftungsklappen der Fassade sind diese ganztägig geöffnet und ermöglichen die durch Thermik getriebene Luftdurchströmung der Fassade. Dabei zeigen die exemplarischen Visualisierungen eines typischen Sommertages in Abb. 305 die beabsichtigte kleinteilige und gleichmäßige Temperaturschichtung innerhalb der Fassade, geregelt durch die gewählte Dimension des Bauteilroster. Trotz der geöffneten Lüftungsklappen und daraus resultierender Durchströmung des Fassadenzwischenraums wird mittels des Fassadenroster ein annähernd homogenes Temperaturbild der Fassade geschaffen. Gleichzeitig verhindert die temperaturgesteuerte Regelung der Lüftungsklappen des Moduls, dass, wie in Abb. 308 zu erkennen, eine Überhitzung des Fassadenzwischenraums verhindert wird. Es zeigt sich ferner, dass durch die sehr nah bei einander liegenden Temperaturdifferenzbereiche der nach Norden und der nach Süden orientierten simulierten Fassadenbereiche mit einer in den meisten Fällen geringen Temperaturerhöhung zwischen der Außenraumtemperatur und der aus dem Modul abströmenden solarkonditionierten Luft, die gewählte Dimension der Durchströmungsöffnungen wohl proportioniert einen erhöhten Wärmeenergiestau innerhalb des Moduls aktiv unterbindet.

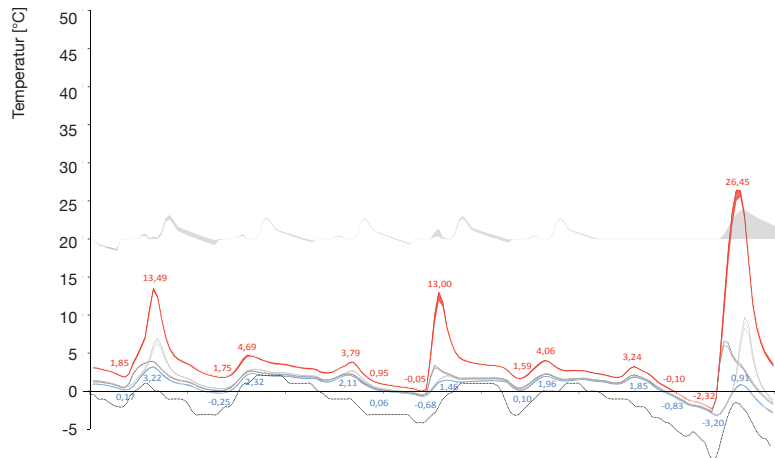


Abb. 306:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung

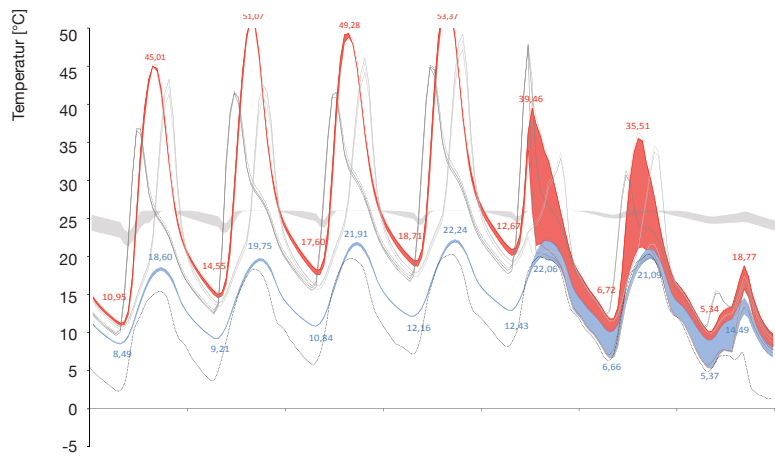


Abb. 307:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

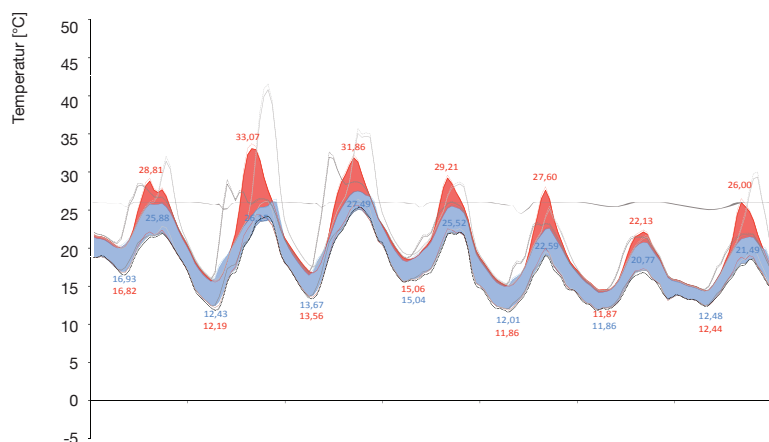


Abb. 308:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung

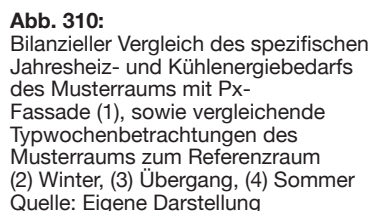
— Zu-/Abluft Nord
— Zu-/Abluft Ost
— Zu-/Abluft Süd
— Zu-/Abluft West

■ Innenraumtemperaturdifferenz Musterraum Nord-Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Nord

20,65 Maximaltemperatur (Abluft, Süd)

19,30 Minimaltemperatur (Zuluft, Süd)

— Temperatur Außenluft



Gebäudeabschluss (1)
Die äußere Fassade schicht wird gebildet durch In-Glas-Photovoltaik gefasst von 2 x 3 mm Verbundglas. Der Belegungsgrad der Photovoltaik beträgt im simulierten Bauteil 50% (50% transparent, 50% opak).

Dämmung und Konstruktion (2/3)  Die dämmenden Eigenschaften des Bauteils resultieren lediglich aus der durch die 30 cm starke Konstruktion geschaffene Luftschicht (2/3) zwischen der Gebäude- (1) und raumabschließenden (4) Schicht des Bauteils. Die 26,9 cm starke, temperaturgeregelte durchströmte Luftschicht (2/3) ist gefasst durch den konstruktiven Rost aus Furnierschichtholz (FSH, 2,4 cm Stärke).

Raumabschluss (4)
Den innenseitigen Raumabschluss dieses Px-Bauteils bildet eine vorgelagerte Schicht aus Beton mit raumseitigem Oberputz. Diese Fassadenschicht ist optional und orientiert sich an typischen Fassadeneinbausituationen im Bestand und bei Massivbauten.

Durch die in diesem Bauteil entfallende klassische Dämmung bietet die temperaturgesteuerte Durchströmung des Fassadenzwischenraums als einzige Beeinflussungsmöglichkeit der Dämmeigenschaften des Bauteils die Möglichkeit ganzheitlich die Potenziale einer solarthermischen Dämmung als alternative Dämmform zu betrachten.

Das genannte Spezifikum einer ganzheitlich ausgesparten Dämmschicht entsprechend der vorangegangenen Bauteile zeigt sich auch unmittelbar in den in Abb. 310 aufgeführten Jahresenergiebedarfen für Heizen und Kühlen. Entgegen den bisher beschriebenen Bauteilen mit durchströmten FZR kehrt sich erwartungsgemäß bei dem hiesigen Bauteil Px0 V4 der mengenmäßige Bedarf an Kühl- und Heizenergie um. Der Bedarf an Wärmeenergie mit Px-Fassade ist dreimal höher als der Bedarf der vergleichenden Referenzsimulation. Dies bestätigt auch der Energiebedarf für Heizen in Abb. 299. Hinsichtlich der Kühlbedarfe zeigt sich jedoch, dass während der Übergangsphasen annähernd gleiche Bedarfe zwischen Referenz- und Px-Bauteil bestehen und während der Sommermonate sogar der Kühlbedarf zur Temperierung des Musterraums unter dem Bedarf der vergleichenden Standardausführung liegt.

Gegenüber den vorab beschriebenen Bauteilen zeigt diese Ausführung des Fassadenmoduls erstmals auch während des Anfangs und zum Ende der Woche in der Übergangszeit einen geringen Bedarf an Heizenergie. Dieser Bedarf besteht jedoch nur außerhalb der eingestellten Nutzungsphase des Büroraums. Mit Aufnahme der Bürotätigkeit der Nutzer wechselt dieser Heizbedarf gemäß den anderen Bauteilsimulationen in einen Bedarf an Kälteenergie zur Kompensierung der solaren und internen Erträge.

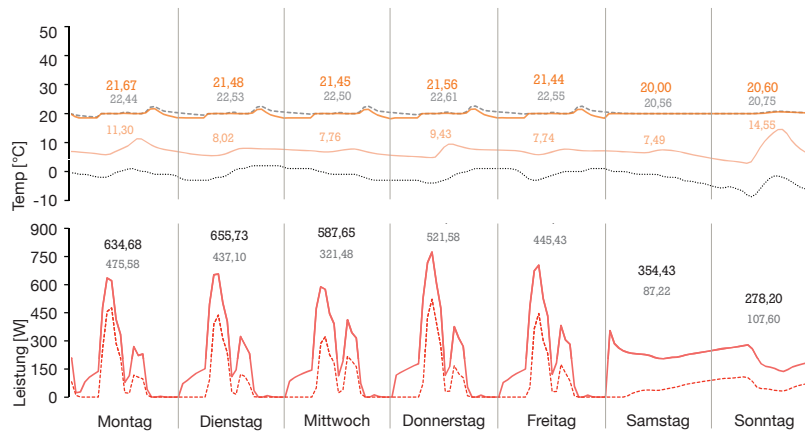


Abb. 311:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung

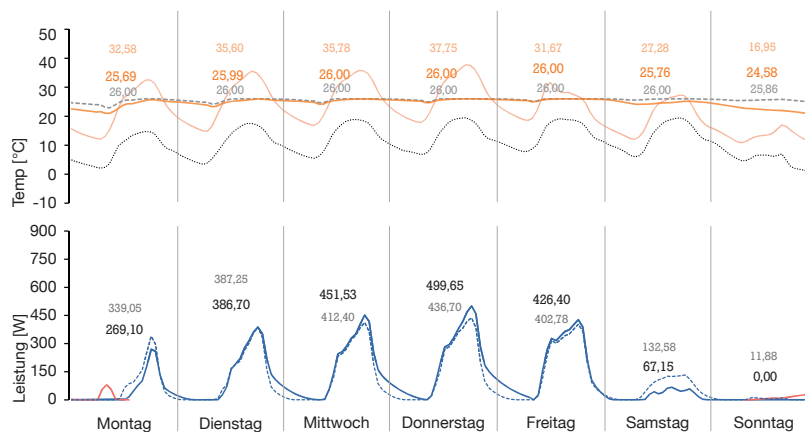


Abb. 312:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation
Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung

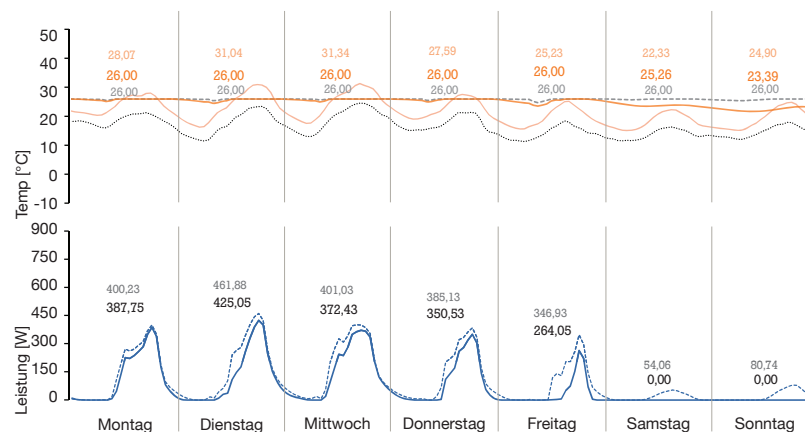


Abb. 313:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung

— Temperatur Musterraum (Px)
 — Temperatur Fassade (Px)
 - - - Temperatur Referenzraum
 . . . Temperatur Aussenluft

— Kühllast Musterraum (Px)
 — Heizlast Musterraum (Px)
 - - - Kühllast Referenzraum
 - - - Heizlast Referenzraum

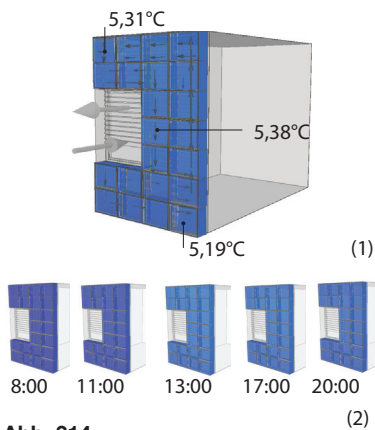


Abb. 314:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

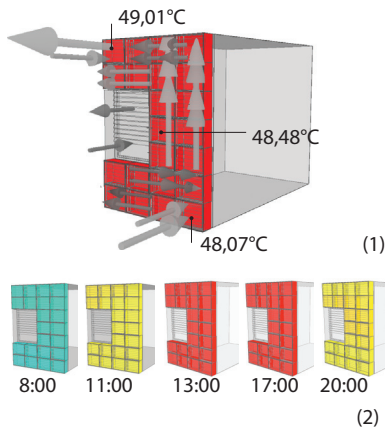


Abb. 315:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

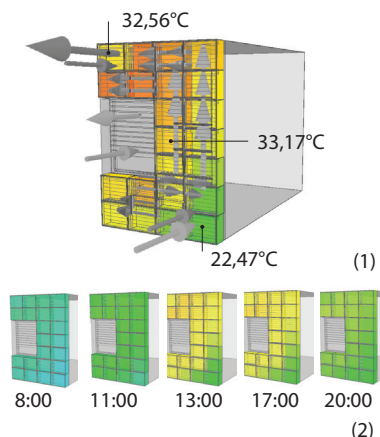


Abb. 316:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung



3.3.7. Typwoche Winter

Durch die ausgesparte konventionelle Dämmung in dem untersuchten Bauteil wird zur Wahrung des Mindesttemperatur zum behaglichen Betrieb des Musterraums durchgängig, wie in Abb. 248 zu sehen, während der betrachteten Typwoche Winter beheizt. Dabei gleicht das winterliche Verhalten dieser Bauteilausführung dem des Bauteils Px0 V1 mit gekapselten Luftschichten durch die während der Wintermonate vollständig geschlossen gehaltenen Lüftungsklappen im Modul.

3.3.8. Typwoche Übergangszeit

In der Übergangszeit zeigt sich anhand der resultierenden Innenraumtemperatur je Orientierung auf Grund des verwendeten Bauteils sehr gut die Beeinflussung durch den solaren Ertrag des Fassadenzwischenraums (siehe Abb. 318). Während im Süden sich ergebende sehr hohe Temperaturen im FZR von bis zu 50°C die Innenraumtemperatur bis an die obere Behaglichkeitsgrenze führen und diese aktiv gekühlt werden muss, bewirken Temperaturen im Norden von bis zu 25°C über die Woche betrachtet durchgängig behagliche Innenraumtemperaturen ohne den Bedarf zusätzlicher Energien zur Heizung oder Kühlung. Da es sich im Betrachtungszeitraum um eine Woche im April handelt mit kühlen bis angenehmen Außenraumtemperaturen zwischen 3° bis maximal 20°C zeigen sowohl die nach Süden entstehenden hohen Temperaturen von über 50°C sowie die moderaten Temperaturen der Nordseite mit bis zu 25°C das differenzierte aber beträchtliche thermische Potenzial zur Reduktion der Heizperiode des Jahres.

3.3.9. Typwoche Sommer

Vergleicht man die Typwoche Sommer in Abb. 319 mit den Ergebnissen des Bauteils Px0 V1 in Abb. 292 so bewirkt die integrierte temperaturgesteuerte Regelungssystematik dieses Bauteils eine wesentliche Dämpfung in den generierten Lufttemperaturen. Mit Maximaltemperaturen im südlichen FZR von nicht mehr als 34°C und im nördlichen FZR von weniger als 29°C bei gleichzeitigem über das Fassadenmodul verteilten Temperaturverlauf mit einem Delta T von circa 3°-4°C lässt sich eine deutlich erkennbare Reduktion der Kühlenergie erreichen, die in Abb. 310 auch quantitativ mit 989 W deutlich unter dem Kühlbedarf der Referenzvariante liegt.

Durch die Abfuhr der Wärmeenergie des Fassadenzwischenraums und der Nachströmung kühlerer Außenluft, die während der betrachteten Typwoche häufig unter der durchschnittlichen Innenraumtemperatur liegt, scheint die Fassadenlösung während der Sommertage aktiv erhöhte Wärmelasten des Innenraums abzuführen, wodurch sich der Temperaturverlauf des Innenraums in Abb. 319 im Wochenverlauf positiv dynamischer gegenüber der gekapselten Variante in Bauteil Px0 V1 entwickelt.

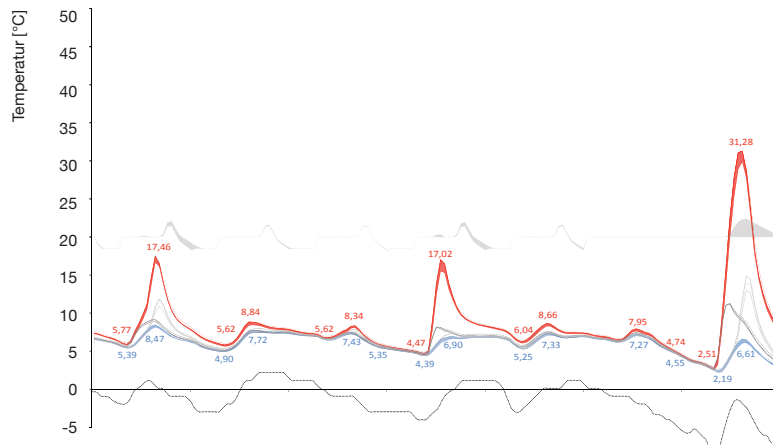


Abb. 317:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung

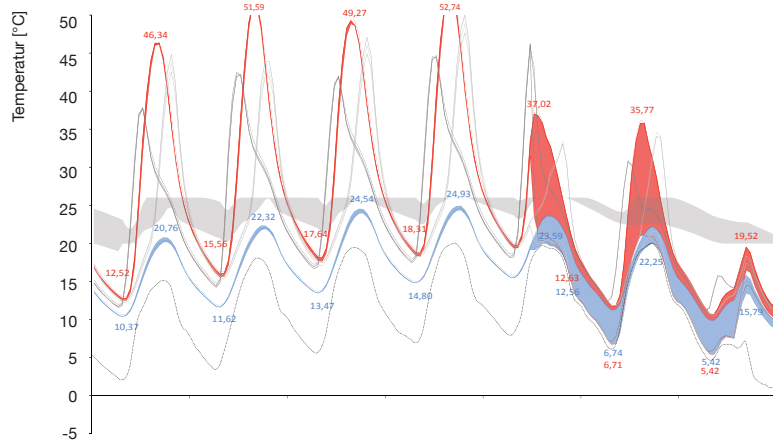


Abb. 318:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

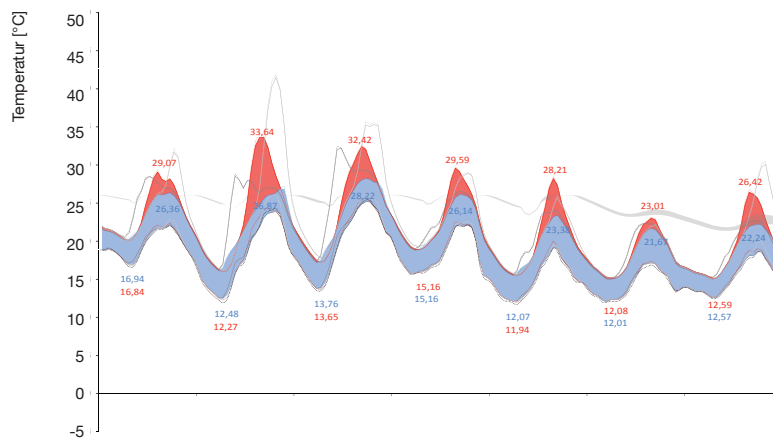


Abb. 319:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung

— Zu-/Abluft Nord
— Zu-/Abluft Ost
— Zu-/Abluft Süd
— Zu-/Abluft West

■ Innenraumtemperaturdifferenz Musterraum Nord-Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Nord

20,65 Maximaltemperatur (Abluft, Süd)

19,30 Minimaltemperatur (Zuluft, Süd)

— Temperatur Außenluft

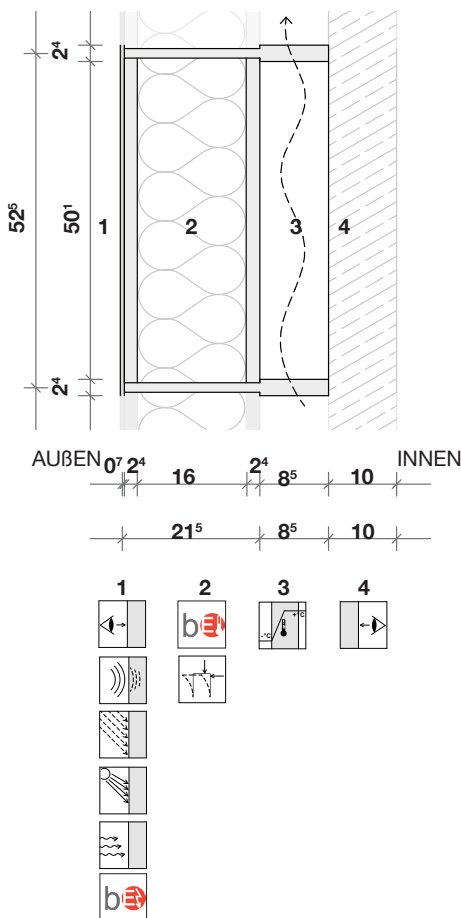


Abb. 320:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung

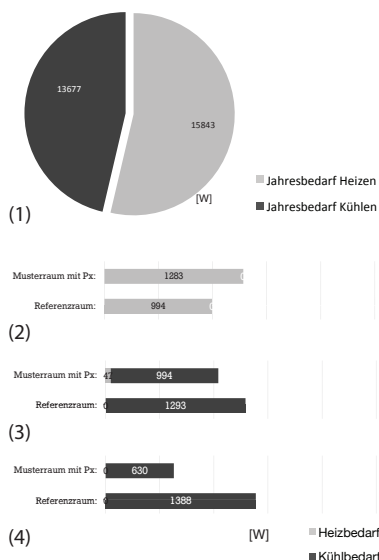


Abb. 321:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung

3.3.10. Sonderbauteil Px16 V7

Gebäudeabschluss, Dämmung und Konstruktion (1/2) **b1-s1,0**
Die äußere Fassadenschicht bildet in diesem Bauteil die Kombination aus einer In-Glas-Photovoltaik gefasst von 2 x 3 mm Verbundglas mit einem Belegungsgrad der Photovoltaik von 50% (50% transparent, 50% opak), die vor einem Dämmpaneel aus 16 cm Zellulosedämmung umfasst von 2x2,4 cm Furnierschichtholz montiert ist. Das Paneel ist außenseitig in den konstruktiven Rost aus Furnierschichtholz (FSH, 2,4 cm Stärke) eingelassen.

Dämmung und Kühlung (3) **b1-s1,0**
Die dämmenden Eigenschaften der Fassadenschicht 3 entstehen in Ergänzung zur Schicht 2 durch die eingebundene Luft, die durch Schließen der Lüftungskappen der Fassade einer stehenden Luftschicht gleicht. Durch Durchströmung dieser Schicht besteht hingegen die Möglichkeit interne Wärmelasten durch thermische Effekte der Fassade abzuführen.

Raumabschluss (4)
Den innenseitigen Raumabschluss dieses Px-Bauteils weiterhin eine vorgelagerte Schicht aus Beton mit raumseitigem Oberputz.

Die alternative Fassadenschichtung birgt die Chance, bei Gebäudenutzungen mit hohen internen Lasten aktiv zur Regulierung der Innenraumtemperatur beizutragen.

Energetisches Verhalten

Die Flexibilität des polyfunktionalen Fassadenprinzips je nach interner Gebäudenutzung energetisch adaptive Eigenschaften durch spezifische Konfiguration der Bauteilschichten zu erreichen zeigt exemplarisch das energetische Verhalten dieses Bauteils. Abb. 292 zeigt den gewünschten Effekt diese Bauteils zur Nutzung des Fassadenzwischenraums mit zeitweiser Durchströmung als aktive Unterstützung zur Regulierung der Innenraumtemperaturen durch Abfuhr anfallender interner Lasten. Die mit teilweise 1/3 niedrigeren Kühllasten simulierten Werte der betrachteten Typwoche belegen exemplarisch die Potenziale zur adaptiven Unterstützung der Fassade zur Regulierung von Innenraumkonditionen bei Gebäudenutzungen mit hohem Kühlbedarf.

Im Winter wird durch Schließen der Lüftungskappen des Fassadenmoduls ein Energieaustausch der Luftschicht des FZR mit dem Außenraum unterbunden. Der FZR wirkt in dieser Phase als Pufferzone dämpfend zwischen dem Innenraum und der gedämmten, konstruktiven Außenschicht.

Durch die innenseitige Anordnung der Luftschicht innerhalb des Bauteils besteht in dieser Ausführung jedoch nicht mehr die Möglichkeit zur Gewinnung solarenergetisch getriebener thermischer Energie.

Dennoch zeigt Abb. 321 mit der Gegenüberstellung der Kühl- und Heizenergiebedarfe des Bauteils gegenüber der Referenzsimulation, dass diese Ausführung insbesondere während der Kühlperiode und bei der simulierten Büronutzung deutliche Vorteile gegenüber Standard-Fassadenausbildungen erwarten lässt. Wenn man ergänzend zu den thermischen Eigenschaften noch die aus der Fassade generierte elektrische Energie mit in Betracht zieht erhöht sich nochmals der Zugewinn einer solchen Fassadenausbildung.

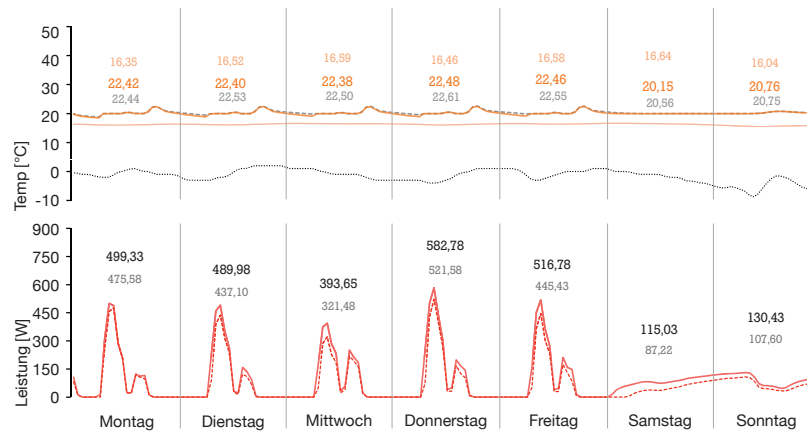


Abb. 322:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung

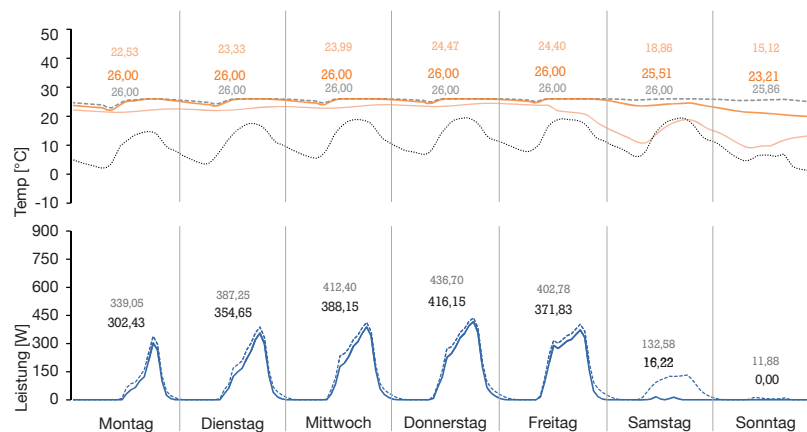


Abb. 323:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation
Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung

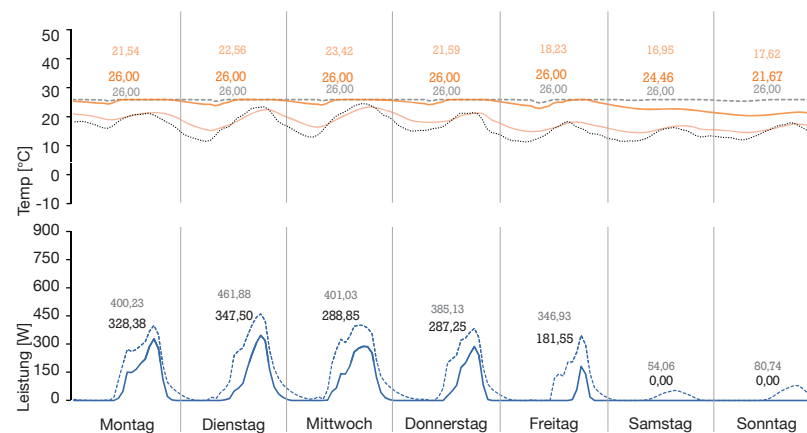


Abb. 324:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung

— Temperatur Musterraum (Px)
 — Temperatur Fassade (Px)
 - - - Temperatur Referenzraum
 Temperatur Aussenluft

— Kühllast Musterraum (Px)
 — Heizlast Musterraum (Px)
 - - - Kühllast Referenzraum
 Heizlast Referenzraum

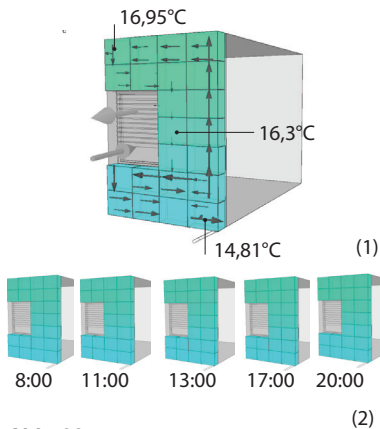


Abb. 325:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

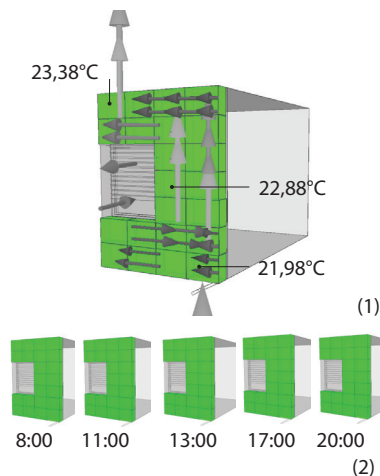


Abb. 326:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

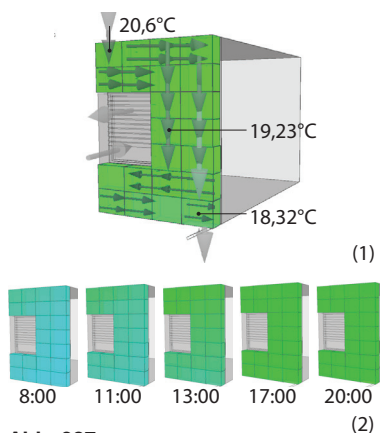


Abb. 327:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung



3.3.11. Typwoche Winter

Während der Winterperiode verhält sich der gewählte Bauteilaufbau entsprechend klassischen gedämmten Fassadenkonstruktionen mit dem positiven Beitrag, dass durch die puffernde Wirkung der Luftschicht der Fassade interne Wärmeüberschüsse indirekt gespeichert werden können. Sehr hohe interne Wärmelasten durch besondere Ereignisse während der Nutzungsphase beziehungsweise auftretende hohe Wärmeerträge durch winterliche Solarenergieeinträge könnten so gegebenenfalls sinnvoll verwertet werden. Abb. 325 zeigt sehr anschaulich die im Fassadenzwischenraum annähernd homogene Temperaturschichtung während der Winterphase mit Temperaturen zwischen 14° bis 17°C, die eine Pufferwirkung stützen können.

3.3.12. Typwoche Übergangszeit

Während der Übergangszeit zeigt sich, dass durch die orientierungsbedingt unterschiedlichen solarenergetischen Erträge durch den Fensterflügel als einziges transparentes Bauteil des Fassadenmoduls die Innenraumtemperaturen zwischen einem nach Norden und einem nach Süden orientierten Raum eine Spreizung erfährt. Sowohl an Wochenende, an denen keine internen Lasten vorliegen, wie auch während der Übergangszeiten mit mäßigen solarenergetischen Einträgen, sinken die mittleren Temperaturen des Innenraums und des Fassadenzwischenraums, wie in Abb. 329 abgebildet, erkennbar ab.

3.3.13. Typwoche Sommer

Die Abb. 327 zeigt sehr eindrücklich die unterstützende Wirkung des betrachteten Bauteils zur Vermeidung von Überhitzung im angrenzenden Musterraum. Das deckungsgleiche Verhalten der Luft im Fassadenzwischenraum der nach Norden und nach Süden orientierten Fassaden belegt einerseits die Unabhängigkeit dieser Ebene von der auftreffenden Solarstrahlung, andererseits zeigen sich dadurch die Möglichkeiten die Durchströmung zu nutzen, um in der angelagerten Büronutzung anfallende Wärmelasten effektiv abzuführen und die Kühllasten dadurch zu senken.

Durch diese Adaptionsmöglichkeit der Fassade können im Sommer Temperaturen im Fassadenzwischenraum erreicht werden, die mit Werten zwischen 18-20°C erwarten lassen, behagliche Innenraumtemperaturen anbieten zu können.

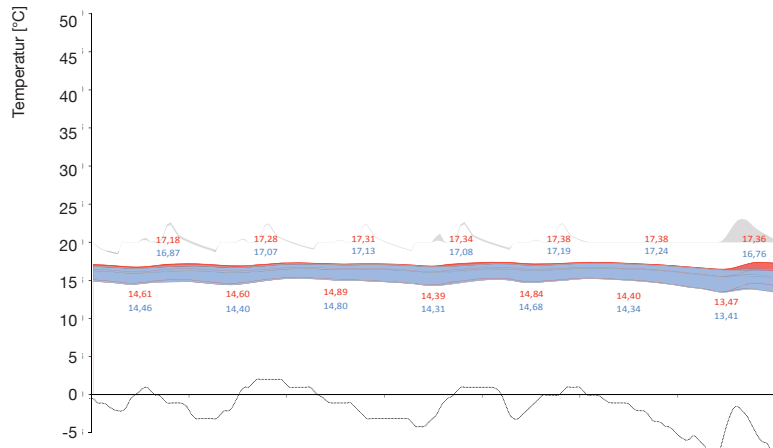


Abb. 328:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung

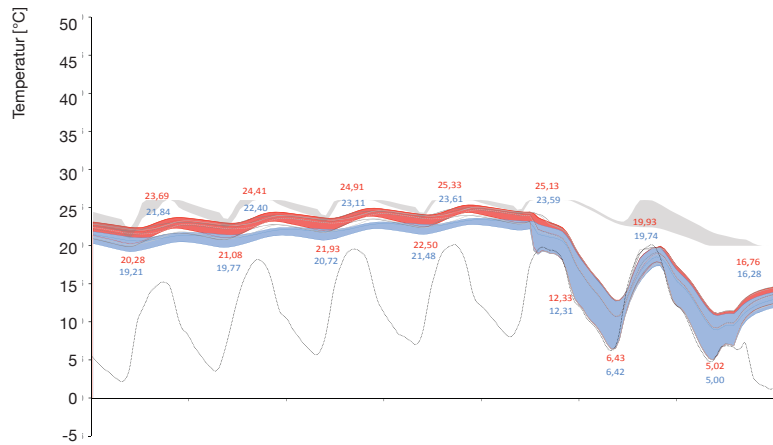


Abb. 329:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

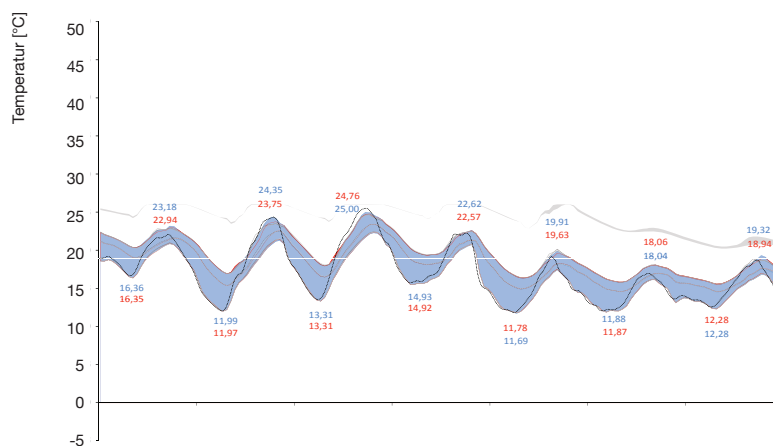


Abb. 330:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung

Zu-/Abluft Nord
Zu-/Abluft Ost
Zu-/Abluft Süd
Zu-/Abluft West

Innenraumtemperaturdifferenz Musterraum Nord-Süd
Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Süd
Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Nord

20,65 Maximaltemperatur (Abluft, Süd)
19,30 Minimaltemperatur (Zuluft, Süd)
Temperatur Außenluft

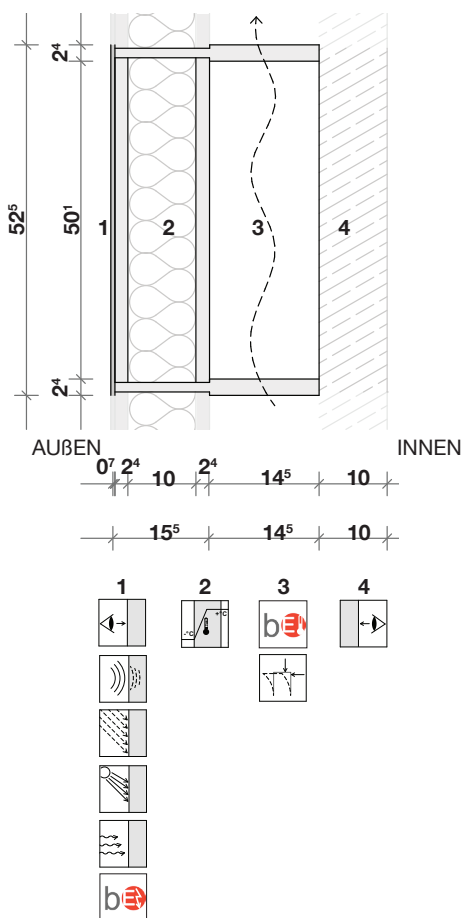


Abb. 331:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung

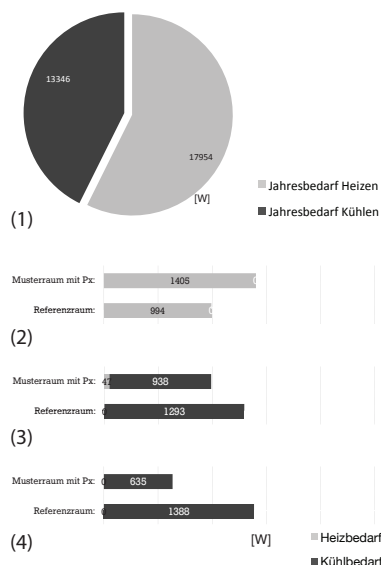


Abb. 332:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung

3.3.14. Sonderbauteil Px10 V11

Gebäudeabschluss, Dämmung und Konstruktion (1/2) **b**

Die äußere Fassadenschicht bildet in diesem Bauteil die Kombination aus einer In-Glas-Photovoltaik gefasst von 2 x 3 mm Verbundglas mit einem Belegungsgrad der Photovoltaik von 50% (50% transparent, 50% opak), die vor einem Dämmpaneel aus 10 cm Zellulosedämmung umfasst von 2x2,4 cm Furnierschichtholz montiert ist. Das Paneel ist außenseitig in den konstruktiven Rost aus Furnierschichtholz (FSH, 2,4 cm Stärke) eingelassen.

Dämmung und Kühlung (3) **b**

Die dämmenden Eigenschaften der Fassadenschicht 3 entstehen in Ergänzung zur Schicht 2 durch die eingebundene Luft, die durch Schließen der Lüftungskappen der Fassade einer stehenden Luftschicht gleicht. Durch Durchströmung dieser Schicht besteht hingegen die Möglichkeit interne Wärmelasten durch thermische Effekte der Fassade abzuführen.

Raumabschluss (4)

Den innenseitigen Raumabschluss dieses Px-Bauteils weiterhin eine vorgelagerte Schicht aus Beton mit raumseitigem Oberputz.

Energetisches Verhalten

Aufbauend auf den Erfahrungen des Bauteils Px16 V7 wurde, wie in den vorangegangenen Simulationen mit dem Bauteil Px10 V11, untersucht welche Auswirkungen eine Substitution der Dämmstärke auf den Energiehaushalt haben wird. Entsprechend den Erwartungen steigt durch die Reduktion der Schichtdicke an Dämmung der Jahreswärmebedarf mit 1406 W nochmals gegenüber der Vorgängerausführung an. Die weitere Reduktion der Dämmstärke auf nur 10 cm führt zu einem nochmals erhöhten Bedarf an Wärmeenergie.

Ausgehend von der Annahme, dass bei einer zu Grunde gelegten Büronutzung eine geringe Nachfrage nach zusätzlichen Einträgen an Wärmeenergie über das Jahr hin besteht, der Bedarf nach Kühlung über das Jahr betrachtet jedoch dominiert, könnten die energetischen Verhaltensweisen des Bauteils von nutzen sein. Durch einen weiteren Optimierungsprozess ist denkbar das Bauteil auch hinsichtlich des energetischen Verhaltens während der Heizperiode verbessern zu können.

In der Übergangszeit zeigen sich die Vorteile des gewählten Bauteilaufbaus durch deutlich geringere Bedarfe an Kühlenergie gegenüber der Referenzsimulation, sowie leicht reduzierte Kühlbedarfe im Verhältnis zum Bauteil Px16 V7. Es besteht die Vermutung, dass durch das größere Luftvolumen des FZR von 14,5 cm Stärke der Luftschicht eine effektivere Durchströmung des Bauteils erreicht werden kann und dadurch größere Mengen überschüssiger Wärme abgeführt werden können.

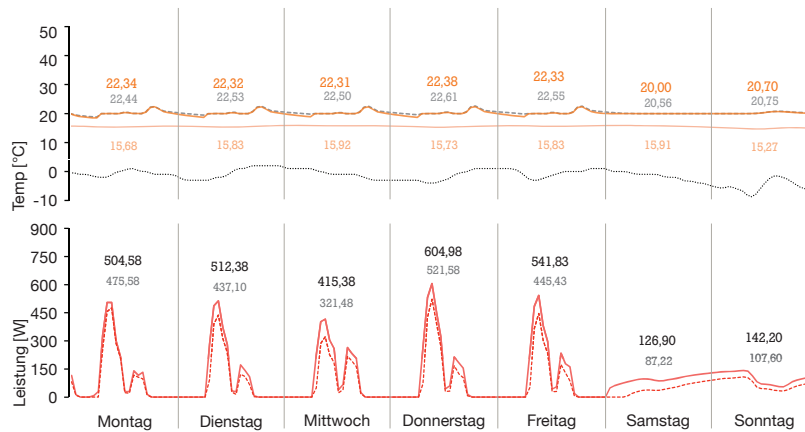


Abb. 333:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung

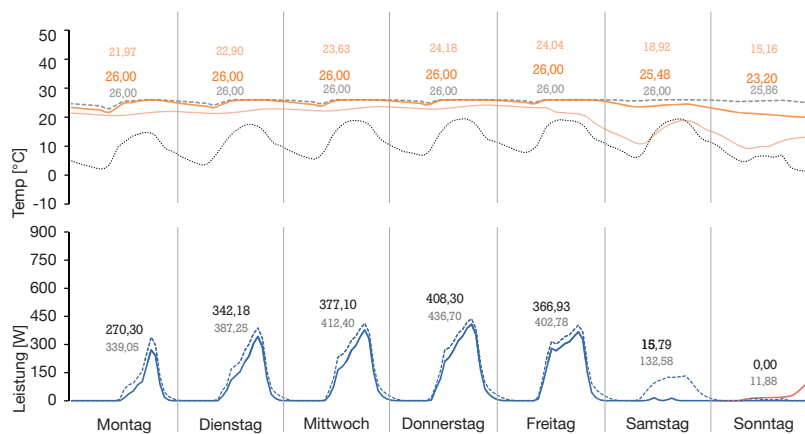


Abb. 334:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation
Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung

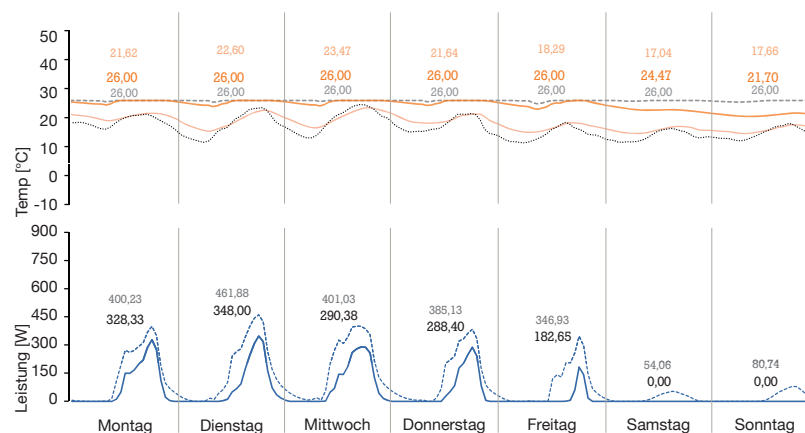


Abb. 335:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung

— Temperatur Musterraum (Px)
 — Temperatur Fassade (Px)
 - - - Temperatur Referenzraum
 Temperatur Aussenluft

— Kühllast Musterraum (Px)
 — Heizlast Musterraum (Px)
 - - - Kühllast Referenzraum
 Heizlast Referenzraum

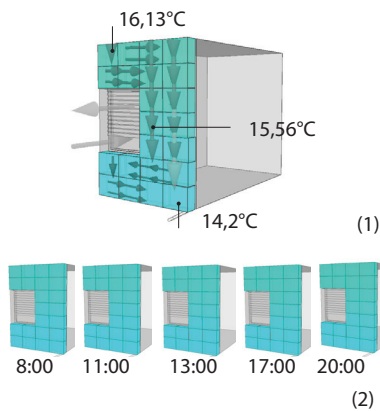


Abb. 336:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

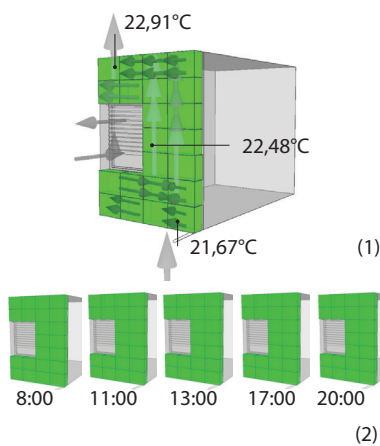


Abb. 337:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

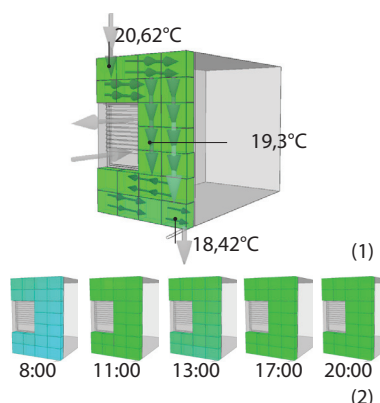


Abb. 338:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung



3.3.15. Typwoche Winter

Während der Winterzeit ist die Bauteilausführung vom thermischen Fassadenbild relativ unauffällig. Mit Temperaturen über die Modulhöhe von 14° bis 16° scheint dieses Bauteil entsprechend der stärker gedämmten vorab beschriebenen Variante eine homogene Temperatschichtung im Winter zu ermöglichen. Durch die kaum vorhandene thermisch isolierende Schicht zwischen Innenraum und der Luftschicht der Fassade besteht ein Wärmeaustausch, der die im Winter gezeigten, relativ hohen Lufttemperaturen im FZR erklärt. Dieser Umstand führt in der Bewertung der Energiebedarfe für Heizen, wie sie in der Typwochenbetrachtung und Jahresbilanz in Abb. 332 gezeigt sind, zu einem 40% höheren Bedarf an Wärmeenergie gegenüber der Referenzsimulation.

3.3.16. Typwoche Übergangszeit

Der dargestellte Typwochengang in Abb. 332 beschreibt eindrücklich die unterschiedlichen Verhaltensweisen des untersuchten Bauteils im Hinblick auf die Orientierung des Fassadenmoduls. Durch den fehlenden Solareintrag in die bauteilintegrierte Luftschicht erfolgt eine Erhöhung der Innenraumtemperatur lediglich durch die internen Lasten, sowie Solarerträge über den im Fassadenmodul eingebundenen Öffnungsflügel. Sobald zum Wochenende die internen Gewinne aus Personen und betriebenen Geräten entfallen, sinkt auch die Innenraum-, wie auch die Fassadenzwischenraumtemperatur ab.

In der Simulation des nach Süden orientierten Raums wird durch den höheren solaren Eintrag gegenüber einer nach Norden orientierten Fassade frühzeitiger die definierte Behaglichkeitsgrenze der Innenraumtemperatur zum Kühlen überschritten. Diese Vermutung äußert sich auch in den Temperaturen der zugehörigen Fassadenzwischenräume. Im Vergleich zwischen nach Norden und nach Süden orientierten Fassaden ergeben sich, während der Betriebstage, Temperaturdifferenzen von circa 3°C.

3.3.17. Typwoche Sommer

In der Sommerperiode bietet das Bauteil entsprechend dem zuvor die Möglichkeit temperaturgeregelt in Abhängigkeit zur Innenraumtemperatur mittels der Regelung der Durchströmung des Fassadenzwischenraums dessen Lufttemperatur gering zu halten und gegebenenfalls anfallende überschüssige interne Lasten durch die Temperaturunterschiede des Innenraums und des Fassadenzwischenraums abzuführen.

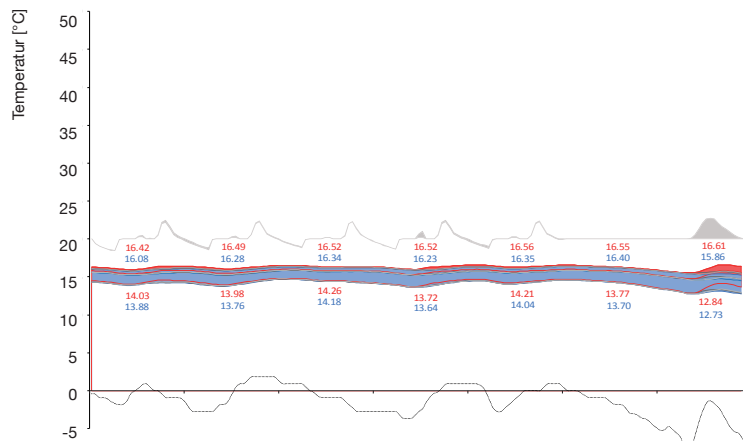


Abb. 339:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung

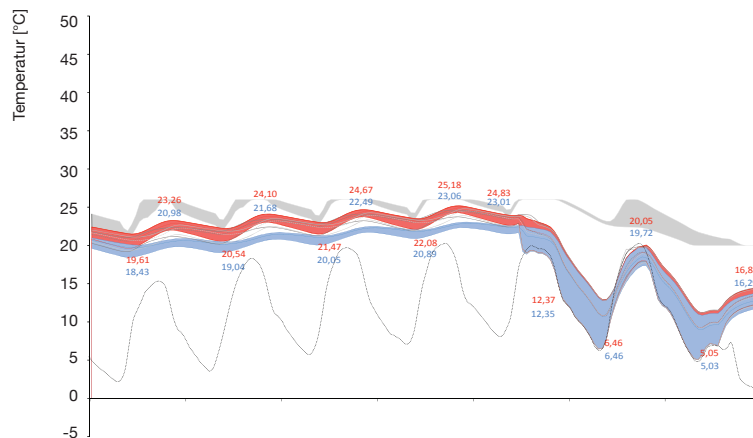


Abb. 340:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

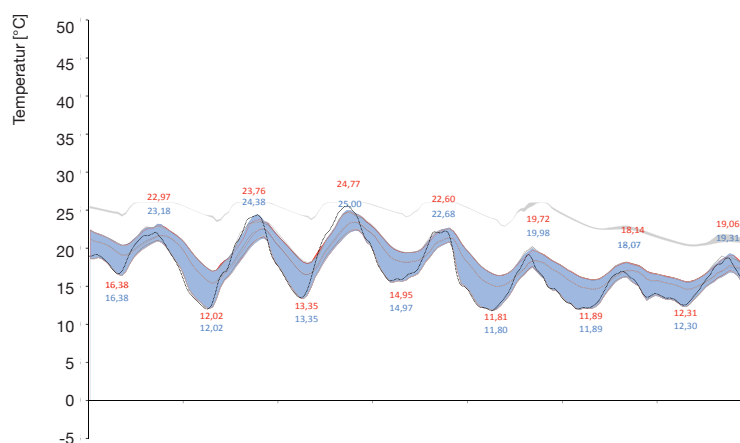


Abb. 341:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung

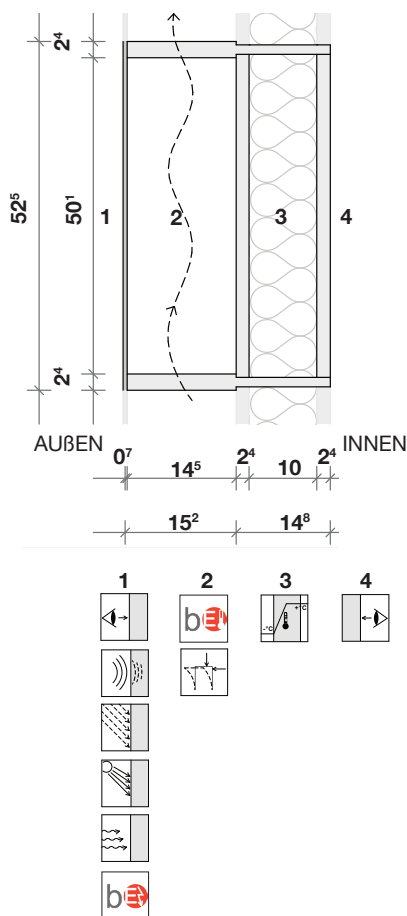
— Zu-/Abluft Nord
— Zu-/Abluft Ost
— Zu-/Abluft Süd
— Zu-/Abluft West

■ Innenraumtemperaturdifferenz Musterraum Nord-Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Nord

20,65 Maximaltemperatur (Abluft, Süd)

19,30 Minimaltemperatur (Zuluft, Süd)

— Temperatur Außenluft



3.3.18. Bauteil Px10 V8

Gebäudeabschluss (1) b

Die äußere Fassadenschicht wird gebildet durch In-Glas-Photovoltaik gefasst von 2 x 3 mm Verbundglas. Der Belegungsgrad der Photovoltaik beträgt im simulierten Bauteil 50% (50% transparent, 50% opak).

Dämmung und Konstruktion (2/3) b

Die dämmenden Eigenschaften des Bauteils resultieren aus einer durch die 30 cm starke Konstruktion geschaffene Kombination einer 14,5 cm dicken, temperaturgeregelte durchströmten Luftschicht (2) unterstützt durch ein 14,8 cm Dämmpaneel (3) aus 10 cm Zellulosedämmung umfasst von 2x2,4 cm Funierschichtholz. Das Paneel ist innenseitig in den konstruktiven Rost aus Funierschichtholz (FSH, 2,4 cm Stärke) eingelassen.

Raumabschluss (4)

Beim innenseitigen Raumabschluß dieses Px-Bauteils wurde auf die sonst angesetzte Betonwand verzichtet. Den Raumabschluß bildet die verkleidete Funierschichtholzplatte des Px-Bauteils.

Aus Fragen des energetischen Verhaltens im Innenraum, aber auch aus ökonomischen Aspekten, wurde in dieser Variante auf die konstruktiv nicht notwendige, innenliegende Betonwand mit Oberputz verzichtet. Auf Grundlage der architektonischen, energetischen und ökonomischen Ansprüche dokumentiert dieses Bauteil exemplarisch erste Optimierungseigenschaften der polyfunktionalen Fassade. Durch die selbsttragenden Eigenschaften der Bauteilkonstruktion könnte eine solche Konstruktion unter anderem im Neubau Anwendung finden.

Energetisches Verhalten

Der aus Gründen der Materialersparnis und resultierender Kostenreduktion attraktiv erscheinende Entfall der in vorangegangenen Bauteilen berücksichtigten Betonwand mit Oberputz zeigt auch aus gesamtenergetischer Sicht (vergleiche Abb. 343 und Abb. 299) keine unmittelbar erkennbaren Nachteile.

Betrachtet man hingegen die separaten Verhaltensweisen der unterschiedlichen Typwochen erkennt man an der Kurvenentwicklung der Fassadetemperatur in der Übergangszeit, dass sich durch die entfallene Speichermasse zwischen Innenraum und Fassadenbauteil ein volatileres Verhalten der Temperatur einstellt (siehe Abb. 294). Die entfallene thermische Trägheit der Fassade führt zu einem reaktiveren Verhalten der Lufttemperaturen. Das Diagramm Abb. 294 zeigt, dass während der Nutzungsphasen an Werktagen die Temperatur durchgängig um bis zu 5°C höher liegt, als im vergleichbaren Bauteil Px10 V5 mit innenliegender Betonwand (siehe Abb. 301).

Abb. 342:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung

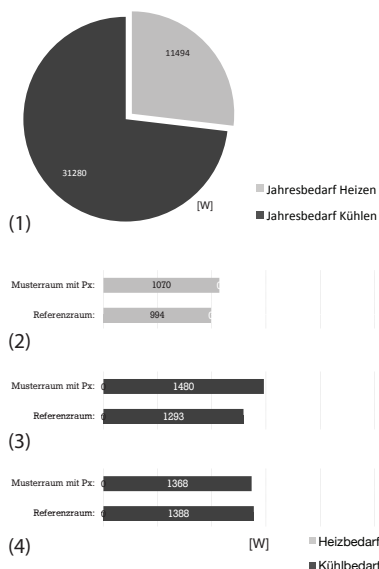


Abb. 343:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung

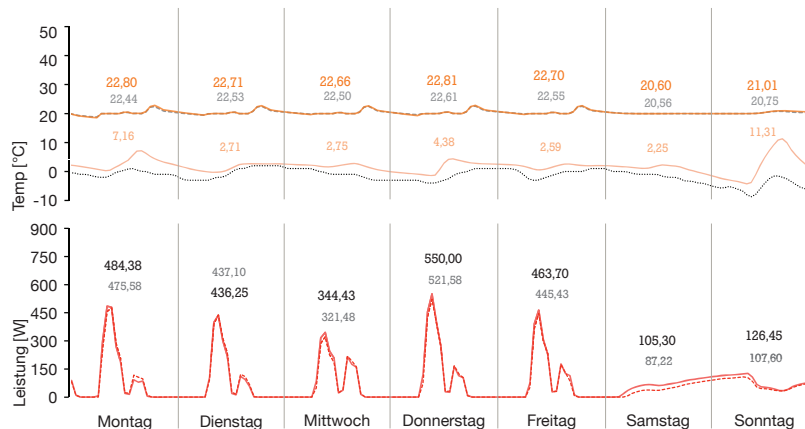


Abb. 344:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung

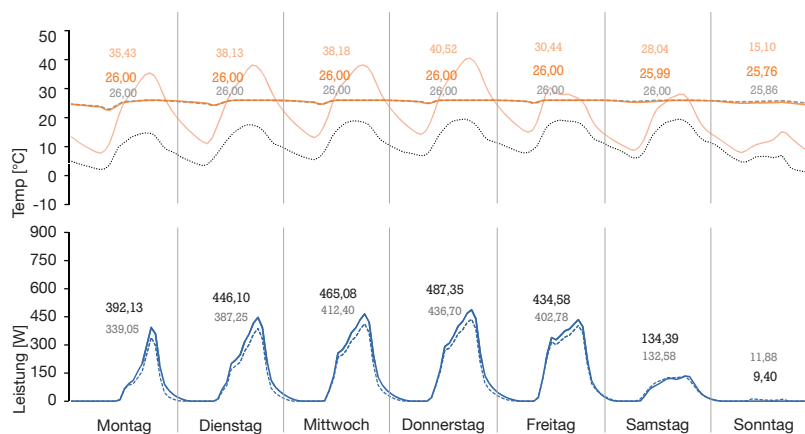


Abb. 345:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung

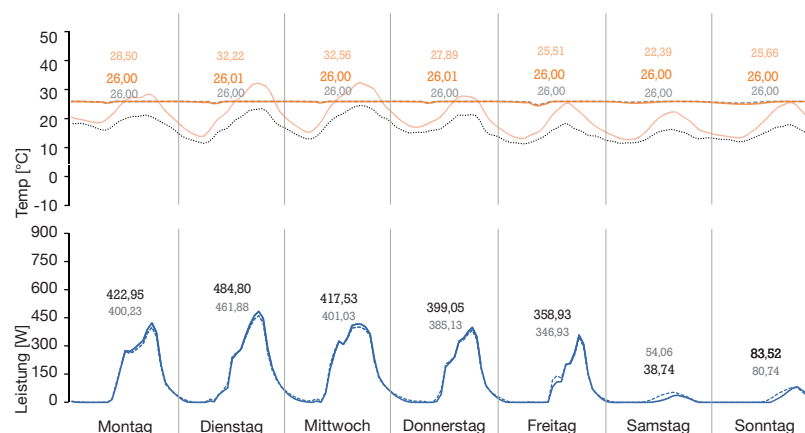


Abb. 346:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung

— Temperatur Musterraum (Px)
 — Temperatur Fassade (Px)
 - - - Temperatur Referenzraum
 Temperatur Aussenluft

— Kühllast Musterraum (Px)
 — Heizlast Musterraum (Px)
 - - - Kühllast Referenzraum
 Heizlast Referenzraum

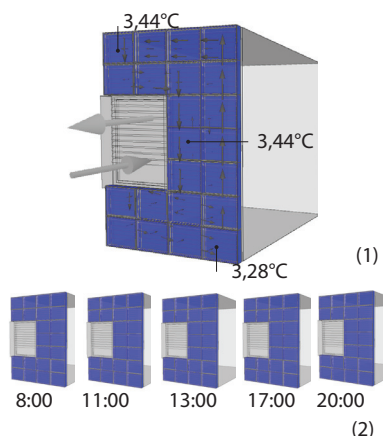


Abb. 347:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

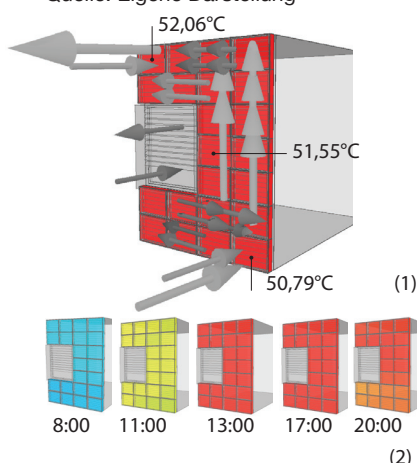


Abb. 348:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung

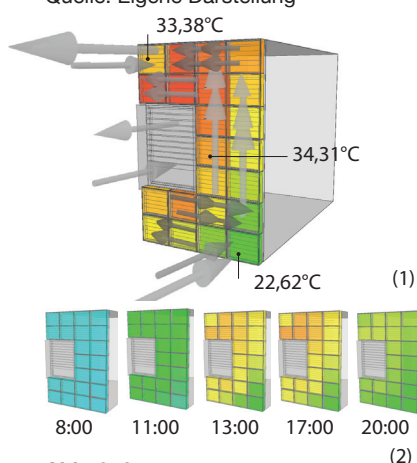


Abb. 349:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung



3.3.19. Typwoche Winter

Das winterliche thermische Verhalten dieser Bauteilvariante gleicht von den Bedarfen an Heizenergie bis zur Entwicklung der Temperaturen im Wochenverlauf sowohl des Innenraums, wie auch des Fassadenzwischenraums, annähernd vollständig dem Verhalten der Variante mit innenseitig vorgelagerter Betonwand (Px10 V5).

3.3.20. Typwoche Übergangszeit

Sowohl in der hier betrachteten Ausführung wie auch im Bauteil Px10 V5 ließ sich erkennen, dass während der Übergangszeiten ein mitunter höherer Kühlbedarf besteht, als während der Sommermonate. Trotz relativ geringer Außenraumtemperaturen werden in den Luftschichten des Fassadenbauteils enorme Temperaturen erreicht, die dazu führen, dass schon in diesen Phasen des Jahres der angelagerte Innenraum aktiv gekühlt wird. Es ist davon auszugehen, dass durch eine weitere Verfeinerung der Regelungssteuerung der Lüftungskappen des Fassadenbauteils ein noch nutzungssensibleres Verhalten der Fassade im Bezug zum Innenraumklima erreicht werden kann. Dies ist jedoch durch weiterführende Simulationen zu prüfen. Dadurch ließen sich die simulierten Bedarfe an Kälteenergie vorraussichtlich wenigstens bis auf die Bedarfe während der Sommertage reduzieren. Die Abb. 348 mit den exemplarischen Visualisierungen des thermischen Verhaltens der Fassade während der Übergangsphase zeigt durch die noch sehr homogenen Einfärbungen deutlich die noch bestehenden Optimierungspotenziale der Lüftungskappenregelung. Betrachtet man hingegen das Verhalten der Fassade am Wochenende der Typwoche Übergang, zeigen sich bereits die temperatur-adaptiven Chancen die ein polyfunktional ausgelegtes Fassadenbauteil bieten kann (Abb. 351).

3.3.21. Typwoche Sommer

Auch während der Sommertage sind die simulierten Maximalwerte der Lufttemperatur im Fassadenzwischenraum leicht erhöht gegenüber des alternativen Aufbaus mit innenseitig vorgelagerter Betonwand, jedoch äußern sich in dieser Phase die Unterschiede nicht so deutlich, wie während der Übergangszeit. Ein Aspekt, der diese Beobachtung begünstigt, ist das in Abb. 349 zu erkennende thermische Verhalten der Fassadenkonstruktion. Durch die Kleinteiligkeit des Fassadenmoduls entwickeln sich Temperaturunterschiede langsam in Richtung des durch Thermik getriebenen Strömungsverhaltens bis zum Luftauslass des Moduls. Durch die ganztägig geöffneten Strömungskappen des Moduls auf Grund der definierten Grenztemperaturen, orientiert sich die Temperatur des Fassadenzwischenraums daher weitestgehend an der des Außenraums (Abb. 351). Dies unterbindet einen Wärmestau innerhalb des Moduls, der sich mittelfristig in Sommermonaten auf die Innenraumtemperatur auswirken würde.

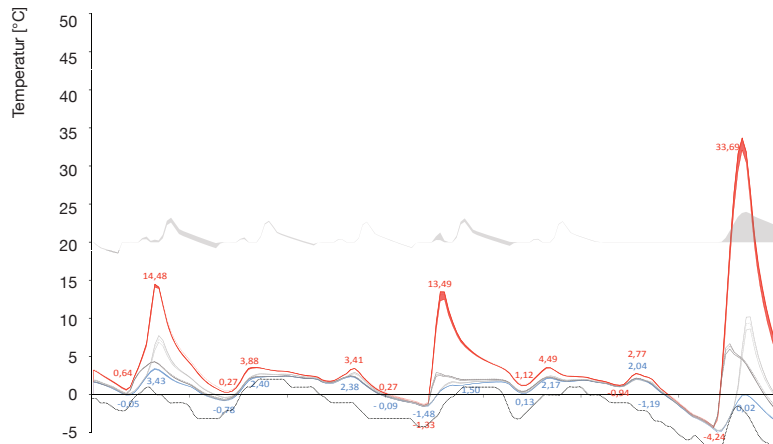


Abb. 350:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung

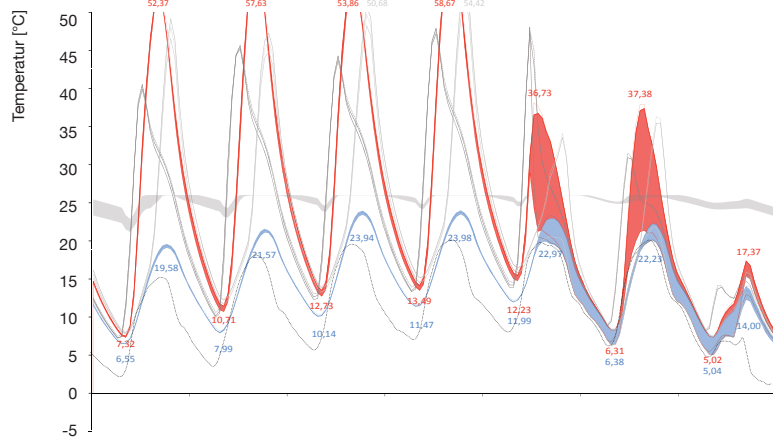


Abb. 351:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung

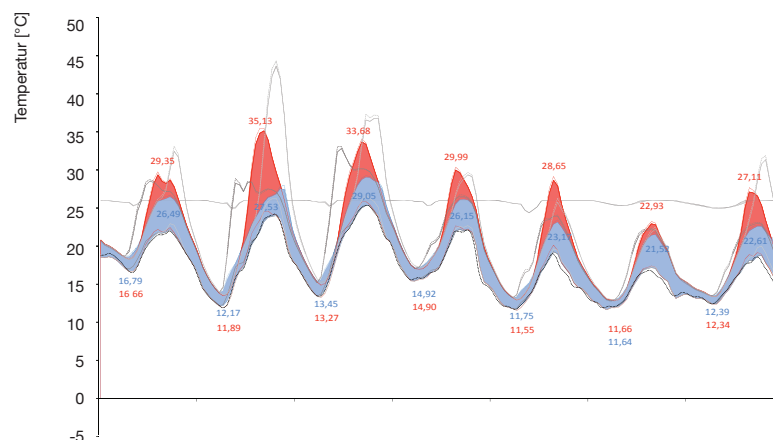


Abb. 352:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung

— Zu-/Abluft Nord
— Zu-/Abluft Ost
— Zu-/Abluft Süd
— Zu-/Abluft West

■ Innenraumtemperaturdifferenz Musterraum Nord-Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Süd
■ Temperaturdifferenz Zu-/Abluft Nord

20,65 Maximaltemperatur (Abluft, Süd)

19,30 Minimaltemperatur (Zuluft, Süd)

— Temperatur Außenluft

3.4. Vergleichende Betrachtung der energetischen Eigenschaften untersuchter Px-Fassadenbauteile

Die energetischen Auswertungen der Bauteilausführungen haben gezeigt, dass bereits unter gleichbleibendem Konstruktionsraster und Materialitäten, durch Variation im Umgang mit der eingebunden Luftschicht und Änderung der Schichtenfolge des Bauteils grundlegend unterschiedliche, energetische Verhaltensweisen erzielt werden können.

Die Ergebnisse der Bauteile mit durchströmter Luftschicht weisen generell gegenüber denen mit stehender, gekapselter Bauteilausprägung bereits deutlich höhere Adaptionmöglichkeiten der Fassade auf den Innenraumkomfort auf. Insbesondere bei den leicht gedämmten bis ungedämmten Ausführungen zeigen sich die Möglichkeiten der thermischen Einflussnahme durch den luftdurchströmten Fassadenzwischenraum. Durch alternative Rasterdimensionen, Schichtdicken und Materialwahl sind gezielt gebäudespezifisch wünschenswerte Verhaltensweisen denkbar.

Die gekapselten Bauteiluntersuchungen konnten anhand der vorliegenden Ergebnisse belegen, dass durch Einsatz von Solarenergie als „solarthermische Dämmung“ klassische Materialien zur Isolation von Gebäuden substituiert, beziehungsweise bedarfsgerecht dimensioniert werden können, ohne komfortbezogene und energiebilanzielle Nachteile zu erhalten.

Im Zuge der den Simulationen zu Grunde gelegten Büronutzung zeigten insbesondere die als Sonderbauteile benannten Ausführungen des polyfunktionalen Fassadenprinzips nennenswerte energetische Vorteile des adaptiven polyfunktionalen Ansatzes. Durch eine alternative Kombination der Bauteilschichten ließ sich ein der Nutzungssituation angepasstes, energetisch-optimiertes Verhalten erkennen.

Im Vergleich dokumentieren die drei untersuchten Bauteiltypen mit gekapselter oder durchströmter Luftschicht, sowie mit alternativer Schichtenfolge innerhalb des Bauteils, die vielseitigen energetischen Verhaltensweisen, die eine nach dem polyfunktionalen Prinzip entwickelte Hüllfläche am Gebäude erzielen kann (Abb. 353). Ergänzt durch die dem System zu Grunde liegende integrale Planungs- und Produktionsweise, die eine objektspezifische Fertigung des Systems mit einem hohen Maß an Präzision bieten kann, schafft die Möglichkeit in unterschiedlichen Anwendungsfällen vom Neubau bis hin zum Bestandsbau konzeptspezifische Lösungen anzubieten.

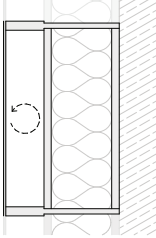
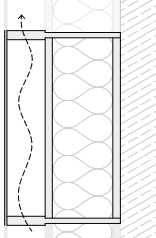
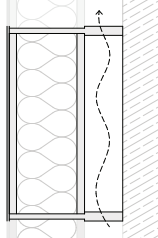
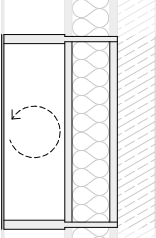
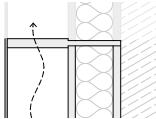
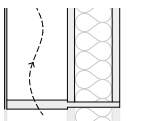
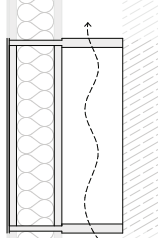
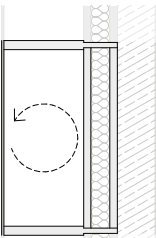
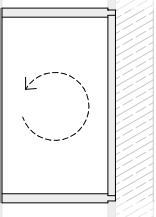
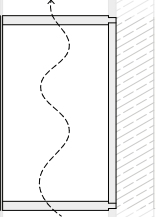
	stehende Luftschicht	zirkulierende Luftschicht	Sondertypen
16 cm Dämmung	Bauteil Px V3 	Bauteil Px V6  reduzierte Heizbedarfe	Bauteil Px V7 
10 cm Dämmung	Bauteil Px V2 	Bauteil Px V5  Bauteil Px V8  reduzierter Materialeinsatz	Bauteil Px V11  reduzierte Kühlbedarfe
5 cm Dämmung	Bauteil Px V9 		
0 cm Dämmung	Bauteil Px V1 	Bauteil Px V4 	reduzierte CO ₂ Emissionen

Abb. 353:
Tabellarische Abbildung und Kurzbeschreibung der Auswahl energetisch analysierter Fassadenaufbauten im Rahmen der bauteilbezogenen Betrachtungen des polyfunktionalen Fassadenprinzips
Quelle: Eigene Darstellung

Steffen Wurzbacher, Christoph Drebes, Christoph Kuhn

Einbindung solaradaptiver Fassaden in das Gebäudeenergiesystem (Teil 5)

1. Synergien zwischen solaradaptiven Fassaden und Gebäudeenergiesystemen

Die vorangegangenen Untersuchungen zu Typologie spezifischen Strahlungspotenzialen und den dynamischen Betrachtungen polyfunktionaler solaradaptiver Fassadenaufbauten haben gezeigt, dass eine umfangreiche Solarenergienutzung an der Gebäudehülle in vielfacher Weise möglich ist. Auf typologischer Ebene finden sich große Potenziale in Dachbereichen „flächiger“ Bebauungstypen. Die eher vertikal organisierten Bebauungen, wie auch Hochhäuser als Sondertyp punktförmiger Gebäude weisen hingegen wesentlichere Potenziale in der Aktivierung der Fassadenflächen auf. Aus den dynamischen Untersuchungen zu polyfunktionalen Fassaden ergibt sich unter anderem die Erkenntnis, dass eine passive Solarenergienutzung in der Fassade durchaus als Kompensation von Dämmstärke alternativ gesehen werden kann. Je nach Konfigurationsform bieten passive Effekte zirkulierender Luftschichten in der Fassade zudem die Möglichkeit konditionierend auf das Innenraumklima einzuwirken und dadurch Energiebedarfe zu verhindern. Die aktive Energienutzung in der Fassade lässt zudem je nach Gebäudenutzung und Typologie attraktive, perspektivische Einsatzmöglichkeiten erwarten.

Im Folgenden wird untersucht, wie in Kombination aus den Erkenntnissen typologischer Potenzialabschätzungen und bauteilbezogener dynamischer Untersuchungen, die entwickelten polyfunktionalen Fassaden in ein Gesamtenergiekonzept eines Gebäudes eingebunden werden können. Hierbei werden auch Auswirkungen auf die gesamte Endenergie- und CO₂-Bilanz der von Szenario zu Szenario variierenden Wärme- und Kältebedarfe, sowie solaren Stromerträge untersucht. Methodisch werden die Ergebnisse der beiden vorangegangenen Teiluntersuchungen zu Typologie und System in einem eigens entwickelten Gebäudeenergiemodell zusammengeführt (Abb. 354 (S.176)).

100	Grundstück
200	Herrichten und Erschließen
300	Bauwerk - Baukonstruktionen
400	Bauwerk - Technische Anlagen
500	Außenanlagen
600	Ausstattung und Kunstwerke
700	Baunebenkosten
Summe	
Differenz	

[illegible]

Figure 1 is a line graph showing the temperature profile of the water in the reactor. The y-axis is labeled 'Temperatur [°C]' and ranges from -5 to 50. The x-axis represents time from 0 to 100 minutes. The graph shows a fluctuating temperature profile with peaks and troughs. The peaks are labeled with their maximum values: 29.12, 35.21, 33.65, 29.99, 28.85, 21.93, and 27.11. The troughs are labeled with their minimum values: 16.66, 12.17, 13.27, 14.92, 11.75, 11.66, and 12.39. The area between the peaks and troughs is shaded in red, and the area between the troughs and the baseline is shaded in blue.

Bauteil	€/qm Bauteil
Akkassette	180
Glaselement	440
Mauerwerk vorwand	310
Naturstein	390
Polybox	500

176

2. Gebäudeenergiemodell

Zur ganzheitlichen Bewertung von unterschiedlichen solaraktivierten Fassadenkonfigurationen wird ein eigenes Gebäudeenergiemodell entwickelt. In Excel programmiert ermöglicht es die Einbindung der zuvor beschriebenen polyfunktionalen Fassadenvarianten, inklusive einer typischen Anlagentechnik. Ziel dabei ist es, die Effizienz und Sinnhaftigkeit der unterschiedlichen Fassadenkonfigurationen in Abhängigkeit zum jeweiligen Gebäudetyp und der Orientierung aus energetischer und monetärer Sicht zu bewerten. Neben der Energie- und Lastbewertung von Fassadenkonfigurationen bietet das Modell die Schnittstelle zur Bewertung der Lebenszykluskosten.

Das Bilanzmodell ist so aufgebaut, dass sowohl betrachtete Gebäude, als auch unterschiedliche Fassadenvarianten kombiniert werden können. Funktional kann ein gewähltes Gebäude mit unterschiedlichen Fassaden und Solarsystemen bestückt werden. Durch einen Variantenmanager lassen sich die verschiedenen Konfigurationen und Belegungsgrade untereinander vergleichen.

2.1. Gebäudekenndaten und Bilanz spezifischer Energiebedarfe

Input 1

Zum Import der im Kapitel 2 beschriebenen und analysierten Gebäude, inklusive deren spezifische „solare Fingerabdrücke“ und baustrukturelle Kennwerte, verfügt das Modell über eine eigene Schnittstelle. Das importierte Gebäude bildet einen Grundkörper dem verschiedene Kennwerte hinterlegt sind, welcher in einem zweiten Schritt durch unterschiedliche Fassadenkonfigurationen bedarfsgerecht genutzt werden können. So werden unter anderen Kennwerte wie Orientierungsanteile der Fassaden, A/V-Verhältnis und weitere städtebauliche Größen wie die GFZ und GRZ importiert.

Input 2

Über eine zweite Schnittstelle werden Informationen der Fassadenkonfigurationen aus den oben beschriebenen dynamischen Simulationen der Bauteile in das Gebäudeenergiemodell übertragen. Hierbei werden insbesondere Beschreibungen zu Bauteilaufbauten, spezifische Heiz- und Kühllasten in Stundenauflösung, sowie Angaben hinsichtlich des Temperaturverlaufs der Luft des Fassadenzwischenraums und der Innenraumtemperatur importiert. Über einen Auswahlbereich innerhalb des Modells lassen sich nach Orientierung (Norden, Osten, Süden, Westen) individuelle Fassadenvarianten auswählen. Dadurch sind sowohl homogene (alle vier Fassaden sind gleich) wie auch heterogene Fassadenkonfigurationen (Fassaden sind unterschiedlich belegt) konfigurierbar.

Aus den simulierten Stundenwerten werden die spezifischen Heiz- und Kühlbedarfe nach Himmelsrichtung für jede Fassadenvariante berechnet. Diese bilden die Basis zur Ermittlung eines mittleren Bedarfs an Wärme und Kälte des

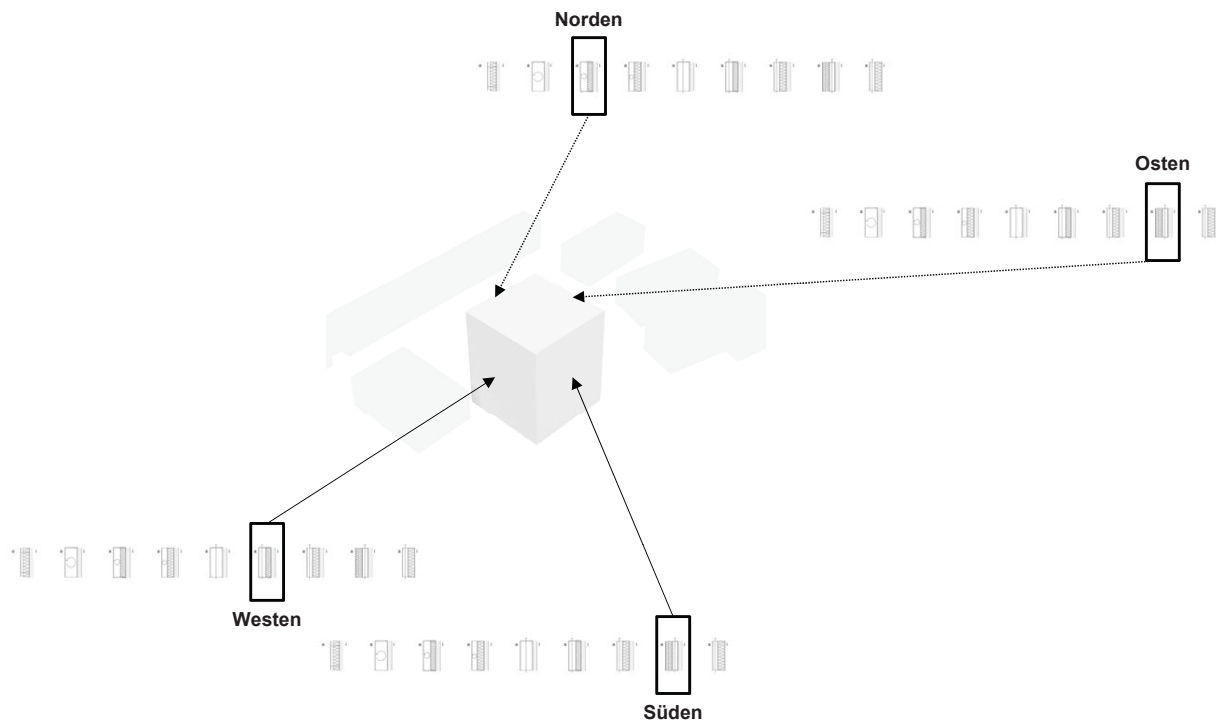


Abb. 355:
Input 2: Auswahlmöglichkeiten
unterschiedlicher, zuvor simulierter
Fassadenkonfigurationen im
Gebäudeenergiemodell;
Quelle: Eigene Darstellung

ausgewählten Gebäudes, der sich aus den gewichteten Anteilen spezifischer Bedarfe nach Orientierung ergibt. Die Gewichtung erfolgt dabei über eine geometrische Berechnung der Anteile an Nord-, Ost-, Süd- und Westfassaden an der gesamten Fassadenfläche des gewählten Gebäudes.

Output 1

Ein wichtiges erstes Ergebnis liefert das Gebäudeenergiemodell bei der Bewertung von Endenergiebedarfen, CO₂ Ausstößen und weiteren Lastverläufen. Hierfür ist im Modell eine eigene Ausgabemaske vorgesehen, welche einen Quervergleich unterschiedlicher Gebäudekonfigurationen ermöglicht.

Output 2

Eine weitere Ausgabemaske schafft die Schnittstelle zu separat erfolgten Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Hierfür werden alle wesentlichen Teil- und Endergebnisse aller Varianten von Gebäudekonfigurationen für einen Datenexport zusammengetragen. Die weiteren Betrachtungen hierzu erfolgen außerhalb des eigenen Modells.

2.2. Bilanz solarer Stromerträge

Zur Ermittlung von Stromerzeugungspotenzialen aus Photovoltaik ist im Gebäudeenergiemodell ein entsprechender Bilanzbereich implementiert. In diesem kann eine detaillierte Auswahl zur Aktivierung unterschiedlicher Bereiche der Gebäudehülle vorgenommen werden. Unabhängig voneinander lassen sich die einzelnen Fassaden (Norden, Osten, Süden und Westen) sowie das Dach solar aktivieren. Der Belegungsgrad der einzelnen Flächen wird über eine prozentuale Belegungsrate individuell für jede Fläche eingestellt. Somit können alle Teilfassaden sowie das Dach angepasst an den gewünschten Eigennutzungsgrad und orientiert an der typologisch gegebenen solaren Exposition flexibel von 0% bis 100% Belegung solar aktiviert werden. 100% Belegung bedeutet in diesem Fall, dass alle Bereiche der Fassade abzüglich der Fensterflächen genutzt werden. Die Fensterbereiche bleiben davon somit unberührt. Ein Gebäude kann dadurch homogen (alle Fassaden sind gleichermaßen mit PV versehen) oder heterogen (die einzelnen Fassaden sind unterschiedlich bespielt) mit solaren Systemen ausgestattet werden. Anhand der in der eingebundenen solaren Fingerabdrücke (vgl. Teil 3) kann der Grad der Fassadenaktivierung hinsichtlich des maximalen Strahlungsertrags optimiert werden.

Nach Einstellung des jeweiligen Belegungsgrades besteht die Option über einen weiteren Auswahlregler zwischen verschiedenen Photovoltaikzelltypen zu wählen. In einer zentralen Datenbank sind hierfür Wirkungsgrade und weitere Kennwerte kristalliner, Dünnschicht- und organischer Photovoltaik hinterlegt. Bei der Ertragsbilanzierung des Modells wird dabei automatisch eine Degradation des elektrischen Ertrags durch Alterung der Systeme berücksichtigt.

Die Wirkungsgrade sind im Abgleich der Werte aus Anlage 1 des Schlussberichts benefit E1, weiteren Werten der Literatur sowie aktuellen Herstellerangaben zu Grunde gelegt. Aus den spezifischen „solaren Fingerabdrücken“ des gewählten Gebäudes wird zusammen mit der eingestellten Belegungsrate und dem gewählten Zelltypus der solare Stromertrag nach Orientierung berechnet und fließt in die weiteren Anlagen- und nutzungsspezifischen Bilanzen mit ein.

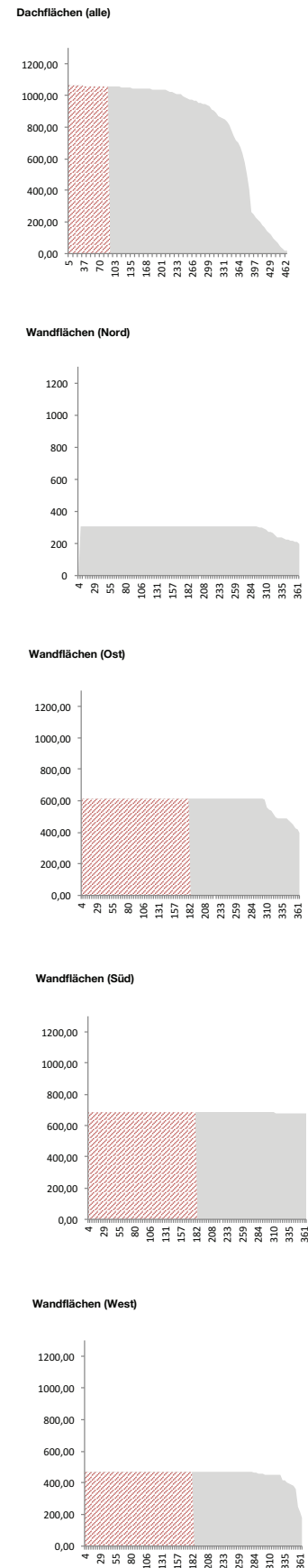


Abb. 356: Eingabebereiche zur Belegung der einzelnen Hüllflächen mit Photovoltaik; Hier beispielhaft 20% Dachsysteme (oben) und 50% Belegung der Nord-, Ost-, Süd- und Westfassaden; Quelle: Eigene Darstellung

2.3. Maß der Eigenversorgung

Ein wesentlicher Aspekt solarer Stromerzeugung ist das Maß der Eigenversorgung. Dieses ist von mehreren Faktoren abhängig. Ein wichtiger Aspekt ist der typische Tageslastgang. Jede Nutzung weist dabei ein eigenes, spezifisches Lastprofil auf. Lastprofile fallen sowohl von Tag zu Tag (z.B. Werktag, Samstag, Sonntag), als auch im Jahresverlauf (Tag im Winter, Übergangszeit, Sommer) unterschiedlich aus. Typische Lastprofile für Strom nach Nutzung stellen lokale Energieversorger in der Regel auf ihrer Internetseite frei zur Verfügung.

Ein weiterer Einflussfaktor auf das Maß der Eigenversorgung stellt die Orientierung der jeweiligen energiegewinnenden Technik dar. Je nach Ausrichtung erreicht z.B. eine Solarzelle zu unterschiedlichen Tageszeiten und Wetterbedingungen ein Produktionsmaximum. So liegt die Tagesspitze einer ost-orientierten fassadenintegrierten Solarzelle bei Direktstrahlung erwartungsgemäß in den sommerlichen Vormittagsstunden, bei einer west-orientierten Solarzelle hingegen in den sommerlichen Nachmittagsstunden. Bei reiner Diffusstrahlung (z.B. an bewölkten, bzw. größtenteils bewölkten Tagen) hingegen würden horizontale Flächen den höchsten täglichen Strahlungsertrag für Solarflächen bieten.

Um den Einfluss unterschiedlicher Orientierungen auf den Eigenversorgungsgrad zu berücksichtigen sind im Gebäudeenergiemodell eigens definierte Algorithmen hinterlegt. Diese sind den Untersuchungen von Wurzbacher (2017) entnommen und im Rahmen der Implementierung in das Gebäudeenergiemodell fortgeschrieben worden. Die Basisdaten beruhen dabei auf Strahlungssimulationen von insgesamt 78 Testkörpern anhand „leistungsspezifischer Typtage“ (vgl. ebd. 2017 S.53). Durch die stundenweise Betrachtung mit anschließender Berechnung der Eigenversorgung liegen somit umfangreiche Werte in Abhängigkeit zur Orientierung und Größe der jeweiligen solaraktiven Fläche vor.

Im Zuge der Implementierung dieser Ergebnisse werden aus den Rohdaten der Simulationen von Wurzbacher (2017) Eigenversorgungsanteile unterschiedlicher Belegungsgrade solaraktiver Flächen in die vier Himmelsrichtungen Norden, Osten, Süden und Westen sowie horizontal extrahiert. Die erneute Auswertung zeigt, dass sich alle berechneten Testkörper unabhängig von der jeweiligen Typologie entlang eigener Kurven anordnen. Bildet man Trendlinien, so weisen diese ein Bestimmtheitsmaß von über 97% auf. Somit sind alle Trendlinien bestimmt und eine lineare Abhängigkeit zwischen Werten der Eigenversorgung und dem Anteil Photovoltaik zu Energiebezugsfläche ist gegeben. Form und Höhe der Eigenversorgung der Kurven unterscheiden sich je nach Orientierung deutlich voneinander. So weist eine horizontale Dachfläche die „steilste“, die Nordfassade die „flachste“ Kurve einer Eigenversorgung auf. Aus den Trendlinien lassen sich für alle Orientierungen folgende Funktionen ableiten.

Anteil Eigenversorgung am Gesamtbedarf (Büronutzung)

- Dach - Hz
 $f(x) = -1,0988 \cdot x^4 + 3,3783 \cdot x^3 - 3,975 \cdot x^2 + 2,2912 \cdot x - 0,0184$
- Wand - Süden
 $f(x) = 0,1494 \cdot x^3 - 0,654 \cdot x^2 + 0,9739 \cdot x + 0,0091$
- Wand - Osten
 $f(x) = 0,2703 \cdot x^3 - 0,7215 \cdot x^2 + 0,8849 \cdot x - 0,0028$
- Wand - Westen
 $f(x) = 0,4081 \cdot x^3 - 0,9756 \cdot x^2 + 1,0036 \cdot x - 0,0025$
- Wand - Norden
 $f(x) = 0,0477 \cdot x^3 - 0,1975 \cdot x^2 + 0,5483 \cdot x - 0,0016$

Anteil Eigenversorgung am Gesamtbedarf (Wohnnutzung)

- Dach - Hz
 $f(x) = 0,1106 \cdot \ln(x) + 0,5949$
- Wand - Süden
 $f(x) = 0,097 \cdot \ln(x) + 0,4978$
- Wand - Osten
 $f(x) = -1,5079 \cdot x^4 + 4,1651 \cdot x^3 - 4,3992 \cdot x^2 + 2,2711 \cdot x + 0,0022$
- Wand - Westen
 $f(x) = 0,1156 \cdot \ln(x) + 0,5189$
- Wand - Norden
 $f(x) = 0,4716 \cdot x^3 - 1,4428 \cdot x^2 + 1,496 \cdot x - 0,0016$

Die extrahierten Funktionen gelten ausschließlich für die Bereiche $x > 0$ bis $x < 1$. Alle Kurven nähern sich einem maximalen Grenzwert von circa 50% (Wohnnutzung) bis 55% bei einer Büronutzung an. Das bedeutet, dass die Hälfte des täglichen Strombedarfs in einem Zeitraum (nachts, frühen Morgen- und späten Abendstunden) ohne signifikantem Solarpotenzial anfallen. Diese „natürliche“ Grenze kann durch Speichertechnologien oder Maßnahmen zur Lastverschiebung weiter erhöht werden.

Im Modell werden die identifizierten Funktionen nun über eine prozentuale Anteilsrechnung miteinander „verschnitten“. Damit lassen sich auch Mischbelegungen unterschiedlicher Größen und unterschiedlicher Richtungen berechnen.

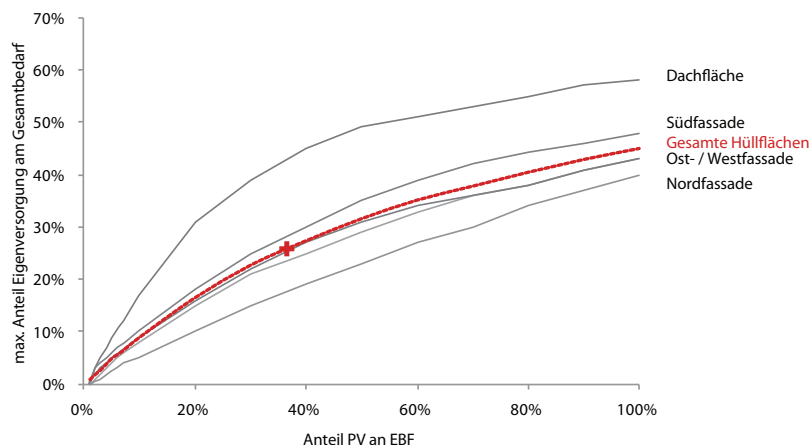
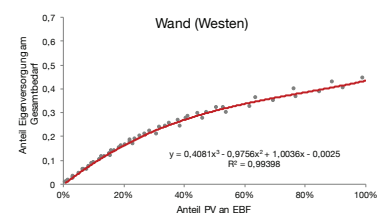
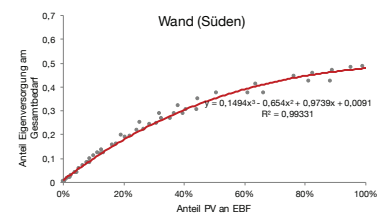
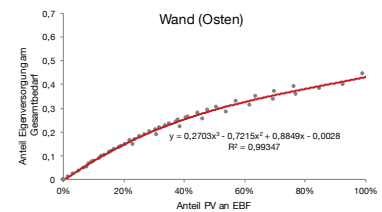
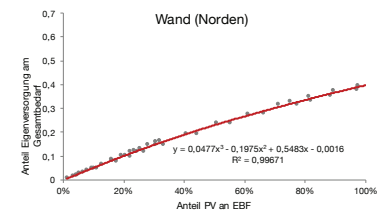
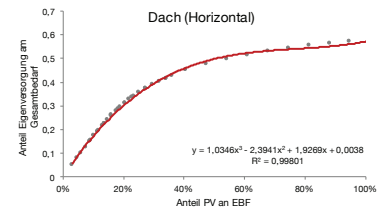


Abb. 357: Algorithm zur Berechnung des Maßes der Eigenversorgung in Abhängigkeit zum Anteil Photovoltaik zur Energiebezugsfläche
 Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von Wurzbacher (2017)

Abb. 358: Darstellung zur Berechnung des Grades der Eigenversorgung
 Quelle: Eigene Darstellung

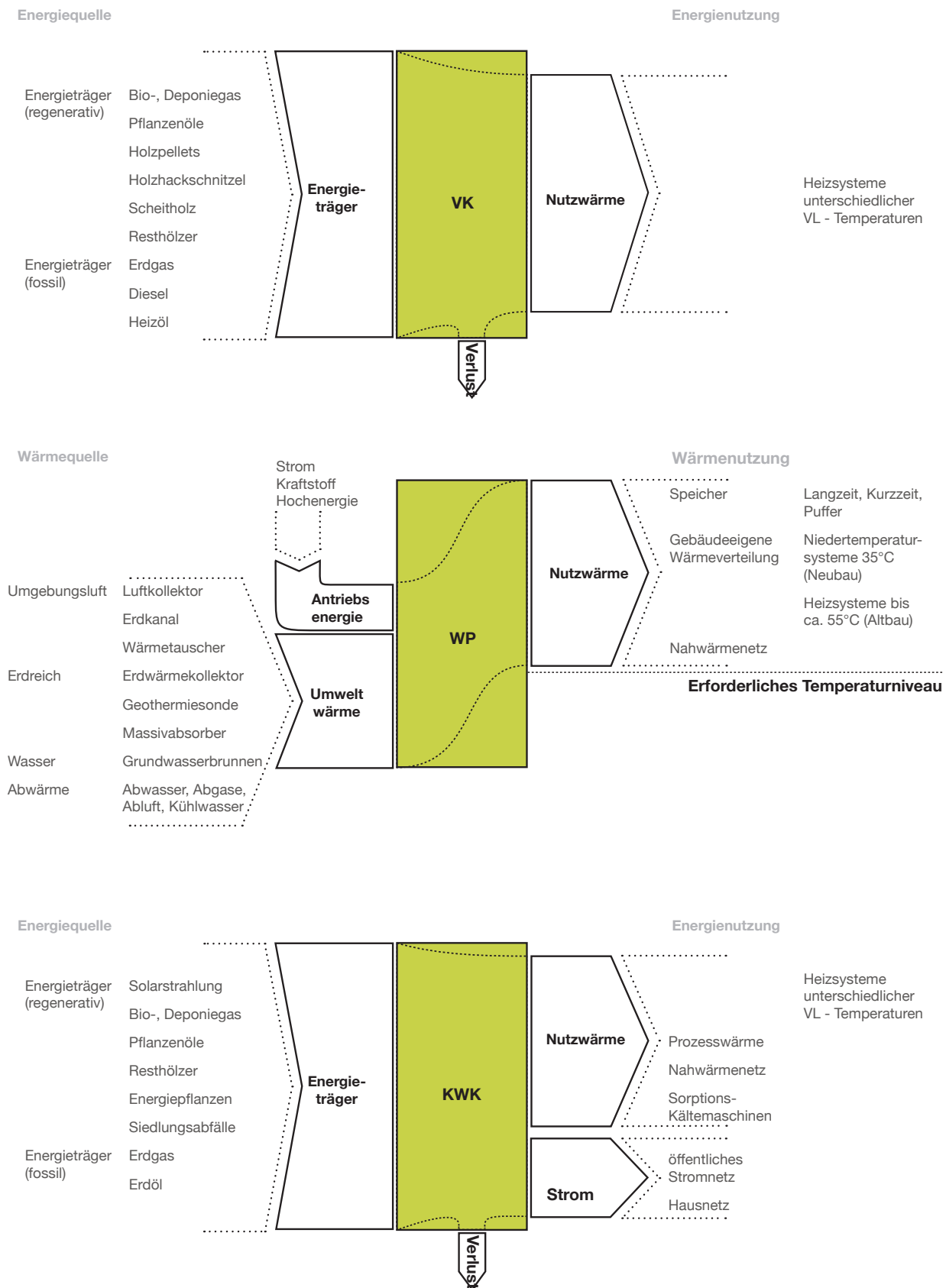


Abb. 359:
Funktionsschematas unterschiedlicher
Anlagentechniken
Quelle: Hegger; Dettmar; Martin et al.
(2012)

2.4. Anlagentechnik und Berechnung des Endenergiebedarfs und CO₂ Ausstoßes

2.4.1. Einbettung der Solarenergienutzung in das Gebäudeenergiesystem

Zur Berechnung des Endenergiebedarfs und CO₂ Ausstoßes wird eine Anlagentechnik im Modell implementiert. Diese dient zur Deckung des Nutzwärme- und Nutzkältebedarfs. Der über Photovoltaik erzeugte Strom fließt ebenfalls in die Gesamtbilanz mit ein. Prinzipiell sind alternative Systeme in der Koppelung mit Photovoltaik denkbar. Neben einem Standardsystem mit Verbrennungskessel bilden vorallem Wärmepumpen- oder gekoppelte Kraft-Wärme-Systeme (KWK) gute Synergien bei der passiven und aktiven solaren Energiegewinnung.

Wärmepumpe

Innerhalb eines Anlagensystems mit Wärmepumpe kann diese gezielt durch Überschüsse an Strom aus der Photovoltaikanlage angesteuert werden. Wird der Wärmepumpe ein größerer Pufferspeicher nachgeschaltet, so kann die Eigennutzung von Photovoltaikstrom nochmals erhöht werden. Optional kann auch die in der Fassade gewonnene Abwärme als Umweltquelle der Wärmepumpe zugeführt werden. Diese Art der Umweltquelle wird gerade bei hohen ganzjährig nachgefragten Warmwasserwärmebedarfen als effizient eingestuft. Setzt sich der Wärmebedarf primär aus Raumwärme zusammen, wird diese Koppelung hingegen als weniger effizient erachtet. Der Grund hierfür liegt in der potenziell fehlenden Menge an solarer Wärme gerade in Zeiten hohen Heizwärmebedarfs.

Kraft-Wärme-Anlage

Die Einbindung einer KWK-Anlage kann zwar nicht die Eigenversorgung von Strom aus Photovoltaik verbessern, insgesamt kann solch ein System jedoch lastglättend betrieben werden. Das bedeutet, dass positive (Überschüsse) oder negative (Defizite) Lastspitzen abgefedert werden können und somit zu einer Stabilisierung des Stromnetzes beitragen. Dieser Effekt ist von ebenso großer Bedeutung wie die Verbesserung der Eigenversorgung mit Strom aus Photovoltaik. Kraft-Wärme Anlagen können in Zeiten, in welchen keine solare Stromproduktion vorliegt notwendige Strommengen produzieren, sofern die resultierende Abwärme ebenfalls genutzt werden kann. In der Regel werden KWK-Anlagen strombasiert ausgelegt und auf 10% bis 20% der maximalen Wärmeleistung dimensioniert, um eine hohe Anzahl an Betriebsstunden pro Jahr zu generieren.

Im vorliegenden Fall wird eine strombetriebene Wärmepumpe herangezogen, welche in den folgenden Abschnitten in ihrer Wirkungsweise und den hinterlegten Kennwerten nochmals eingehend beschrieben ist.

2.4.2. Endenergie- und CO₂ Bilanz

Nach einer Bilanz eines Endenergiebedarfs mittels Anlagentechnik erfolgt eine Hochrechnung des Selbigen auf die Zeiträume 20 Jahre und 50 Jahre. Hierbei wird auch entsprechend einer sogenannten Plusenergiebilanz gezeigt, ob im Jahresmittel mehr oder weniger Energie gewonnen, als verbraucht wird.

Aus dem ermittelten jährlichen Endenergiebedarf wird dann anhand eines Faktors zur CO₂ Bilanzierung der Ausstoß des Stickoxides ermittelt. Werte für die verwendeten Basis Äquivalente wurden von Statista.de (2016) übernommen. Da sich der CO₂ Ausstoß pro Kilowattstunde Strom im Laufe der Zeit jedoch verändert und sich auch zukünftig weiter anpassen wird, wurde eine Hochrechnung möglicher Äquivalente anhand des Ausbauziels der Bundesregierung vorgenommen. Dieses sieht vor den Anteil erneuerbaren Stroms bis zum Jahr 2050 auf 80% des deutschen Strombedarfs zu erhöhen. Aus diesem Ziel lässt sich ein jährlich sinkender Faktor eines CO₂ Äquivalentes linear interpolieren. Die jeweiligen jahresbezogenen CO₂ Faktoren werden mit den zuvor ermittelten Strombedarfen jahresweise im Betrachtungszeitraum von 50 Jahren verrechnet. Insgesamt ergibt sich durch den kleiner werdenden CO₂ Faktor ein fallender CO₂ Ausstoß.

Berechnungen zur Gutschrift von CO₂ erfolgen anhand des gleichen Faktors. Hier wird ein anderes Verfahren herangezogen, als dies zum Beispiel die Definition zum Plusenergiegebäudes (BMVBS 2011) vorsieht, wo ein erhöhter Faktor eines Verdrängungsstroms angesetzt wird.

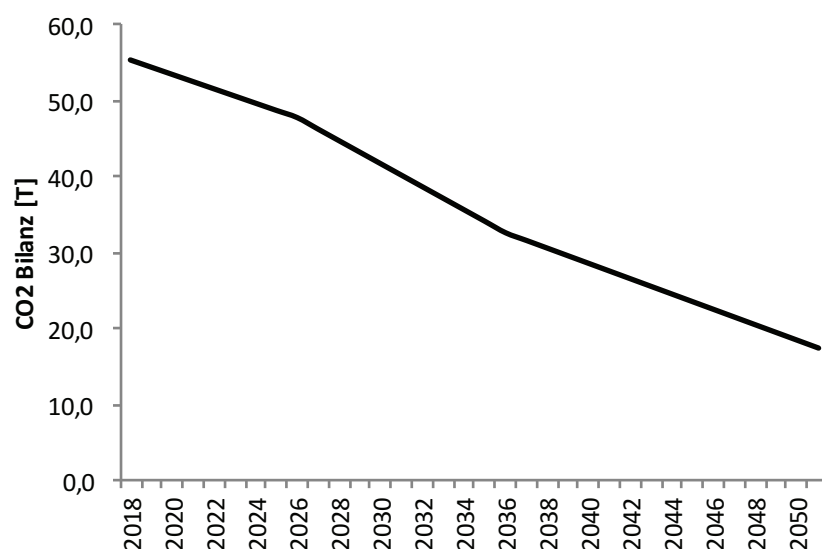


Abb. 360:
Entwicklung des CO₂ Faktors im
Zeitraum von 50 Jahren;
Quelle: Eigene Darstellung auf
Datengrundlage von Statista.de (2016)

3. Fallbeispiel: Freistehendes solaradaptives Bürohaus

Bei dem gewählten Gebäude handelt es sich um ein im Grundriss annähernd quadratisches, gleichmäßig nach allen Himmelsrichtungen ausgerichtetes Bürogebäude. Es wurde aus einer real vorgefundenen Bebauung übernommen. Die Umgebung entspricht einer typischen Bebauung eines Gewerbegebietes mit unterschiedlichen kleineren und größeren Baukörpern. Der Baukörper ist in insgesamt sechs Geschosse gegliedert und weist eine Nutzfläche von 2239 Quadratmetern auf. Die weiteren geometrischen und strahlungsspezifischen Kennwerte sind in den folgenden Grafiken zusammengetragen. Typologisch handelt es sich um einen eher kleinen Baukörper, dessen gleichmäßige Verteilung der Fassadenflächen in alle Himmelsrichtungen unterschiedliche Konfigurationen polyfunktionaler Fassaden ermöglicht. Das Gebäude ist mit einem Flachdach ohne Dachaufbauten versehen.



Abb. 361:
3D Darstellung zur Geometrie und
städtebaulichen Einbindung des
Fallbeispiels
Quelle: Eigene Darstellung

Baustrukturelle Kennwerte

Brutto Grundflächen	BGF	3.732,48 m ²
Grundfläche	GR	466,56 m ²
Brutto Rauminhalt	BRI	11.244,10 m ³

Nettobauland	NBL	3.011,34 m ²
Geschossflächenzahl	GFZ	0,93
Grundflächenzahl	GRZ	0,15

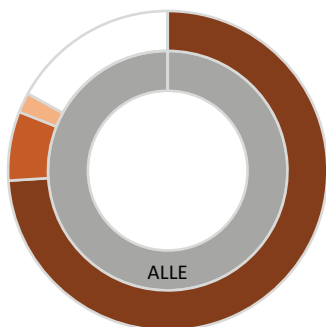
Geschosshöhe	3,50 m
Vollgeschosse	8
A/V	0,046296296

Dachflächen

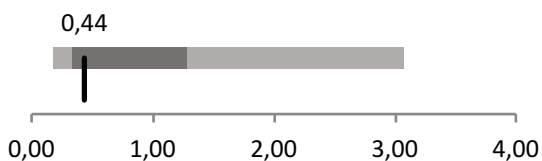
Nord	0,00 m ²
Ost	0,00 m ²
Süd	0,00 m ²
West	0,00 m ²
Horizontal	466,56 m ²
gesamt	466,56 m²

Anteil Flächen mit Strahlungsbereichen

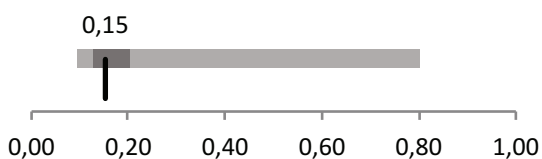
Dachflächen



Einordnung Fallbeispiel Bürobau in typische GFZ



Einordnung Fallbeispiel Bürobau in typische GRZ



Wandflächen

Nord	520,56 m ²
Ost	520,56 m ²
Süd	520,56 m ²
West	520,56 m ²
gesamt	2.082,24 m²

Wandflächen

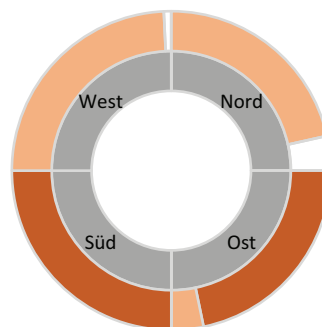
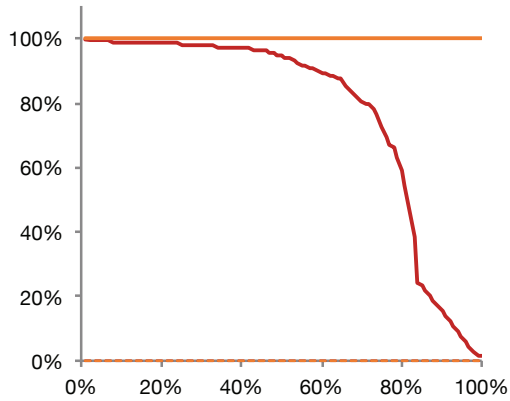


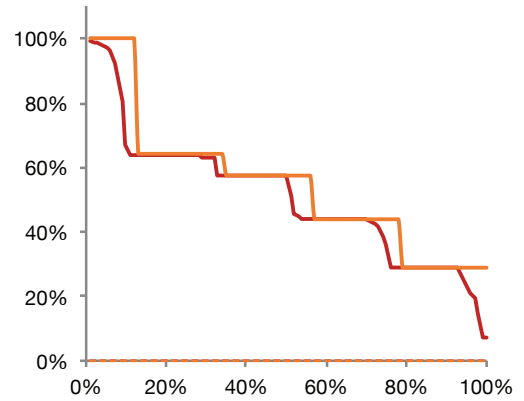
Abb. 362:
Datensammlungen des gewählten
Testgebäudes im Fallbeispiel eines
freistehenden Bürobau
Quelle: Eigene Darstellung

Globalstrahlungsverteilung auf Dach- und Hüllflächen

Dachflächen

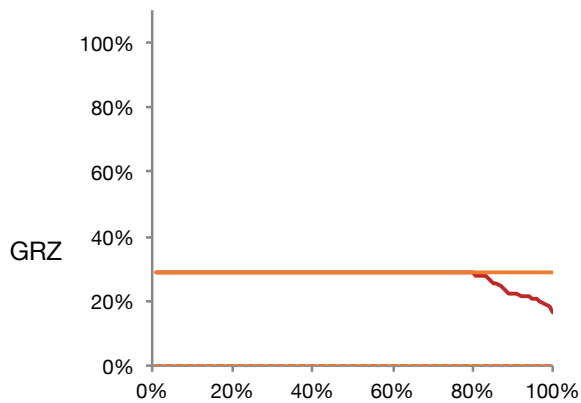


Hüllflächen (alle)

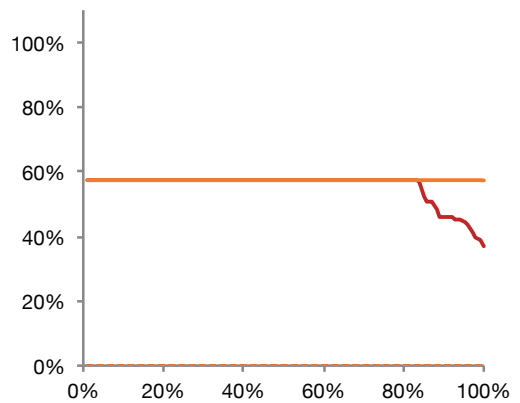


Globalstrahlungsverteilung auf Wandflächen nach Orientierung

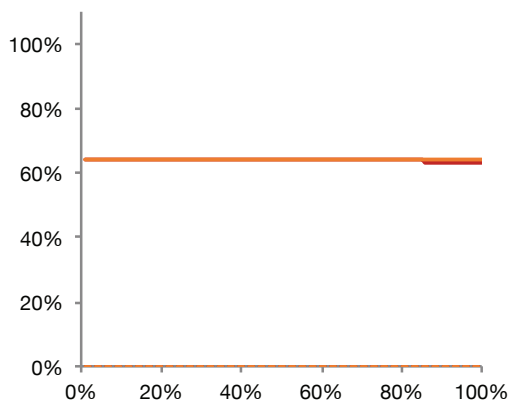
Wandflächen Nord



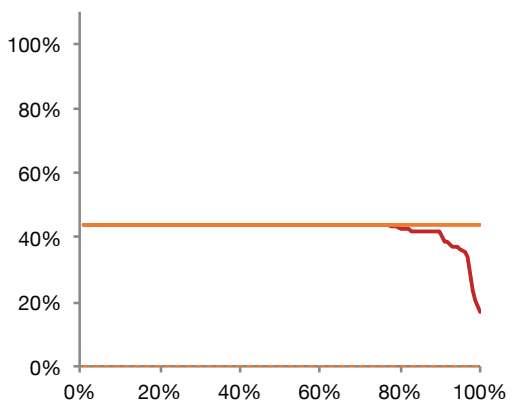
Wandflächen Ost



Wandflächen Süd



Wandflächen West



- Fallbeispiel Bürobau (RED2)
- Fallbeispiel Bürobau (RED0)
- - - Median Punktförmige Bauten (RED2)
- - - Median Punktförmige Bauten (RED0)

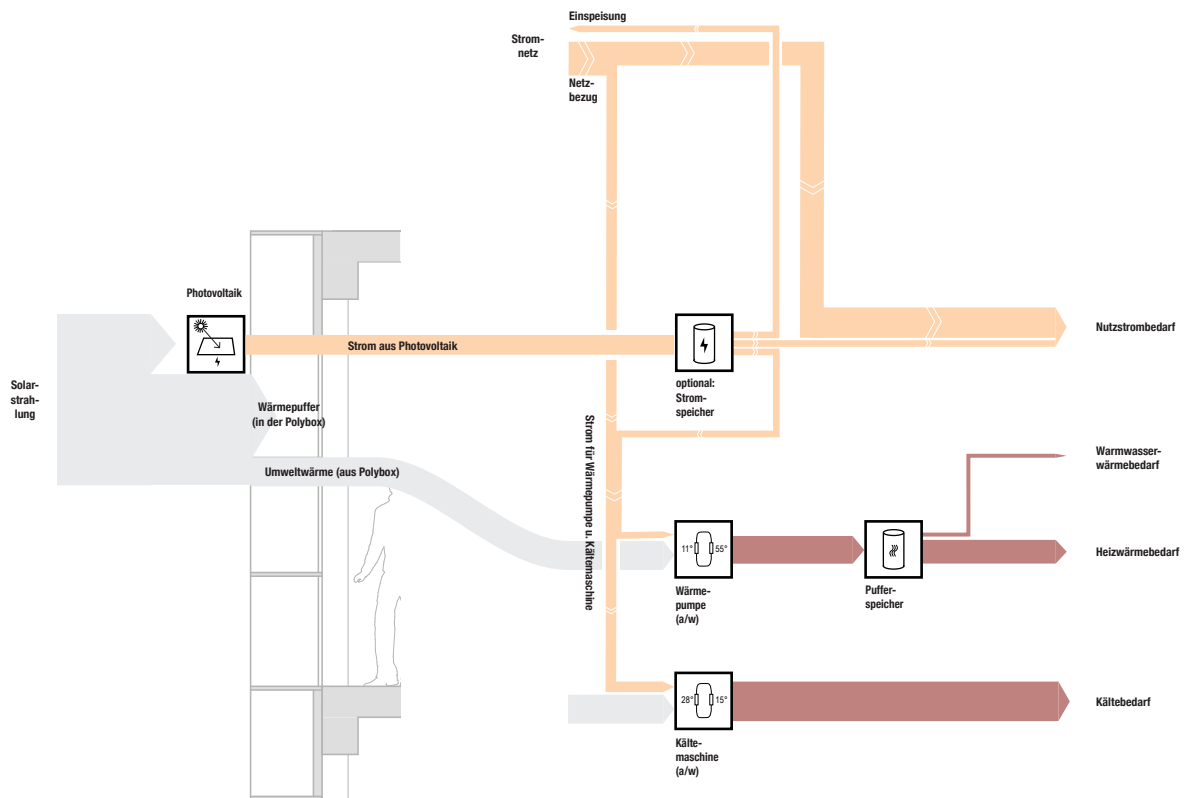


Abb. 364:
Schematische Übersicht zur
Einbindung der polyfunktionalen
solaradaptiven Fassade in die zu
Grunde gelegte Anlagentechnik
Quelle: Eigene Darstellung

Integration von Photovoltaik

Standard



Polybox S1 bis S11



PV Integration:

Dach	20% PV	20% PV
Fassade - Nord	Keine PV	keine PV
Fassade - Ost	Keine PV	50% PV*
Fassade - Süd	Keine PV	50% PV*
Fassade - West	Keine PV	50% PV*

Abb. 363:
Übersicht der Konfiguration von
Photovoltaik in Fassaden und
Dachflächen der Basisvariante und der
untersuchten Szenarien S1 bis S11
Quelle: Eigene Darstellung

3.1. Beispielhaft implementiertes Energiesystem

Die Stromproduktion der Fassade wird bilanztechnisch in das Gesamtenergiesystem über die zuvor beschriebenen Kennwerte zur Stromproduktion aus Photovoltaik (Kristalline Zellen, mittlerer Systemwirkungsgrad von 12%, inkl. Wechselrichter) sowie Berechnungsfunktionen zur Eigenversorgung eingebunden. Zur Wärmebereitstellung ist im vorliegenden Fallbeispiel eine strombetriebene Wärmepumpe vorgesehen. Deren Strombedarf wird über einen festen COP (Coefficient of Performance) Wert von vier aus den zuvor bilanzierten Mengen notwendiger Heiz- und Trinkwarmwasserwärme berechnet. Als „Nebenrechnung“ wird die Menge Umweltwärme mitbilanziert, welche anteilsweise aus der Abluft der Polybox Fassade entnommen werden kann.

Die notwendige Nutzkälte wird im vorliegenden Fallbeispiel über einen reversiblen Betrieb der Wärmepumpe oder über eine eigene strombetriebene Kompressionskältemaschine bereitgestellt. Hier ist ebenfalls ein fester COP von vier hinterlegt. Die weiteren Berechnungen zum Endenergiebedarf und CO₂ Ausstoß erfolgen gemäß oben beschriebenen Rechenverfahren.

3.2. Untersuchte Szenarien zur Fassadenkonfiguration

Anhand des verwendeten freistehenden Bürogebäudes werden die Auswirkungen energetischer Verhaltensweisen vorangegangener Varianten der polyfunktionalen Fassade in unterschiedlichen Szenarien S1 bis S11 getestet und miteinander verglichen. Hierdurch ist eine endenergetische und CO₂ –technische Bewertung möglich. Diese erweitert die im vorangegangenen Kapitel bereits beschriebenen spezifischen Vergleichen der Nutzenergiebedarfe. Durch die Gebäudegesamtbetrachtung können auch Wechselwirkungen von Gewinnen und Verlusten einander gegenübergestellt werden. Es wird hieraus auch, die Beantwortung der einleitend genannten Forschungsfrage, ob aktive Energiegewinnung Dämmung substituieren kann, erwartet.

Prinzipiell lässt das entwickelte Gebäudeenergiemodell ganz unterschiedliche Konfigurationen zum Anteil von PV-Systemen, Zelltypen, Fassadentypen bis hin zu unterschiedlichen Fensterflächenanteile zu. Um einen Quervergleich aller Szenarien zu erlauben, werden einheitliche Parameter zugrunde gelegt. Diese sehen einen einheitlichen Belegungsgrad photovoltaischer Systeme der Fassaden und des Daches vor (vgl. beistehende Übersicht Abb. 363). Auch sind alle Systeme mit gleichem Zelltypus sowie gleicher Heiz- und Kühlanlage versehen. Somit resultieren potenzielle Änderungen in den Ergebnissen aus Auswirkungen der jeweilig gewählten Fassadenvariante. Neben dem Quervergleich entwickelter Szenarien S1 bis S11 wird ein Referenz- und Standardszenario S0 definiert. Dieses dient als Bezugspunkt des entwickelten Fassadenprinzips zu marktgängigen Systemen in der endenergetischen, CO₂-technischen und den separat durchgeführten Lebenszyklus- und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Das Referenzszenario S0 ist mit einer marktüblichen Standard Fassade versehen. Die

Gebäudekonfiguration	
	<i>Beschreibung</i>
Basis o.PV	alle Fassaden mit Standardsystem; ohne PV
Basis m.PV	alle Fassaden mit Standardsystem; 20% Dachflächen mit PV
S1	alle Fassaden mit Polybox Px V1 (stehende Luftschicht, ohne Dämmung, 10cm Beton); 20% Dachflächen mit PV, 50% Fassadenflächen (Ost, Süd, West) mit PV
S2	alle Fassaden mit Polybox Px V2 (stehende Luftschicht, 10cm Dämmung, 10cm Beton); 20% Dachflächen mit PV, 50% Fassadenflächen (Ost, Süd, West) mit PV
S3	alle Fassaden mit Polybox Px V3 (stehende Luftschicht, 16cm Dämmung, 10cm Beton); 20% Dachflächen mit PV, 50% Fassadenflächen (Ost, Süd, West) mit PV
S4	alle Fassaden mit Polybox Px V4 (zirkulierende Luftschicht, ohne Dämmung, 10cm Beton); 20% Dachflächen mit PV, 50% Fassadenflächen (Ost, Süd, West) mit PV
S5	alle Fassaden mit Polybox Px V5 (zirkulierende Luftschicht, 10cm Dämmung, 10cm Beton); 20% Dachflächen mit PV, 50% Fassadenflächen (Ost, Süd, West) mit PV
S6	alle Fassaden mit Polybox Px V6 (zirkulierende Luftschicht, 16cm Dämmung, 10cm Beton); 20% Dachflächen mit PV, 50% Fassadenflächen (Ost, Süd, West) mit PV
S7	alle Fassaden mit Polybox Px V7 (zirkulierende Luftschicht zwischen Raumabschluss und Dämmung, 16cm Dämmung in GA-Schicht, 10cm Beton); 20% Dachflächen mit PV, 50% Fassadenflächen (Ost, Süd, West) mit PV
S8	alle Fassaden mit Polybox Px V8 (zirkulierende Luftschicht, 10cm Dämmung, kein Beton); 20% Dachflächen mit PV, 50% Fassadenflächen (Ost, Süd, West) mit PV
S9	alle Fassaden mit Polybox Px V9 (stehende Luftschicht, 5cm Dämmung, Beton); 20% Dachflächen mit PV, 50% Fassadenflächen (Ost, Süd, West) mit PV
S11	alle Fassaden mit Polybox Px V11 (zirkulierende Luftschicht zwischen Raumabschluss und Dämmung, 10cm Dämmung in GA-Schicht, 10cm Beton); 20% Dachflächen mit PV, 50% Fassadenflächen (Ost, Süd, West) mit PV

Tab. 4:
Auswahlmöglichkeiten unterschiedlicher, zuvor simulierter Fassadenkonfigurationen im Gebäudeenergiemodell;
Quelle: Eigene Darstellung

Fassade wird nicht solar aktiviert. Lediglich das Dach wird mit einer Belegung von 20% der Fläche durch Photovoltaik genutzt.

In den Szenarien werden nacheinander die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen polyfunktionalen Fassadensysteme durchdekliniert. Ein wesentlicher Einflussfaktor hierbei stellt das Maß jeweilig vorgesehener Dämmung sowie deren Lage innerhalb der Konstruktion dar. Eine Übersicht aller Szenarien ist nebenstehend abgebildet.

4. Energetische Performance entwickelter solaradaptiver Fassaden

4.1. PV Jahresstromertrag

Durch die einheitliche Belegung der Fassaden und Dachflächen aller Polybox Szenarien S1 bis S11 wird in allen Szenarien ein gleicher Stromertrag in der Jahressumme generiert. Dabei blieben Effekte auf den Wirkungsgrad auf Grund der Erwärmung der photovoltaischen Schicht durch den erwärmten Fassadenzwischenraum unberücksichtigt. Bei einer Belegung von 50% aller opaken Flächen der Ost-, Süd- und Westfassaden sowie einer 20% Belegung der Dachflächen in den Szenarien mit Px-Fassaden (Polyfunktionale Fassade) wird insgesamt ein Jahresstromertrag von 49.991 kWh/a erzielt. Die Referenzvariante S0 mit lediglich einer 20% Belegung der Dachflächen produziert hingegen nur einen Strombetrag von 11.265 kWh/a.

4.2. Spezifische Nutzenergiebedarfe

Neben den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen spezifischen Nutzenergiebedarfen innerhalb des Testraums jeweiliger Fassadenvarianten werden auch im Gebäudeenergiemodell mittlere spezifische Nutzenergiebedarfe bilanziert. Hier wirken sich Orientierung und Konfiguration der einzelnen Fassaden maßgeblich auf die Höhe genannter Werte aus. Da den einzelnen Szenarien unterschiedliche Px-Bauteile mit entsprechend variierenden Dämmstärken hinterlegt sind, schwanken die ermittelten Nutzenergiebedarfe entsprechend. Die Nutzwärme setzt sich aus den spezifischen Heizwärmebedarfen und einem festen Wert für die Trinkwarmwasserbereitstellung zusammen.

Nutzwärme

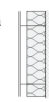
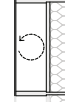
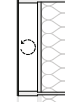
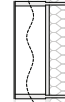
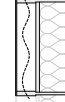
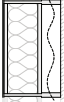
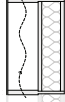
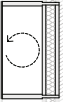
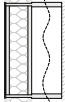
Bei den Szenarien ohne Dämmung S1 und S4 ergeben sich durch den fehlenden winterlichen Wärmeschutz mit 52,5 kWh/(qm*a) (S1) und 60,1 kWh/(qm*a) (S4) sehr hohe spezifische Nutzwärmebedarfe. Diese sind mehr als doppelt so hoch wie die Referenzvariante S0 mit einer Dämmschicht von 16cm. Passive Solarerträge der polyfunktionalen Fassade „verpuffen“ hierbei förmlich und entfalten keinerlei Wirkung.

Einen annähernd gleichen Nutzwärmebedarf wie S0 stellt sich bei den Polyfunktionalen Fassaden ab einer Dämmstärke von

Szenarien entwickelter Gebäudekonfigurationen

	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S11
--	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Fassadenvarianten

	V0	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V11
											

PV Jahresstromertrag [kWh/a]

	11.265	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991
--	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

spez. Nutzenergiebedarfe [kWh/(qm*a)]

Summe	101.9	154.0	112.6	109.5	131.3	105.8	107.3	87.6	106.3	129.5	90.1
Nutzwärme	20.2	52.5	20.8	19.2	60.1	21.6	19.0	28.2	22.0	28.0	31
Nutzkälte	41.7	61.4	51.8	50.3	31.2	44.2	48.3	19.4	44.3	61.4	19
Nutzstrom	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40

Strombilanz [kWh]

Eigennutzug Stom aus PV	9.111	36.980	31.401	30.973	33.922	30.486	30.682	28.017	30.553	33.673	28.357
Strom aus PV	11.265	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991	49.991
Einspeisung PV	2.154	13.011	18.591	19.018	16.070	19.505	19.309	21.975	19.438	16.319	21.634
Netzbezug Strom	115.131	116.399	98.836	97.492	106.771	95.959	96.576	88.186	96.169	105.989	89.257

Energiebedarf [kWh/a]

Endenergiebedarf	112.977	103.388	80.245	78.473	90.702	76.454	77.267	66.211	76.731	89.670	67.622
------------------	---------	---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

CO2 Ausstoß [T/a]

CO2	60	55	43	42	49	41	41	35	41	48	36
-----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Tab. 5:
Ergebnisse der Gebäudegesamtenergiebilanz in der Übersicht;
Quelle: Eigene Darstellung

10cm (S2, S5) ein. Hierbei spielt es bei der Betrachtung des Nutzwärmebedarfs keine Rolle, ob das Fassadensystem als durchströmte, oder eingekapselte Variante genutzt wird. Damit wird deutlich, dass die passiven Erträge im Zwischenraum der Polybox sich positiv, wie im vorangegangenen Kapitel zur bauteilbezogenen Betrachtung genannt, auf den Raumwärmebedarf auswirkt. Passive Solarfassaden können damit ab einem gewissen Mindestdämmmaß weitere Dämmung substituieren. Eine weitere Erhöhung der Dämmstärke von 10cm auf 16cm (S3, S6) wirkt sich in den Simulationen und Bilanzen nur noch unwesentlich auf die Höhe der Nutzwärme aus und führt mitunter sogar zu erhöhten Kältebedarfen.

Nutzkälte

Die entwickelten Szenarien zeigen bei der Betrachtung der spezifischen Nutzkältebedarfe unterschiedliche Verhaltensweisen. Tendenziell liegen fast alle Px-Fassaden Konfigurationen über dem Wert des Referenzszenarios von $41,7 \text{ kWh}/(\text{qm} \cdot \text{a})$. Hier zeigt sich, dass ein uneingeschränkter Solarertrag im Sommerfall zu empfindlichen Überhitzungen des Zwischenraums führen kann. Das in vielen Varianten eingesetzte Dämmpaket führt darüber hinaus zu einer gewissen Einkapselung von Wärmelasten im Gebäudeinneren. Lediglich Szenario 4 (ungedämmt, durchströmt) liegt beim Nutzkältebedarf mit $31,2 \text{ kWh}/(\text{qm} \cdot \text{a})$ deutlich besser, als das Referenzszenario. Je größer die eingesetzte Dämmung wird, desto höher fällt der Nutzkältebedarf aus. Folglich unterbindet die Dämmung einen Wärmestrom vom Innenraum in den Fassadenzwischenraum im Sommerfall.

Eine Ausnahme bilden die beiden „Sonderszenarien“ S7 und S11. Bei diesen liegt die Dämmung vor dem Zwischenraum. Dieser wird folglich nicht mehr solar aktiviert und kann dadurch auch keine Wärmelasten im Sommerfall aufnehmen. Die partielle Durchströmung des Zwischenraums entlang der ungedämmten Trennschicht zum Innenraum befördert dabei den Wärmeabtransport und evoziert einen Wärmestrom aus dem Raum in die Fassade. In Anwendung dieser Schichtenfolge bietet das betrachtete Fassadenprinzip die Möglichkeit durch adaptives Verhalten der Durchströmungsöffnung bei Wärmeüberschuss im Gebäude aktiv eine Konditionierung des Innenraums mit zu gestalten.

Nutzstrom

Allen Szenarien ist ein gleicher Nutzstrombedarf für Beleuchtung und Arbeitsmittel hinterlegt. Zusätzlich ist ein pauschaler Wert für Hilfsenergien berücksichtigt. Schwankungen durch Klappensteuerung der Polybox werden nicht separat erfasst und sind dementsprechend pauschal in der Bilanz berücksichtigt.

4.3. Strombilanz

Eigennutzung Strom aus PV

Auswirkungen auf die Eigennutzung von Strom aus Photovoltaik ergeben sich durch die Höhe produzierten Stroms und die Höhe des benötigten Strombedarfs insgesamt. Hierbei werden auch Hilfs- und Umwandlungsenergien berücksichtigt. Je höher der Wärmebedarf, desto mehr Strom benötigt die im vorliegenden Fallbeispiel implementierte Wärmepumpe. Folglich weisen die Szenarien S1, S4 und S9 den höchsten Betrag einer Eigennutzung auf.

Einspeisung PV Strom

Da der Anteil produzierten Stroms über Photovoltaik bei allen Szenarien gleich ist, die Eigennutzung jedoch schwankt, unterliegt folglich auch die Einspeisung von PV Strom entsprechenden Schwankungen. Diese erfolgt im umgekehrten Maß wie die Eigennutzung. Somit weisen die Szenarien S7 und S11 die höchste Einspeisung auf.

4.4. Endenergiebedarf und CO₂ Ausstoß

Berücksichtigt man neben den Nutzenergien auch den Stromertrag aus Photovoltaik und die Energien der Umwandlungstechnik, so erhält man mit dem Endenergiebedarf den energetischen „Fußabdruck“ eines Gebäudes. Je kleiner dieser ausfällt, desto weniger Energie muss diesem von außen zugeführt werden. Da in den vorliegenden Fällen das Anlagensystem in allen Systemen rein strombasiert aufgebaut ist, kann aus dem Endenergiebedarf über einen CO₂ Faktor auch der zu erwartende CO₂ Ausstoß bilanziert werden. Hierbei können sich unterschiedliche Werte einander aufwiegen oder gegebenenfalls egalisieren.

In den getätigten Untersuchungen stehen interessanter Weise alle Szenarien mit Px-Fassade besser dar, als das Referenzszenario mit seinen 60 Tonnen CO₂ pro Jahr. Selbst eine ungedämmte Fassadenkonfiguration der Szenarien S1 oder S4 weist sowohl endenergetisch, als auch vom CO₂ Ausstoß her niedrigere Werte auf. Grund hierfür sind die Photovoltaik Systeme in den opaken Flächen der Ost-, Süd- und Westfassaden.

Literaturverzeichnis

BMVBS (2011)

BMVBS: Wege zum Effizienzhaus-Plus; Berlin 2011

Hegger; Dettmar; Martin et al. (2012)

Hegger, Manfred; Dettmar, Jörg; Martin, Alexander; Meinberg, Thomas; Boczek, Barbar; Drebes, Christoph; Greiner, Mirka; Hesse, Ulrike; Kern, Tobias; Mahlke, Debora; Najjar, Anton Al; Schoch, Christiane; Schulze, Joachim; Sieber, Sandra; Stute, Volker; Sylla, Ousmane; Wurzbacher, Steffen ; Zelmer, Andrea: Eneff:Stadt | Forschungsprojekt „UrbanReNet“ Vernetzte regenerative Energiekonzepte im Siedlungs- und Landschaftsraum - Anlage II (Anlage II); Darmstadt 2012

Statista.de (2016)

Statista.de: Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2016 (in Gramm pro Kilowattstunde); 2016; abgerufen von: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/>; Zugriff am: 27.04.2017

Wurzbacher (2017)

Wurzbacher, Steffen: Zum Verhältnis urbaner Bebauungstypen und Energie - Analysen zu Interdependenzen von Orientierung, Form- und Struktureigenschaft urbaner Bebauungstypen und einer solaren Strombereitstellung unter den Paradigmen, Leistung‘ und ‚Energie‘; Lemgo 2017

Wurzbacher; Drebes; Müller et al. (2018)

Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Müller, Nikolas D.; Kuhn, Christoph; Pfnür, Andreas: Die Entwicklung des solaren Bauens (Teil 1) in: Kuhn, Christoph; Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Pfnür, Andreas; Müller, Nikolas: Gebäudeintegrierte solaraktive Strategien: Analytische Bewertung und Entwicklung gebäudeintegrierter solaraktiver Systeme

Nikolas D. Müller, Andreas Pfnür

Finanzielle Effekte solaraktiver Bauteile auf Eigentümer und Nutzer von Bürogebäuden (Teil 6)

Methodisches Vorgehen und Fallbeispiel

1. Einleitung und Fragestellung

Auf der politischen Agenda stehen die Energiewende und der Klimaschutz weit oben. Für beide Bereiche wurden ehrgeizige Ziele definiert, in dessen Zusammenhang der Bedarf an regenerativ erzeugtem Strom grundsätzlich ansteigt. Auch der für den Gebäudebetrieb erforderliche Strombedarf steigt im Zuge der Energiewende und des Klimaschutzes, bspw. durch den steigenden Einsatz von Wärmepumpen oder alternativen Technologien im Kontext der Elektrifizierung des Wärmemarktes (Stichwort „Power to heat“). Der Stand der Technik bietet inzwischen die Möglichkeiten solaraktive Bauteile zu entwickeln, mit denen ein großer Teil des erforderlichen Strombedarfs vor Ort erneuerbar produziert werden kann. Den technologischen Möglichkeiten zum Trotz konnten in der Vergangenheit die gestalterischen Ausführungsmöglichkeiten häufig die Erwartungen der am Bau beteiligten Stakeholder nicht erfüllen (vgl. Hegger; Drebes; Wurzbacher 2015). Mit der in diesem Projekt an anderer Stelle deutlich verbesserten gestalterischen Qualität solaraktiver Fassadenelemente, rücken konkrete Umsetzungen dieser Technologie in greifbare Nähe. Damit wird die Wirtschaftlichkeit dieser Innovation aus Sicht der beteiligten Entscheidungsträger zunehmend zum kritischen Erfolgsfaktor für deren Markterfolg.

Der vorliegende Teil der Arbeit zielt darauf ab, die finanziellen Effekte solaraktiver Bauteile zu analysieren und Optimierungspotentiale herauszuarbeiten. Im Erkenntnisinteresse steht die Beantwortung der Fragestellung, welche wirtschaftlichen Effekte für immobilienwirtschaftliche Akteure zu erwarten sind, wenn gestalterisch anspruchsvolle solaraktive Systeme eingesetzt werden.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage ist die Arbeit wie folgt gegliedert:

Kapitel 2 (S.201) dient dazu in die Grundlagen der Bewertung alternativer Maßnahmen zur Durchsetzung der Energie- und Klimapolitik aus Akteursperspektive einzuführen. Hierfür werden zunächst ökonomische Werttheorien vorgestellt, um hierauf aufbauend herauszuarbeiten, wie alternative Maßnahmen zur Durchsetzung der Energie- und Klimapolitik aus der Perspektive immobilienwirtschaftlicher Akteure sinnvollerweise zu bewerten sind. In diesem Kapitel wird konkret ein standardisiertes Verfahren entwickelt, anhand dem alternative Ansätze zur Wirtschaftlichkeitsanalyse hinsichtlich ihrer individuellen Bewertungsziele/-zwecke, der zur Lösung eingesetzten Methoden sowie der Bewertungsvorschriften (Gewinnung von Eingangsdaten respektive Berücksichtigung von vorhandenen Daten in der Ergebnisdiskussion) grundsätzlich systematisiert und damit vergleichbar gemacht werden können. Kapitel 2 (S.201) liefert damit die Grundlagen, um zu ermitteln, inwieweit alternative Methoden zur Analyse der Wirtschaftlichkeit zweckdienlich sind, wenn es gilt, die Entscheidungssituation immobilienwirtschaftlicher Akteure bestmöglich abzubilden. In Kapitel 3 (S.215) werden alternative Ansätze und Methoden zur Wirtschaftlichkeitsanalyse (Lebenszykluskostenanalyse und Verfahren der Investitionsrechnung) vorgestellt und – aufbauend

auf dem vorgestellten Prozessmuster – hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile im Kontext der Fragestellung dieser Arbeit (Möglichkeiten und Grenzen aus immobilienwirtschaftlicher Sicht) diskutiert. Auch wird hier das methodische Vorgehen von Wirtschaftlichkeitsanalysen im Kontext solaraktivierter die Fallbeispiele und die Berechnungsprämissen für die Wirtschaftlichkeitsanalysen erarbeitet. Anschließend werden in Kapitel 5 (S.261) die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalysen vorgestellt. Die Ergebnisse der Analysen werden in Kapitel 6 (S.280) diskutiert und Potentiale zur Optimierung der finanziellen Effekte solaraktiver Fassadenelemente herausgearbeitet. Die einzelnen Projektbausteine sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

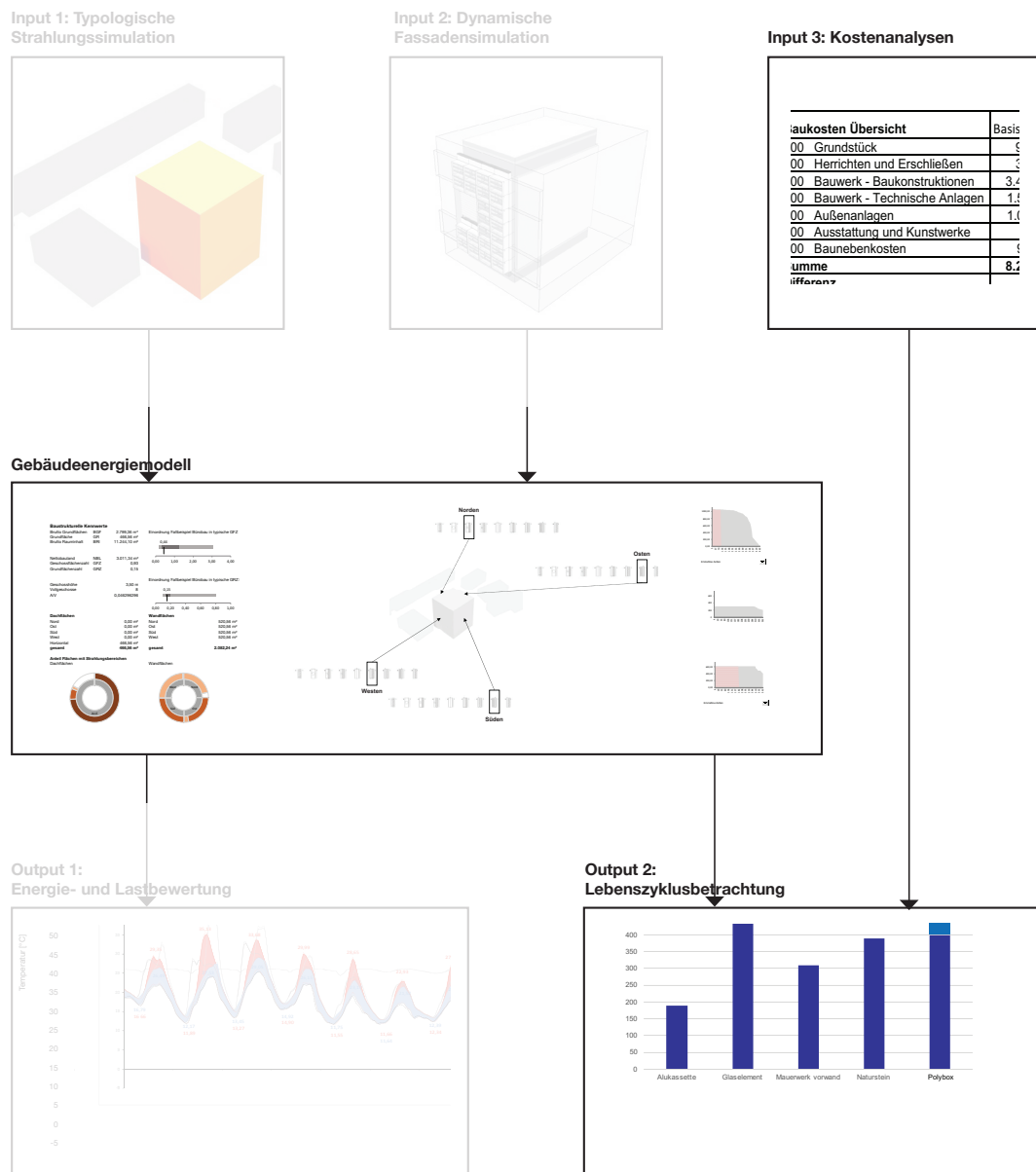


Abb. 365:
Projektaufbau benefit E2
Quelle: Wurzbacher; Drebes; Müller et al. (2018) S.23

In der vorliegenden Arbeit wird nur ein kleiner Ausschnitt möglicher Fragestellungen zu den Möglichkeiten und Grenzen solaraktiver Bauteile betrachtet. Wenngleich hoch relevant für politische, technische, ökologische, juristische und ökonomische Entscheidungsprozesse, sind folgende Fragestellungen explizit nicht Gegenstand der in dieser Arbeit durchgeführten Analysen:

- Die Evaluation der politischen Instrumente zur Durchsetzung der Energie- und Beschleunigung der Wärmewende im Kontext der solaren, gebäudeintegrierten Stromerzeugung.
- In der gesellschaftlichen Diskussion um die Durchsetzung der Energieebene zeigt sich, dass der Einsatz von bestimmten Technologien (beispielsweise Elektroautos) nicht nur von ihrer Wirtschaftlichkeit abhängt, sondern in besonderem Maße von der Zahlungsbereitschaft einzelner Akteure. In der vorliegenden Arbeit liegt das Erkenntnisinteresse zunächst auf den finanziellen Effekten des Einsatzes solaraktiver Bauteile. Die Zahlungsbereitschaft immobilienwirtschaftlicher Akteure für den Einsatz solaraktiver Systeme ist einer Folgeuntersuchung überlassen.

Die Arbeit ist in einem stark interdisziplinär geprägten Forschungsfeld verortet. Da die einzelnen, sich mit der Energie- und Klimapolitik befassenden Disziplinen ihrerseits häufig einen eigenen Sprachgebrauch haben und damit Begriffe in den unterschiedlichen Disziplinen regelmäßig inhaltlich anders definiert sind, werden nachfolgend die wesentlichen, zum Verständnis dieser Arbeit erforderlichen, Begrifflichkeiten geklärt.

Begriff	Hier zum Tragen kommendes Verständnis
Ordnungsrecht	Unter Ordnungsrecht werden alle Maßnahmen verstanden, welche die Energieeinsparung und die Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am Wärmebedarf adressieren sowie damit in direkten Zusammenhang stehen. Das Ordnungsrecht bezeichnet damit die Summe der rechtlichen Maßnahmen, um nach dem strategischen Ansatz die Energie- und Klimapolitik zu steuern.
Stakeholder	Unter den Stakeholdern werden alle Akteure verstanden, die einerseits einen Erfolgsbeitrag für das Zustandekommen der Wärmewende leisten und andererseits von den wirtschaftlichen Folgen der Wärmewende betroffen sind. Die Berücksichtigung aller relevanten Stakeholder-Interessen ist der kritische Erfolgsfaktor für den Erfolg der Steuerungskonzepte der Wärmewende.
Wärmewende	Unter dem Begriff Wärmewende wird der strategische Ansatz zur Umsetzung der Energiewende in der Immobilienwirtschaft verstanden, die auf eine nachhaltige Erwärmung von Gebäuden ausgelegt ist.

Tab. 6:
Begriffsklärungen
Quelle: Eigene Zusammenfassung

2. Grundlagen zur Bewertung alternativer Maßnahmen zur Durchsetzung der Energie- und Klimapolitik aus den Perspektiven immobilienwirtschaftlicher Stakeholder

2.1. Vorbemerkungen

Die Arbeit zielt darauf ab, die finanziellen Effekte solaraktiver Bauteile zu analysieren und mögliche Optimierungspotentiale zu identifizieren. Im Erkenntnisinteresse steht die Fragestellung, welche wirtschaftlichen Effekte für immobilienwirtschaftliche Akteure zu erwarten sind, wenn gestalterisch anspruchsvolle solaraktive Systeme eingesetzt werden. Das Ziel in Kapitel 2 ist eine Systematisierung zu generieren, auf deren Basis alternative Methoden der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Zweckdienlichkeit evaluiert werden können. Im Mittelpunkt dieses Kapitels steht daher die Beantwortung der Frage, auf welcher Grundlage verschiedene Methoden der Wirtschaftlichkeitsberechnung hinsichtlich ihrer Zweckdienlichkeit evaluiert werden können, wenn die Bewertung alternativer Handlungsoptionen im Gebäudesektor aus der Perspektive immobilienwirtschaftlicher Akteure im Zentrum des Erkenntnisinteresses steht? Zur Beantwortung dieser Frage werden zunächst die alternativen Bewertungsanlässe im Kontext der gebäudebezogenen Energiewende vorgestellt, um hierauf aufbauend in die theoretischen Grundlagen für die ökonomische Bewertung alternativer Handlungsoptionen einzuführen. Hierauf aufbauend wird eine Systematik entwickelt, mit der die alternativen Ansätze der Wirtschaftlichkeitsbewertung verglichen werden können.

2.2. Alternative Bewertungsanlässe im Kontext der gebäudebezogenen Energiewende (Wärmewende)

Wenn an dieser Stelle von Bewertungsanlässen die Rede ist, meint dies jeweils ein Ereignis oder auch einen äußeren Beweggrund, welches/der dazu führt, die Bewertung von Maßnahmen zur Energieeinsparung oder zum Klimaschutz im Gebäudesektor zu veranlassen oder diese auch direkt zu bewerten. In der Diskussion um die Weiterentwicklung der Energie- und Klimapolitik gibt es prinzipiell die folgenden Bewertungsanlässe aus den verschiedenen Perspektiven:¹

- Die Planung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. des Anteils erneuerbarer Energien an Gebäuden im Rahmen des Nachweises ordnungsrechtlicher Anforderungen auf Objektebene bzw. ggf. darüber hinaus eine projektbezogene Lebenszykluskostenanalyse im Kontext der Nachhaltigkeitsbewertung.

¹ Daneben gibt es im Kontext der Umweltpolitik/Ressourcenpolitik weitere Bewertungsanlässe und Bewertungsansätze, die jedoch im Kontext dieser Arbeit nicht weiter beschrieben werden. Hierzu zählt beispielsweise die Steuerung der in Anspruch genommenen biotischen und vor allem abiotischen Ressourcen von Baumaterialien im Lebenszyklus und damit insbesondere auch die Verwertung von abiotischen Baumaterialien.

- Die Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. des Anteils erneuerbarer Energien an Gebäuden aus den Perspektiven der betroffenen Akteure auf das Wirtschaftsgut.
- Die politische Planung und Umsetzung von Instrumenten zur Steigerung der Energieeffizienz bzw. des Anteils erneuerbarer Energien auf gesamtwirtschaftlicher Ebene.

Darüber hinaus gibt es einen weiteren Anlass, der in der jüngeren Vergangenheit zunehmend in der politischen Debatte um den Gebäudesektor an Relevanz gewinnt, sich jedoch grundsätzlich nicht dem originären Bestreben der gebäudespezifischen Energie- und Klimapolitik unterordnet, sondern im Kontext der jüngeren Entwicklungen in der Atompolitik entstanden ist.

- Die politische Planung von Instrumenten zur Steuerung von Maßnahmen im Gebäudesektor zur Steigerung des strategischen (sektorenübergreifenden) Nutzens für die Energiewende auf gesamtwirtschaftlicher Ebene.

An dieser Stelle zeichnen sich bereits zwei Aspekte ab: Erstens finden die Bewertungsanlässe zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Lebenszyklus der Immobilie statt, zweitens wird ersichtlich, dass die jeweiligen Bewertungsanlässe immer zweckbezogen sind. In logischer Folge fordern die Bewertungsanlässe daher eine Individualisierung des ökonomischen Bewertungsansatzes hinsichtlich des verfolgten Bewertungszwecks ein. Die folgenden Ausführungen zu den unterschiedlichen Bewertungsansätzen sollen diese Schlussfolgerung verdeutlichen (vgl. hierzu auch folgende Abb. 365).

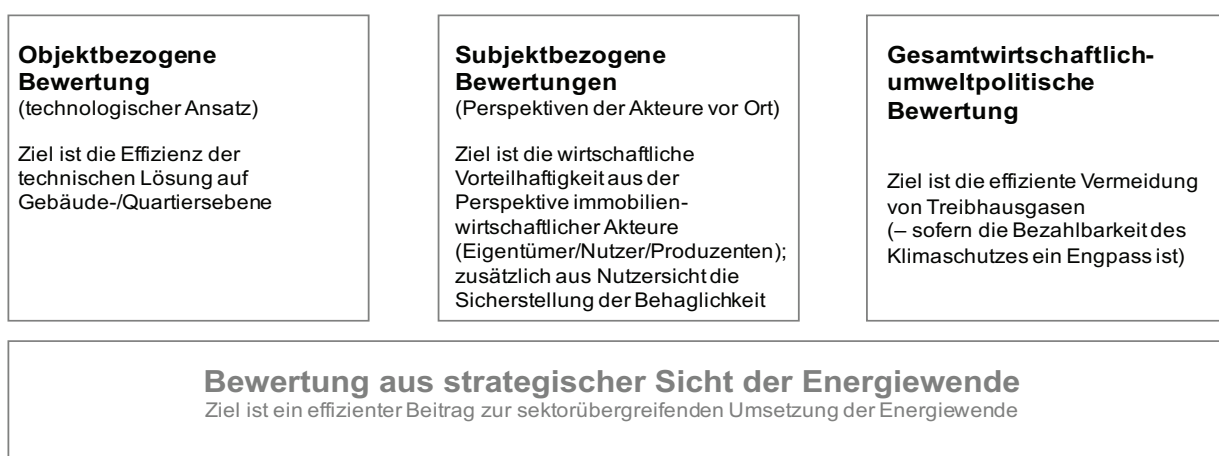


Abb. 366:
Alternative Bewertungsanlässe der Energie- und Klimapolitik im Gebäudesektor
Quelle: Überarbeitete Version von Müller/Pfnür (2017)

Der erste Anlass ist rechtlicher Natur. Hier hat der Planer qua Werksvertragsrecht im Kontext der Gebäudeplanung die Aufgabe den Nachweis zu erbringen, dass das Gebäude bzw. im Falle der Sanierung die angestrebten Maßnahmen auch den Anforderungen der EnEV sowie des EEWärmeG erfüllen. Der Zweck der Bewertung ist demnach, den Nachweis des energetischen Standards in Bezug auf die im Ordnungsrecht vorgeschriebenen Steuerungsindikatoren zu erbringen. Es handelt sich an dieser Stelle um eine objektbezogene Bewertung. Der zweite Bewertungsanlass ist ökonomischer Natur. Hier bewerten die immobilienwirtschaftlichen Akteure aus ihren jeweiligen Perspektiven die nach dem Anforderungsrecht geforderten Maßnahmen der Energie- und Klimapolitik hinsichtlich ihrer finanziellen Effekte. Der Zweck der Bewertung ist demnach, die finanziellen Effekte bestimmter Maßnahmen bei Neubau oder Sanierung aus Akteurssicht abzubilden. Es handelt sich daher hier um eine *subjektbezogene Bewertung*.

Darüber hinaus gibt es zwei weitere Bewertungsansätze, die insbesondere in der energie- und umweltpolitischen Planung und Steuerung eine entscheidende Rolle spielen. Wenngleich diese Bewertungsansätze im Kontext der vorliegenden Arbeit nicht im Fokus stehen, sei an dieser Stelle vollständigkeitshalber auf sie hingewiesen: Der dritte Bewertungsanlass ist ebenfalls ökonomischer Natur, allerdings wird hierbei der Zweck verfolgt, die politische Steuerung auf gesamtwirtschaftlicher Ebene zu planen und zu evaluieren. Damit handelt es sich um eine *gesamtwirtschaftliche Bewertung*.

Der vierte Bewertungsanlass verfolgt den Zweck, sektorübergreifend zu evaluieren, welchen Beitrag bestimmte Maßnahmen im Gebäudesektor für die Umsetzung der Energiewende auf gesamtwirtschaftlicher Ebene leisten können. Es handelt sich daher um eine *Bewertung aus strategischer Sicht der Energiewende*.

Damit gibt es verschiedene Anlässe, die wirtschaftlichen Möglichkeiten und Grenzen alternativer Handlungsoptionen bei der Entwicklung von energieeffizienten und/oder energieproduzierenden Gebäuden zu ermitteln. Aufbauend auf den alternativen Bewertungsanlässen und auf der damit verbundenen (individuellen) Bewertungszwecke wird nachfolgend herausgearbeitet, welche Konsequenz die alternativen Bewertungsansätze für die Wahl der Methodik zur Analyse der Wirtschaftlichkeit haben. Im Kontext der Fragestellung dieser Arbeit liegt der Fokus auf den beiden ersten Bewertungsanlässen. Entsprechend wird im weiteren Verlauf der Arbeit aufgezeigt, inwieweit sich diese beiden Anlässe der Bewertung im Detail hinsichtlich ihrer Sichtweise auf das Bewertungsproblem und die Bewertungsvorschriften unterscheiden.

2.3. Systemgrenzen bei Wirtschaftlichkeitsanalysen im Gebäudesektor

Für den Fall der objektspezifischen Perspektive wird in der, der EnEV zugrundeliegenden DIN 18599 exakt geklärt, wie in der Bewertung vorzugehen ist. Dort ist der Begriff Systemgrenze in zweierlei Kontext definiert: Einerseits als ‚äußere Begrenzung‘ der in der Bewertung herangezogenen Informationen, andererseits als ‚äußere Begrenzung‘ des Gegenstandsbereichs. Um Missverständnisse in der Begrifflichkeit zu vermeiden, bietet es sich zur weiteren Strukturierung an die Systemgrenze in eine horizontale sowie vertikale Komponente aufzugliedern. Die horizontale Systemgrenze sei durch die Informationsgrundlage definiert, die vertikale Systemgrenze durch den Gegenstandsbereich (gegenwärtig nach dem Energieeinsparrecht das Gebäude). Nachfolgend wird in die beiden Begriffe eingeführt.

Horizontale Systemgrenze in der Bilanzierung (Ausschnitt des Lebenszyklus)

Der Lebenszyklus eines Gebäudes, respektive der eingesetzten Materialien, besteht prinzipiell aus vier Phasen: der Produktion, der Errichtung, der Nutzung und der Verwertung. In der Produktionsphase werden die Baumaterialien hergestellt, die in der Errichtungsphase zu einem Bauwerk (bestehend aus den die Materialien für die Baukonstruktion und die technischen Anlagen nach DIN 276) zusammengefügt werden. Nach Errichtung folgt die Nutzungsphase des Gebäudes, in welcher das Gebäude dem Zweck seiner Errichtung nachkommt – dem Wohnen, dem Arbeiten, der Produktion, der Lehre oder anderen Formen der Nutzung. Nachdem die Immobilie ihren Nutzungszweck erfüllt hat (abhängig von dem Nutzungszweck, dem Immobilienmarkt und den Lebenszyklen der eingesetzten Materialien), wird das Gebäude verwertet (vgl. folgende Abb. 366).



Abb. 367:
Lebenszyklus eines Gebäudes
(Baukonstruktion und technische
Anlagen)
Quelle: Eigene Darstellung

Die EnEV betrachtet ausschließlich die Nutzungs- bzw. Betriebsphase, also lediglich einen Teilbereich des Lebenszyklus von Gebäuden in der energie- und klimapolitischen Bewertung. Anders bilanziert beispielsweise das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMBU) im Kontext der Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden; hier werden Baumaterialien und Gebäude über den gesamten Lebenszyklus hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen bewertet (Ökobilanzierung).

Vertikale Systemgrenze in der Bilanzierung (Gegenstandsbereich)

Die vertikale Systemgrenze beschreibt den Gegenstandsbereich, auf den sich die Bilanzierung energie- und/oder klimapolitischer Kennwerte bezieht. Im Energieeinsparrecht ist dies gegenwärtig prinzipiell die ‚äußere Grenze‘ des Gebäudes (vgl. DIN 18599).

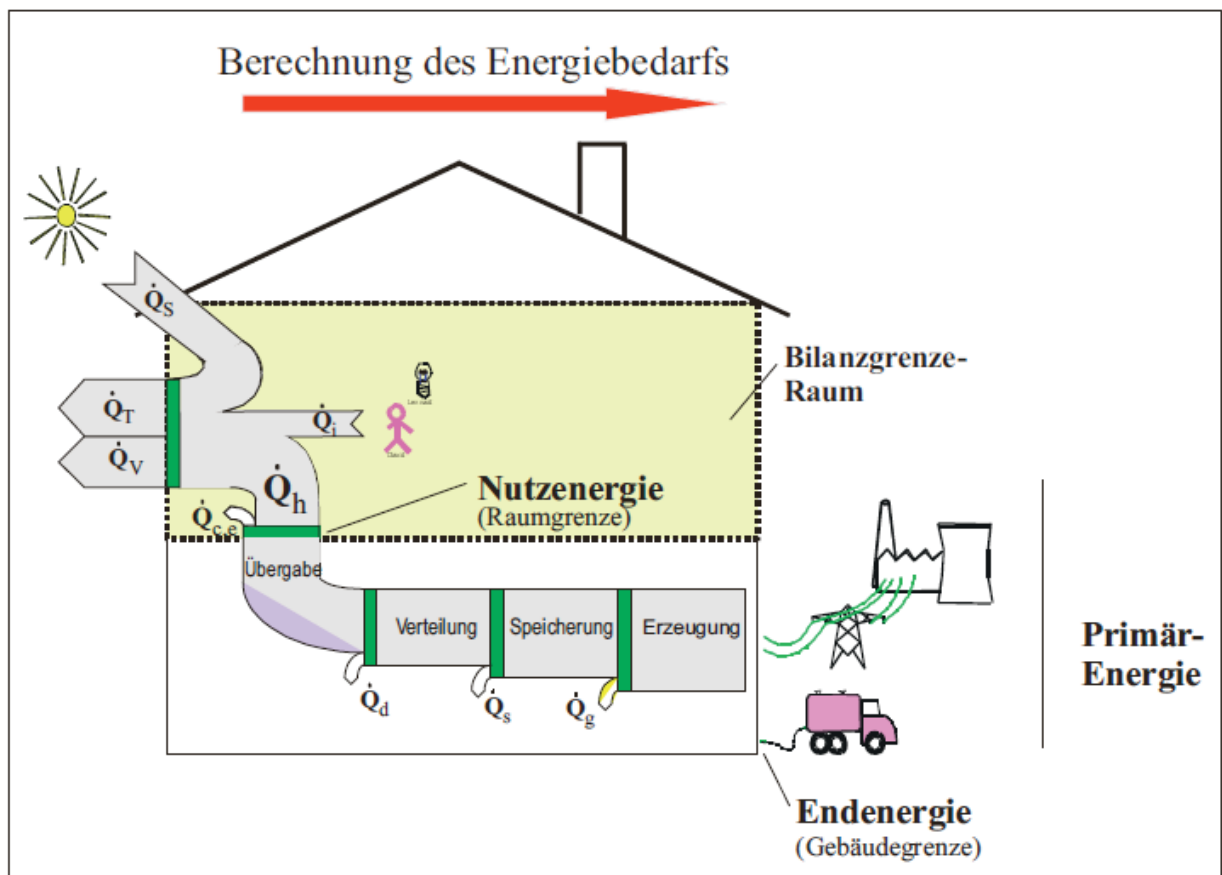


Abb. 368:
Schema zur Berechnung des
Energiebedarfs (Energieflussschema
nach DIN 18599) Quelle: DIN (2003b: 9)

Allerdings ist diese Systemgrenze nur eine der möglichen vertikalen Systemgrenzen: Im Sinne des PlusEnergieHauses kann beispielsweise das Gebäude gemeinsam mit der e-Mobilität betrachtet werden, im Sinne der Programme zur energetischen Stadterneuerung das Quartier, wenngleich dieses noch nicht abschließend definiert ist,² oder auch die Stadt (bspw. die Summe der Energieströme vgl. hierzu Landeshauptstadt Stuttgart 2010).

Je nach gewählter Systemgrenze fließen daher andere Parameter in die Bewertungsvorschrift ein. Entsprechend unterschiedlich fällt das Ergebnis von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen auch bei gleichen Methoden und auch sonst identischen Berechnungsprämissen bei veränderten Systemgrenzen aus. Inwieweit die Systemgrenzen definiert sind und inwieweit die Definitionen zweckdienlich sind, ist unter anderem Gegenstand des folgenden Kapitels.

2.4. Ökonomische Werttheorien als Bewertungsgrundlage

Ausgangslage für die Entscheidungsfreiheit bei alternativen Handlungsoptionen in der Energie- und Klimapolitik

Die Energie- und Klimapolitik ist prinzipiell von Entscheidungsfreiheit geprägt. Einerseits überlässt es die Europäische Union den einzelnen Mitgliedsstaaten, wie sie die Anforderungen aus der EU-Energie-Effizienzrichtlinie (Europäische Union 2012) oder auch aus der Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Europäische Union 2010) umsetzen, andererseits überlässt es die Bundesregierung unter Berufung auf die Technologieoffenheit prinzipiell den Eigentümern, wie sie die Anforderungen aus dem Anforderungsrecht (EnEV/ EEWärmeG) vor Ort erreichen. Die gegenwärtige Praxis der Energie- und Klimapolitik schafft damit Zielfunktionen und eröffnet Handlungsalternativen. Damit wird die Grundlage für rationales Entscheiden gelegt. Sofern die Handlungsalternativen zielbezogen formuliert werden und samt ihren Voraussetzungen und Ergebnisse bekannt sind, kann der Wert der politischen bzw. baulichen oder technischen Handlungsoptionen als Basis einer rationalen Entscheidung ermittelt werden.

In der gebäudebezogenen Energie- und Klimapolitik gibt es diverse Stakeholder. Unter Stakeholdern werden in dieser Arbeit alle Akteure verstanden, die einerseits einen Erfolgsbeitrag für die Durchsetzung der Energie- und Klimapolitik leisten und andererseits von den wirtschaftlichen Folgen der gewählten Maßnahmen betroffen sind. Stakeholder unterscheiden sich dadurch, dass sie unterschiedliche Partikularinteressen verfolgen. Die unterschiedlichen Partikularinteressen wiederum definieren spezifische Zielsysteme, die perspektivisch differenzierbar sind, und anhand derer die verschiedenen Stakeholder den Erfolg von Maßnahmen aus ihrer individuellen Perspektive heraus bewerten. Der Wert bestimmter Maßnahmen wird ungeachtet der Perspektive durch die Messung von Zielerreichungsgraden bestimmt.

² Eine baurechtliche oder allgemein anerkannte Definition zum Quartier als Grundlage weiterer Betrachtungen zu den energie- und klimapolitischen Möglichkeiten und Grenzen steht jedoch noch aus.

Solange sich nun die Ziele der verschiedenen Stakeholder unterscheiden, gelangt jeder Akteur – je nach Zielsystem – bei der Bewertung identischer Maßnahmen zu spezifischen Bewertungsergebnissen. Vor diesem Hintergrund muss daher zunächst erörtert werden, wie der Wert der Handlungsalternativen in der Energie- und Klimapolitik für den Gebäudesektor aus der Sicht der relevanten Stakeholder zu ermitteln ist.³

Wenn mit der vorliegenden Arbeit geklärt werden soll, welche wirtschaftlichen Effekte für immobilienwirtschaftliche Akteure zu erwarten sind, wenn gestalterisch anspruchsvolle solaraktive Systeme eingesetzt werden, dann muss einem akteursbezogenen Ansatz folgend zunächst geklärt werden, auf welche Weise die verschiedenen Akteure ihre rationale Entscheidung bei verschiedenen Handlungsalternativen treffen. In der Ökonomie werden hierzu maßgeblich drei Theorieansätze diskutiert: die objektive Werttheorie, die subjektive Werttheorie und die gerundive Werttheorie.⁴ Die folgenden Absätze beschreiben jeweils die Vor- und Nachteile der verschiedenen Werttheorien, um – im folgenden Kapitel hierauf aufbauend – ein Modell herauszuarbeiten, auf dessen Grundlage akteursbezogene und zugleich intersubjektiv nachvollziehbare Bewertungsansätze abgeleitet werden können.

Objektive Werttheorie

Die *objektive Werttheorie* geht von der Annahme aus, dass der Wert eines Objektes (in dem vorliegenden Fall einer Handlungsoption/gebäudespezifischen Maßnahme) eine mit dem Objekt unwiderruflich verknüpfte Eigenschaft, ein allgemeingültiger Charakter sei. Dieser Annahme folgend „müssten alle rational handelnden Subjekte einem Objekt den gleichen Wert beimessen“ (Baumgarten/Brauer 1971 S. 344). Der Wert – im ökonomischen Sinne – ergibt sich entsprechend des Gütereinsatzes zur Gesteuerung des Objektes.

An dieser Stelle sollte klar sein, dass dabei der subjektive Wert, den ein Objekt für den einzelnen aufgrund individueller Bedürfnisstrukturen hat, in der objektiven Werttheorie nicht berücksichtigt wird. Solange keine individuellen Bedürfnisstrukturen vorhanden wären, würde dies zu keinerlei Problemen in der Bewertung führen. Allerdings zeichnet sich eine entwickelte Gesellschaft in besonderem Maße durch individuelle Bedürfnisstrukturen aus. Diese ermöglichen, dass auch bei rationalem Handeln der Wert des gleichen Objektes für verschiedene Subjekte gänzlich unterschiedlich ausfallen kann. Das allerdings ist per se nicht vereinbar mit der Prämisse, dass der Wert des Objektes in dem Objekt innewohnt.

3 Solange finanzielle Ressourcen begrenzt sind, spielt es für den vorliegenden Fall an dieser Stelle noch keine Rolle, ob es sich bspw. um das Kapital und die sonstigen Ressourcen von Eigentümern, Nutzern oder das des Steuerzahlers handelt. Denn aus einer ökonomischen Betrachtungsweise heraus erfordern begrenzte Ressourcen immer einen effizienten Umgang, also rationales Handeln. Rationales Handeln allerdings ist nur möglich, wenn das Wahlproblem (die alternativen Handlungsoptionen) mittels eines intersubjektiv nachvollziehbaren Vergleiches aufgelöst werden kann.

4 Vgl. zu den folgenden Abschnitten : 6ff.; zusammenfassend : 333 ff.; : 96 f.; : 127 ff.; : 47 ff..

Unterschiedliche Bewertungen des gleichen Gutes bzw. Objektes werden – trotz der vorausgehenden Kritik – von Anhängern der objektiven Werttheorie wie folgt begründet: „a) Unvermögen der Subjekte zum Erkennen des Wertes, b) absichtlich falsche Aussagen, c) unterschiedliche Sprachkonventionen, d) falsche oder unvollkommene Informationen“ (ebd.). Diese Argumente führen jedoch ins Abseits, weil ein intersubjektiver Vergleich alternativer Handlungsoptionen, der als Grundlage für rationales Entscheiden erforderlich ist, nicht gegeben ist. Engels konstatiert daher treffend, die objektive Werttheorie sei als empirische Theorie falsch,

„denn es ist durchaus möglich, daß zwei rational handelnde und voll informierte Personen verschieden wählen. Mit dem Marktpreis als objektiven Wert wäre die Werttheorie überflüssig, doch bliebe das Wahlproblem ungeklärt. Mit transzendenten Maßstäben ist die objektive Werttheorie metaphysisch und wissenschaftlich unbrauchbar, da ihre Aussagen in keiner Weise überprüfbar wären. Soll sich – auch das wurde in der betriebswirtschaftlichen Literatur vertreten – der ‚Wert‘ gar nicht auf das Wahlproblem beziehen, so müßte man für dieses ein eigenes Wort erfinden; das Problem aber bliebe bestehen. Die Theorie lieferte dann zwar Zahlen, die aber ohne alle Bedeutung wären“ (Engels 1962 Hervorhebungen im Original).

Subjektive Werttheorie

Die zuvor beschriebenen individuellen Bedürfnisstrukturen werden von der *subjektiven Werttheorie* zum Gegenstand des Erkenntnisinteresses erhoben. Den theoretischen Annahmen nach ist der Wert eines Gutes bzw. Objektes derjenige, der ihm von einem spezifischen Subjekt zugesprochen wird. Der Wert alternativer Handlungsoptionen wird entsprechend der subjektiven Präferenzordnung und damit von der Psyche des Individuums geprägt. Er ist damit abhängig u.a. von der Sozialisation, dem Erfahrungshintergrund sowie den Fähig- und Fertigkeiten des bewertenden Subjektes. Entsprechend kritisch illustriert Engels die Implikationen einer subjektiven Werttheorie für die Praxis:

„Für Vertreter der subjektiven Werttheorie kann es z.B. eine Betriebswirtschaftslehre nicht geben, die Entscheidung des Unternehmers wäre vollkommen willkürlich, Richtlinien oder Beurteilungsmaßstäbe wären nicht möglich, weil jede Entscheidung eine Frage des persönlichen Geschmacks wäre“ (Engels 1962).

Wenngleich auch aus persönlichkeitspsychologischer oder wissenssoziologischer Perspektive die Anzahl der Bewertungsgrundlagen und damit der Bewertungen nicht unendlich ist (vgl. Müller 2017 Kapitel 3), so gibt es doch mehr als einen Wert für ein Gut bzw. Objekt. Der dem Gut bzw. Objekt subjektiv beigemessene Wert kann zwar methodisch erfasst werden, ist jedoch aufgrund der dazu hohen erforderlichen Komplexität nicht zweckdienlich, um den Wert alternativer Handlungsoptionen innerhalb einer Gemeinschaft zu ermitteln und zu kommunizieren – was letztlich die Weiterentwicklung der Energie- und Klimapolitik einfordert. So kann zusammengefasst werden, dass die subjektive Werttheorie aus psychologischer Sicht hochspannend und relevant ist, allerdings keine Basis

für die Weiterentwicklung des Energieeinsparrechts bietet, da die ermittelten Ergebnisse aufgrund der methodischen Limitationen in der Praxis so gut wie nicht falsifizierbar sind.

Gerundive Werttheorie

Vor dem Hintergrund dieser Kritik hat Engels mit seiner Schrift Betriebswirtschaftliche *Bewertungslehre im Licht der Entscheidungstheorie* in die *gerundive Werttheorie* eingeführt. Die *gerundive Werttheorie* basiert auf der Annahme, Wert sei weder eine Eigenschaft im Sinne der objektiven Werttheorie, noch eine individualpsychologische Angelegenheit, wie der subjektiven Theorie. Stattdessen sei „Wert .. ein Maßstab der Vorziehwürdigkeit“ (Engels 1962 S.12). Die im Sinne einer Bewertung zwischen vorhandenen Handlungsalternativen zu definierende Vorziehwürdigkeit sei allerdings niemals absolut oder uneingeschränkt gültig, sondern immer nur auf einen Zweck oder eine Zielfunktion bezogen (vgl. ebd.). Der Maßstab der Vorziehwürdigkeit könne daher nur intersubjektiv nachvollzogen und somit falsifiziert werden, wenn der Zweck und das Ziel der Bewertung bekannt seien. Dies illustriert Engels anhand des folgenden Beispiels:

„Behauptet der A, daß ein bestimmter Gegenstand 1000 DM, der B, daß er 100 DM wert sei und gehen die Urteile von verschiedenen Motiven und Zwecken aus, so gibt es keine wissenschaftliche Theorie oder Methode, die eine Entscheidung darüber ermöglichte, ob der A oder der B recht hat“ (ebd.).

Zudem löst die gerundive Werttheorie den Wert eines Gutes bzw. Objektes vollkommen von einer subjektiven Präferenzordnung. Stattdessen bestimmen der Zweck, die Zielfunktion und der erreichte/zu erreichende Erfolg den Wert eines Gutes bzw. Objektes bei vorhandenen Handlungsalternativen (vgl. ebd.). Die gerundive Werttheorie schafft damit die Grundlage, dass jeder, der über dieselben Annahmen verfügt, den Wert kalkulieren kann. In diesem Sinne, so konstatiert Engels, sei „der Wert objektiv [, allerdings nicht im Sinne der objektiven Werttheorie, sondern] .. intersubjektiv überprüfbar. Die gerundive Werttheorie lässt deshalb im Gegensatz zum Werts subjektivismus eine Beurteilung von Handlungsweisen zu“ (ebd.). Wert kann in diesem Kontext definiert werden als eine entscheidungslogische, intersubjektive falsifizierbare Größe.

Zwischenfazit

Mit dieser Arbeit soll geklärt werden, welche finanziellen Effekte aus alternativen Fassaden resultieren. Hierfür benötigt man zunächst intersubjektiv nachvollziehbaren Bewertungsprozesse, welche zugleich den Zielsystemen der verschiedenen Stakeholdern Rechnung tragen. Anders kann die Entscheidungssituation für oder gegen eine bestimmte Fassade aus der Sicht eines Eigentümers, Mieters oder auch Selbstnutzers nicht hinreichend genau beschrieben werden. Vor diesem Hintergrund liegt der Vorteil der gerundiven Werttheorie klar auf der Hand: Die Trennung zwischen dem Wert und der Bewertung einer Maßnahme erlaubt es, aus alternativen Fassadensystemen zur Durchsetzung bestehender

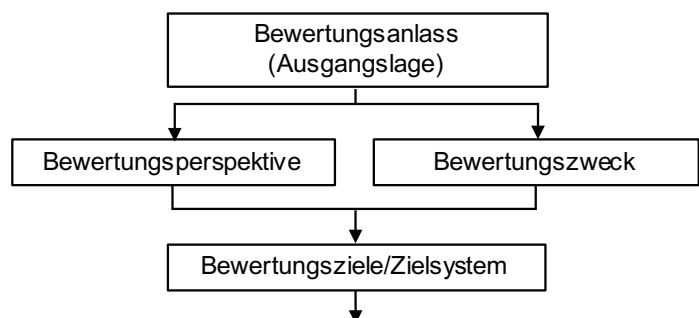
Zielfunktionen rational zu wählen. Damit sind gerundete Werte – anders subjektive oder objektive bezeichnete Werte im Sinne der zuvor dargestellten Werttheorien – gesellschaftlich kommunizierbar, sofern der Bewertungsprozess (u.a. Zwecke, Ziele, Bewertungsgrundlagen, Bewertungsverfahren) in der Kommunikation transparent dargestellt wird (vgl. hierzu auch Brauner 2013). Das Bewertungsergebnis ist demnach aus Sicht eines Akteurs zweckbezogen. Dies heißt, ein anderer Akteur, der die gleiche Perspektive einnimmt, würde unter ansonsten gleichen Rahmenbedingungen zu demselben Ergebnis in der Bewertung kommen. Vor dem Hintergrund der vorherigen Ausführungen zu den verschiedenen Bewertungsanlässen (vgl. Kapitel 2.2 (S.201)) ist an dieser Stelle bereits klar, dass sowohl die Zielfunktion als auch die Voraussetzungen und Ergebnisse alternativer Maßnahmen je nach Bewertungsanlass und Bewertungsperspektive unterschiedlich ausfallen.

Um aus den verschiedenen Bewertungsanlässen die unterschiedlichen Bewertungsansätze (Bewertungsverfahren) transparent und nachvollziehbar ableiten zu können, wird ein systematisiertes Verfahren benötigt. Dieses Verfahren wird nachfolgend dargestellt, bevor im Anschluss hierauf aufbauend die verschiedenen (für die Beantwortung der Fragestellung relevanten) Bewertungsansätze entwickelt werden.

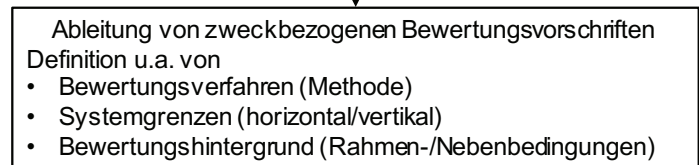
2.5. Modell zur Systematisierung alternativer Bewertungsprozessen

Wie zuvor ausgeführt, zielen die nachfolgenden Analysen darauf ab, die Differenzen zwischen alternativen Bewertungsansätzen herauszuarbeiten. Es bedarf eines systematisierten Verfahrens, um die Ähnlichkeiten und Differenzen strukturiert darstellen zu können. Hierfür eignet sich ein Entscheidungsprozess, der in der Wahl zwischen verschiedenen Handlungsoptionen in der Energie- und Klimapolitik im Gebäudesektor durchlaufen wird (vgl. folgende Abb. 368). Das Verfahren leitet sich zudem aus den Anforderungen der gerundiven, zweckbezogenen Werttheorie (vgl. den methodischen Exkurs zur ökonomischen Werttheorie) ab.

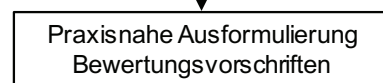
1. Definition der Bewertungsproblems



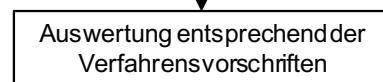
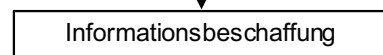
2. Erstellung von Bewertungsvorschriften



3. Zweckorientierte Gestaltung des Bewertungsverfahrens



4. Durchführung der Bewertung alternativer Handlungsoptionen



5. Dokumentation und Diskussion der Ergebnisse alternativer Handlungsoptionen

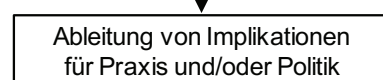
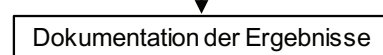


Abb. 369:
Prozess einer Bewertung nach
der als gerundiv bezeichneten
zweckbezogenen Werttheorie
Quelle: Anpassung von Pfnür (2011:
76).

1. Definition des Bewertungsproblems

In einem ersten Bewertungsschritt ist das Bewertungsproblem präzise abzugrenzen. Hierfür wird zunächst der Bewertungsanlass analysiert, um aus diesem sowohl die Perspektive des Bewertungssubjekts als auch den damit verbundenen Bewertungszweck zu definieren. Wie bereits skizziert, sind im Rahmen der Anwendung und Weiterentwicklung der Energie- und Klimapolitik im Gebäudesektor verschiedene Bewertungsanlässe und Bewertungsperspektiven vorhanden, die das jeweilige Bewertungsziel definieren (vgl. Kapitel 4.2 (S.251)). Die Bewertungsperspektive sowie der Bewertungszweck bilden die Grundlage für das problemspezifische Bewertungsziel.

2. Erstellung von Bewertungsvorschriften – als Teil des Bewertungsverfahrens

Anhand der jeweiligen Bewertungsziele ist ein entsprechender Wertbegriff mit zugehörigen Bewertungsvorschriften auszuwählen. Die Ziele dienen in diesem Schritt als zweckbezogener Maßstab für die Bewertung alternativer Handlungsoptionen. Die Bewertungsziele erfordern Bewertungsvorschriften, die beispielsweise regeln, mittels welcher Methoden und Verfahren unter welchen Prämissen und Rahmenbedingungen die gegebenen Handlungsalternativen bewertet werden.

3. Zweckorientierte Gestaltung des Bewertungsverfahrens – als Teil des Bewertungsverfahrens

Sind die Bewertungsvorschriften der Bewertung definiert, ist das entsprechende Bewertungsverfahren praxisnah derart auszugestalten, dass Ergebnisse auch von Seiten Dritter nachvollzogen und verifiziert bzw. falsifiziert werden können.

4. Durchführung der Bewertung – als Teil des Bewertungsverfahrens

Die Durchführung der Bewertung besteht in erster Linie aus der Informationsbeschaffung. In dieser sind alle für das Bewertungsverfahren notwendigen Kosten- und Risikowirkungen, die mit den Handlungsalternativen der Maßnahmen zur Umsetzung der Energie- und Klimapolitik aus dem entsprechenden Bewertungsansatz einhergehen, zunächst zu identifizieren und anschließend in die dem Bewertungsverfahren entsprechende Dimension zu transformieren. Die alternativen Handlungsoptionen werden je Bewertungsanlass selbst von dem zu bestellenden Gutachter zur Bewertung selbst entwickelt oder auch (wie bspw. evtl. im politischen Prozess sinnvoll) vorgegeben.

5. Kommentierung und Diskussion der Ergebnisse – als Teil des Bewertungsverfahrens

Im Zuge der Komplexität verschiedener Bewertungsansätze und Zielsysteme im Kontext der Energie- und Klimapolitik für den Gebäudesektor ist es von großer Bedeutung, dass der Gutachter sein Ergebnis kommentiert, um spätere Missverständnisse auszuschließen. Hierfür sollte der Gutachter mit den Betroffenen

sowie auch mit weiteren Gutachtern/Experten, die mit den Rahmenbedingungen anderer Bewertungsansätze vertraut sind, diskutieren, um seine Bewertung gegebenenfalls korrigieren zu können. Dies kann der Fall sein, weil die in den Verfahrensregeln definierten Eingangsdaten in der Realität vor Ort anders ausfallen (z.B.: Energiebedarf vs. Energieverbrauch) oder auch, weil das Bewertungsergebnis auf die Durchsetzung der Ziele anderer Bewertungsanlässe Einfluss hat (z.B. Renditemaximierung vs. Nutzungskostenminimierung). Aufbauend von den aus verschiedenen Bewertungsperspektiven diskutierten Ergebnissen (der Bewertung der Handlungsalternativen) können dem entsprechenden Bewertungszweck Implikationen für die Praxis oder/und die Politik abgeleitet werden.

Wie die Ausführungen zeigen, ist der dargestellte Ablauf eines gerundeten Bewertungsprozesses prinzipiell darauf ausgelegt die Spezifika eines Bewertungsansatzes darzustellen. Damit ist er auch in der Lage, strukturell die jeweiligen Differenzen unterschiedlicher Bewertungsanlässe vergleichend abbilden zu können.

2.6. Zwischenfazit

Mit dem Kapitel wurde in ökonomische Werttheorien eingeführt, um darzustellen, dass es aus einer ökonomischen Betrachtungsweise unterschiedliche Ansätze zur Entscheidungsfindung gibt. Es konnte gezeigt werden, dass sich insbesondere die gerundive, zweckbezogene Werttheorie für die ökonomische Bewertung alternativer Fassadentypen als sinnvoll erweist. Nach der gerundiven Werttheorie bemisst sich der Wert einer Maßnahme immer im Kontext eines spezifischen Bewertungsansatzes, folgt dabei aber einem geregelten, transparenten Bewertungsprozess, der bei Wiederholung zu dem gleichen Ergebnis führen würde. In Kapitel wurde hierauf aufbauend sowohl herausgearbeitet, wie ein solcher Bewertungsansatz zu strukturieren ist, als auch, dass im Kontext der Energie- und Klimapolitik mehr als ein Bewertungsanlass vorhanden ist, nachdem der Wert einer Maßnahme bemessen werden kann. Dies führt zu der Erkenntnis, dass – je nach Anlass des gewählten Bewertungsansatzes – ein und dieselbe Maßnahme zu unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit führen kann.

Entsprechend ist es für die sachgerechte Einordnung der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse erforderlich, ein Grundverständnis für die verschiedenen Bewertungsanlässe und die hierauf aufbauenden Bewertungsansätze zu generieren. Hierfür werden – aufbauend auf dem in diesem Kapitel vorgestellten Prozessmuster – nachfolgend die alternativen Ansätze zur ökonomischen Bewertung von einzelnen Maßnahmen zur Durchsetzung der Energie- und Klimapolitik im Gebäudesektor hinsichtlich ihrer individuellen Bewertungsziele/-zwecke, der zur Lösung eingesetzten Methoden sowie der Bewertungsvorschriften (Gewinnung von Eingangsdaten respektive Berücksichtigung von vorhandenen Daten in der Ergebnisdiskussion) vergleichend analysiert und damit systematisiert. Die zuvor vorgestellte Struktur des Bewertungsprozesses wird damit nachfolgend herangezogen, um die spezifische Zweckbezogenheit der alternativen Bewertungsansätze aus den jeweiligen Perspektiven herauszuarbeiten. Dabei wird das Ziel verfolgt, diejenigen Differenzen zwischen den verschiedenen Bewertungsansätzen darzustellen, die – wie sich zeigen wird – zu unterschiedlichen Bewertungen gleicher Maßnahmen führen.

3. Diskussion alternativer Bewertungsansätze zur Wirtschaftlichkeitsanalyse bei energetischen Maßnahmen

3.1. Vorbemerkungen

In dem vorausgehenden Kapitel wurde ein Prozessmuster zur Systematisierung alternativer Ansätze zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorgestellt. Ebenfalls wurde dargestellt, dass es unterschiedliche Anlässe zur Bewertung alternativer Handlungsoptionen zur Steigerung der Energieeffizienz/ des Einsatzes von Photovoltaikanlagen gibt. Dabei verfolgt das Kapitel das Ziel herauszuarbeiten, inwieweit die aus den alternativen Bewertungsanlässen resultierenden Bewertungsansätze geeignet sind, Wirtschaftlichkeitsanalysen durchzuführen, welche die Entscheidungssituation immobilienwirtschaftlicher Akteure bestmöglich abzubilden vermögen. Hierfür werden aufbauend auf den Ergebnissen aus dem vorausgehenden Kapitel zunächst die aus den Bewertungsanlässen resultierenden Bewertungsansätze detailliert und methodisch konsistent analysiert, um die Ähnlichkeiten und Unterschiede zu identifizieren. Dies folgt dem Zweck die Grundlagen zu schaffen, um anschließend die Möglichkeiten und Grenzen alternativer Ansätze zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen diskutieren zu können.

3.2. Alternative Bewertungsansätze im Vergleich

3.2.1. Die Bewertungsansätze einer objektbezogenen Bewertung

Aufbauend auf den in Kapitel 2.5 (S.211) dargestellten Strukturrahmen werden im folgenden Abschnitt die Ansätze und die Prozesse einer objektbezogenen Bewertung dargestellt. Grundsätzlich sind zwei gänzlich unterschiedliche Bewertungsansätze unter der objektbezogenen, also einer auf das Gebäude fokussierende Bewertung subsumiert. Einer zielt im Sinne des Energieeinsparungsgesetzes (EnEG) respektive der hierüber legitimierten Energieeinsparverordnung (EnEV) sowie im Sinne des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG) darauf ab, die energetische Qualität des Gebäudes zu bewerten. Das Ziel der Bewertung ist es in diesem Fall, in Referenz zu einem Vergleichsobjekt die ordnungsrechtlichen Auflagen zu unterschreiten oder auch diese zu übertreffen, indem ein besonders energieeffizientes Gebäude geplant und errichtet wird. Der zweite Ansatz richtet sich auf die Wirtschaftlichkeit derselben Maßnahmen. Hierbei ist das Ziel, die Herstellungs- und Nutzungskosten des Gebäudes mit dem Fokus auf den Lebenszyklus zu optimieren. Die beiden Ansätze bauen aufeinander auf, da die Ergebnisse der Bilanzierung energetischer Qualitäten eine Grundlage der Lebenszykluskostenanalyse (LCC) ist. Im Kontext der Fragestellung dieser Arbeit ist es daher sinnvoll, die beiden Bewertungsansätze separat voneinander zu betrachten respektive darzustellen.

I. Objektbezogene (gebäudespezifische) Bewertung der energetischen Qualitäten

Definition des Bewertungsproblems

Die objektbezogene Bewertung verfolgt im Sinne des Energieeinspargesetzes (EnEG) respektive der hierüber legitimierten Energieeinsparverordnung (EnEV) sowie im Sinne des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG)⁵ den Zweck, die energetische Qualität des Gebäudes zu bewerten. Das Ziel der Bewertung ist es die primärenergetisch effizienteste Lösung in Vergleich zu einem normierten Referenzobjekt zu identifizieren und damit die ordnungsrechtlichen Auflagen zu unterschreiten bzw. diese zu übertreffen.

Darüber hinaus liefern Ergebnisse der objektbezogenen Bewertung der energetischen Qualitäten eines Gebäudes auch die Eingangsdaten, die für Wirtschaftlichkeitsanalysen erforderlich sind (vgl. insb. Müller; Pfnür 2017).

Bewertungsverfahren

Die für die Bewertung heranzuziehenden Bewertungsverfahren (Methoden), der Systemgrenzen (horizontal/vertikal) sowie des Bewertungshintergrundes muss in diesem Fall nicht mehr zweckbezogen definiert werden. Sie sind bereits in den geltenden Normen DIN 4108 (DIN 2003a) sowie DIN 4701 (DIN 2003b) bzw. DIN V 18599 (DIN 2011b) definiert, auf die das Ordnungsrecht (EnEG/EnEV sowie EEWärmeG) Bezug nimmt. Grob zusammengefasst wird mit den Normen unter normierten Standardbedingungen

„die Energiemenge [ermittelt], die zur Deckung des Jahresheizenergiebedarfs und des Trinkwasserwärmebedarfs (Bedarf und Aufwand der Anlagentechnik) benötigt wird, unter Berücksichtigung der zusätzlichen Energiemengen, die durch vorgelagerte Prozessketten außerhalb der Systemgrenze ‚Gebäude‘ bei der Gewinnung, Umwandlung und Verteilung der jeweils eingesetzten Brennstoffe entstehen“ (DIN 2003b S.11).

Der gebäudebezogene Jahres-Primärenergiebedarf wird nach der DIN V 18599 auf Basis der Endenergie mit Hilfe durchschnittlicher oder spezifischer Primärenergiefaktoren in Abhängigkeit der eingesetzten Energieträger ermittelt, indem die Endenergie je nach Energieträger mit Faktoren hinsichtlich ihrer primärenergetischen Umweltwirksamkeit bewertet wird (vgl. DIN 2011a).

Hinsichtlich der in den Berechnungsvorschriften berücksichtigten Energiemengen ist festzustellen, dass in der DIN 18599 zwischen *Primärenergie, nicht erneuerbar* und *Primärenergie, gesamt* unterschieden wird. In die Berechnung des Jahres-Primärenergiebedarfs sind nach Anlage 1 in der DIN (2.1.1.) der Norm lediglich „die Werte für den *nicht erneuerbaren*

5 Zum Zeitpunkt der Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens wird auf politischer Ebene bereits das neue Gebäudeenergiegesetz (GEG) diskutiert und in Form gebracht, in welchen das EnEG und das EEWärmeG zusammengeführt werden sollen. Gegenwärtig konnte jedoch noch kein politischer Interessensausgleich gefunden werden, so dass nicht klar ist, wann und in welcher Weise das GEG kommen wird.

Anteil“ in Ansatz zu bringen. Aufgrund dieser Limitation bleiben die Verluste der vor Ort eingesetzten erneuerbaren Energieträger, bestehend aus vorgelagerten Prozessketten, in der Bilanzierung unberücksichtigt. Die zur Berechnung erforderlichen Primärenergiefaktoren sind eine Größe, die von der Politik in Abhängigkeit von dem Energiemix und in Bezug auf die vorgelagerten Verluste im Laufe der Zeit angepasst und in der DIN 18599:1 ausgewiesen werden. Primärenergiefaktoren sind damit nicht statisch, wie beispielsweise die Faktoren zur rechnerischen Ermittlung von Treibhausgasemissionen beim Einsatz bestimmter Energieträger. Auffällig bei den politisch definierten Primärenergiefaktoren ist, dass diese für Heizöl, Gas und Kohle identisch sind, wenngleich sich die Treibhausgasemissionen der genannten Energieträger deutlich unterscheiden. Strom aus erneuerbaren Energien kann von dem berechneten Endenergiebedarf, der in die Berechnung des Jahres-Primärenergiebedarfs eingeht, abgezogen werden, soweit er „im unmittelbaren räumlichen Zusammenhang zu dem Gebäude erzeugt wird“ (§ 5, Abs. (1) 1.) sowie „vorrangig in dem Gebäude unmittelbar nach Erzeugung oder nach vorübergehender Speicherung selbst genutzt und nur die überschüssige Energiemenge in ein öffentliches Netz eingespeist wird“ (§ 5, Abs. (1) 2.). Die anrechenbare Menge des erneuerbar erzeugten Stroms ist seitens der EnEV jedoch höchstens auf die Strommenge begrenzt, „die dem berechneten Strombedarf der jeweiligen Nutzung entspricht“ (§ 5, Abs. (1) Satz 2) (Monatsbilanzverfahren).

Die Bilanzgrenze des Jahres-Primärenergiebedarfs in der EnEV ist das Gebäude, beziehungsweise im Kontext der Anrechenbarkeit erneuerbarer Energien der unmittelbar räumliche Zusammenhang mit dem Gebäude. Vorketten aus der Herstellung der Anlagen oder Netze werden nicht berücksichtigt (vgl. Lützkendorf; Unholzer 2013 S.9). Für die Berechnungen energetischer Qualitäten nach DIN sind diverse Standards und auch Prämissen gesetzt. Dies ist vergleichbar mit dem gegenwärtig stark diskutierten Norm-Fahrzyklus zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs und der Emissionen von PKWs.

Das entsprechende Bewertungsverfahren richtet sich strikt nach den in den DIN definierten Berechnungsverfahren (vgl. DIN 18599). Die Ergebnisse sind damit logisch aufgebaut und verifizierbar bzw. falsifizierbar.

Entsprechend der Vorgaben in der DIN wird in der Informationsbeschaffung auf standardisierte und statistische Daten zurückgegriffen, auf die in den Normen verwiesen wird. Entsprechend der DIN ist das Kernergebnis der Berechnungen der Jahres-Primärenergiebedarf des Gebäudes, welcher auf den zuvor ermittelten Nutzwärme- und Kältebedarfen und dem Endenergiebedarf aufbaut.

In der Praxis zeigt sich, dass die ermittelten Werte zum Teil von realen Messgrößen im Betrieb abweichen. Zurückzuführen ist dies u.a. darauf, dass die in den Verfahrensregeln definierten Eingangsdaten in der Realität vor Ort anders ausfallen (Nutzlasten, Klimadaten, etc.). Entsprechend weicht das Ergebnis, definiert bspw. als Energiebedarf, vom tatsächlichen

Energieverbrauch ab. Entsprechend simulieren einzelne Planer die Gebäude mit individuellen, spezifischen Ansätzen und Eingangsdaten, um das rechnerische Ergebnis hinsichtlich der tatsächlich zu erwartenden Energieströme zu optimieren.

II. Objektbezogene Bewertung der Lebenszykluskosten

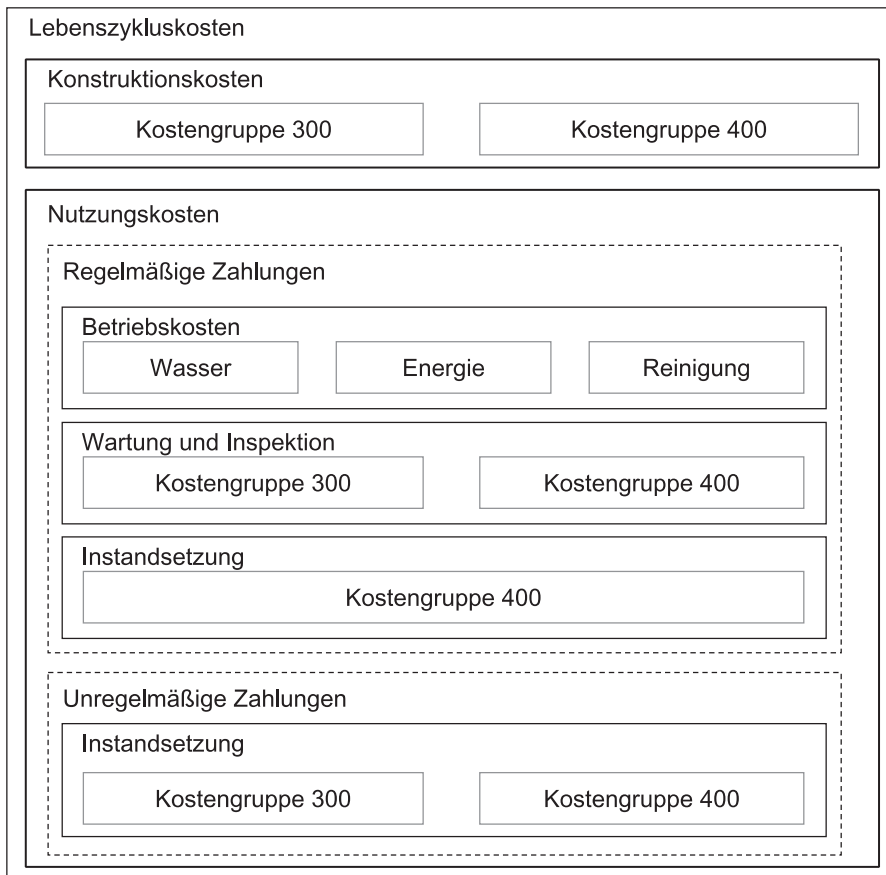
Das zweite auf das Erkenntnisobjekt ‚Gebäude‘ gerichtete Bewertungsverfahren ist die gebäudespezifische Lebenszykluskostenbetrachtung.

Definition des Bewertungsproblems

Die Lebenszykluskostenanalyse (LCC) verfolgen den Zweck, die mit der Erstellung und dem Betrieb einhergehenden Kostenstrukturen transparent aufzuzeigen. Damit wird das Ziel verfolgt, verschiedene Gebäudetypen und/respektive Gebäudetechnologien in den auf den Lebenszyklus bezogenen Kostenstrukturen vergleichbar zu machen, Optimierungspotentiale (hinsichtlich der Verknüpfung von Anfangskosten und Folgekosten) zu identifizieren und damit eine Investitionsentscheidung zu ermöglichen. Darüber hinaus wird mit einer LCC der Zweck verfolgt, im Sinne der Nachhaltigkeitsbewertung das Gebäude bzw. die spezifische Lösung für das Gebäude und die Gebäudetechnik gemeinsam ökonomisch zu bewerten.

Bewertungsverfahren

Dem Bewertungszweck folgend konzentriert sich die LCC in der Praxis auf ausgewählte gebäudebezogene Kostengruppen. Hierzu zählen Herstellungs- wie Nutzungskosten. Zu den ausgewählten Herstellungskosten nach DIN 276 gehören in der Bewertungspraxis des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) die Kostengruppen (KG) 300, KG 400 (ausgenommen die KG 470), KG 530 (teilweise), KG 540, KG 550 (teilweise), KG 570 (teilweise) (vgl. BMUB, 2015: A1). Zu den ausgewählten Nutzungskosten nach DIN 18960 (Nutzungskosten im Hochbau) werden in den Berechnungen die KG 311: Versorgung- Wasser, die KG 312- 316: Versorgung- Öl, Gas, feste Brennstoffe, Fernwärme, Strom, die KG 321: Entsorgung- Abwasser, die KG 331, 332 und 333: Unterhalts-, Glas- und Fassadenreinigung, die KG 352: Inspektion und Wartung der Baukonstruktion, die KG 353: Inspektion und Wartung der TGA, die KG 410: Instandsetzung der Baukonstruktion sowie die KG 420: Instandsetzung der TGA berücksichtigt (vgl. ebd.: A2). Zu den ausgewählten Kosten gehören damit explizit keine Mietkosten oder auch Finanzierungskosten (vgl. hierzu Abb. 370).

**Abb. 370:**

Lebenszykluskostenanalyse - ausgewählte Kostenstrukturen
 Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Zimmermann (2012, S. 17).

Die nach Benchmarks zu ermittelnden Kosten werden über den Betrachtungszeitraum bzw. Lebenszyklus periodengerecht und damit für den Zeitpunkt ihres Auftretens berechnet und in der Regel in einer Excel-Tabelle abgebildet. Die für die Instandsetzung angesetzten Kosten richten sich dabei nach den spezifischen Lebenszyklen der einzelnen Bauteile/Baustoffe/technischen Anlagen. Aufbauend auf den Daten wird in der Regel der Barwert der verschiedenen Alternativen ermittelt (vgl. BMUB 2015) und ggf. auf die Bruttogeschossfläche bezogen.

Das entsprechende Bewertungsverfahren ist damit konkret zweckorientiert ausgestaltet, logisch aufgebaut und allgemein bewertbar. Das BMUB stellt für die formalisierte Bewertung entsprechende Berechnungstools zur Verfügung, sodass die Berechnungen auch von Dritten problemlos nachvollzogen werden können. In der Informationsbeschaffung kann auf Kostendatenbanken zurückgegriffen werden. Allerdings ist die Datenquelle nicht explizit geregelt, sodass der Gutachter zweckorientiert sinnvolle Daten auswählen muss. Die LCC zu den ausgewählten Herstellungs- und Nutzungskosten sind hinsichtlich der verschiedenen Varianten und der damit verbundenen Optimierungsmöglichkeiten für den spezifischen Fall zu beschreiben. In den Berechnungen ist diejenige Variante ökonomisch optimal, welche den geringsten Barwert aufweist.

Zwischenfazit

Die energetische Bewertung nach DIN 18599 verfolgt ebenso wie die ökonomische Bewertung mittels LCC den Zweck, auf der Ebene des Gebäudes/Objektes eine Grundlage zu schaffen, nach der eine optimale Konfiguration von Gebäude und Anlagentechnik aus alternativen Varianten unter standardisierten Bedingungen ausgewählt werden kann. Im Folgenden ist entsprechend der Zielsetzung dieser Arbeit zu klären, inwieweit damit die Entscheidungssituation der handelnden Akteure abgebildet, also eine fundierte und zugleich zweckbezogene Grundlage für eine Investitionsentscheidung generiert werden kann. Hierfür werden zunächst die Perspektiven immobilienwirtschaftlicher Akteure beschrieben, um hierauf aufbauend als Basis für einen Vergleich ebenfalls zweckorientierte Bewertungsansätze zu formulieren.

3.2.2. Die Bewertungsansätze immobilienwirtschaftlicher Akteure

Die zentrale Verantwortung und Umsetzung der Strategien zur Energie respektive Wärmewende im Gebäudesektor in Deutschland obliegt den immobilienwirtschaftlichen Akteuren. Das sind zunächst die selbstnutzenden Eigentümer und die Produzenten von Gebäuden und Immobiliendienstleister sowie im Fall vermieteten Flächen die Mieter und Vermieter (vgl. Pfnür 2011 S.24). Immobilien sind maßgebliche Vermögensbestandteile sowie Kostenfaktoren für Non-Property-Unternehmen und Umsatzbringer für die Immobilienwirtschaft. Deshalb verfolgen alle diese für den Erfolg der Wärmewende maßgeblichen Stakeholdergruppen vitale Partikularinteressen. Diese Partikularinteressen sind in Deutschland juristisch traditionell stark abgesichert durch ein umfangreiches Immobilienrecht, in dem neben den Rechten und Pflichten des Immobilieneigentums insbesondere auch die Planung, die Errichtung, der Betrieb, die Nutzung und Verwertung von Immobilien geregelt sind. Darüber hinaus sind die immobilienwirtschaftlichen Stakeholder durch ihre jeweilige Leistungsfähigkeit in ihren individuellen Beiträgen zur Wärmewende zum Teil stark eingeschränkt (vgl. bspw. für den Wohngebäudebereich Pfnür; Müller 2013). Die Umsetzung der Klimaschutzstrategien blieb in der Vergangenheit deutlich hinter den ursprünglichen Planungen zurück. Das Energiekonzept der Bundesregierung weist darauf hin, dass es mit einem „weiter so“ nicht getan sein dürfte (vgl. Die Bundesregierung 2010 S.5). Es ist davon auszugehen, dass dieser mangelnde Erfolg in der Umsetzung maßgeblich darauf zurückzuführen ist, dass die Perspektiven der immobilienwirtschaftlichen Akteure auf die Wärmewende bislang nicht ausreichend genau und umfangreich in den Umsetzungsstrategien und deren rechtlichen Umsetzungen berücksichtigt worden sind (vgl. hierzu auch ebd. 2010 S.22). Nachfolgend werden die aktuelle Strategie der Wärmewende und ihre rechtliche Umsetzung deshalb nach den drei Sub-Perspektiven getrennt dargestellt und analysiert.

I. Die Perspektive des Eigentümers

Die Eigentümer gehören zu den wichtigsten Stakeholdern der Wärmewende. Als Bauherren haben sie entscheidenden Einfluss auf die energetischen Gebäudestandards. Insbesondere steht es ihnen frei, rechtlich geforderte Mindeststandards zu übertreffen oder Zielvorgaben, die an zeitliche Deadlines im politischen Prozess geknüpft sind, bereits früher zu erfüllen, beziehungsweise alternativ die politisch anvisierten Maßnahmen auszusetzen, indem sie Investitionsmaßnahmen im Gebäudesektor unterlassen.

Eigentümer unterscheiden sich in Selbstnutzer und Vermieter. Grundsätzlich bewerten die Gebäudeeigentümer die Vorteilhaftigkeit energetischer Standards oder Investitionen anhand einer monetären Bewertung in Form einer Investitionsrechnung. Insbesondere im Falle von Selbstnutzern tritt allerdings oft auch ein nicht-monetärer Zusatznutzen zum Beispiel in Form eines steigenden Sozialprestiges durch die Anschaffung einer besonders umweltschonenden Immobilie auf, der durchaus entscheidungsrelevanten Einfluss haben kann. Ebenso können umweltschonende Gebäudeausführungen die Aufenthaltsqualität positiv wie in Einzelfällen bei unsachgemäßer Ausführung oder Nutzung auch negativ beeinflussen. Nachfolgend stehen allerdings die monetären Bewertungseffekte im Vordergrund der Betrachtung.

Definition des Bewertungsproblems

Aus einer ökonomischen Perspektive betrachtet sind Eigentümer bestrebt, das von ihnen in Immobilien investierte Kapital zu maximieren. Der Anlass einer Bewertung aus Eigentümersicht ergibt sich daher im immobilienwirtschaftlichen Sinne aus der Fragestellung, mit welchen finanziellen und nicht-monetären Nutzeneffekten verschiedene energetische Qualitäten und Maßnahmen bei Neubauten oder Sanierungen einhergehen. Der Anlass ist damit primär ökonomischer Natur und richtet sich perspektivisch auf alternative Handlungsoptionen. Die Bewertung wird durchgeführt, um die nach dem Anforderungsrecht geforderten Maßnahmen der Energie- und Klimapolitik hinsichtlich ihrer finanziellen Effekte abzubilden und damit die wirtschaftlich vorteilhafteste Maßnahme für den selbstnutzenden Eigentümer/Vermieter zu identifizieren.

Bewertungsverfahren

Aus dem Ziel, die wirtschaftlich vorteilhafteste Variante aus der Perspektive des Eigentümers/Investors zu identifizieren, leiten sich die Kriterien ab, welchen das Bewertungsverfahren genügen muss. Vor dem Hintergrund, dass Handlungsalternativen zu bewerten sind, die aufgrund der hohen Investitionssummen und der langen Projektlaufzeiten zum Teil erhebliche Risiken für den Investor bergen, ist dies insbesondere eine hinreichend genaue Abbildung der Realität.⁶ Als Bewertungsverfahren

6 Der Gesetzgeber war bei der Einführung des EnEG bestrebt, „Anforderungen ... so zu bemessen, daß sie in ihrer Gesamtheit zu wirtschaftlich optimalen Lösungen führen“ : 8. In der Gesamtheit können wirtschaftlich optimalen Lösung nur dann sein, wenn sie die Entscheidungssituation des Eigentümers vollständig abbilden. Vgl. hierzu auch die in Anhang 1 dargestellten Rahmenbedingungen sowie zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Neubau sowie für den Fall energetischer Sanierungen.

dienen Methoden der dynamischen Investitionsrechnung. In der Praxis hat sich das Verfahren der Vollständigen Finanzplanung durchgesetzt, bei dem alle Nutzen und Kostenwirkungen energetischer Investitionen in eine Immobilie monetär bewertet und periodengenau erfasst werden (vgl. zur Diskussion selbiger bspw. Pfnür; Müller 2013 insb. Müller; Pfnür 2016 sowie Kapitel 3.3 (S.228) und Kapitel 3.4 (S.239) der vorliegenden Arbeit). Auf Basis dieser vollständigen Finanzplanung lassen sich zahlreiche Kennzahlen, wie beispielsweise die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate des eingesetzten Kapitals (Eigenkapitalrendite) oder die Periodenliquidität als Maßstab der jederzeitigen Finanzierungsfähigkeit der Investition berechnen.

Für die investitionsrechnerischen Analysen reicht es nicht aus, lediglich den Erstellungsprozess einer Immobilie zu betrachten. Stattdessen sind in der subjektiven Bewertung aus der Perspektive eines Eigentümers alle der mit dem Investitionsprojekt einhergehenden Zahlungsströme vom Kauf bis zum Verkauf zu berücksichtigen (horizontale und vertikale Systemgrenze⁷). Den Bewertungshintergrund bilden alle Rahmenbedingungen, die prinzipiell die Wirtschaftlichkeit der Handlungsalternativen/der alternativen Investitionsprojekte beeinflussen. Aus ökonomischer Perspektive zählen hierzu insbesondere die Investitionskosten (bei der Sanierung unter anderem abhängig von dem baulichen Zustand des Gebäudes), die Höhe der Fremdkapitalkosten, die Schadensanfälligkeit baulicher sowie die Fehleranfälligkeit technischer Lösungen.

Zudem gibt es im Falle von vermieteten Gebäuden eine direkte Verbindung zwischen der Bewertung alternativer Handlungsoptionen aus der Perspektive des Eigentümers und der des Mieters. Wenn die Entscheidungssituation der Akteure realitätsnah abgebildet werden soll, können die beiden Perspektiven entsprechend nicht losgelöst voneinander betrachtet werden. Der Bewertungshintergrund zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit alternativer Handlungsoptionen auf Eigentümerseite wird ferner von den Möglichkeiten und Grenzen geprägt, die zur Refinanzierung des Investments erforderlichen Mieten/Verkaufspreise in ausreichendem Maße durchzusetzen. In diesem Zusammenhang sind insbesondere miet- und steuerrechtliche Aspekte in der Bewertung zu berücksichtigen, ebenso wie die Aufnahmefähigkeit des Marktes, die regional sehr stark differenziert ist.

In diesem Zusammenhang erscheint für das konzeptionelle Verständnis der vorliegenden Arbeit ein Exkurs zu den Determinanten der Wirtschaftlichkeit aus Eigentümersicht sinnvoll. Hierzu sei ausgeführt:

- Wie Analysen zu den finanziellen Effekten alternativer energetischer Standards aus Eigentümerperspektive zeigen, wird die Wirtschaftlichkeit vor Ort, neben dem Zinsniveau oder den Baukosten, im vermieteten Bereich insbesondere durch die Umlagefähigkeit bzw. Aufnahmefähigkeit von Investitionskosten am Markt

determiniert. Die Aufnahmefähigkeit des Marktes richtet sich nach der Fähigkeit zur Zahlung der mit der Nutzung verbundenen Kosten sowie nach der Zahlungsbereitschaft für bestimmte Qualitäten der angebotenen Fläche. Die nutzerseitigen Kosten setzen sich zusammen aus den Netto-Kaltmieten, den kalten sowie warmen Betriebskosten, sowie in dem vorliegenden Fall aus der Übernahme der Wartungskosten.

- Die Netto-Kaltmiete leitet der Eigentümer – vereinfacht dargestellt – aus der Höhe der Investitionskosten, der Höhe des eingesetzten Eigenkapitals und der von ihm anvisierten Zielrendite ab.
- Die warmen Betriebskosten auf Nutzerseite leiten sich aus der für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser aufgewendeten Energie(träger)mengen ab, die beim Versorger bezogen werden müssen (Endenergie). Die Höhe der warmen Betriebskosten wird dabei sowohl von der Nutzungsweise des Gebäudes als auch von der Energieeffizienz des Gebäudes und der Anlagentechnik sowie dem eingesetzten Energieträger bzw. der Energieversorgung bestimmt. Sie ermittelt sich aus dem Endenergieverbrauch multipliziert mit dem Energie(träger)einheitspreis. Die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit von bestimmten Maßnahmen für sowohl Eigentümer als auch Nutzer steht damit direkt in Verbindung mit der Summe der gesamten mit der Nutzung der Fläche einhergehenden Kosten.

II. Die Perspektive des Nutzers

Definition des Bewertungsproblems

Für Nutzer stellt sich regelmäßig die Frage, wie sich die spezifischen Maßnahmen am Gebäude auf die Summe der Nutzungskosten auswirken. Inzwischen kann selbst *political correct* konstatiert werden, dass grundsätzlich die Bezahlbarkeit alternativer Optionen zur Energieeinsparung, zum Klimaschutz und zur Umsetzung der Energiewende im Gebäudesektor als zentraler Engpass anzusehen ist. Vice versa zur oben dargestellten Situation des Vermieters muss der Mieter in seinem Kalkül zwischen alternativen Angeboten und den damit verbundenen Kostenstrukturen abwägen.

Bewertungsverfahren

Die Verfahrensvorschrift muss auch in diesem Fall der Anforderung genügen, die relevanten Kostenstrukturen der Betrachtungsperspektive realistisch abbilden zu können. Hierfür eignet sich, wie bereits bei den Eigentümern, das Verfahren der Vollständigen Finanzpläne (vgl. Pfnür; Müller 2013; Müller; Pfnür 2016; Kapitel 3.4), in der alle durch die energetische Qualität des Gebäudes bedingten Mehrkosten und die daraus resultierenden quantifizierbaren Nutzen periodengerecht aufgestellt werden. Auf der Basis der Finanzpläne lässt sich insbesondere die Veränderung der Nutzungskosten gegenüber einem zuvor definierten Status quo errechnen und einem möglichen qualitativen Nutzen gegenüberstellen. Der Nutzer

berücksichtigt in der zweckbezogenen Bewertung lediglich die eigene Nutzungsphase (in der Regel nur ein Teil der Nutzungsphase im Lebenszyklus des Gebäudes) und begrenzt die Bewertung auf eine Nutzungseinheit (bei Bürogebäuden mit mehr als einer Nutzungseinheit damit nur einen Teil eines Gebäudes). Die Systemgrenze ist damit anders gefasst, als es bei einer objektbezogenen Bewertung oder auch einer subjektbezogenen Bewertung aus Eigentümersicht der Fall wäre. Der Hintergrund des nutzerspezifischen Bewertungsansatzes besteht insbesondere aus den die Nutzungskosten beeinflussenden Aspekten. Zu letzteren zählen neben der erforderlichen Nettomiete zur Refinanzierung des Investments auf Eigentümerseite, den baulichen und energetischen Voraussetzungen, die Fehleranfälligkeit der technischen sowie die Schadensanfälligkeit der baulichen und/oder technischen Lösung. Hinsichtlich der in der Energie- und Klimapolitik relevant gemachten Indikatoren spielt hier ebenfalls nur der Endenergiebedarf eine handlungsleitende Rolle, da sich hieraus die warmen Betriebskosten ableiten.⁸

Hinsichtlich der nutzerspezifischen Bewertung ist darauf zu verweisen, dass die nutzerseitige Bezahlbarkeit und/oder Zahlungsbereitschaft energetischer Maßnahmen auch im Nicht-Wohngebäudebereich ein maßgeblicher Engpass in der Durchsetzung der energie- und klimapolitischen Ziele für den Gebäudesektor ist. Um die finanziellen Effekte primärenergetisch optimierter und solaraktivierter Bauteile ermitteln zu können, sind Informationen zu den Nutzungskosten entscheidend. Hierzu zählen neben den Netto-Kaltmieten und den kalten Betriebskosten insbesondere Kosten für die Erzeugung von Wärme und ‚Kälte‘, also Informationen zu dem Endenergiebedarf des Gebäudes. An dieser Stelle wird offensichtlich, dass ein Eingangsdatum der nutzerspezifischen Bewertung das Ergebnis der objektbezogenen Bewertung ist, da der Nutzer in seiner Bewertung auf Kennwerte zum Energieverbrauch angewiesen ist. Fallen diese Kennwerte jedoch nicht realitätsgetreu aus, verzerrt dies nicht nur die nutzerspezifische Bewertung alternativer Handlungsoptionen zur Energieeinsparung oder zur Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien, sondern, in Folge, auch die gesamtwirtschaftlich-umweltpolitische Bewertung (vgl. hierzu Müller; Pfnür 2017), welche sich im Idealfall auch an den Ergebnissen aus den akteursbezogenen Bewertungen ausrichtet.

8 Wenngleich anzumerken ist, dass sich die konkreten Kosten bei vergleichbaren energetischen Standards je nach Nutzungsweise (auch Wissen und Kompetenz im Umgang energieeffizienten Gebäuden und den eingesetzten Techniken) und der Art des eingesetzten Energieträgers stark unterscheiden können.

III. Weitere Perspektiven

Neben dem objektspezifischen Bewertungsansatz und dem von Eigentümern und Nutzern gibt es weitere Perspektiven und damit Bewertungsansätze (vgl. Kapitel 2.2 (S.201)): Die Perspektive der Produzenten, der Gesamtwirtschaft und die politische Perspektive zur Bewertung alternativer Handlungsoptionen aus der strategischen Sicht der Energiewende (vgl. zu den alternativen Bewertungsansätzen insb. Müller; Pfnür 2017). Diese Perspektiven stehen jedoch nicht im Mittelpunkt des Erkenntnisinteresses der vorliegenden Arbeit. Für die Ableitung von politischen Handlungsempfehlungen, die sowohl sektorenübergreifend auf die Durchsetzung der Energiewende abzielen, als auch umweltökonomisch effizient sein sollen, sind diese Perspektiven ebenfalls entscheidend (vgl. ebd.).

3.2.3. Zwischenfazit zu den alternativen Bewertungsansätzen

Die vorausgehenden Ausführungen machen deutlich, dass im Kontext der Frage, ob und inwieweit bestimmte Gebäudekonfigurationen zur Umsetzung energie- und klimapolitischer Ziele wirtschaftlich sind, stark davon abhängt, welcher Bewertungsansatz zum Tragen kommt. Je nach Bewertungsansatz wird implizit eine andere Fragestellung erörtert, dessen Ergebnis nicht allgemeingültig ist. Dies ist insbesondere dadurch begründet, dass in einem jeden der zuvor aufgeführten Bewertungsansätze – dem jeweiligen Bewertungszweck folgend – andere Bewertungsverfahren, Berechnungsprämissen und Eingangsdaten zur Anwendung kommen. Die Ergebnisse der alternativen Bewertungsansätze geben entsprechend eine Antwort auf eine spezifische Fragestellung, die keine Allgemeingültigkeit zulässt. Der Begriff der Wirtschaftlichkeit oder gar Effizienz lässt sich nicht von einem Bewertungsansatz auf einen anderen übertragen, sondern muss im individuellen Fall neu analysiert werden (vgl. hierzu ausführlich auch Müller; Pfnür 2017). Konkret kann konstatiert werden, dass eine Lebenszykluskostenanalyse nicht unbedingt einen Rückschluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme, auf die Entscheidungssituation eines Vermieters oder Nutzers zulassen muss, gleiches gilt umgekehrt. Entsprechend haben die alternativen Bewertungsansätze jeweils für sich betrachtet ihre Berechtigung, wenn sie ihrem Zweck folgend trennscharf voneinander abgegrenzt werden (vgl. folgende Tab. 7).

Bei den gebäudebezogenen Maßnahmen gilt es verstärkt, politische Lösungen zu wählen, welche auch im sektorenübergreifenden Vergleich aus einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung sowie aus strategischer Sicht der Energiewende heraus effizient sind. Diese Perspektiven sind für die Beantwortung der Fragestellung nicht relevant und werden daher an dieser Stelle nicht weiterverfolgt. Da sie jedoch für die Entwicklung langfristig erfolgreicher Strategien zur Durchsetzung der Energie- und Klimapolitik entscheidend sind, werde die Bewertungsansätze dieser Perspektiven in der nachfolgenden Tabelle vollständigkeitshalber in grau dargestellt.

	Objekt	Eigentümer	Nutzer
Bewertungsproblem			
Zweck	Ökologisch – Nachweis des energetischen Standards in Bezug zu EnEV/EEWärmeG.	Ökonomisch – Evaluation finanzieller Effekte alternativer Maßnahmen.	Ökonomisch – Evaluation der Kosten des Wohnens.
Ziel	Primärenergetisch effiziente Lösung zu identifizieren. (Wirtschaftlichkeit nach LCC.)	Wirtschaftlich effiziente Lösungen zu identifizieren.	Wirtschaftlich effiziente Lösungen zu identifizieren.
Bewertungsvorschriften			
Methode	Energetische Bilanzierung nach DIN 18599 bzw. DIN 4701/ 4108; Fokus: nicht energetische Anteil PE.	Wirtschaftlichkeitsanalysen (idealerweise mittels Vollständiger Finanzplanung).	Finanzplan.
Systemgrenze horizontal	Gebäude.	Gebäude (+ Mobilität, Energiegewinnung).	Nutzungseinheit (+ Mieterstrom Gebäude).
Systemgrenze vertikal	Nutzungsphase.	Bau- und Nutzungsphase, ggf. gebäudeübergreifend.	Individuelle Nutzungsphase.
Bewertungshintergrund	Generalisierende Eingangsdaten zur energetischen Bilanzierung sowie politisch festgelegte Primärenergie-Faktoren.	Gestehungs- und Fremdkapitalkosten, rechtl. Anforderungen, Aufnahme-fähigkeit des Marktes für erforderliche Umlagen.* ←→	Summe der Nutzungskosten (Kaltmiete, kalte- und warme Nebenkosten).*
Bewertungsergebnis	Technisch optimale Lösungen unter „Laborbedingungen“.	Wirtschaftlich optimale Lösungen für den spez. Fall vor Ort.	Wirtschaftlich optimale Lösungen am Wohnort.
Prämisse	Wirtschaftlichkeitsgebot der objektspezifischen Bewertung.	Bezahlbar- und Wirtschaftlichkeit (im Vergleich zu alternativen Anlageprodukten).	Aufnahmefähigkeit des Marktes, Zahlungsbereitschaft des Nutzers, strategischer Nutzen für das Unternehmen.

Tab. 7:

Differenzen zwischen verschiedenen Bewertungsansätzen in der Energie- und Klimapolitik
 Quelle: vgl. Müller; Pfnür (2017), angepasste Version für Bürogebäude. *) Reale Eingangsdaten, starke Differenzen aufgrund spezifischer Rahmenbedingungen vor Ort möglich.

Produzent	Gesamtwirtschaft	Energiewende
Ökonomisch – Analyse finanzieller Effekte auf Unternehmung.	Vermeidung von negativen Umweltwirkungen (Treibhausgasemissionen)	Umsetzung der Energiewende
Minimierung unternehmensbezogener Kostenstrukturen, Maximierung leistungsbez. Ertragsstrukturen.	Kosteneffiziente Lösungen zu identifizieren.	Wirtschaftlich effiziente Lösungen im politischen Prozess zu identifizieren.
Shareholder Value.	Vermeidungskosten-effizienz.	Wirtschaftlichkeitsanalysen (idealerweise mittels Vollständiger Finanzplanung).
Abhängig von der unternehmerischen Leistung, i.d.R. nur ein Teilbereich der Immobilie.	BRD (alle Sektoren).	BRD (Verknüpfung der Sektoren).
	Alle Phasen im Lebenszyklus.	Bau- und Nutzungsphase.
Reale Kostenstrukturen einschl. Schulungen, Haftungsrisiko, etc., rechtl. Anforderungen, Marktnachfrage.*	Reale Vermeidungskosten, tatsächliche finanzielle Effekte bei den Stakeholdern auf Projektebene vor Ort.*	Gestehungs- und Fremdkapitalkosten, rechtl. Anforderungen, Aufnahme-fähigkeit des Marktes für erforderliche Umlagen.*
Wirtschaftlich optimale Lösungen für die Unternehmung.	Sektorübergreifend: Vermeidungskosten möglicher Maßnahmen (Grundlage effizienter Steuerung).	Wirtschaftlich optimale Lösungen im politischen Prozess.
Geschäftsmodell und Arbeitsplätze bleiben erhalten.	Kosteneffizienz, Treffsicherheit, soziale und wirtschaftspolitische Vertretbarkeit und Durchsetzbarkeit.	Kosteneffizienz, Treffsicherheit, soziale und wirtschaftspolitische Vertretbarkeit und Durchsetzbarkeit.

3.3. Möglichkeiten und Grenzen alternativer Methoden der Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel die finanziellen Effekte des Einsatzes solaraktiver Fassaden auf Eigentümer und Nutzer zu analysieren. Zur sachgerechten Analyse solcher Effekte werden in der Regel investitionsrechnerische Methoden herangezogen. Aufgrund unterschiedlicher Ziele und Anwendungsbereiche von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gibt es jedoch eine Fülle verschiedener Methoden, die sich entsprechend der angestrebten Komplexitätsreduktion der Entscheidungssituation sowohl in ihrem Vorgehen, den erzielten Ergebnissen und auch der Interpretation selbiger erheblich unterscheiden. Aufgrund der Vielzahl der in der Bau- und Immobilienwirtschaft herangezogenen Methoden zur Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, scheint es zunächst sinnvoll, dem ökonomisch nicht so sehr versierten Leser die verschiedenen Methoden näher zubringen. Damit wird der Zweck verfolgt, jedem Leser die Möglichkeit zu bieten, das in der vorliegenden Arbeit gewählte methodische Vorgehen einzuordnen, die vollzogenen Rechenschritte zu verfolgen und die Ergebnisse in ihren Auswirkungen sowohl eigenständig als auch im Vergleich zu in anderen Studien angewendeten Methoden interpretieren zu können. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass es sich bei Investitionen in den Büroneubau um langfristige Investitionen mit vergleichsweise hohen Investitionssummen handelt, scheint die Abwägung verschiedener Methoden in der Diskussion um die Wirtschaftlichkeit alternativer energetischer Standards dringend erforderlich.

Grundsätzlich lassen sich investitionsrechnerische Verfahren in statische und dynamische Verfahren unterscheiden, die sich in ihrem methodischen Vorgehen strikt voneinander begrenzen lassen: *„Die statischen Verfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass sie die Unterschiede des zeitlichen Anfalls der jeweiligen Rechnungsgrößen nicht berücksichtigen und damit auf eine Ab- oder Aufzinsung verzichten. Da für alle Perioden die gleichen Werte angenommen werden, liegt den Rechnungen in der Regel lediglich eine Periode zugrunde. Dies bedeutet, dass man sich mit Durchschnittswerten zufriedengeben muss. Es handelt sich somit um relativ einfache Rechnungen, welche sich aus den Informationen des betrieblichen Rechnungswesens ableiten lassen. Sie finden – gerade wegen ihrer Einfachheit und Übersichtlichkeit – in der Praxis häufig Anwendung. Die dynamischen Verfahren zeichnen sich demgegenüber dadurch aus, dass sie versuchen, die Zahlungsströme über die gesamte Nutzungsdauer zu erfassen. Dies hat zur Folge, dass an die Stelle von Kosten- und Nutzengrößen Einzahlungen und Auszahlungen treten und damit bestimmte Notwendigkeiten der buchhalterischen Abgrenzung (z.B. bei Abschreibungen) entfallen. Die Vergleichbarkeit von zeitlich unterschiedlich anfallenden Einzahlungs- und Auszahlungsströme wird dadurch erreicht, dass diese auf einen bestimmten Zeitpunkt abgezinst werden“ (Thommen; Achleitner 2012 S.667f).*

Bei den statischen Methoden handelt es sich damit um radikale Vereinfachungen der Realität respektive Entscheidungssituation eines Investors, wohingegen mittels der dynamischen Methoden der Versuch gewagt wird, die Realität möglichst präzise abzubilden. Darüber hinaus lassen sich die dynamischen Methoden weiter in formelbasierte Methoden differenzieren, die mit einem einheitlichen Kalkulationszinssatz rechnen, und tabellenbasierten Verfahren, bei denen mit unterschiedlichen Zinssätzen für die Anlage und Aufnahme finanzieller Mittel gerechnet werden kann. (vgl. folgende Abb. 370)

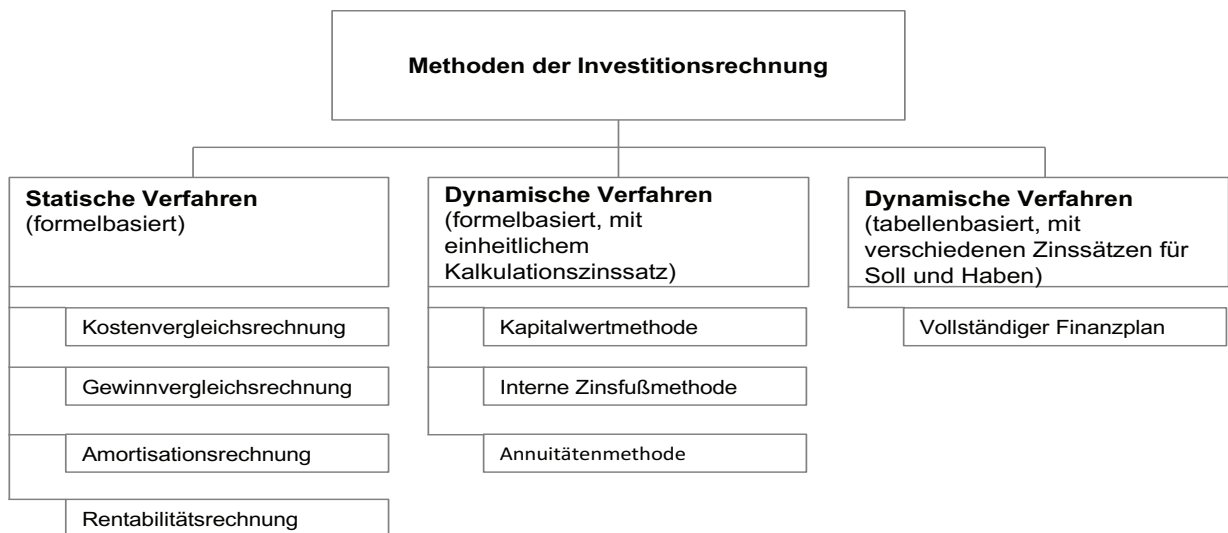


Abb. 371:
Übersicht über Methoden der
Investitionsrechnung in der Bau- und
Immobilienwirtschaft
Quelle: Eigene Darstellung in
Anlehnung an Thommen/Achleitner
(2012).

Die methodischen Unterschiede der verschiedenen Verfahren und deren Effekte auf die evozierten Ergebnisse werden deutlich, wenn die verschiedenen Verfahren (vgl. Abb. 365 (S.202)) nachfolgend näher betrachtet werden.⁹ Das folgende Abschnitt skizziert und diskutiert dafür zunächst die statischen Verfahren. Anschließend werden die klassischen, formelbasierten Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung vorgestellt und hinsichtlich des in dieser Arbeit gegebenen Anwendungsfalls bewertet, bevor hierauf aufbauend in die Methode der Vollständigen Finanzplanung eingeführt wird.

9 Vgl. zu dem folgenden Abschnitt insb. Thommen/Achleitner (2012: 667 ff.). Rechnerische Grundlagen sind u.a. gut aufbereitet bei : 9 ff., ff., : 31 ff.

Statische Verfahren

Kostenvergleichsrechnung

Bei der Kostenvergleichsrechnung werden die Kosten alternativer Investitionsprojekte ermittelt und gegenübergestellt. Die Kostengröße stellt dabei das Kriterium für die Vorteilhaftigkeit einer Investition. Daher ist im Sinne der Kostenvergleichsrechnung diejenige Investition aus der Perspektive des Investors vorteilhafter, welche die kleineren Kosten aufweist. Klassische Bezugsgrößen der Investitionsrechnung sind die Kosten für die Rechnungsperiode oder aber auch für eine Leistungseinheit. Im vorliegenden Anwendungsfall wären projektbezogenen Gestehungskosten als Vergleichsmaßstab heranzuziehen. In der Kostenvergleichsrechnung bleibt jedoch der Erlös unberücksichtigt, da annahmegemäß davon ausgegangen wird, a) dass die Erlöse für alle Investitionsvorhaben identisch sind, b) keiner einzelnen betriebswirtschaftlichen Investition zugerechnet werden können oder aber c) die Erlöse nicht messbar sind (vgl. Thommen; Achleitner 2012 S.669).

Insbesondere diese Vereinfachungen sind es, die aus immobilienwirtschaftlicher Perspektive realitätsfern sind. So erzielt jedes immobilienwirtschaftliche Projekt, gleich im Verkauf oder der Vermietung, Erlöse,¹⁰ die konkret der Investition zugerechnet werden können. Ferner negiert die Methode sowohl Betriebskosten als auch erforderliche Eigenkapitalmittel und Kapitalkosten, die für alternative Investitionsprojekte anfallen und in der Immobilienwirtschaft aufgrund der hohen Kostenstrukturen nicht unerheblich auf die finanzielle Vor- oder Nachteiligkeit einer Investition wirken. Daher bleibt unklar, welche finanziellen Effekte eine – im Sinne der Kostenvergleichsrechnung – vorteilhafte Investition (geringste Kosten) in der Realität auf Investoren und Nutzer hat.

Gewinnvergleichsrechnung

In der Gewinnvergleichsrechnung wird der zuvor genannten Kritik an der Kostenvergleichsrechnung, dass Investitionen in der Regel mit Erlösen verbunden sind, Rechnung getragen. Die Kostenvergleichsrechnung ist dafür um die Erlösseite erweitert. Die Methode bietet daher die Möglichkeit, aus alternativen Investitionsmöglichkeiten diejenige zu identifizieren, welche den größten Gewinnbeitrag verspricht. Das Verfahren bietet sich daher für Fälle an, in denen „verschiedene Investitionsprojekte aufgrund unterschiedlicher quantitativer und/oder qualitativer Absatzmengen unterschiedliche Erlöse aufweisen“ (Thommen; Achleitner 2012 S.672). Trotz dieser Erweiterung und der damit verbundenen Vorteile bleiben die zuvor genannten Kritikpunkte an dem statischen Vorgehen, insbesondere aus der Perspektive immobilienwirtschaftlicher Akteure, bestehen.

10 Im Falle des selbstnutzenden Eigentümers besteht der kalkulatorisch anzusetzende Erlös aus einer fiktiv anzusetzenden Mietersparnis.

Rentabilitätsrechnung

In der Realität sind verschiedene Investitionsmöglichkeiten regelmäßig mit unterschiedlichen Kapitaleinsätzen verbunden. Vor diesem Hintergrund ist es zweckdienlich, bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mittels statischer Verfahren die Rentabilität zu berücksichtigen. Die Rentabilität setzt, ausgehend von der Kosten- und Gewinnvergleichsrechnung, den Gewinn in Beziehung zu dem eingesetzten Kapital. Die Rentabilitätsrechnung wird in der Immobilienwirtschaft auch als Entwicklerrechnung bezeichnet. Gegenüber den beiden vorherigen Methoden, zielt die Rentabilitätsberechnung auf ein Wirtschaftlichkeitskriterium (Kosten-Nutzen). Mittels der Rentabilitätsberechnung können verschiedene Kennzahlen miteinander verglichen werden, die aus immobilienwirtschaftlicher Perspektive eine Rolle spielen; so beispielsweise eine Gestehungsrendite als Quotient aus Mieteinnahmen durch Investitionssumme im Vermietungsfall oder eine Gesamtkapitalrendite als Quotient aus Gewinn durch Investitionssumme im Verkaufsfall. In der Rentabilitätsberechnung werden unter anderem die absolute Höhe des Gewinns sowie der Aspekt unterschiedlicher Nutzungsdauern vernachlässigt. Daher ist insbesondere im Kontext der relativ langen Investitionszeiträume in der Immobilienwirtschaft von Investitionsrechnungen mittels der Rentabilitätsrechnung abzusehen.

Amortisationsrechnung

Amortisation ist ein häufig bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen herangezogener Kennwert. In der Amortisationsrechnung, auch als Pay-Back- oder Pay-Off-Methode bezeichnet, wird der Zeitraum ermittelt, der zur Rückzahlung des Investitionsbetrags Einzahlungsüberschüsse erforderlich ist. Rechnerisch lässt sich die Amortisation ermitteln, in dem entweder der Investitionsbetrag solange periodisch unterschiedlich hoch anfallende, in den Berechnungen zu kumulierenden Ergebnisüberschüssen gestellt wird, bis der Investitionsbetrag erreicht ist, oder der Investitionsbetrag durch regelmäßig statisch anfallende Ergebnisüberschüsse dividiert wird. Ein Investitionsprojekt ist demnach gegenüber einem anderen dann als wirtschaftlich zu betrachten, wenn die Amortisationszeit geringer ist als die der Alternative oder aber auch, wenn die Amortisationszeit geringer ist als der Lebenszyklus des Investitionsprojektes.

Im Vergleich zu den zuvor skizzierten Methoden sind mittels der Amortisationsrechnung Überlegungen zum Risiko der Investition möglich, da das Verfahren sich konkret auf Zahlungszeiträume bezieht. Thommen/Achleitner (2012) konstatieren in diesem Kontext einen für den vorliegenden Vergleich alternativer Immobilieninvestments relevanten Aspekt: „Je länger die Wiedergewinnungszeit, umso größer ist das Risiko, dass sich die Investition nicht bezahlt macht. Denn je langfristiger die Planung, umso größer ist auch die Wahrscheinlichkeit unvorhergesehener bzw. unvorhersehbarer Ereignisse, welche die vorausgesagten Werte wesentlich verändern können“ (ebd. 678).

Ungeachtet dessen, lässt die Amortisationsrechnung keine Rückschlüsse zu der erwartenden Rendite einer Investition zu. Entsprechend bleibt bei investitionsrechnerischen Analysen zur Amortisation beispielsweise offen, wie sich wirtschaftlich definierte

Investments zu denen alternativer Investments am Kapitalmarkt verhalten. Problematisch sind investitionsrechnerische Analysen zudem bei unterschiedlichen Nutzungsdauern der zu vergleichenden Investments, da die Höhe jährlicher Abschreibungen die Amortisationsdauer erheblich beeinflussen kann. In diesem Kontext sei zuletzt auf einen wesentlichen Kritikpunkt an den statischen Verfahren hingewiesen, der auch auf die Amortisationsrechnung zutrifft: Die aus der zeitlichen Struktur der Zahlungen resultierenden finanziellen Effekte bleiben in allen statischen Verfahren unberücksichtigt.

Zusammenfassende Beurteilung der statischen Verfahren

Wie dargelegt, zeichnen sich statische Methoden der Investitionsrechnung durch eine große Praktikabilität aus. Diese Praxistauglichkeit ist darauf zurückzuführen, dass die Berechnungen relativ einfach sind und auf leicht verständliche Eingangsdaten zurückgreifen. Sie eignen sich daher insbesondere dann, wenn es darum geht, schnell und einfach einen Einblick in vermeintliche finanzielle Vor- oder Nachteiligkeit alternativer Investitionsmöglichkeiten zu erhalten. Die mittels statischer Verfahren berechneten Ergebnisse sind jedoch aufgrund der gewählten Vereinfachungen mit gravierenden methodischen Nachteilen verbunden, die mitunter das Ergebnis stark verfälschen können. Diese Nachteile sind in der Literatur umfassend herausgearbeitet, weshalb es an dieser Stelle nicht lohnenswert erscheint, diese Diskussion in aller Ausführlichkeit zu rezipieren. Stattdessen sollen an dieser Stelle die Kern-Kritikpunkte zusammengefasst dargestellt werden (Thommen; Achleitner 2012):

- Zeitliche Unterschiede in Bezug auf effektive Ein- und Auszahlungen bleiben weitgehend unberücksichtigt. Für ein Unternehmen spielt dieser Aspekt nicht nur bezüglich der Liquidität, sondern auch der Rentabilität eine Rolle. Je weiter der Einzahlungsüberschuss in der Zukunft liegt, umso kleiner wird die Rentabilität, weil das Geld zur Reinvestition erst in einem späteren Zeitpunkt zur Verfügung steht.
- Die Betrachtung einer einzigen Periode und somit die Rechnung mit Durchschnittswerten ist eine grobe Vereinfachung, die nicht der betrieblichen Wirklichkeit entspricht.
- Die effektive Nutzungsdauer bleibt unberücksichtigt. Damit besteht die Gefahr, dass längerfristige Investitionsprojekte unterbewertet werden. Dies wird besonders deutlich bei Anwendung der Amortisationsrechnung.

Für den Anwendungsfall von Immobilieninvestitionen sei hinzugefügt, dass die statischen Verfahren hierfür insbesondere zu großen Verzerrungen des Ergebnisses führen können, „weil die Höhe des Investitionsvolumen und die Langfristigkeit von Investitionen zu hohen Kapitalisierungseffekten führen, die in den statischen Methoden nicht berücksichtigt werden können“ (Pfnür 2002 S.343). Im Kontext der zusammengefassten Kritik kann für den vorliegenden Anwendungsfall in den Worten des BMUB konstatiert werden, dass „statische Verfahren .. zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Immobilieninvestitionen grundsätzlich nicht geeignet [sind]. Dies gilt erst recht bei lebenszyklusorientierten Betrachtungen“ (BMUB 2016 S.35). Entsprechend ist der Einsatz eines dynamischen Verfahrens zwingend.¹¹ Die dynamischen Verfahren werden im folgenden Abschnitt näher betrachtet.

Dynamische Verfahren

Prinzipiell wird mit klassischen dynamischen Verfahren versucht, die gravierenden Schwächen der statischen Verfahren mit dem Ziel zu reduzieren, die Entscheidungssituation realitätsnäher abzubilden. Hierfür kommen folgende Aspekte bei den klassischen dynamischen Verfahren zum Tragen:

- Anstatt mit durchschnittlichen Werten für die einzelnen Betrachtungsperioden zu rechnen, werden Zahlungsströme (Einzahlungen und Auszahlungen) in den Berechnungen angesetzt, die während des gesamten Investitionszeitraums auftreten.
- Anstatt den Zeitpunkt einzelner Zahlungen zu negieren, werden die Effekte des Zeitpunktes auf die anfallenden Ein- und Auszahlungen berücksichtigt.

Der zweite Aspekt fordert einen Abzinsungsfaktor ein, mittels dessen in den klassischen formelbasierten Verfahren sämtliche Ein- und Auszahlungen auf den Zeitpunkt diskontiert werden, zu dem die erste Zahlung erfolgt (vgl. Thommen; Achleitner 2012 S.680).

Kapitalwertmethode (Net-Present-Value-Methode)

Der Zweck der Kapitalwertmethode ist, den Wert sämtlicher mit einer Investition verbundenen Ein- und Auszahlungen, die zu beliebigen Zeiten innerhalb der Investitionslaufzeit anfallen, für einen Bezugszeitpunkt (in der Regel zu Beginn der Investition) zu ermitteln und damit verschiedene Investitionsmöglichkeiten vergleichbar zu machen. Der Kapitalwert (Net-Present-Value) einer Investition ist damit der Wert, der sich aus der Differenz der abgezinsten Einzahlungen und Auszahlungen in der Gegenwart ergibt. Für dieses Vorgehen ist die Kapitalwertmethode auf einen Diskontierungszinssatz (Kalkulationszinssatz) angewiesen. Der Kapitalwertmethode liegt damit die Annahme zugrunde, dass periodisch erzielte Überschüsse zu dem Kalkulationszinssatz wieder angelegt werden. Damit hat der Kalkulationszinssatz – neben der Höhe und zeitlichen Verteilung der jährlichen Ein- und Auszahlungen – einen entscheidenden Einfluss

11 Diese Aussage widerspricht prinzipiell dem ordnungsrechtlichen Wirtschaftlichkeitsgebot (vgl. Kapitel 2.1 (S.201)).

auf das Ergebnis (vgl. Thommen; Achleitner 2012 S.684). Hierbei gilt prinzipiell: „Je höher der Kalkulationszinssatz ist, desto kleiner ist der Kapitalwert und umgekehrt“ (ebd.).

In der Praxis bieten sich verschiedenen Möglichkeiten, den Kalkulationszinssatz für die Berechnungen zu ermitteln (vgl. Thommen; Achleitner 2012 S.684) und damit die Realität in den Berechnungen abzubilden: 1. Man legt die Finanzierungskosten zugrunde und verlangt, dass die Investition mindestens eine Rendite in der Höhe der Kosten des eingesetzten Kapitals erzielt. 2. Man nimmt die Rendite, die bei alternativen Anlagemöglichkeiten erzielt werden könnte, sei dies bei sachähnlichen oder sachfremden Investitionsprojekten. 3. Man gibt eine Zielrendite vor, die man unter Berücksichtigung verschiedener Faktoren (z.B. Marktchancen, Risiko) erreichen möchte. Vorteilhaft ist eine Investition immer dann, wenn der Kapitalwert positiv ist. Ist dies der Fall, drückt der Kapitalwert aus, dass mit der Investition ein über die geforderte Mindestverzinsung in Form des Kalkulationszinssatzes sowie die Rückzahlung des eingesetzten Kapitals ein Überschuss erwirtschaftet wird. Für den Fall, dass der Kapitalwert negativ ist, wird die geforderte Mindestverzinsung nicht erreicht. Für den Fall, dass der Kapitalwert gleich Null ist, hängt die Vorteilhaftigkeit für den Investor davon ab, welcher Kalkulationszins gewählt wurde. Bei dem Vergleich alternativer Investitionen ist damit aus der Perspektive des Investors diejenige Investition vorteilhaft, die den größeren Kapitalwert aufweist (vgl. zu diesem Absatz Thommen; Achleitner 2012 S.684f).

Die Kapitalwertmethode hat den Vorteil, dass sie ein rechnerisch einfaches Verfahren ist, mit dem leicht zu interpretierende Ergebnisse in Form von absoluten Werten ermittelt werden. Problematisch hingegen ist die Annahme eines vollständigen Finanzmarktes, insbesondere der Annahme von gleichen Soll- und Habenzinsen sowie der Prämisse der Wiederanlage zu dem Kalkulationszins. Daneben ist es in der Praxis schwierig, Projekte mit unterschiedlichen Nutzungszeiträumen mit einander zu vergleichen.

Interne Zinssatzmethode

Mittels der internen Zinssatzmethode wird die interne Verzinsung einer Investition ermittelt. Der Zinssatz kann aus der Kapitalwertmethode abgeleitet werden. Der Interne Zinssatz bezeichnet die Verzinsung einer Investition, die sich bei einem Kapitalwert gleich Null ergibt. Damit weist das Ergebnis die Rentabilität aus, mit der sich der Kapitaleinsatz pro Periode verzinst.

Der Methode liegt – wie bei der Kapitalwertmethode – die Annahme zugrunde, dass Überschüsse wiederangelegt werden können. Ferner liegt der internen Zinssatzmethode die Prämisse zugrunde, dass die periodischen Rückflüsse, die über die interne Verzinsung hinausgehen, zur Rückzahlung des Kapitaleinsatzes eingesetzt werden (vgl. Thommen; Achleitner 2012 S.685). Ein Investitionsprojekt ist theoretisch immer dann vorteilhaft, wenn der interne Zinssatz über den geforderten Mindestzins hinausgeht. Bei dem Vergleich alternativer Investitionen ist damit aus der Perspektive des Investors diejenige Investition

vorteilhaft, die den höchsten internen Zins aufweist. Unabhängig von der grundsätzlichen Kritik an formelbasierten, dynamischen Methoden der Investitionsrechnung steht die Methode des internen Zinssatzes spezifischer Kritik gegenüber. Diese ist insbesondere darauf zurück zu führen, dass die Methode nur funktioniert, solange die Zahlungsüberschüsse in allen Perioden positiv sind. Sofern – wie in der Praxis von Investitionsprojekten häufig zu beobachten – sich aus der Investition in dem Investitionszeitraum positive wie negative Überschüsse ergeben, ist das Ergebnis der Berechnungen aufgrund der Vorzeichenwechsel nicht mehr zwingend eindeutig in der Aussage. Aufgrund dieser Herausforderung ergibt sich für methodisch nicht so versierte Investoren das Risiko, möglicherweise mathematisch verzerrte Ergebnisse fehl zu deuten. Daher wird die Methode, insbesondere auch für den Vergleich alternativer Investitionsmöglichkeiten, als hoch problematisch erachtet (vgl. bspw. Kruschwitz 2003 S.106ff; Grob 2006 S.60f; Rolfes 2003 S.87ff).

Annuitätenmethode

Ziel der Annuitätenmethode ist, aus dem Kapitalwert einer Investition gleich große periodische Einzahlungsüberschüsse für die Investitionslaufzeit zur Vergleichbarkeit alternativer Investitionsmöglichkeiten zu ermitteln. Die periodisch gleichbleibenden Zahlungen über den Investitionszeitraum werden als Annuität bezeichnet. Die Periodisierung des Kapitalwerts wird methodisch mittels der Verrechnung von Zinseszinsen erreicht. Zunächst wird hierfür der Kapitalwert berechnet (daher baut die Annuitätenmethode auf der Kapitalwertmethode auf). Anschließend wird in einem zweiten Schritt der Kapitalwert mit dem Annuitätenfaktor (Wiedergewinnungsfaktor; Kehrwert des Rentenbarwertfaktors) multipliziert. Die Annuität der Investition kann daher auch als Ausdruck des durchschnittlichen jährlichen Investitionserfolgs bezeichnet werden.

Vorteilhaft ist eine Investition immer dann, wenn die ermittelte Annuität größer Null ist. Werden mehrere Investitionsprojekte miteinander verglichen, ist das Projekt am vorteilhaftesten, welches die höchste Annuität aufweist. Da die Methode auf der Kapitalwertmethode aufbaut, gelten grundsätzlich die gleichen dort geäußerten Kritikpunkte auch hier. Gegenüber der Kapitalwertmethode bietet die Annuitätenmethode grundsätzlich die Möglichkeit, Investitionsprojekte mit unterschiedlichen Investitionszeiträumen miteinander zu vergleichen.

Beurteilung der klassischen, formelbasierten dynamischen Verfahren

Gegenüber der statischen Verfahren zur Investitionsrechnung, liegt der Vorteil der dynamischen Verfahren hauptsächlich darin, dass sie den zeitlichen Ablauf des Projektes und im Investitionszeitraum unterschiedliche Zahlungsströme berücksichtigen. Dies führt zu folgenden Vorteilen der klassischen dynamischen Verfahren gegenüber den statischen Verfahren (Thommen; Achleitner 2012 S.688):

- Sämtliche Ein- und Auszahlungen über alle Perioden der Investitionsdauer werden einzeln erfasst.
- Der Zeitpunkt aller relevanten Zahlungsgrößen wird auf Grundlage von Zinseszinsrechnung erfasst.

Gegenüber den statischen Verfahren steigt somit die Komplexität der Berechnungen, es wird jedoch ein höherer Realitätsbezug aufgebaut. Dennoch vermögen die klassischen formelbasierten dynamischen Verfahren nicht alle Nachteile der statischen Verfahren zu beseitigen. Hierzu gehört insbesondere (vgl. hierzu bspw. auch Thommen; Achleitner 2012 S.688):

- Es wird unterstellt, dass sämtliche Einzahlungsüberschüsse zum angenommenen Kalkulationszinssatz (Kapitalwertmethode) oder internen Zinssatz reinvestiert werden können (Wiederanlage der Einzahlungsüberschüsse). Es existiert damit keine getrennte Betrachtung zwischen Soll- und Habenzins.
- Es wird angenommen, dass ein Investor – unabhängig von seiner Bonität und Zahlungsfähigkeit – beliebige Mengen an Kapital aufnehmen und reinvestieren kann (Vollkommener Kapitalmarkt).
- Es existiert nur ein Zinssatz für die Anlage in alternative Investitionen (der Kalkulationszinssatz).
- Sämtliche Zahlungen einer Periode fallen zu einem Zeitpunkt an (z. B. Jahresende).
- Es wird angenommen, dass sich alle Zahlungsströme eindeutig der Investition zuordnen lassen.
- Es wird angenommen, dass die Informationen über die Eingangsdaten der Investition sicher sind (Annahme vollkommener Informationen).

Damit bestehen trotz der Vorteile der klassischen formelbasierten dynamischen Verfahren der Investitionsrechnung gegenüber den statischen Verfahren entscheidende Einschränkungen, die zu erheblichen Abweichungen zwischen den rechnerisch ermittelten Ergebnissen und den tatsächlichen Ergebnissen des Investitionsprojektes in der Praxis führen können. Vor diesem Hintergrund konstatiert Pfnür für den Anwendungsfall in der Immobilienwirtschaft hierzu „Die Vereinfachungen der klassischen [dynamischen] Verfahren der Investitionsrechnung können in der Darstellung der Entscheidungssituation erhebliche Auswirkungen auf das Entscheidungsergebnis haben“ (2011 S.106). In diesem Kontext warnt Pfnür vor vereinfachten, die Realität nur unzureichend abbildenden Betrachtungen (vgl. ebd.). Dass grundsätzlich gleiche Eingangsdaten bei unterschiedlichen methodischen Analysen auf Basis der klassischen dynamischen formelbasierten Verfahren zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können, wird in der Literatur vielfach dargestellt. So kann ein Investitionsprojekt A nach einer Kapitalwertbetrachtung gegenüber einem Investitionsprojekt B vorteilhaft sein, wenngleich

eine Betrachtung mittels der internen Zinssatzmethode zu einem gegenteiligen Ergebnis führt (vgl. bspw. Grob 2006 S.101; Thommen; Achleitner 2007 S.412). Es kann angenommen werden, dass impliziten Annahmen der formelbasierten Methoden und deren Wirkung auf das Ergebnis nicht jedem unmittelbar klar sind. Damit unterliegt die Interpretation von Ergebnissen, die Mittels der formelbasierten dynamischen Verfahren erzeugt wurden, in der Praxis regelmäßig einem nicht zu unterschätzenden Risiko.

Vollständige Finanzplanung

Eine Alternative zu den klassischen formelbasierten Verfahren bietet die von (Heister 1962) entwickelten Methode der Vollständigen Finanzplanung (VoFi), die ebenfalls zu den Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung gezählt wird. Im Gegensatz zu den klassischen dynamischen formelbasierten Verfahren jedoch ist die inzwischen in der Immobilienwirtschaft verbreitete VoFi-Methode jedoch eine tabellenbasierte Endwertbetrachtung, bei der als Zielgröße jeder Berechnung der Geldmittelbestand am Ende des Planungszeitraums der Investition ermittelt wird. Ein weiterer Gegensatz zu den formelbasierten Verfahren ist, dass „bei den klassischen Methoden der Investitionsrechnung die Finanzierung implizit Berücksichtigung findet, [währenddessen] .. sie bei der vollständigen Finanzplanung explizit – also vollständig – modelliert“ (Grob 2006 XII) wird. Eine VoFi bietet damit die Möglichkeit, die versteckten (impliziten) Prämissen der klassischen formelbasierten dynamischen Methoden transparent offen zu legen. Methodisch wird in der VoFi wie folgt vorgegangen: Zur Durchführung der VoFi-Methode werden alle einer Investition zuzurechnenden Zahlungen sachlich abgegrenzt und zeitlich den Perioden der Investitionslaufzeit der jeweiligen Höhe nach zugeordnet. Die Methode ist dabei strikt zahlungsorientiert. Kalkulatorische Größen finden keine Berücksichtigung. Die Besonderheit der VoFi-Methode gegenüber anderen investitionsrechnerischen Verfahren besteht darin, dass nicht nur die originär einer Investition zuzurechnenden Zahlungen explizit berücksichtigt werden, sondern dass durch die Investitionsentscheidung ein finanzielles Gleichgewicht erhalten bleiben muss. Dies heißt: Die sich aus der Investition ergebenden Überschüsse werden in den Folgeperioden am Kapitalmarkt angelegt, die sich ergebende Defizite/Fehlbeträge werden durch eine Fremdkapitalaufnahme gedeckt. Diese Betrachtung kommt der eines Investors gleich, der sein Kapital auf ein Bankkonto oder in einen Immobilienfond einzahlt; denn hinter den Kulissen legt die Bank oder der Fond das eingezahlte Geld samt dem periodisch erzielten Überschuss erneut an. Zur besseren Übersichtlichkeit dieser Vorgänge kann ein vollständiger Finanzplan in mehrere Teile gegliedert werden: einem Teil für die originären Zahlungen für das Investitionsprojekt und einem zweiten Teil für die derivativen Vorgänge. Der erste Teil erfasst damit bei Immobilienprojekten im wesentlichen Anschaffungs- bzw. Herstellungsausgaben, Finanzierungskosten, Mieteinnahmen, nicht umlagefähige Betriebskosten und zum Investitionsendzeitpunkt den Verkaufserlös aus der Perspektive eines Vermieters. In dem zweiten, derivativen Teil der VoFi werden die mittelbar aus der originären Investition resultierenden Zahlungen berücksichtigt, sodass im Ergebnis alle mit einer Investition in Verbindung stehenden Zahlungen

inklusive Zinseszinsrechnungen vollständig in den Tableaus abgebildet werden. Auf diese Weise entsteht mit einer VoFi ein umfangreiches Tabellenwerk, welches die originären wie auch die derivativen – zum Teil aufgrund der hohen Kostenstrukturen äußerst ergebniswirksamen – Ein- und Auszahlungen transparent offenlegt. Dabei ermöglicht insbesondere die periodenweise differenzierte Zurechenbarkeit der Zahlungen für den Kapitaldienst eine realitätsnahe Berücksichtigung der Konditionenvielfalt (vgl. hierzu Pfnür 2011 S.99f).

Vor diesem Hintergrund sind die klassischen Verfahren streng genommen Vereinfachungen einer VoFi (vgl. Pfnür 2002 S.343). Welchen Einfluss diese methodischen Vereinfachungen auf das Ergebnis investitionsrechnerischer Analysen haben kann, zeigen exemplarische Analysen eindrucksvoll: „eine Abkehr von der realitätsnahen Erfassung der Kapitalisierungseffekte im Entscheidungskalkül [führt] zu erheblichen Unterschieden in den Endwerten und in den kritischen Werten einzelner Parameter“ (Pfnür 2011 S.106) und damit zu einem Risiko, sich den formelbasierten Verfahren in der Investitionsentscheidung anzuvertrauen.

Zwischenfazit

Die Entscheidung für oder gegen eine Investition machen Wirtschaftssubjekte, zumindest solange Kapital ein knappes Gut ist, von den Alternativen der Kapitalverwendung abhängig. Wenn Alternativen unterschiedliche Kapitaleinsätze erfordern, unterschiedliche Zahlungsstrukturen und damit verbundene Risiken aufweisen, dann führt ein Vergleich von Endwerten ebenso wie ein Vergleich von Barwerten, also von absoluten Größen, nicht zwangsläufig zu einer richtigen Entscheidung. Hier muss die Rendite des eingesetzten Kapitals als Entscheidungsgröße herangezogen werden. Die Rendite ist die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate des eingesetzten Kapitals und kann als Eigenkapital- oder Gesamtkapitalrendite berechnet werden. Die auf Basis Vollständiger Finanzpläne ermittelten Wachstumsraten des eingesetzten Kapitals (VoFi-Eigenkapitalrendite) sind hingegen frei von methodischen Problemen und frei von für den Betrachter nicht sichtbaren impliziten Prämissen der Berechnung.

Die Verfahrensauswahl bei den Berechnungen in dieser Arbeit soll sich unmittelbar am Zweck orientieren, dem die Berechnungen dienen: Es soll gezeigt werden, mit welchen finanziellen Auswirkungen die Akteure durch die unterschiedlichen energetischen Standards zu rechnen haben. Um diesem Zweck sachgerecht und transparent Rechnung zu tragen, werden die Wirtschaftlichkeitsberechnungen mittels Vollständiger Finanzpläne durchgeführt. Diese Methode wird in der Praxis vermehrt angewendet, da immobilienwirtschaftliche Akteure der VoFi gegenüber den anderen investitionsrechnerischen Analysen eine klare Präferenz einräumen, wenn die Grundlagen der Investitionsentscheidung eine Methode sein soll, die die Rahmenbedingungen der Realität möglichst genau abzubilden vermag (vgl. bspw. GdW 2010 S.67ff; Wendlandt 2013; VNW 2016).

3.4. Akteursbezogene Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei Nicht-Wohngebäuden

Wie bereits an anderer Stelle ausgeführt, definieren in der Tradition der gerundiven Werttheorie die Ziele der verschiedenen Akteure die Bewertungsansätze. Die Perspektive von Eigentümern, Selbstnutzern und Mietern ist gleichsam ökonomisch geprägt (vgl. Kapitel 3.2 (S.215)), jedoch unterscheiden sich die Bewertungsansätze entsprechend ihrer Sicht auf das Gebäude. Im Sinne des homo oeconomicus verfolgen Eigentümer prinzipiell mit der Investition in eine Immobilie das Ziel, den Wert des eingesetzten Kapitals langfristig zu maximieren. Die wirtschaftliche Messgröße in Bezug auf die Zielerreichung ist, wie die vorausgehenden Ausführungen gezeigt haben, die durchschnittlich Eigenkapital-Rendite, die in der immobilienwirtschaftlichen Praxis das wichtigste finanzwirtschaftliche Entscheidungskriterium zwischen unterschiedlichen Investitionsalternativen geworden ist.¹² Der mietende Nutzer hingegen zielt einem rein ökonomischen Kalkül folgend darauf ab, das Kosten-Nutzen-Verhältnis zu maximieren. Im Ergebnis bemisst er die Wirtschaftlichkeit alternativer Fassadenausführungen anhand der Nutzen-Kosten-Relationen, also der Summe der Nutzungskosten pro Flächeneinheit. Der selbstnutzende Eigentümer wiederum strebt danach, die Nutzungskosten bei gegebener Fassadenqualität zu minimieren. Die relevanten Kenngrößen der Akteure sind damit monetarisierbar, sodass die Ergebnisse alternativer Handlungsoptionen der Fassadensysteme mit dem Einsatz von Wirtschaftlichkeitsanalysen bewertet werden können.

Für die in dieser Arbeit durchzuführenden Wirtschaftlichkeitsanalysen wird die Methode der dynamischen Investitionsplanung herangezogen und mittels des Verfahrens der Vollständigen Finanzplanung umgesetzt (vgl. Kapitel 3.3 (S.228) und 3.4 (S.239)). In der Anwendung dieses Verfahrens wird insbesondere der Zweck verfolgt, die finanziellen Effekte für Eigentümer und Mieter zu analysieren, welche aus alternativen Handlungsoptionen in der Anwendung solaraktiver Bauteile resultieren. Die Vollständigen Finanzpläne der Polybox sich prinzipiell, wenngleich sie auf derselben Datenbasis (vgl. hierzu Kapitel 4 (S.246)) aufbauen. Diese prinzipiellen Unterschiede hinsichtlich der Aufstellung und Auswertung der Finanzpläne werden nachfolgend beschrieben (vgl. folgende Abb. 372).

¹² Daneben spielen noch weitere, nicht-monetäre Kriterien eine Rolle in der Entscheidung für oder gegen eine Investition, wie bspw. der strategische Nutzen im Sinne des Corporate oder Employer Branding.

VoFi Vermieter		VoFi Mieter		VoFi Selbstnutzer
Auszahlung Investition				Auszahlung Investition
Einzahlung Nettomiete	←	Auszahlung Nettomiete		Äquivalent Ausz. Nettomieten
Ein-/Auszahlung Nebenkosten	←	Auszahlung Nebenkosten		Äquivalent Ausz. Nebenkosten
Ein-/Auszahlung Betriebskosten	←	Auszahlung Betriebskosten		Auszahlung Betriebskosten
Ein-/Auszahlung Wartungskosten	←	Auszahlung Wartungskosten		Auszahlung Wartungskosten
Ein-/Ausz. Instandhaltungskosten	←	Auszahlung Instandhaltungskosten		Auszahlung Instandhaltungskosten
Auszahlung Verwaltungskosten		Auszahlung Verwaltungskosten		Äquivalent Ausz. Verwaltungskosten
Einzahlung Stromertrag (EEG)				Einzahlung Stromertrag (EEG)
Auszahlung Kapitaldienst				Auszahlung Kapitaldienst
Zahlungssaldo		Zahlungssaldo		Zahlungssaldo
Anschlussinvestition/ -finanzierung		Anschlussinvestition/-finanzierung		Anschlussinvestition/ -finanzierung
Zahlungssaldo kumuliert		Zahlungssaldo kumuliert		Zahlungssaldo kumuliert

Abb. 372:
Schematische Darstellung der
VoFi-Methode für den vorliegenden
Betrachtungsfall
Quelle: Eigene Darstellung

Wie schematisch abgebildet, stellt die Miete bei den Vermietern einen Zahlungseingang und bei den Mietern einen Zahlungsausgang dar. Die Sicht des Mieters stellt damit das entsprechende Pendant zur Vermieterperspektive dar. Beide bedingen sich und können nicht losgelöst voneinander betrachtet werden. Einerseits sind die Zahlungseingänge der Vermieter abhängig von der Aufnahmefähigkeit des Marktes in Bezug auf die erforderlichen Mieten. Andererseits sind die Zahlungsausgänge der Mieter abhängig von der vom Vermieter zur Verfügung gestellten Fläche, dessen Eigenschaften sowie von dem Mietpreis. Durch Aufsummierung der Zahlungsströme ergeben sich Ergebniszeilen innerhalb der Finanzpläne. Um die Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit und die Veränderungen in der Liquiditätsbelastung der Akteure sichtbar zu machen, sind die Zahlungsströme von Eigentümern und Mietern einer kombinierten Analyse zu unterziehen. Im Gegensatz zu den Zahlungsströmen zwischen Eigentümern und Mietern im Wohnungsbereich, sind die Zahlungsströme für die Bereitstellung einer Fläche im Nicht-Wohnbereich gesetzlich nicht geregelt und können zwischen den Parteien weitestgehend frei verhandelt werden. Nicht unüblich ist es, dass der Mieter nicht nur die Miete und die Nebenkosten zahlt, sondern auch noch Instandhaltungsmaßnahmen übernimmt. Entsprechend der Fragestellung dieser Arbeit werden in der weiteren Untersuchung insbesondere die nachfolgend aufgeführten Ergebnisse (Kennwerte) zu den Auswirkungen der alternativen Standards mittels vollständiger Finanzpläne berechnet¹³ und diskutiert:

13 Die vollständigen Finanzpläne zu den alternativen Standards der nachfolgenden Analysen sind dem Anhang 2 zu entnehmen.

- **Eigentümerseitig:** Die durchschnittliche Eigenkapitalrendite auf das eingesetzte Kapital (VoFi Eigenkapitalrendite) – Die hier berechnete spezielle VoFi-Eigenkapitalrendite ist die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate des eingesetzten Kapitals auf den Endwert (zur Berechnung vgl. die folgenden Abschnitte). Anhand des Kriteriums der Eigenkapitalrendite können alle Investitionen als wirtschaftlich betrachtet werden, deren Eigenkapitalrenditen höher sind als die Renditen möglicher Alternativen. Dabei ist darauf zu achten, dass als Vergleich nur Alternativen herangezogen werden, die hinsichtlich Laufzeit und Risikostruktur tatsächlich auch vergleichbar sind. Dieses Kriterium ist im Variantenvergleich der vorliegenden Arbeit gegeben.¹⁴
- **Mieterseitig:** Maximierung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses der Gebäudenutzung – Für die Nutzung einer Fläche müssen Mieter die Summe aus der Nettokaltmiete, den kalten sowie warmen Betriebskosten zzgl. Aufwendungen für Wartung, Instandhaltung und Verwaltung zahlen. Diese Summe der Nutzungskosten ist daher aus Sicht des Mieters das entscheidende Maß bei der Wahl zwischen alternativen Optionen bei sonst gleichen Nutzungsqualitäten.
- **Selbstnutzerseitig:** Minimierung Nutzungskosten bei sonst gleichen Nutzungsqualitäten.

Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben das korrekte Vorgehen in einem Vollständigen Finanzplan zur Ermittlung der Kennzahlen als Grundlage zur Bewertung alternativer Handlungsoptionen (vgl. hierzu Kapitel 5 (S.261)).

14 Es sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass es aus betriebswirtschaftlicher Sicht zwar notwendig aber nicht hinreichend ist, wenn ein positiver Wert für die Eigenkapitalrendite erzielt wird. Vielmehr erfordert die Entscheidung zugunsten einer Investition, dass diese zumindest die Opportunitätskosten des eingesetzten Kapitals erwirtschaftet. Diese bestimmen sich anhand eines als Basiszinssatz bezeichneten Preises für risikofrei investiertes Kapital zuzüglich eines Risikoaufschlags. Alle Immobilieninvestitionen sind grundsätzlich risikobehaftet. Über die Höhe des Risikos und des entsprechenden Risikoaufschlags entscheidet der Investor anhand seiner konkreten Situation. Dabei hat die Übernahme des Investitionsrisikos regelmäßig einen Marktpreis. Als Indikator für diesen Marktpreis gelten beispielsweise die Immobilienrenditen in den Marktberichten oder die Liegenschaftszinssätze der Gutachterausschüsse.

Vollständige Finanzplanungen aus der Sicht von Eigentümern

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in dieser Arbeit werden tabellenbasiert mittels Vollständiger Finanzpläne durchgeführt. Beispielhaft und zur Illustration der im weiteren Verlauf der Arbeit dargestellten Ergebnisse ist nachfolgend ein exemplarischer Ausschnitt aus einem Vollständigen Finanzplan dargestellt (vgl. folgende Abb. 373).

VoFi Vermieter– Variante: BEISPIEL					
Perioden (Betrachtungshorizont)	0	1	2 ...	19	20
Investition					
Investitionskosten	8.904.610				
Eigenkapital	-2.671.383				
Fremdkapitalzufluss zur Finanzierung der Investition	-6.233.227				
Auszahlungen					
<u>1. Finanzierung</u>					
FK-Stand 01.01.					
Zahlung Annuität	-6.233.227	-5.921.566	-623.323	-311.661	
davon Fremdkapital Zinsen	-311.661	-311.661	-311.661	-311.661	
davon Fremdkapital Tilgung	-186.997	-177.647	-18.700	-9.350	
FK-Stand 31.12.	-124.665	-134.014	-292.962	-302.312	
<u>1. Auszahlungen Finanzierung Summe</u>	-5.921.566	-5.609.904	-311.661	-0	
	-311.661	-311.661	-311.661	-311.661	
<u>2. Laufender Betrieb</u>					
Verwaltungskosten	30%	-672	-672	-672	-672
Strom Eigennutzungsanteil (EEG) (60% d. EEG-Umlage)		-927	-927	-927	-927
Stromsteuer Eigennutzungsanteil		-690	-690	-690	-690
<u>2. Auszahlungen laufender Betrieb Summe</u>		-2.289	-2.289	-2.289	-2.289
Auszahlungen Summe		-313.950	-313.950	-313.950	-313.950
Einzahlungen					
Einspeisevergütung Netzaabgabe		1.810	1.804	1.714	1.709
Mietzahlungen		408.046	410.086	446.373	448.605
Stom Eigennutzungsanteil (EEG) (60% d. EEG-Umlage) vom Mieter		927	927	927	927
Einzahlungen Summe		409.856	411.890	448.088	450.314
Projektkonto					
Cash-Flow I: Originärer Zahlungsstrom		95.905	97.940	134.137	136.364
Verzinsung Projektkonto		0	480	660	671
Cash-Flow II: Bestandsänderung Projektkonto im lfd. Jahr		95.905	98.420	134.797	137.035
Saldo Projektkonto: Cash-Flow kumuliert		95.905	194.325	2.190.484	2.327.519
Wertermittlung					
Vervielfältiger		17,0	16,9	15,2	15,1
Verkehrswert (Jahresnettomiete*Vervielfältiger)		6.967.544	6.960.946	6.810.931	6.799.746
Nettoinventarwert (Net Asset Value - NAV)		1.045.978	1.351.042	6.499.270	6.799.746
<u>Investitionsendwert (bei Liquidation in der lfd. Periode) vor Steuern</u>		1.141.884	1.545.367	8.689.754	9.127.265

Abb. 373:

Aufbau eines Vollständigen Finanzplans
aus Eigentümerperspektive
(Prinzipschaubild)
Quelle: Eigene Darstellung

Der Finanzplan bildet im oberen Teil zunächst die periodisch anfallenden Ein- und Auszahlungen ab.¹⁵ Hierunter fallen als Auszahlungen die Finanzierung der Investition sowie die laufenden nicht umlagefähigen Betriebskosten. Als Einzahlungen werden hier die Mieteinzahlungen verbucht.

Der zweite Teil (*Zahlungsströme Konto Eigentümer*) bildet den eigentlichen Kern der Vollständigen Finanzplanung ab: Den derivativen Teil. Hierunter bildet der *Cash-Flow I* die Differenz zwischen laufenden Einnahmen und Ausgaben, also den Zahlungssaldo des laufenden Jahres, ab. Im *Cash-Flow I* werden damit als Ausgaben die laufenden Aufwendungen für Zins und Tilgung des Darlehens, die nicht umlagefähigen Kosten des Vermieters sowie als Einzahlung die Summe der Mieteinzahlungen berücksichtigt. Unter dem Titel *Verzinsung Projektkonto* wird ermittelt, welche Effekte sich für den Vermieter ergeben, wenn er die sich aus der Investition ergebenden Überschüsse am Kapitalmarkt anlegt bzw. die sich ergebenden Fehlbeträge durch Fremdkapitalaufnahmen decken muss. Aufgrund des dynamischen Charakters der Rechnung werden anschließend die Kapitalisierungseffekte von Überschüssen und Fehlbeträgen, die in den Folgeperioden am Kapitalmarkt angelegt oder durch eine Fremdkapitalaufnahme gedeckt werden müssen, errechnet und mit den Periodensalden saldiert (*Cash-Flow II*). Dabei bildet der *Cash-Flow II* nachrichtlich den Saldo von *Cash-Flow I* und *Verzinsung Projektkonto* ab, der *Cash-Flow II* kumuliert das Ergebnis der vollständigen Betrachtung der Investition in der laufenden Periode. Im Ergebnis werden alle mit der Investition in Verbindung stehenden Zahlungen inklusive der derivativen Zinsergebnisse (Zinseszinsrechnung) vollständig abgebildet.

Anschließend wird in der Tabelle die Berechnung der Wertveränderung der Immobilieninvestition abgebildet. Dazu wird eingangs der *Vervielfältiger* in den laufenden Perioden abgebildet. Der *Vervielfältiger* dient, wie zuvor beschrieben, der Ermittlung des Verkehrswerts der Immobilie. Der *Verkehrswert* ist, vereinfachend angenommen, das Produkt aus der Jahresnettomiete (*Summe Mieteinzahlungen*) und dem *Vervielfältiger*. Der *Nettoinventarwert* ergibt sich aus dem *Verkehrswert* abzüglich aller noch ausstehender *Fremdkapitalrestschulden*. Der *Investitionsendwert* (bei Liquidation in der laufenden Periode) wird aus der Summe des *Nettoinventarwerts* und der des kumulierten *Cash-Flow II* gebildet.

¹⁵ Eine zellenbasierte Erläuterung zu dem Vorgehen bei Vollständigen Finanzplänen ist bspw. zu finden bei Pfnür/Müller (2013: 66 ff.).

Zuletzt wird in den Tabellen die durchschnittliche Eigenkapitalverzinsung anhand der folgenden Formel berechnet:

$$EKR_{VoFi} = (L_n / EK_0)^{1/n} - 1$$

Wobei:

EKR_{VoFi} = Durchschnittliche Eigenkapitalrendite
(Interner Zinsfuß) der vollständigen Finanzplanung

L_n = Liquidationserlös beziehungsweise
Investitionsendwert in der Periode n

n = Nutzungsdauer der Investition in Jahren

EK_0 = Eigenkapital

Vollständige Finanzplanungen aus der Sicht von Mietern

Wie zuvor dargestellt, können die Vermieter- und die Mietersicht nicht isoliert betrachtet werden, da sie sich in ihren Effekten auf die Wirtschaftlichkeit beider Parteien kausal bedingen. Einerseits sind die Zahlungseingänge der Vermieter abhängig von der

Aufnahmefähigkeit des Marktes in Bezug auf die erforderlichen Mieten. Andererseits sind die Zahlungsausgänge der Mieter abhängig von der vom Vermieter zur Verfügung gestellten Fläche und dessen Eigenschaften sowie dem Mietpreis. Beispielhaft und zur Illustration der nachfolgenden Beschreibung der Berechnungen aus Mietersicht ist in folgender Abbildung exemplarisch ein vollständiger Finanzplan dargestellt.

Zunächst werden in dem Finanzplan aus Mietersicht die im Zeitverlauf anfallende Nettomiete sowie die prognostizierten Nebenkosten abgebildet. Die *Nettomietzahlung* ist dabei

VoFi Mieter – Variante: BEISPIEL						
Perioden (Betrachtungshorizont)	0	1	2	...	19	20
<u>Auszahlungen</u>						
Verwaltungskosten		-1.568	-1.568		-1.568	-1.568
Wartungs- und Instandhaltungskosten Gebäude		-47.358	-47.358		-47.358	-47.358
Wartungs- und Instandsetzungskosten PV		-250	-250		-250	-250
zus. Reinigungsaufwand Poly-Box		-2.082	-2.082		-2.082	-2.082
Kalte Nebenkosten/Betriebskosten (inkl. Grundsteuer)		-11.197	-11.197		-11.197	-11.197
Gas Netzbezug		0	0		0	0
Strom Eigennutzungsanteil (EEG) (60% d. EEG-Umlage)		-927	-927		-927	-927
Strom Netzbezug (Nutzer)		-26.007	-26.267		-31.109	-31.420
Mietzahlungen		-408.046	-410.086		-446.373	-448.605
Auszahlungen Summe		-497.435	-499.735		-540.864	-543.407
Projektkonto						
Cash-Flow I: Originärer Zahlungsstrom	-520.037	-497.435	-499.735		-540.864	-543.407
Verzinsung Projektkonto		0	-19.897		-528.363	-571.132
Cash-Flow II: Bestandsänderung Projektkonto im lfd. Jahr		-497.435	-519.633		-1.069.227	-1.114.539
Saldo Projektkonto: Cash-Flow kumuliert		-497.435	-1.017.068		-14.278.298	-15.392.836

Abb. 374:
Aufbau eines Vollständigen
Finanzplans aus Mietersicht
(Prinzipschaubild) Quelle: Eigene
Darstellung

das entsprechende Gegenstück zu den *Mieteinzahlungen* in der Vermieterperspektive. Die Wartungskosten betreffen die vom Mieter vertraglich übernommene Wartung der Anlagen zur Erzeugung von Wärme und ‚Kälte‘. Die *Energiekosten* zur Erzeugung von Wärme und ‚Kälte‘ sind das Produkt aus dem Energiebedarf des Gebäudes und dem Energiepreis in den jeweiligen Perioden für die in Anspruch genommene Nutzfläche. Für das Jahr $t = 1$ werden die in den Prämissen hergeleiteten Eingangsdaten angesetzt. Im Zeitverlauf wirken die herausgearbeiteten Energiepreissteigerungsraten sowie potentielle Mieterhöhungen auf die hier dargestellten Kostenstrukturen. Anschließend wird die Finanzplanung um Kapitalisierungseffekte vervollständigt. Dazu wird zunächst der *Cash-Flow I* als Saldo zwischen originären Einnahmen und Ausgaben gebildet. Dem

Umstand der Miete entsprechend gibt es für den Mieter aus finanzieller Perspektive nur einen Auszahlungssaldo. Dieser wird entsprechend dem hier zum Tragen kommenden dynamischen Investitionsrechnungskonzept durch verzinsliche Kapitalaufnahme finanziert. Der Betrag ist in der Zeile *Verzinsung Mietkonto* dargestellt. Am Ende werden alle mit der Investition in Verbindung stehenden Zahlungen inklusive Zinseszinsrechnungen vollständig abgebildet. Dabei bildet der *Cash-Flow II* nachrichtlich den Saldo von *Cash-Flow I* und *Finanzierungskosten Fremdkapital* ab und der *Cash-Flow II kumuliert* das Ergebnis der vollständigen Betrachtung der Nutzungskosten in der laufenden Periode.

Dem Zweck folgend, die Wirtschaftlichkeit alternativer energetischer Standards aus der Perspektive des Mieters zu interpretieren, bieten sich verschiedene Ergebnisgrößen an. Neben der Summe der Nutzungskosten im ersten Jahr wird der Endwert der Nutzungskosten nach 20 Jahren in den Ergebnissen als Größe verglichen (*Cash-Flow II kumuliert* am Ende des Betrachtungszeitraums).

4. Fallbeispiel und Berechnungsprämissen

Exkurs: Unterschied zur klassischen Lebenszykluskostenanalyse

In der ingenieurswissenschaftlichen Betrachtung von Gebäuden werden häufig auch Lebenszykluskostenanalysen (eng. Life Cycle Costing, LCC) durchgeführt. Bei Lebenszykluskostenrechnungen stehen die gebäudespezifischen Kostenstrukturen der Phasen Erstellung und Nutzung im Fokus der Analysen. Die Analysen zielen darauf ab, die objektspezifischen Gesamtkosten in den Phasen Erstellung- und Nutzung zu ermitteln. Damit wird regelmäßig der Zweck verfolgt, bei alternativen Handlungs-/Projektoptionen den Trade-Off zwischen Investitions- und Nutzungskosten als Grundlage für Investitionsentscheidungen zu ermitteln. Die Investitionskosten richten sich nach der DIN 276 (Kosten im Hochbau), die Nutzungskosten nach der DIN 18960 (Nutzungskosten). In der Regel werden LCC-Analysen auf die gebäudespezifischen Kostengruppen in Bau- und Betrieb verengt (vgl. 3.2). Entsprechend werden Kostenstrukturen, die aus der Perspektive immobilienwirtschaftlicher Akteure bei der Wahl zwischen alternativen Handlungsoptionen entscheidend sind, wie beispielsweise die Mietzahlungen, nicht berücksichtigt.

Exkurs: Rendite

Der Begriff der Rendite und dessen Verwendung in der Immobilienwirtschaft ist regelmäßig kompliziert und mit großen Missverständnissen über den Aussagegehalt dieser Kennzahl behaftet. Dazu trägt insbesondere bei, dass es eine kaum noch überschaubare Vielzahl an unterschiedlichen Definitionen und Berechnungsformen gibt, die in der immobilienwirtschaftlichen Praxis munter durcheinander verwendet werden. So macht es beispielsweise große Unterschiede ob ...

- ... von einer Rendite pro Jahr oder über die gesamte Projektdauer gesprochen wird,
- ... sich die Berechnung auf das eingesetzte Eigenkapital oder das Gesamtkapital bezieht,
- ... Grundstücks- und Nebenkosten in die Investitionssumme einbezogen worden sind,
- ... der Gewinn inflationsbereinigt (z.B. durch Indexierung aller Ein- und Auszahlungen) berechnet wurde,
- ... die Unsicherheit in der Prognose der Variablen des Projekterfolgs, die zu Risiken führen, durch Risikokosten bereinigt wurde oder nicht und wenn ja, in welchem Umfang das geschehen ist,
- ... die Transaktionskosten des Projektträgers in Form von Projektsteuerungs- und Vermögensverwaltungskosten in der Rechnung berücksichtigt wurden oder
- ... die Rendite vor oder nach Steuern berechnet wurde.

Neben der Vielzahl an unterschiedlichen Definitionen, erschweren in der immobilienwirtschaftlichen Praxis insbesondere die Interpretation und die Berechnungsmethodik der Rendite regelmäßig eine sachgerechte und realitätsnahe Diskussion der Berechnungsergebnisse.

4.1. Fallbeispiel

Typgebäude

Für die Analysen wird ein typisches Bürogebäude als Fallbeispiel ausgewählt. Das Bürogebäude hat eine Nutzfläche von rund 2.200 m², ein Bruttorauminhalt von circa 11.000 m³ (vgl. folgende Tab. 8) und steht in räumlicher Nachbarschaft zu anderen Gebäuden (vgl. folgende Abb. 375). Die Auswahl erfolgte auf Basis einer Analyse zur deutschen Gebäudetypologie (vgl. Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018a).

Systemkomponenten Solaraktiver Bauteile

Für die Analysen zu den finanziellen Effekten wurden in



Abb. 375:
Betrachtetes Typgebäude
Quelle: Wurzbacher; Drebes; Kuhn
(2018c)

Gebäudekennwerte

Grundstücksgröße	3.011 m ²
Nutzfläche	2.239 m ²
Bruttorauminhalt	11.244 m ³
Fassadenflächen	
Fassadenbruttofläche (je Nord/Ost/Süd/West)	521 m ²
Fassadenfläche (brutto inkl. Fenster – brutto gesamt)	2.082 m ²
Fassadennettofläche (je Nord/Ost/Süd/West)	364 m ²
Fassadenfläche (exkl. Fenster – netto gesamt)	1.458 m ²
Fensterflächen (je Nord/Ost/Süd/West)	156 m ²
Fensterfläche (gesamt)	625 m ²

Tab. 8:
Typologische Kennwerte des Gebäudes
Quelle: Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018c).

dem Projekt verschiedene Systemaufbauten entwickelt (vgl. „Dynamische Betrachtungen solaradaptiver polyfunktionaler Fassaden (Teil 4)“ S.101). Die verschiedenen Systemaufbauten für die Fassade bauen allesamt auf dem Polybox-Fassadensystem auf (vgl. ebd.), unterscheiden sich jedoch in der spezifischen Ausgestaltung des Systems (vgl. Abb. 353 (S.171)).

Grundsätzlich können drei verschiedenen Arten des Systemaufbaus unterschieden werden:

- Px-Fassadensystem/Polyboxen mit stehender Luftschicht,
- Px-Fassadensystem/Polyboxen mit zirkulierender Luftschicht sowie
- Hinterlüftete Px-Fassadensysteme/Polybox-Varianten (Sondertypen).

Die betrachteten Varianten unterscheiden sich ferner in der Dicke der Dämmung (0, 5, 10, 16 cm). Detaillierte Beschreibungen, auch zur Entwicklung des Fassadensystems sowie der energetischen und gestalterischen Möglichkeiten, sind bei Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018b) S.127 zu finden. Mit allen Fassadenaufbauten werden die Anforderungen der gültigen EnEV erfüllt (vgl. hierzu auch das folgende Kapitel).

Energetische Kennwerte alternativer Standards

Bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen alternativer energetischer Standards, in diesem Fall zusätzlich solaraktivierter Fassaden, sind zunächst die auf Gebäudeebene durch die energetischen Maßnahmen erzielten Energiegewinne und -verbräuche relevant. In den in dieser Arbeit angestellten Analysen sind die energetischen Qualitäten und Kennwerte von dem Projektpartner, das Fachgebiet Entwerfen und nachhaltiges Bauen der TU Darmstadt, ermittelt worden. In der Entwicklung und Bilanzierung wurden die verschiedenen Polybox-Fassadenvarianten darauf ausgelegt die Anforderung der EnEV zu erfüllen und die thermische Behaglichkeit sicherzustellen (vgl. Wurzbacher; Drebes; Kuhn 2018c). In der Basisvariante wurde lediglich die Dachfläche mit PV ausgerüstet (20 %). In den Szenarien S1 - S9 und S11 wurden rund 38 % der Fassadenfläche und 20 % der Dachfläche mit PV belegt (vgl. folgende Tabelle). Hieraus resultieren aus den energetischen Betrachtungen des Typgebäudes unter Berücksichtigung der alternativen Fassadenvarianten die in folgender Tabelle zusammengefassten Kennwerte. Wie in der Tabelle 5 (S.192) dargestellt ist, ist der Jahresstromertrag in den Szenarien S1 – S9 und S11 identisch, aber aufgrund der größer dimensionierten PV-Anlage höher als

in dem Basisfall. In den Szenariofällen kommen die Analysen zu unterschiedlichen Ergebnissen in der Energiebilanz sowie Strombilanz, je nachdem wie die Fassade konzipiert ist (vgl. Abb. 353 (S.171)). Hier zeigt sich beispielsweise, dass der Netzbezug Strom je nach Fassadenvariante zwischen 115.131 und 88.186 kWh/a sehr unterschiedlich ausfallen kann. Die hier dargestellten energetischen Kennwerte sind Eingangsdaten für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen in Kapitel 5 (S.261) der vorliegenden Arbeit. Dort wird auch eruiert, inwieweit sich diese Ergebnisse auf die akteursspezifische Wirtschaftlichkeit auswirken wird in Kapitel 5 (S.261) erörtert. Zunächst sind neben den Energiebedarfen die Kostenstrukturen für die erforderlichen Investitionsbedarfe zu ermitteln. Dies geschieht im folgenden Abschnitt.

4.2. Kostenstrukturen

Kostenstrukturen – Ermittlung der Kapitalbedarfe / Investitionskosten für die solaraktiven Bauteile

Die Kostenstrukturen für die solaraktiven Bauteile wurden auf Grundlage der konstruktiven Planung der Fassadensysteme und der daraus resultierenden Massen mithilfe von gängigen Baukostendatenbanken analysiert. Für die Analysen wurde auf die Baukostendatenbank des Baukosteninformationszentrums deutscher Architektenkammern (BKI) sowie auf die Baukostendatenbank DBD zurückgegriffen.

Aufgrund des gewählten Vergleichs mit einer hinterlüfteten Standard-Fassade mit Alu-Kassette zeigt die folgende Tabelle einerseits die Kostenstrukturen für Basis-Variante (Betonwand, mineralische Dämmung, Alu-Kassette) mit einer Photovoltaikanlage auf dem Dach (summiert unter „Basis m.PV“). Andererseits werden die Kostenstrukturen der Polybox-Fassadenvarianten im Vergleich dargestellt. Hierfür werden zunächst im oberen Bereich der Tabelle die Kosten für die Standard-Variante in Abzug gebracht, um hierauf folgend im unteren Bereich die spezifischen Kosten für die Polybox-Varianten und die Kosten für PV zu ermitteln. Im Ergebnis werden auf diese Weise die spezifischen Kosten für die Fassaden-Varianten und die Kostendifferenzen dargestellt.

Die Auswertungen zeigen zunächst, dass die Polybox-Fassadenvarianten in allen Fällen zu höheren Investitionsbedarfen auf Gebäudeebene führen. Dies ist einerseits bedingt durch die zusätzliche Fläche installierter PV-Anlage an der Fassade (plus 547 m²). Andererseits ist die Polybox-Fassade grundsätzlich teurer als die zum Vergleich gewählte Standard-Fassade, weil sowohl in Summe mehr als auch zudem teurere Materialien verwendet werden – beispielsweise Glas anstatt Aluminiumkassetten als gebäudeabschließende Schicht.

An dieser Stelle ist jedoch kritisch anzufügen, dass die Polyboxfassade mit einer besonders günstigen Fassadenvariante verglichen wird. Im Neubau von Bürogebäuden werden durchaus auch andere Fassadensysteme eingesetzt, die deutlich teurer sind als die für den Vergleich gewählte Alu-Kassette. Die dargestellten Differenzen fallen damit nur für den gewählten Vergleich in dieser Höhe aus. Ferner besteht ein Kostenoptimierungspotential bei den Polyboxvarianten S1-S7, S9, S11, wenn auf die Betonwand hinter der Polybox verzichtet wird, wie die Variante S8 zeigt.

Die Kostenstrukturen sind auf den Kostenstand Q3/2016 indexiert. Da die Eingangsdaten einer gewerblichen Betrachtung folgen, ist die für Endverbraucher gesetzlich vorgeschriebene Mehrwertsteuer nicht berücksichtigt.

Bauteil	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
Außenwandbekleidung (außen) Metalltafel Aluminium D 2mm				
UK Alu hinterlüft. Außenwandbekl.	56.559	-56.559	-56.559	-56.559
Wärmedämmung Außenwand MW 0,040W/mK D 160mm WAB	48.679	-48.679	-48.679	-48.679
Außenwandbekl. Alu-Tafel D 3mm	77.737	-77.737	-77.737	-77.737
Außenwand Betonfertigteil (Vollwandtafel)				
Wandtafel Fertigteil Vollwandtafel	66.727	-66.727	-66.727	-66.727
Bewehrungsstahl	794	-794	-794	-794
Außenwandbekleidung (innen) Beton Putz PIV gefilzt	27.678	-27.678	-27.678	-27.678
Innenwandbekleidung Farbbeschichtung Dispersionsfarbe	7.149	-7.149	-7.149	-7.149
Basis – Kosten transparenter Bauteile Fassade				
Fenster Kunststoff 1tig. B 1020 mm H 1390 mm, inkl.Aussenfensterbank	226.383	-226.383	-226.383	-226.383
Außenjalousie/Raffstore Einzelanlage B 1050mm H 1400mm Behang Alu bandbesch Antrieb Elektromotor	76.920	-76.920	-76.920	-76.920
Innenfensterbank Holzwerkstoff melaminbesch B 25cm D 25mm L 2,5m	34.045	-34.045	-34.045	-34.045
Px – Kosten für Px-Varianten opake Bauteile				
Außenwand Betonfertigteil (Vollwandtafel)				
Wandtafel Fertigteil Vollwandtafel	-	66.727	66.727	66.727
Bewehrungsstahl	-	794	794	794
Außenwandbekleidung (innen) Beton Putz PIV gefilzt	-	27.678	27.678	27.678
Innenwandbekleidung Farbbeschichtung Dispersionsfarbe	-	7.149	7.149	7.149
Innenwandbekleidung Farbbeschichtung Lack	-	0	0	0
Konstruktion				
Außenwand tragend Rahmen Furnierschichtholz B/H 6/12cm Achsabstand 60-62,5cm H 2,5-3m Beplankung innen, ohne Dämmung	-	232.553	0	0
Außenwand tragend Rahmen Furnierschichtholz B/H 6/12cm Achsabstand 60-62,5cm H 2,5-3m Beplankung innen/außen, Zellulosedämmung 10 cm	-	0	295.865	0
Außenwand tragend Rahmen Furnierschichtholz B/H 6/12cm Achsabstand 60-62,5cm H 2,5-3m Beplankung innen/außen, Zellulosedämmung 16 cm	-	0	0	317.750
Mechanik und klappen für zirkulierende Luftschicht	-	0	0	0
Solaraktivierung				
Solarpanel Kristalin mit Wechselrichtern, Dach	9.331	9.331	9.331	9.331
Solarpanel Kristalin mit Wechselrichtern	0	98.386	98.386	98.386
Solarpanel Organisch mit Wechselrichtern, Fassade	0	0	0	0
Solarpanel Organisch mit Wechselrichtern, Fassade	0	0	0	0
Px – Kosten transparenter Bauteile Fassade				
Fenster Kunststoff 1tig. B 1020 mm H 1390 mm, inkl.Aussenfensterbank	0	226.383	226.383	226.383
Außenjalousie/Raffstore Einzelanlage B 1050mm H 1400mm Behang Alu bandbesch Antrieb Elektromotor	0	76.920	76.920	76.920
Innenfensterbank Holzwerkstoff melaminbesch B 25cm D 25mm	0	34.045	34.045	34.045
Verglasung ESG Polybox Gebäudeabschluss ink. Befestigung	0	285.975	285.975	285.975
Summe	632.004	1.065.942	1.129.254	1.151.139
Differenz zur Variante Basis m.PV		443.269	506.580	528.465
300 Bauwerk - Baukonstruktionen (ohne Planungskosten)	622.673	958.225	1.021.537	1.043.422
400 Bauwerk - Technische Anlagen in der Fassade (ohne Planungskosten)	9.331	107.717	107.717	107.717
Differenz pro qm Fassadenfläche opake Bauteile		512	542	553

Tab. 9:
Kostenstrukturen der Fassadenvarianten auf Gebäudeebene
Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von BK1 (2017) und Dr. Schiller und Partner GmbH (2011)

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
-56.559	-56.559	-56.559	-56.559	-56.559	-56.559	-56.559
-48.679	-48.679	-48.679	-48.679	-48.679	-48.679	-48.679
-77.737	-77.737	-77.737	-77.737	-77.737	-77.737	-77.737
-66.727	-66.727	-66.727	-66.727	-66.727	-66.727	-66.727
-794	-794	-794	-794	-794	-794	-794
-27.678	-27.678	-27.678	-27.678	-27.678	-27.678	-27.678
-7.149	-7.149	-7.149	-7.149	-7.149	-7.149	-7.149
-226.383	-226.383	-226.383	-226.383	-226.383	-226.383	-226.383
-76.920	-76.920	-76.920	-76.920	-76.920	-76.920	-76.920
-34.045	-34.045	-34.045	-34.045	-34.045	-34.045	-34.045
66.727	66.727	66.727	66.727	0	66.727	66.727
794	794	794	794	0	794	794
27.678	27.678	27.678	27.678	0	27.678	27.678
7.149	7.149	7.149	7.149	0	7.149	7.149
0	0	0	0	15.887	0	0
232.553	0	0	0	0	0	0
0	295.865	0	0	295.865	0	295.865
0	0	317.750	317.750	0	0	0
52.500	52.500	52.500	52.500	52.500	52.500	0
9.331	9.331	9.331	9.331	9.331	9.331	9.331
98.386	98.386	98.386	98.386	98.386	98.386	98.386
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0
226.383	226.383	226.383	226.383	226.383	226.383	226.383
76.920	76.920	76.920	76.920	76.920	76.920	76.920
34.045	34.045	34.045	34.045	34.045	34.045	34.045
285.975	285.975	285.975	285.975	285.975	285.975	285.975
1.118.442	1.181.754	1.203.639	1.203.639	1.095.292	885.889	1.129.254
495.769	559.080	580.965	580.965	472.619	263.216	506.580
1.010.725	1.074.037	1.095.922	1.095.922	987.575	778.172	1.021.537
107.717	107.717	107.717	107.717	107.717	107.717	107.717
537	568	578	578	526	425	542

Kostenstrukturen – Ermittlung der Investitionskosten auf Gebäudeebene

Aus der Perspektive immobilienwirtschaftlicher Akteure sind die Gestehungskosten des Gebäudes entscheidend, wenn die finanziellen Effekte realitätsnah ermittelt werden sollen. Entsprechend wurden für das Projekt die Kostengruppen 100-700 der DIN 276 betrachtet. Für den Erwerb des Grundstücks (KG 100) und das Herrichten und Erschließen (KG 200) wurden für jedes Gebäude in Summe rund 1,2 Millionen Euro angesetzt. Die Außenanlagen (KG 500) wurden ebenfalls mit rund 1 Million Euro veranschlagt. Die Baunebenkosten (KG 700) werden mit 19 % der zuvor ermittelten Kostengruppen 300 und 400 (Baukonstruktion) angesetzt. Die folgende Tabelle zeigt die spezifischen Gestehungskosten der verschiedenen Varianten.

Für den betrachteten Gebäudetyp ergeben sich somit bei dem Einsatz einer Polyboxfassade im Vergleich zu einer Basisvariante mit einer Alukassette mindestens zusätzliche Kosten in Höhe von 1.040.000 € (S9). Je nach Ausgestaltung können die Kostendifferenzen bei dem Beispielgebäude auch bis zu 1,4 Millionen Euro betragen.

Baukosten Übersicht	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
100 Grundstück	903.402	903.402	903.402	903.402
200 Herrichten und Erschließen	306.000	306.000	306.000	306.000
300 Bauwerk - Baukonstruktionen	3.493.153	4.451.378	4.514.690	4.536.575
400 Bauwerk - Technische Anlagen	1.251.976	1.350.362	1.350.362	1.350.362
500 Außenanlagen	1.005.400	1.005.400	1.005.400	1.005.400
600 Ausstattung und Kunstwerke	0	0	0	0
700 Baunebenkosten	901.575	1.102.331	1.114.360	1.118.518
Summe	7.861.506	9.118.873	9.194.214	9.220.257
Differenz	0	1.257.367	1.332.708	1.358.751

Tab. 10:
Gestehungskosten alternativer Bürogebäude mit solaraktiver Fassade
Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von BKI (2017) und Dr. Schiller und Partner GmbH (2011)

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
903.402	903.402	903.402	903.402	903.402	903.402	903.402
306.000	306.000	306.000	306.000	306.000	306.000	306.000
4.503.878	4.567.190	4.589.075	4.589.075	4.480.729	4.271.325	4.514.690
1.350.362	1.350.362	1.350.362	1.350.362	1.350.362	1.350.362	1.350.362
1.005.400	1.005.400	1.005.400	1.005.400	1.005.400	1.005.400	1.005.400
0	0	0	0	0	0	0
1.112.306	1.124.335	1.128.493	1.128.493	1.107.907	1.068.121	1.114.360
9.181.348	9.256.689	9.282.732	9.282.732	9.153.800	8.904.610	9.194.214
1.319.842	1.395.183	1.421.226	1.421.226	1.292.294	1.043.104	1.332.708

4.3. Berechnungsprämissen

Zur Berechnung finanzieller Effekte sind neben den energetischen Standards solaraktiver Fassadenelemente und den Kostenstrukturen weitere Annahmen zu treffen. Diese werden in diesem Kapitel erarbeitet. Hierfür wird insbesondere auf qualifizierte öffentliche Statistiken, wie beispielsweise vom Statistischen Bundesamt, sowie auf Angaben aus als zuverlässig erachteten Datenbanken und Studien zurückgegriffen. Ein bestehender Informationsmangel und die vereinfachte Betrachtung machen es zum Teil notwendig, eigene Annahmen zu treffen beziehungsweise zur Komplexitätsreduktion Durchschnittswerte für einige Eingangsdaten zur Berechnung zu bilden. Den in dieser Arbeit angestellten Investitionsrechnungen liegen im Einzelnen die nachfolgend aufgeführten Prämissen zugrunde.

Finanzierung und kalkulatorische Zinssätze

Für die Berechnungen sind hinsichtlich der Finanzierung und der kalkulatorischen Zinssätze einige Annahmen zu treffen, die im Folgenden ausgeführt werden: Zunächst wird davon ausgegangen, dass der Investor für die Neubauvariante Eigenkapital in Höhe von 30 % der Investitionssumme, bestehend aus den Kostengruppen KG 100 (Grundstück), KG 300 (Bauwerk – Baukonstruktion), KG 400 (Bauwerk – Technische Anlagen), 500 (Außenanlagen) und 700 (Baunebenkosten), tragen kann. Das für die Investition darüberhinausgehende Kapital wird in den Berechnungen über ein Annuitätendarlehen bereitgestellt. Dieses hat einen Fremdkapitalzinssatz in Höhe von 3,0 % bei einer Zinsbindungsfrist und Laufzeit von 20 Jahren und wird anfänglich mit 2,0 % getilgt.

Auf der Ebene des Projektkontos wird für Eigentümer und Mieter mit einem Sollkosten-Zinssatz (Nachfinanzierung eines negativen Cash-Flows) in Höhe von 4,0 % gerechnet. Es wird angenommen, dass ein Eigentümer positive Erträge kurzfristig in alternative Immobilienprojekte mit einem Zinssatz in Höhe von 0,5 % anlegen kann.

Gegenstand	Wert	Einheit
Eigenkapital-Quote	30,0%	per anno (p.a.)
Fremdkapital-Zinssatz (Soll, für 20 Jahre fest)	3,0%	p.a.
Anfängliche Tilgung	2,0%	p.a.
Soll Zinssatz laufend Eigentümer / Mieter Projektkonto	4,0%	p.a.
Haben Zinssatz laufend Projektkonto (Anschlussinvestition)	0,5%	p.a.
Kalkulationszinssatz (Diskontierungzinssatz)	4,0%	p.a.

Tab. 11:
Annahmen zur Finanzierung und zu
kalkulatorischen Zinssätzen
Quelle: Eigene Annahmen

Indizes der Preisentwicklung

Von der Anwendung einer allgemeinen Preissteigerungsrate, beispielsweise anhand der Preissteigerungsrate für Waren und Dienstleistungen des statistischen Bundesamts (Inflationsrate), wurde hier, anders als in vielen anderen Studien üblich, aus Gründen mangelnder Genauigkeit dieses Vorgehens, verzichtet. Stattdessen sind die Preissteigerungen in den jeweiligen Zahlungsreihen differenziert betrachtet. So ist davon auszugehen, dass sich die Preise in Energie, auch in Abhängigkeit vom Energieträger, über die Inflationsrate hinaus entwickeln werden. Diese Preissteigerung wird in den Berechnungen mit folgenden Annahmen berücksichtigt.

Gegenstand	Wert	Einheit
Inflation	0,0%	p.a.
Energiekostensteigerung Strom, oberhalb Inflation	1,0%	p.a.
Betriebskostensteigerung (= Inflation)	0,0%	p.a.

Tab. 12:
Annahmen zu den Indizes der Preisentwicklung
Quelle: Eigene Annahmen

Miete

Der Zweck der Berechnungen ist es, die finanziellen Effekte unterschiedlicher energetischer Qualitäten im Büroneubau transparent zu machen. Die für die Refinanzierung des Investments erforderliche Netto-Anfangsmiete der verschiedenen energetischen Qualitäten wird in den Berechnungen für die finanziellen Effekte der Polyboxvarianten über eine Zielwertsuche eruiert. In der Basisvariante mit PV mit Alukassetten-Fassade dient zur Ermittlung der Eigenkapitalrendite eine Netto-Anfangsmiete von 11,42 €/m². In den Berechnungen wird davon ausgegangen, dass der Vermieter die Mieterträge pro Jahr um 0,5% ab dem ersten Jahr aufgrund eines Staffelmietvertrages und von Neuvermietungen steigern kann.

Gegenstand	Wert	Einheit
Nettoanfangsmiete im Basisfall m.PV	11,4	€/m ² Wfl./Monat
Nettoanfangsmiete Polyboxvarianten (Ergebnis aus Zielwert VoFi-EkR)	[Zielwert]	€/m ² Wfl./Monat
Mietsteigerung	0,5	% p.a.

Tab. 13:
Annahmen zur Miete
Quelle: Eigene Annahmen

Betriebs und Verwaltungskosten

Nach der Errichtung des Gebäudes fallen im Zuge der Nutzung des Gebäudes Betriebs- und Verwaltungskosten an. Verwaltungskosten werden mit 1 Euro pro Quadratmeter pro Jahr angesetzt. Im Falle der Vermietung entfallen hiervon 70 % auf den Mieter. Die Wartungs- und Instandhaltungskosten werden mit dem üblichen Satz von einem Prozent der Investitionskosten für die Kostengruppen 300 und 400 angesetzt. Für die PV werden Wartungs- und Instandhaltungskosten in Höhe von 5 Euro pro Kilowatt pro Jahr angesetzt. Für die Polybox wird ein zusätzlicher Reinigungsaufwand in Höhe von einem Euro pro Quadratmeter und Jahr veranschlagt. Kalte Betriebskosten werden in Höhe von 5 Euro pro Quadratmeter im Jahr angesetzt. Der den Berechnungen zugrundeliegende Strompreis beträgt 24,5 Cent kWh, der Eigennutzungsanteil der EEG Umlage wird mit 0,028 € pro kWh veranschlagt (60 % der EEG-Umlage).

Gegenstand	Wert	Einheit
Verwaltungskosten	1,0	€/m ² ·a
bei Vermietung trägt der Mieter anteilig ... der Verwaltungskosten	70,0	%
Wartungs- und Instandhaltungskosten Gebäude der KG 300/400	1,0	%/a
Wartungs- und Instandsetzungskosten PV	5,0	€/kW/a
zus. Reinigungsaufwand Poly-Box	1,0	€/m ² ·a
Kalte Nebenkosten/Betriebskosten (inkl. Grundsteuer)	5,0	€/m ² ·a
Energiebilanz		
Strom Netzbezug (Nutzer)	0,245	€/kWh
Strom Eigennutzungsanteil (EEG) (60% d. EEG-Umlage)	0,028	€/kWh

Tab. 14:
Annahmen zu den Betriebs- und Verwaltungskosten
Quelle: Eigene Annahmen

Die Einspeisevergütung für die Stromerzeugung wird entsprechend § 48 EEG bei einer installierten Leistung von bis 40 KW mit 12,36 Cent pro Kilowattstunde und bei einer Anlage mit einer installierten Leistung von bis zu 750 Kilowatt mit 11,09 Cent pro Kilowattstunde angesetzt.

Wertermittlung der Immobilien / Degression PV-Ertrag

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnungen von Immobilieninvestitionen ist es zwingend notwendig, neben den laufenden Cash-Flows auch die Wertentwicklung des Objektes zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck kommt in der Immobilienwirtschaft, wie auch in der Unternehmensbewertung, regelmäßig ein Multiplikator/Faktor zur Anwendung. Der Wert der Immobilie ergibt sich aus der Multiplikation der Summe der Nettomieten mit eben diesem Multiplikator/Faktor (vgl. Pfnür 2011: 98). Für die Berechnungen wird vereinfacht ein durchschnittlicher Multiplikator/Faktor in Höhe von 17 für die betrachteten Objekte als Ausgangswert angenommen. In den Investitionsrechnungen wird angenommen, dass der Vervielfältiger im Zuge der Zeit in Höhe von 0,1 p.a. abnimmt da der mit dem Neubau aufgebaute Wert im Laufe der Zeit durch Verschleiß und sonstige Altersbedingte Entwertungen wie technischen Fortschritt und modische Änderungen kontinuierlich aufgezehrt wird.

Exkurs: Multiplikator

Der Multiplikator/Faktor ist demnach als Verzinsungsanspruch eines Wirtschaftssubjekts, das eine Investitionsentscheidung zu treffen hat, definiert. Dieser Anspruch richtet sich nach dem risikofreien Zins einer der Zahlungsstruktur nach identischen Kapitalanlage plus einem Risikoaufschlag/-abschlag für das Risiko beziehungsweise das Potenzial der Investition. Bei Immobilieninvestitionen bemisst sich der Risikoaufschlag einerseits nach der relativen Miethöhe im Vergleich zum Teilmarkt, in dem sich das Objekt bewegt, und andererseits anhand einer Vielzahl weiterer Faktoren. So werden schlecht instand gehaltene Objekte, Objekte mit hohen Nebenkosten, Objekte mit wenig zukunftsfähigen Ausstattungsmerkmalen oder Objekte mit Mietern, die hohe Mietrückstände aufweisen beziehungsweise produzieren mit vergleichsweise niedrigeren Multiplikatoren/Faktoren bewertet, wenn in diesen immobilienwirtschaftlichen Tatbeständen Risiken für den Investor verborgen sind.

Um die über den Zeitraum reduzierte Leistungsfähigkeit der PV-Anlage abzubilden, wird eine Ertragsdegression vom 0,30 % p.a. angesetzt.

Betrachtungszeitraum

Wertermittlung Immobilie/Degression PV-Ertrag	Wert	Einheit
Vervielfältiger (Ausgangswert)	17	-
Vervielfältiger Degression	0,1	p.a.
PV-Ertrag Degression	0,30%	p.a.

Tab. 15:
Annahmen zur Wertermittlung und
Degression
Quelle: Eigene Annahmen

In den Berechnungen wird ein Betrachtungszeitraum von 20 Jahren abgebildet.

Steuern und Fördermittel

In den Berechnungen wurden steuerliche Aspekte nicht berücksichtigt. Eine Behandlung der steuerlichen Auswirkungen ist im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der sehr unterschiedlichen Eigentümer- und Nutzergruppen nicht zu leisten. Eine um diesen Aspekt erweiterte Modellberechnung ist bei Bedarf einer höheren Genauigkeit der Aussagen zu empfehlen. In den Berechnungen werden die Einflüsse möglicher Fördermittel nicht berücksichtigt.

Abschließende Bemerkungen zu der finanzwirtschaftlichen Modellierung

Die oben dargestellte Herangehensweise der finanzwirtschaftlichen Modellierung mittels Vollständiger Finanzpläne sowie die auf Investitionswerte und Renditen ausgelegte Berechnung von Bewertungskriterien unterstellt, dass der Investor seine Entscheidung einzig und allein nach finanzwirtschaftlichen, Cash-Flow-basierten Kriterien trifft. Sollten sich durch die Wahl der Fassadenvariante Effekte auf andere mögliche Entscheidungsgrößen wie beispielsweise Sozialprestige und den damit einhergehenden Zahlungsbereitschaften ergeben, so werden diese zunächst bei der Entscheidungsfindung annahmegemäß nicht berücksichtigt.

Naturgemäß findet jede Bauinvestition in der Realität unter Unsicherheit über die zu erwartenden Zahlungsströme statt. Diese Unsicherheit ist die Quelle von Investitionsrisiken, die man methodisch zwar grundsätzlich gut bewerten kann, allerdings rechtfertigt an dieser Stelle der dazu nötige Aufwand nicht den entstehenden Nutzen.

Um die grundsätzlichen Wirkungen von Unsicherheit beispielsweise über Energiepreisentwicklungen oder die Entwicklung von Zinsen auf die Robustheit der Berechnungsergebnisse zu verdeutlichen, werden in Kapitel 5.3 (S.268) Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

5. Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalysen zum Einsatz solaraktiver Bauteile

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen vorgestellt. Entsprechend der verschiedenen immobilienwirtschaftlichen Perspektiven werden Ergebnisse für die jeweilige Akteuresgruppe dargestellt. Ferner werden vollständigkeithalber die Ergebnisse klassischer Lebenszykluskostenanalysen aufgeführt.

5.1. Objektspezifische Wirtschaftlichkeit bei einer klassischen Lebenszykluskostenanalyse

In Kapitel 2.2 (S.201) konnte gezeigt werden, dass in der gebäudespezifischen Bewertung im Kontext der Energiewende alternative Bewertungsansätze vorhanden sind. In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse des ingenieurstechnisch geprägten Ansatzes der Lebenszykluskostenanalyse (LCC) dargestellt werden. In dieser werden nach VDI 2067 grundsätzlich nur die Herstellungskosten für die Kostengruppen 300 (Bauwerk – Baukonstruktionen) und 400 (Bauwerk – Technische Anlagen) sowie die im Betrieb anfallenden Kostenstrukturen über den Lebenszyklus bzw. einem angenommenen Zeitraum betrachtet. Grundsätzlich werden in den Berechnungen nach der Erstinvestition periodengerecht anfallenden energie- und nutzungsrelevanten Ausgaben potentiellen Energie-Erträgen durch die PV gegenübergestellt. Mietzahlungen, Fremdfinanzierungskosten oder Effekte aus einer immobilienbezogenen Wertermittlung sind explizit nicht Gegenstand dieser objektspezifischen Betrachtung. Aus den angestellten Lebenszykluskostenanalysen leitet sich folgendes Ergebnis für die alternativen Varianten ab: Die Lebenszykluskostenbetrachtungen zu dem Typgebäude zeigen zunächst, dass sich die spezifischen Nutzungskosten unterscheiden, wenn auch nur geringfügig. In den betrachteten Fällen unterscheiden sich die Nutzungskosten zugunsten der Polybox-Varianten – je nach System - um 34 bis 8.534 Euro pro Jahr. Bezogen auf den qm/Monat reduziert sich dieser Betrag auf max. 32 ct. Grundsätzlich zeigen die Analysen daher, dass die gegenwärtig geforderten energetischen Qualitäten einer Fassade (denen die Basisvariante entspricht) schon so hoch sind, dass sich auch vermeintliche Verbesserungen in den Nutzungskosten kaum noch bemerkbar machen. Die Kostenvorteile in den

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
Klassische LCC Betrachtung – nur KG 300/400/700				
Barwert (DCF) der Lebenszykluskosten (20 J)	-6.891.348	-8.148.129	-8.149.522	-8.169.903
Δ Barwert (DCF) der Lebenszykluskosten ggü. Basis m.PV	0	-1.256.782	-1.258.174	-1.278.555
Nutzungskosten LCC (Cash-Flow I) im ersten Jahr	-89.123	-89.024	-83.942	-83.553
Durchschnittliches Δ Nutzungskosten LCC d. nächsten 20 Jahre p.a.	0	34	5.534	5.955
Paybackperioden in Jahren des Δ Investitionskosten durch Δ Nutzungskosten LCC	-	36729	241	228

Tab. 16:
Ergebnisse von Lebenszykluskosten-
analysen
Quelle: Eigene Berechnungen.

Polyboxvarianten sind zu einem großen Teil auf den Stromertrag zurückzuführen, der in der Variante Basis mit PV nicht angesetzt werden kann, weil hier keine solaraktivierten Fassadenmodule eingesetzt werden (vgl. hierzu auch Kapitel 4.1 (S.248)). In diesem Kontext zeigen die Anlaser jedoch, dass die in der Nutzungsphase bestehenden Kosten-Vorteil der Polybox-Fassadenvarianten den höheren Investitionskosten gegenüberstehen. Im Endeffekt fallen die Barwertbetrachtungen der Lebenszykluskosten deutlich zugunsten der Basisvariante mit einer PV auf dem Dach aus. Das Ergebnis zeigt sich in anderer Weise, wenn die Paybackperioden der Kostenersparnisse in der Nutzungsphase den Investitionskosten der verschiedenen Varianten gegenübergestellt werden. Die Paybackperioden für die Polybox-Varianten liegen deutlich über den Lebenszyklen der einzelnen Bauteile (>160 Jahre). Damit ist in dem gewählten Vergleich die hochqualitative Fassadenvariante (Polybox) der kostenoptimierten Fassade aus Alukassetten in Bezug auf die finanziellen Effekte unterlegen. Der Vergleich würde gleichwohl bei der Wahl einer anderen Bezugsvariante (bspw. Glasfassade, Sandstein, Sichtbeton, etc.) anders ausfallen, weil mit anderen Bezugsvarianten andere, höhere Kostenstrukturen einhergehen.

5.2. Finanzielle Effekte aus der Perspektive von Vermietern und Mietern bei einer Anpassung der Nettomieten an Renditeerwartungen vermietender Eigentümer

Die finanziellen Effekte von Investitionen in Gebäude für Eigentümer (Vermietern) und Mietern bedingen sich in zweierlei Hinsicht (vgl. Kapitel 3.4 (S.239)): Einerseits steht die zur anvisierten Eigenkapitalrendite erforderliche Netto-Anfangsmiete in Abhängigkeit von den Gestehungskosten des Projektes (Investitionskosten). Andererseits steht die Eigenkapitalrendite in Abhängigkeit von der am Markt nachhaltig

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
-8.170.066	-8.199.881	-8.228.521	-8.193.197	-8.097.878	-7.890.032	-8.109.187
-1.278.719	-1.308.533	-1.337.174	-1.301.849	-1.206.530	-998.684	-1.217.839
-86.238	-83.110	-83.288	-80.861	-83.171	-86.012	-81.170
3.049	6.435	6.242	8.869	6.369	3.294	8.534
433	217	228	160	203	317	156

erzielbaren Miete. Vor diesem Hintergrund sowie um die direkten Abhängigkeiten zwischen Eigentümern und Mietern offen zu legen, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen gemeinsam betrachtet. Die durchgeführten Berechnungen folgen der Prämisse, dass ein Investor/Eigentümer eine – für alle alternativen Standards identische – Zielrendite erreichen möchte, die unter den gegebenen Rahmenbedingungen in der Basis-Variante zu erreichen ist. Die Variable in den Berechnungen ist damit die zur Erreichung der Zielrendite erforderliche Anfangs-Nettomiete. Damit folgen die Berechnungen grundsätzlich der folgenden Frage:

„Welchen Betrag muss ein Eigentümer mit den Mieterträgen erzielen, um bei ansonsten unveränderlichen Eingangsdaten in die Investitionsrechnung eine unter allen Varianten identische Rendite zu erreichen? Und was bedeutet dies finanziell für den einzelnen Mieter?“

Hinter dieser Frage liegt damit die grundsätzliche Annahme, dass ein Eigentümer mit einer Immobilienprojektinvestition ein ökonomisches Ziel verfolgt, welches sich in einer Zielrendite ausdrückt.¹⁶ Die Zielrendite des Eigentümers wird unter anderem von den Gestehungskosten, den Fremdkapitalkosten und in besonderem Maße von den Mieterträgen beeinflusst. Da ein Investor in der Regel diese Zielrendite nicht nach dem Standard der Fassade anpasst, sind die Zielrenditen über die betrachteten Varianten identisch (siehe dazu auch den Exkurs zur Rendite in Kapitel 3.4 (S.239)).

Die Berechnungen folgen damit dem ökonomischen Kalkül, dass ein Eigentümer Projekte nur dann entwickelt, wenn er eine gewisse Zielrendite mit den Projekten realisieren kann. Die Berechnungen analysieren daher die sich aus diesem Kalkül ergebenden finanziellen Effekte für die Nutzer. Auf der Nutzerseite werden neben den erforderlichen Nettomietkosten, die kalten Nebenkosten/Betriebskosten ebenso dargestellt wie die warmen Betriebskosten, die sich aus den Eingangsdaten ableiten. In Summe können damit die Nutzungskosten pro Variante abgebildet werden, die ein Mieter zu tragen hätte, wenn ein Eigentümer eine entsprechende Zielrendite erreichen möchte. Die durchgeführten Berechnungen kommen zu den folgenden Ergebnissen:

16 vgl. Kapitel 3.2.2

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
Investitionskosten				
Gestehungskosten/Investitionssumme	7.861.506	9.118.873	9.194.214	9.220.257
Δ zu Basis m.PV (KG 300/400 inkl. Planungskosten KG 700)	0	-1.257.367	-1.332.708	-1.358.751

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
VoFi Vermieter – Variante:				
Eigenkapitalbedarf	2.358.452	2.735.662	2.758.264	2.766.077
Δ Eigenkapitalbedarf	0	377.210	399.812	407.625
Investitionsendwert (20 J)	6.021.307	6.982.634	7.047.075	7.061.149
Δ Investitionsendwert ggü. Basis m.PV	0	-961.327	-1.025.768	-1.039.842
Barwert (DCF) der Investition	2.661.432	3.086.341	3.114.824	3.121.045
Δ Barwert (DCF) ggü. Basis m.PV	0	-424.909	-453.392	-459.613
VoFi-EK-Rendite am Ende der Investitionsdauer (20 J)	4,80%	4,80%	4,80%	4,80%

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
VoFi Mieter – Variante:				
Netto-Anfangsmiete im ersten Jahr [pro m2/Monat]	11,4	13,2	13,3	13,4
Nutzungskosten im ersten Jahr [pro m2/Monat]	-14,8	-16,7	-16,6	-16,6
Nutzungskosten im ersten Jahr	-397.856	-447.576	-445.531	-445.996
Durchschnittliches Δ Nutzungskosten d. nächsten 20 Jahre [pro m2/Monat]	0,0	-1,9	-1,9	-1,9
Endwert der Nutzungskosten in 20 Jahren	-12.306.230	-13.848.737	-13.779.750	-13.793.742
Endwert d. Δ Nutzungskosten ggü. Basis m.PV	0	-1.542.507	-1.473.520	-1.487.511

Tab. 17:
Finanzielle Effekte für Vermieter
und Mieter: Prämisse identische
Renditeerwartung
Quelle: Eigene Berechnungen.

Wie die Analysen zeigen, fällt der Investitionsbedarf am Typgebäude beim Einsatz einer Polyboxvariante im Vergleich zu dem Einsatz einer Alu-Kassetten-Fassade um mindestens 1.045.000 € höher aus.¹⁷ Unter der Prämisse, dass das Projekt mit einem Eigenkapitalanteil von 30 % realisiert wird, fällt entsprechend der erforderliche Eigenkapitalbedarf für die Realisierung einer Polybox-Fassade bei dem betrachteten Gebäude um mindestens rund 310.000 € höher aus.

Die Berechnungen folgen der Prämisse, dass ein vermietender Eigentümer – unabhängig von der Fassadenvariante – eine unter den Varianten einheitliche Zielrendite anstrebt. Entsprechend resultieren aus der gegebenen Kostendifferenz zusätzliche Netto-Mietkosten zur Refinanzierung der eingesetzten Mittel. Die Nettomietkosten werden in dem Fall Basis mit PV in Höhe von 11,4 Euro pro Quadratmeter und Monat angesetzt. Hieraus resultiert in dem vorliegenden Fall eine VoFi-Eigenkapitalrendite in Höhe von 4,8 %. Wird diese Renditeerwartung als Zielrendite auf die anderen Varianten übertragen, leiten sich hieraus für die Polybox-Varianten zusätzliche Nettomietkosten von min. 1,4 Euro pro Quadratmeter

¹⁷ Dies ist – wie bereits erwähnt – insbesondere dem Umstand geschuldet, dass für den Vergleich eine besonders kostengünstige Fassadenvariante gewählt wurde. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass in vielen Fällen auf den Einsatz einer Alu-Kassetten-Fassade verzichtet, und teurere Fassadenvarianten verbaut werden.

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
9.181.348	9.256.689	9.282.732	9.282.732	9.153.800	8.904.610	9.194.214
-1.319.842	-1.395.183	-1.421.226	-1.421.226	-1.292.294	-1.043.104	-1.332.708

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
2.754.404	2.777.007	2.784.820	2.784.820	2.746.140	2.671.383	2.758.264
395.953	418.555	426.368	426.368	387.688	312.931	399.812
7.034.117	7.098.576	7.109.713	7.112.149	7.008.611	6.814.763	7.041.166
-1.012.809	-1.077.269	-1.088.406	-1.090.842	-987.304	-793.456	-1.019.859
3.109.097	3.137.588	3.142.511	3.143.587	3.097.823	3.012.142	3.112.213
-447.664	-476.156	-481.078	-482.155	-436.391	-350.709	-450.780
4,80%	4,80%	4,80%	4,80%	4,80%	4,79%	4,80%

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
13,3	13,4	13,4	13,4	13,3	12,9	13,3
-16,6	-16,6	-16,7	-16,6	-16,5	-16,2	-16,5
-447.279	-447.219	-448.182	-445.781	-442.973	-436.062	-442.560
-1,9	-1,9	-2,0	-1,9	-1,8	-1,5	-1,7
-13.836.493	-13.831.212	-13.861.292	-13.784.141	-13.699.493	-13.488.119	-13.684.498
-1.530.263	-1.524.982	-1.555.062	-1.477.910	-1.393.262	-1.181.889	-1.378.268

und Monat ab. Unter Berücksichtigung der Betriebskosten ergeben sich über den Betrachtungszeitraum zusätzliche Nutzungskosten im Vergleich zum Basisfall in Höhe von 0,80 – 1,30 Euro pro Quadratmeter Nutzfläche und Monat.¹⁸ Mieterseitig führt dies bei dem betrachteten Fall im Zeitraum von 20 Jahren zu zusätzlichen Nutzungskosten in Höhe von 1.130.000 – 1.540.000 Euro. Damit ist die Polybox-Fassade im Vergleich der gegebenen Varianten bei einer Investitionsentscheidung, die ausschließlich auf die rationale Kostenminimierung abzielt, wirtschaftlich unvorteilhaft.

Inwieweit diesem Betrag ein für handelnde Akteure subjektiv ein höherer Wert beigemessen wird, lässt sich mit dem an dieser Stelle durchgeführten Analysen nicht klären. Die Zahlungsfähigkeit und der Zahlungsbereitschaft des/der Mieter vorausgesetzt, ist der Investitionsendwert einer mit einer Polybox verkleideten Fassade bei gleicher Eigenkapitalrenditeerwartung um 794.000 – 1.090.000 Euro höher als im Fall der Basisvariante mit PV. Diese zusätzlichen Kosten bilden damit den zusätzlichen Investitionsbedarf ab, der für ein Projekt mit einer Polyboxfassade anfällt. Wird allein ein Vergleich unter den Polybox-Varianten angestellt, ist die Variante S9 die wirtschaftlich vorteilhafteste für den Mieter, da bei dieser die geringsten Nutzungskosten anfällt.

18 Vgl. zu den Kennwerten des Gebäudes Kapitel 4.1 (S.248) insb. Tabelle.

5.3. Finanzielle Effekte aus der Perspektive von Selbstnutzern

Für den Fall des selbstnutzenden Eigentümers, der die Immobilie im eigenen Bestand hält und selbst nutzt, gelten grundsätzlich die gleichen Berechnungsprämissen. Entsprechend der in den vorausgehenden Berechnungen zu den finanziellen Effekten für Mieter und Eigentümer werden die gleichen Netto-Anfangsmieten für den selbstnutzenden Eigentümer als fiktive Mietzahlungen angesetzt. Die Ergebnisse der Analysen stellen sich wie folgt dar:

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
Investitionskosten				
Gestehungskosten/Investitionssumme	7.861.506	9.118.873	9.194.214	9.220.257
Δ zu Basis o.PV (KG 300/400 inkl. Planungskosten KG 700)	0	-1.257.367	-1.332.708	-1.358.751

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
Projektbezogener VoFi (Selbstnutzer) – Variante:				
Eigenkapitalbedarf	2.358.452	2.735.662	2.758.264	2.766.077
Δ Eigenkapitalbedarf	0	377.210	399.812	407.625
Investitionsendwert (20 J)	3.630.320	4.637.998	4.848.952	4.873.556
Δ Investitionsendwert ggü. Basis m.PV	0	-1.007.677	-1.218.631	-1.243.236
Barwert (DCF) der Investition	1.604.610	2.050.006	2.143.248	2.154.124
Δ Barwert (DCF) ggü. Basis m.PV	0	-445.396	-538.638	-549.513

Tab. 18:
Ergebnisse für selbstnutzende
Eigentümer
Quelle: Eigene Berechnungen

Da sich an der Betrachtung des Objektes nichts ändert, fallen äquivalent zu der Vermieterperspektive in einer Selbstnutzerperspektive die Investitionskosten des Basisfalls geringer aus als bei den Varianten mit einer Polyboxfassade. Im vorliegenden Fall reicht die Kostendifferenz bei dem betrachteten Typgebäude von 1.045.000 -1.420.000 €. Bei einem angenommenen Eigenkapitalanteil von 30 % muss der Eigentümer für die Projektentwicklung somit – je nach Variante – 310.000 – 430.000 Euro zusätzlich aufbringen. Hieraus resultieren auch durch die zuvor ermittelten Nettomieten (die im Fall der Selbstnutzung ggf. auch als interne Verrechnungssätze angesetzt werden) zur Refinanzierung des Investments bei gleicher Renditeerwartung (vgl. Kapitel 3.2.2) höhere Investitionsendwerte nach einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren. Hierfür sind jedoch auch ein zusätzlicher Investitionsbedarf und höhere interne Verrechnungssätze erforderlich.

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
9.181.348	9.256.689	9.282.732	9.282.732	9.153.800	8.904.610	9.194.214
-1.319.842	-1.395.183	-1.421.226	-1.421.226	-1.292.294	-1.043.104	-1.332.708

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
2.754.404	2.777.007	2.784.820	2.784.820	2.746.140	2.671.383	2.758.264
395.953	418.555	426.368	426.368	387.688	312.931	399.812
4.770.826	4.927.604	4.932.746	5.003.187	4.827.924	4.542.152	4.918.399
-1.140.506	-1.297.284	-1.302.425	-1.372.867	-1.197.604	-911.832	-1.288.078
2.108.717	2.178.013	2.180.286	2.211.421	2.133.954	2.007.642	2.173.944
-504.106	-573.403	-575.675	-606.810	-529.344	-403.032	-569.334

Diese Betrachtung ist jedoch eine rein rational Kosten-Nutzen Betrachtung finanzieller Effekte, bei der der nicht-monetäre Nutzen einer besonderen Fassadengestaltung unberücksichtigt bleibt. Jedoch resultiert für den Nutzer regelmäßig aus qualitativ anspruchsvollen Produkten ein zunächst nicht-monetärer Nutzen. Dieser kann darin bestehen, dass mit diesen Produkten eigene Wertevorstellungen kommuniziert (bspw. Corporate Branding) werden oder auch um Attraktivität zu generieren (bspw. Arbeitsplätze in attraktiven Gebäuden anzubieten, um Mitarbeiter an sich zu binden). Die Bewertung dieser nicht-monetärer Größen erfolgt in Kapitel 5.6 (S.279) (vgl. hierzu auch Kapitel 5.5 (S.273)).

5.4. Finanzielle Effekte für den Eigentümer bei einer Anpassung der Zielrendite an mieterseitig identische Nutzungskosten im Anfangsjahr

Vor dem Hintergrund, der im Vergleich zur Basisvariante höheren Nutzungskosten bei einer Polybox-Systemfassade stellt sich die Frage, wie sich die Rendite des Eigentümers verändert, wenn der Markt nur eine bestimmte Summe der Nutzungskosten aufnehmen kann oder will. Dieser Frage liegt die unter ökonomischen Gesichtspunkten realistische Annahme zugrunde, dass der Markt von dem rationalen Streben seiner Teilnehmer nach dem finanziellen Kosten-Nutzen-Optimum oder von deren finanziellen Restriktionen geprägt ist. Dem Ziel folgend, die Auswirkungen einer bestimmten Aufnahmekapazität respektive Zahlungsbereitschaft für den Eigentümer zu prüfen, werden an dieser Stelle weitere Analysen durchgeführt. Konkret wird evaluiert, inwieweit sich eine – zwischen den Varianten einheitliche – mieterseitige Nutzungskostenbelastung auf die Eigenkapitalrendite auswirkt. Hierfür werden die in Kapitel 5.2 (S.263) für den Basisfall mit PV abgeleiteten Nutzungskosten ($t=1$) zur Erreichung der zuvor ermittelten Zielrendite in Höhe von 4,8 % für alle Varianten als feste Größe angenommen, also 14,8 €/qm per Monat im ersten Jahr.

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
Investitionskosten				
Gestehungskosten/Investitionssumme	7.861.506	9.118.873	9.194.214	9.220.257
Δ zu Basis o.PV (KG 300/400 inkl. Planungskosten KG 700)	0	-1.257.367	-1.332.708	-1.358.751

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
VoFi Vermieter – Variante:				
Eigenkapitalbedarf	2.358.452	2.735.662	2.758.264	2.766.077
Δ Eigenkapitalbedarf	0	377.210	399.812	407.625
Investitionsendwert (20 J)	6.021.307	5.101.951	5.244.295	5.240.729
Δ Investitionsendwert ggü. Basis m.PV	0	919.357	777.012	780.578
Barwert (DCF) der Investition	2.661.432	2.255.075	2.317.991	2.316.415
Δ Barwert (DCF) ggü. Basis m.PV	0	406.358	343.441	345.017
VoFi-EK-Rendite am Ende der Investitionsdauer (20 J)	4,80%	3,17%	3,26%	3,25%

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
VoFi Mieter – Variante:				
Netto-Anfangsmiete im ersten Jahr [pro m2/Monat]	11,4	11,4	11,5	11,6
Nutzungskosten im ersten Jahr [pro m2/Monat]	-14,8	-14,8	-14,8	-14,8
Nutzungskosten im ersten Jahr	-397.856	-397.733	-397.733	-397.733
Durchschnittliches Δ Nutzungskosten d. nächsten 20 Jahre [pro m2/Monat]	0,0	0,0	0,0	0,0
Endwert der Nutzungskosten in 20 Jahren	-12.306.230	-12.301.859	-12.296.323	-12.295.899
Endwert d. Δ Nutzungskosten ggü. Basis m.PV	0	4.372	9.908	10.332

Tab. 19:
Finanzielle Effekte für Vermieter und Mieter: Prämisse mieterseitig identische Nutzungskosten
Quelle: Eigene Berechnungen.

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
9.181.348	9.256.689	9.282.732	9.282.732	9.153.800	8.904.610	9.194.214
-1.319.842	-1.395.183	-1.421.226	-1.421.226	-1.292.294	-1.043.104	-1.332.708

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
2.754.404	2.777.007	2.784.820	2.784.820	2.746.140	2.671.383	2.758.264
395.953	418.555	426.368	426.368	387.688	312.931	399.812
5.164.880	5.231.837	5.206.343	5.300.017	5.302.826	5.370.313	5.351.094
856.427	789.471	814.964	721.290	718.481	650.994	670.213
2.282.890	2.312.484	2.301.216	2.342.620	2.343.862	2.373.691	2.365.197
378.543	348.948	360.216	318.812	317.571	287.741	296.236
3,19%	3,22%	3,18%	3,27%	3,34%	3,55%	3,37%

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
11,5	11,6	11,6	11,6	11,6	11,5	11,6
-14,8	-14,8	-14,8	-14,8	-14,8	-14,8	-14,8
-397.733	-397.733	-397.733	-397.733	-397.733	-397.733	-397.733
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
-12.298.824	-12.295.416	-12.295.610	-12.292.966	-12.295.482	-12.298.577	-12.293.303
7.406	10.815	10.620	13.265	10.748	7.653	12.927

Unter der Prämisse, dass Mieter nur eine bestimmte Summe für die Nutzung der Flächen – und das unabhängig von der energetischen und gestalterischen Qualität der Fassade – aufwenden, zeigen die exemplarischen Analysen, dass ceteris paribus die gestalterisch hochwertigeren, solaraktivierten Fassaden eigentümerseitig die Renditeerwartungen um bis zu eineinhalb Prozentpunkte schmälern. Unter der in diesen Analysen getroffenen Annahme, der Markt würde Fassadenunabhängig nur bestimmte Zahlungen leisten können oder wollen, offenbaren sich in dem solaraktivierten Polyboxsystem damit das Risiko, seine angestrebte Zielrendite nicht erreichen zu können.

Jedoch ist an dieser Stelle zur Einordnung der Ergebnisse anzumerken, dass die zusätzlichen Investitionskosten in den Polyboxvarianten auf zwei Aspekte zurückzuführen sind, die in der Basisvariante mit PV nicht berücksichtigt sind: 1) Die Polybox-Fassaden sind grundsätzlich solaraktiviert. Im konkreten Berechnungsfall sind die Fassaden großflächig mit PV-Modulen bestückt. Das Vergleichsbeispiel der Basisvariante hat allerdings nur auf dem Dach PV-Module. Hieraus resultiert ein Delta in den Investitionskosten in Höhe von min. 277.000 €, welches sich bei gleicher Zahlungsfähigkeit/Zahlungsbereitschaft negativ auf die Eigenkapitalrendite niederschlägt. 2) In dem Vergleich wird eine einfache Alu-Standard-Fassade mit einer gestalterisch anspruchsvollen, qualitativ hochwertigen Fassade verglichen. Dieser Vergleich gleicht im Prinzip einem Vergleich zwischen einem gestalterisch einfachen, möglichst kostengünstigen low-tech Auto und einem gestalterisch hochwertigen, high-tech Auto. Es handelt sich also um einen Vergleich von zwei Produkten, die einen unterschiedlichen Markt adressieren. Anders ausgedrückt, einen Vergleich zweier hinsichtlich der Zielgruppe gemäß Produktspezifik mit unterschiedlichen Kostenstrukturen einhergehenden Konsumgüter. Ohne die spezifisch unterschiedlichen Prämissen zu berücksichtigen, die mit den unterschiedlichen Produktgruppen einhergehen, führt ein solcher Vergleich fast selbstverständlich zur wirtschaftlichen Nachteiligkeit neuer, qualitativ hochwertiger Konsumgüter im Vergleich mit einfachen Standardlösungen. Das Ergebnis gestaltet sich jedoch eigentümerseitig regelmäßig anders, wenn die spezifische Zahlungsbereitschaft für die unterschiedlichen Produktgruppen in den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen berücksichtigt wird. Diese Aspekte und die zuvor dargestellten Ergebnisse legen daher nahe, differenziert zu klären, inwieweit zusätzliche Zahlungsbereitschaften für gestalterisch anspruchsvolle und zugleich solaraktivierte Fassaden bestehen. Der Frage inwieweit zusätzliche Zahlungsbereitschaften das Ergebnis verändern, wird in dem folgenden Kapiteln nachgegangen.

5.5. Finanzielle Effekte für den Eigentümer bei einer zusätzlichen Zahlungsbereitschaft für gestalterisch anspruchsvolle und zugleich solaraktivierte Fassaden bei dem Nutzer

Grundsätzlich ist das Angebot für Konsumprodukte breit aufgefächert. Es gibt Produkte, die in der Zweckerfüllung darauf ausgelegt sind, besonders kosteneffizient zu sein, andere Produkte verfolgen hingegen das Ziel, zusätzlich oder auch alternativ bestimmte Nachfrage-Kriterien im Markt in besonderer Weise zu erfüllen. Nimmt man den Bereich Automobil als Anschauungsobjekt, so zeigt sich, dass beispielsweise ein Skoda Citigo oder ein Dacia Sandero besonders kosteneffizient sind, wenn als Maßstab die gesamten Nutzungskosten pro Kilometer (Resultierend aus Anschaffung, Treibstoff, Wartung/Instandhaltung, Versicherung, Wertverlust durch Abnutzung) herangezogen werden – demgegenüber sind beispielsweise eine Mercedes E-Klasse oder ein Tesla Model S nicht besonders nutzungskosteneffizient in dieser Hinsicht. Den Nutzungskosten der Kleinwagen mit circa 0,30 €/km stehen 0,80 bis 1,60 €/km bei den Oberklassefahrzeugen gegenüber.¹⁹ Dennoch werden Fahrzeuge der Oberklasse entsprechend bestimmter Nachfragekriterien im Markt produziert und – höheren Nutzungskosten zum Trotz – abgenommen. Es besteht also eine zusätzliche Zahlungsbereitschaft für diese Produkte, der reinen Nutzungskosteneffizienz zum Trotz. In der Regel wäre die Zielgruppe auch nicht bereit, sich mit den rein auf die Nutzungskosteneffizienz ausgerichteten Produkte zu kaufen. Autos sind hier nur ein Beispiel, in anderen Konsumgütergruppen finden sich gleichgelagerte Mechanismen (bspw. Kleidung, Smartphones, Uhren).

Ein identischer Sachverhalt findet sich bei Gebäuden. Bei Bürogebäuden gibt es eine zusätzliche Zahlungsbereitschaft für energetisch hochwertige ebenso wie für repräsentative (und damit regelmäßig kostenintensivere) Fassaden, die das Corporate Branding unterstützen (vgl. hierzu folgende Abb. 375). Neben den Anforderungen an die energetische Qualität eines Gebäudes ist dies einerseits auf die gewünschte Außendarstellung respektive für den Unternehmenserfolg erforderliche Außendarstellung eines Unternehmens (Repräsentativität, Corporate Branding). Andererseits sehen viele Unternehmen inzwischen, dass sie in der Herausforderung gegenwärtig Mitarbeiter zu halten und auch potentiell zukünftige Mitarbeiter zu gewinnen (Stichwort War of Talents) attraktive Arbeitsumgebungen und identitätsstiftende Gebäude eine immer größere Rolle spielen. Die Fassade übernimmt in diesem Kontext – neben dem reinen Zweck des Gebäudeabschlusses – eine Aufgabe der strategischen Unternehmensführung. Entsprechend werden vielerorts (nicht nur in Innenstadtlagen) Bürogebäude mit gestalterisch hochwertigen und oder auch zugleich energetisch anspruchsvollen Fassaden realisiert, bei denen die Optimierung auf die Investitionskosten oder die Nutzungskosteneffizienz nicht das entscheidende Argument gewesen sind (vgl. hierzu auch folgende Beispiele, die lediglich einen sehr kleinen Ausschnitt von Fassaden darstellen, die im Vergleich zu einer Alukassetten-Fassade höhere Investitionskosten aufweisen).

¹⁹ Vgl. ADAC (2017, www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokosten/autokosten-rechner/default.aspx, Kostenermittlung für Haltedauer 60 Monate und 15.000 km/Jahr Fahrleistung).



Abb. 376:

Fassaden-Beispiele von gestalterisch anspruchsvollen Fassaden
 Quelle: (von links oben nach rechts unten) Emanuel Raab, 3deluxeDesign (CC BY-SA 3.0) [Unternehmen: Leonardo Stores GmbH, Bad Driburg / Architekt: 3deluxeDesign]; ebd. [Unternehmen: Kaffee Partner GmbH, Osnabrück / Architekt: 3deluxeDesign]; CEphoto, Uwe Aranas [Unternehmen: DKV Deutsche Krankenversicherung AG, MEAG MUNICH ERGO AssetManagement GmbH, Köln / Architekt: Sauerbruch Hutton Gesellschaft von Architekten mbH]; Tuxyso (CC BY-SA 3.0) [Unternehmen: Thyssen Krupp AG, Essen / Architekt: JSWD Architekten GmbH & Co. KG]; Christian Schd (CC BY-SA 3.0) [Unternehmen: Nord LB, Hannover / Architekt: Behnisch Architekten Behnisch Architekten Partnerschaft mbB]

Da die Beispiele exemplarisch zeigen, dass nicht nur bei denen in der jüngeren Vergangenheit häufig diskutierten Neubauprojekte von marktführenden Technologieunternehmen im Silicon Valley gestalterisch anspruchsvolle Fassaden eingesetzt werden, sondern ebenso bei deutschen Unternehmen – mitunter auch in B-Standorten. Vor diesem Hintergrund wird in dem folgenden Abschnitt untersucht, welche finanziellen Effekte für den Eigentümer aus einer mieterseitig zusätzlichen Zahlungsbereitschaft für eine gestalterisch anspruchsvolle, repräsentative Fassade resultieren.

Gegenüber der zusätzlichen Zahlungsbereitschaft für verschiedene energetische Fassadenqualitäten gibt es gegenwärtig zu der zusätzlichen Zahlungsbereitschaft für bestimmte Fassadentypen noch keine gesicherte Datenlage, die es erlauben würde, konkrete Rückschlüsse auf die zusätzliche Zahlungsbereitschaft für eine Polybox-Fassade gegenüber einer Alukassetten-Fassade zu ziehen. Hinzu kommt, dass mit der Polybox-Fassade ein erstmals gestalterisch anspruchsvolles solaraktiviertes low-tech Fassadensystem entwickelt wurde, das zugleich die Einstellung des Nutzers zum Energie- und Klimaschutz offen nach Außen trägt (Unternehmenswerte, Corporate Branding).

Mit dem Ziel eine erste Näherung zu der erforderlichen Datenbasis zu generieren, wurden Experteninterviews mit marktführenden Maklern von Büroflächen durchgeführt. Den Interviews zufolge gibt es für gestalterisch anspruchsvolle Fassaden eine zusätzliche Zahlungsbereitschaft in der Spanne von 10 – 25 %, wobei die Tendenz den Experten zufolge bei 20-25 % liegt. Von den Experten wurde ebenfalls darauf hingewiesen, dass jene Mietergruppen, die sich für Gebäude mit gestalterisch anspruchsvollen Fassaden entscheiden, Gebäude mit einer schlichten auf die Investitionskosten hin optimierte Fassade in ihrer Entscheidung nicht berücksichtigen, weil diese ihren Basisanforderungen nicht genügen würden.

Entsprechend dieser Annahmen werden am Beispielsfall die finanziellen Effekte dieser Annahme der mieterseitig zusätzlichen Zahlungsbereitschaft – bezogen auf die Summe aller Nutzungskosten – geprüft. Die erste Tabelle zeigt die Auswirkungen einer zusätzlichen Zahlungsbereitschaft in Höhe von 10 % für eine gestalterisch anspruchsvolle Fassade gegenüber der Zahlungsbereitschaft für eine sichtbar kostenoptimierte Fassade, die zweite Tabelle die Effekte bei einem Zahlungsplus von 25 %.

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
Investitionskosten				
Gestehungskkosten/Investitionssumme	7.861.506	9.118.873	9.194.214	9.220.257
Δ zu Basis o.PV (KG 300/400 inkl. Planungskosten KG 700)	0	-1.257.367	-1.332.708	-1.358.751

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
VoFi Vermieter – Variante:				
Eigenkapitalbedarf	2.358.452	2.735.662	2.758.264	2.766.077
Δ Eigenkapitalbedarf	0	377.210	399.812	407.625
Investitionsendwert (20 J)	6.021.307	6.613.343	6.754.819	6.751.392
Δ Investitionsendwert ggü. Basis m.PV	0	-592.035	-733.512	-730.085
Barwert (DCF) der Investition	2.661.432	2.923.114	2.985.646	2.984.132
Δ Barwert (DCF) ggü. Basis m.PV	0	-261.681	-324.214	-322.699
VoFi-EK-Rendite am Ende der Investitionsdauer (20 J)	4,80%	4,51%	4,58%	4,56%

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
VoFi Mieter – Variante:				
Netto-Anfangsmiete im ersten Jahr [pro m2/Monat]	11,4	12,9	13,0	13,0
Nutzungskosten im ersten Jahr [pro m2/Monat]	-14,8	-16,3	-16,3	-16,3
Nutzungskosten im ersten Jahr	-397.856	-437.775	-437.775	-437.775
Durchschnittliches Δ Nutzungskosten d. nächsten 20 Jahre [pro m2/Monat]	0,0	-1,6	-1,5	-1,5
Endwert der Nutzungskosten in 20 Jahren	-12.306.230	-13.544.567	-13.539.031	-13.538.607
Endwert d. Δ Nutzungskosten ggü. Basis m.PV	0	-1.238.336	-1.232.800	-1.232.376

Tab. 20:
Finanzielle Effekte für Vermieter und Mieter: Prämisse zusätzliche Zahlungsbereitschaften für gestalterisch und solaraktivierte Fassaden in Höhe von 10 %
Quelle: Eigene Berechnungen.

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
Investitionskosten				
Gestehungskkosten/Investitionssumme	7.861.506	9.118.873	9.194.214	9.220.257
Δ zu Basis o.PV (KG 300/400 inkl. Planungskosten KG 700)	0	-1.257.367	-1.332.708	-1.358.751

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
VoFi Vermieter – Variante:				
Eigenkapitalbedarf	2.358.452	2.735.662	2.758.264	2.766.077
Δ Eigenkapitalbedarf	0	377.210	399.812	407.625
Investitionsendwert (20 J)	6.021.307	8.861.296	9.002.772	8.999.345
Δ Investitionsendwert ggü. Basis m.PV	0	-2.839.989	-2.981.465	-2.978.038
Barwert (DCF) der Investition	2.661.432	3.916.714	3.979.247	3.977.732
Δ Barwert (DCF) ggü. Basis m.PV	0	-1.255.282	-1.317.815	-1.316.300
VoFi-EK-Rendite am Ende der Investitionsdauer (20 J)	4,80%	6,05%	6,09%	6,08%

Variante	Basis m.PV	S1 (1)	S2 (1)	S3 (1)
VoFi Mieter – Variante:				
Netto-Anfangsmiete im ersten Jahr [pro m2/Monat]	11,4	15,1	15,3	15,3
Nutzungskosten im ersten Jahr [pro m2/Monat]	-14,8	-18,5	-18,5	-18,5
Nutzungskosten im ersten Jahr	-397.856	-497.435	-497.435	-497.435
Durchschnittliches Δ Nutzungskosten d. nächsten 20 Jahre [pro m2/Monat]	0,0	-3,9	-3,9	-3,9
Endwert der Nutzungskosten in 20 Jahren	-12.306.230	-15.396.118	-15.390.582	-15.390.158
Endwert d. Δ Nutzungskosten ggü. Basis m.PV	0	-3.089.887	-3.084.351	-3.083.928

Tab. 21:
Finanzielle Effekte für Vermieter und Mieter: Prämisse zusätzliche Zahlungsbereitschaften für gestalterisch und solaraktivierte Fassaden in Höhe von 25 %
Quelle: Eigene Berechnungen

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
9.181.348	9.256.689	9.282.732	9.282.732	9.153.800	8.904.610	9.194.214
-1.319.842	-1.395.183	-1.421.226	-1.421.226	-1.292.294	-1.043.104	-1.332.708

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
2.754.404	2.777.007	2.784.820	2.784.820	2.746.140	2.671.383	2.758.264
395.953	418.555	426.368	426.368	387.688	312.931	399.812
6.676.006	6.742.740	6.717.593	6.810.487	6.812.774	6.879.311	6.860.889
-654.699	-721.433	-696.286	-789.180	-791.467	-858.004	-839.582
2.950.811	2.980.307	2.969.193	3.010.252	3.011.263	3.040.672	3.032.530
-289.379	-318.875	-307.760	-348.820	-349.830	-379.240	-371.097
4,53%	4,54%	4,50%	4,57%	4,65%	4,84%	4,66%

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
13,0	13,1	13,1	13,1	13,1	13,0	13,1
-16,3	-16,3	-16,3	-16,3	-16,3	-16,3	-16,3
-437.775	-437.775	-437.775	-437.775	-437.775	-437.775	-437.775
-1,6	-1,5	-1,5	-1,5	-1,5	-1,6	-1,5
-13.541.532	-13.538.124	-13.538.318	-13.535.674	-13.538.190	-13.541.285	-13.536.011
-1.235.301	-1.231.893	-1.232.088	-1.229.443	-1.231.959	-1.235.055	-1.229.781

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
9.181.348	9.256.689	9.282.732	9.282.732	9.153.800	8.904.610	9.194.214
-1.319.842	-1.395.183	-1.421.226	-1.421.226	-1.292.294	-1.043.104	-1.332.708

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
2.754.404	2.777.007	2.784.820	2.784.820	2.746.140	2.671.383	2.758.264
395.953	418.555	426.368	426.368	387.688	312.931	399.812
8.923.960	8.990.693	8.965.547	9.058.441	9.060.728	9.127.265	9.108.842
-2.902.653	-2.969.386	-2.944.240	-3.037.134	-3.039.421	-3.105.958	-3.087.535
3.944.412	3.973.908	3.962.793	4.003.853	4.004.864	4.034.273	4.026.130
-1.282.980	-1.312.476	-1.301.361	-1.342.420	-1.343.431	-1.372.841	-1.364.698
6,05%	6,05%	6,02%	6,07%	6,15%	6,34%	6,16%

S4 (1)	S5 (1)	S6 (1)	S7 (1)	S8 (1)	S9	S11
15,2	15,3	15,3	15,4	15,3	15,2	15,3
-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5	-18,5
-497.435	-497.435	-497.435	-497.435	-497.435	-497.435	-497.435
-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9	-3,9
-15.393.083	-15.389.675	-15.389.869	-15.387.225	-15.389.741	-15.392.836	-15.387.562
-3.086.853	-3.083.444	-3.083.639	-3.080.994	-3.083.511	-3.086.606	-3.081.332

Die Ergebnisse dieser Analysen kommen daher in zweierlei Hinsicht zu wirtschaftlich interessanten Ergebnissen. Die zusätzliche Zahlungsbereitschaft in Höhe von 10 % – bezogen auf die Summe aller Nutzungskosten – entspricht nutzerseitig 16,3 €/qm im Monat. Die Nettomieten steigen entsprechend von 11,4 auf rund 13 €/qm im Monat. Werden diese Nettomieten in den Szenarien mit den Polybox-Fassaden in der Finanzplanung angesetzt, steigt die zu erwartende Rendite des vermietenden Eigentümers auf Werte zwischen 4,5 und 4,9 %. Aus der Sicht des vermietenden Eigentümers ist damit ein Gebäude mit einer solaraktivierten Polybox-Fassade ceteris paribus so wirtschaftlich wie ein Gebäude mit einer sichtbar kostenoptimierten Fassade ohne PV.

Wird darüber hinaus angenommen, dass wieder unter ansonsten gleichen Prämissen die Zahlungsbereitschaft zusätzlich 25 % beträgt, dann steigen die Renditeerwartungen des vermietenden Eigentümers um min. 1,2 Prozentpunkten gegenüber den Renditeerwartungen im Basisfall ohne solaraktivierte Fassade. Die gestalterisch anspruchsvolle und zugleich solaraktive Polybox-Fassade führt damit am Typgebäude je nach Ausführungsvariante zu Eigenkapitalrenditen in Höhe von rund 6,0 - 6,4 %, wobei sich das Szenario S9 hinsichtlich der zu erwartenden Eigenkapitalrenditen am vorteilhaftesten darstellt.

Die Ergebnisse machen damit deutlich, inwieweit eine gestalterisch anspruchsvolle Fassade gegenüber einer rein auf die Kosten hin optimierten Fassade zu zusätzlichen Renditeerwartungen führen kann, sofern entsprechende Zielgruppen am Markt vorhanden sind. Die Polybox-Fassade ist unter den gegebenen Annahmen gegenüber einer standardisierten Fassade aus der Sicht des Eigentümers wirtschaftlich vorteilhaft.

5.6. Zwischenfazit

Mit diesem Kapitel werden die finanziellen Effekte bei dem Einsatz solaraktiver Bauteile für Eigentümer, Mieter und Selbstnutzer ermittelt. Als Fallbeispiel dient ein exemplarisches Bürogebäude. In den Wirtschaftlichkeitsanalysen wird eine besonders kostenoptimierte Alukassetten-Fassade mit einem, nach gestalterischen Kriterien entwickelten solaraktivierten Fassadensystem verglichen.²⁰ Vollständigkeitshalber wird zudem eine Lebenszykluskostenanalyse zu dem Objekt durchgeführt, um eine weitere (in der Diskussion im energetisch Maßnahmen häufig herangezogene) Kenngröße als Grundlage einer belastbaren Aussage zur Wirtschaftlichkeit alternativer Handlungsoptionen zu erhalten.

Die Analysen zeigen erwartungsgemäß, dass mit der jeweils gewählten Betrachtungsperspektive respektive dem akteursbezogenen Ansatz zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit alternativer Handlungsoptionen unterschiedliche Ergebnisse generiert werden. Dies ist insbesondere deshalb der Fall, weil hier zwei gänzlich unterschiedliche Fassadensysteme miteinander verglichen werden. Für einige Fälle ist die auf die Investitionskosten hin optimierte Alukassetten-Fassade die nach ökonomischen Kriterien richtige Wahl, für andere Fälle stellt sich das von Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018b) entwickelte Polybox-Fassadensystem wirtschaftlich vorteilhaft dar. Die einzelnen Ergebnisse werden in dem folgenden Kapitel zusammengefasst und diskutiert.

20 Vgl. zu den Prämissen der Berechnungen Kapitel 4 (S.246).

6. Ergebnisdiskussion

In der vorliegenden Arbeit werden alternative Fassadensysteme in ihren finanziellen Effekten miteinander verglichen. Als Beispielfall dient ein typisches Bürogebäude. Verglichen werden eine standardisierte Alukassetten-Fassade (nicht solaraktiviert) und ein unter gestalterischen Prämissen neu entwickeltes solaraktiviertes Fassadensystem.

Zunächst wurden die Gestehungskosten für die verschiedenen Fassadensysteme analysiert. Erwartungsgemäß fallen die Investitionskosten in der standardisierten Fassadenvariante am Fallbeispiel über alle Varianten hinweg geringer aus. Dies ist einerseits durch die Tatsache begründet, dass bei dem Einsatz des Polybox-Fassadensystems in den betrachteten Fällen immer Solarmodule an der Fassade angeordnet sind, die zusätzliche Investitionskosten einfordern. Zudem ist die gesamte wasserführende Schicht der Fassade verglast, was im Vergleich zu der schlichten Alukassette ebenfalls mit zusätzlichen Kosten verbunden ist. Hieran zeigt sich, dass in dem Projekt zwei gänzlich unterschiedliche Fassaden miteinander verglichen werden, die in ihrer materiellen und gestalterischen Qualität unterschiedlicher nicht hätten sein können. Der Vergleich ist auf das Setting in dem Forschungsprojekt zurück zu führen, und ist unkritisch, solange die Ergebnisse in der Diskussion entsprechend eingeordnet werden. Die reine Kostenvergleichsanalyse fällt demnach erwartungsgemäß zugunsten des kostenoptimierten Standardmoduls einer Alukassette aus. Würden die Handlungsalternativen nun lediglich hinsichtlich der Investitionskosten entschieden, würden am Markt ausnahmslos kostenoptimierte Fassadensysteme eingesetzt werden. Dies entspricht jedoch nicht dem Status Quo. Entsprechend – und dem Interesse folgend, zu klären, welche finanziellen Effekte von dem Einsatz solaraktivierter Fassadenmodule ausgehen – richten sich die weiteren Analysen auf die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Fassadensysteme.²¹

Die Wirtschaftlichkeitsanalysen zeigen erwartungsgemäß, dass mit der jeweils gewählten Betrachtungsperspektive respektive dem akteursbezogenen Bewertungsansatz²² unterschiedliche Ergebnisse bei identischen Fassadenvarianten generiert werden. Dies bedeutet im Klartext: Wirtschaftlichkeit ist von der gewählten Betrachtungsperspektive abhängig und kann nicht generell bewertet werden. Ein Fassadentyp, der sich unter bestimmten Prämissen bspw. für einen Vermieter als wirtschaftlich darstellt, muss nicht zwingend für den Mieter des Objektes ebenfalls wirtschaftlich vorteilhaft sein. So kann für den Mieter ein anderer Fassadentyp durchaus vorteilhafter sein. Daher sind die Ergebnisse der Analysen im Einzelfall detailliert zu betrachten und in ihren Wechselwirkungen im Gesamtzusammenhang zu diskutieren. Zunächst soll auf die Ergebnisse der einzelnen Analysen eingegangen werden, bevor die Ergebnisse in ihrem Gesamtkontext diskutiert werden.

21 Die Polybox-Fassade wird in 10 verschiedenen Varianten analysiert (vgl. Kapitel 4.1 (S.248)).

22 Vgl. hierzu Kapitel 3.2 (S.215).

Wie die Analysen zeigen, sind die Nutzungskosten bei den solaraktivierten Polybox-Fassaden aufgrund der erzielten Stromerträge zwar geringer als die im Basisfall ohne PV, dieser vermeintliche Vorteil kann jedoch in einer Betrachtung über den Lebenszyklus nicht die hierfür erforderlichen Investitionen kompensieren. In einer Lebenszykluskostenbetrachtung (LCC) sind die Barwerte der Lebenszykluskosten der solaraktivierten Fassadenvarianten deutlich höher als die der Basisvariante (Alukassetten-Fassade mit PV auf dem Dach). Der LCC zufolge stellt sich die Basisvariante in diesem Vergleich damit aufgrund der geringeren Investitionskosten und fast identischer Nutzungskosten erwartungsgemäß wirtschaftlich vorteilhafter dar (vgl. Kapitel 5.1 (S.262)). Allerdings, so muss an dieser Stelle konstatiert werden, bildet eine klassische LCC die Entscheidungssituation von Eigentümern und Nutzern nicht realistisch ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass relevante Entscheidungsgrößen, wie bspw. die Summe der erforderlichen Investitionskosten (vgl. Kapitel 4.2 (S.251)), die tatsächlichen Finanzierungskosten oder auch marktüblichen Mieten in einer klassischen LCC nicht berücksichtigt werden.

Dem Ziel folgend, beim Einsatz solaraktiver Fassaden Transparenz über finanziellen Effekte für die Akteure zu generieren und damit die spezifische Entscheidungssituation abbilden zu können, werden die Handlungsoptionen in Vollständigen Finanzplänen modelliert. Zunächst steht die Frage im Raum, welche Mieten aus den alternativen Fassadensystemen resultieren, wenn der Eigentümer – unabhängig vom Fassadensystem – darauf abzielt, eine marktübliche und damit über die Varianten hinweg einheitliche Eigenkapitalrendite zu erreichen. Die Variable in dieser Betrachtung ist die Netto-Kaltniete, die dem Eigentümer zur Verfügung steht, um die Investition zu refinanzieren. Unter der Prämisse einer identischen Renditeerwartung von 4,8 % resultieren aus der gegebenen Kostendifferenz zwischen der Basisvariante und den Polybox-Varianten zusätzliche Netto-Mietkosten in Höhe von 0,8 – 1,3 € pro Quadratmeter Nutzfläche und Monat bei dem Einsatz der solaraktivierten Polybox-Systeme. Aufgrund der grundsätzlich bei allen Varianten hohen energetischen Standards, können die Energieersparnisse bei den Polybox-Systemen die höheren Netto-Mieten nicht kompensieren. Damit ist die Polybox-Fassade im Vergleich zu einer nicht solaraktivierten und standardisierten Alukassetten-Fassade bei einer Investitionsentscheidung, die ausschließlich auf die rationale Kostenminimierung abzielt, wirtschaftlich unvorteilhaft für den Mieter. In diesem Fall stellt sich unter den betrachteten Fassadentypen die Variante S9 am vorteilhaftesten dar, da bei dieser im Vergleich die geringsten

Nutzungskosten anfallen (vgl. hierzu Kapitel 5.2 (S.263)). Eine Selbstnutzerperspektive einnehmend verändert sich die zuvor dargestellte Situation nicht grundlegend. Ein selbstnutzender Eigentümer muss für die gestalterisch anspruchsvollere und zugleich solaraktivierte Fassade erst einmal zusätzliche Investitionskosten bereitstellen. Hieraus resultiert – prinzipiell äquivalent zu den vorausgehenden Ergebnissen – ein höherer interner Verrechnungssatz zur Refinanzierung des Investments. Sofern der selbstnutzende Eigentümer danach strebt, die Handlungsalternativen ausschließlich rational nach den Kosten pro Büro-Arbeitsplatz zu bewerten, fällt seine Entscheidung daher zugunsten der standardisierten Alukassetten-Fassade aus (vgl. Kapitel 5.3 (S.268)).

Vor dem Hintergrund, der im Vergleich zur Basisvariante höheren Nutzungskosten bei einer Polybox-Systemfassade stellt sich die Frage, wie sich die Rendite des Eigentümers verändert, wenn der Markt nur eine bestimmte Summe der Nutzungskosten aufnehmen kann oder will. Dieser Frage liegt die unter ökonomischen Gesichtspunkten realistische Annahme zugrunde, dass der Markt von dem rationalen Streben seiner Teilnehmer nach dem finanziellen Kosten-Nutzen-Optimum oder von deren finanziellen Restriktionen geprägt ist. Entsprechend ist zu klären, welches eigentümerseitige Risiko aus einer reduzierten Aufnahmefähigkeit des Marktes resultiert. Unter der Prämisse, dass der Markt lediglich Nutzungskosten in der Höhe aufnehmen kann, wie sie bei kostenoptimierten Alukassetten-Fassade entstehen, sinkt die zu erwartende Zielrendite beim Eigentümer *ceteris paribus* um rund einen Prozentpunkt. Unter den Polybox-Varianten stellen sich die als S9 und S10 bezeichneten Varianten für den Eigentümer als am wirtschaftlichsten dar (vgl. Kapitel 5.4 (S.270)).

Bevor auf die weiteren Ergebnisse eingegangen wird, ist an dieser Stelle nochmals darauf hinzuweisen, dass in den Analysen unterschiedliche Fassadensysteme für unterschiedliche Zielgruppen miteinander verglichen werden. Ohne die spezifisch unterschiedlichen Prämissen zu berücksichtigen, die mit den ungleichen Produktgruppen einhergehen, führt ein solcher Vergleich fast selbstverständlich zur wirtschaftlichen Nachteiligkeit der neuen, qualitativ und gestalterisch hochwertigeren und zugleich solaraktivierten Fassadensysteme gegenüber einfachen Standardlösungen – zumindest solange die spezifische Zahlungsbereitschaft der Zielgruppen nicht berücksichtigt wird. Entsprechend gilt es, differenziert zu klären, inwieweit zusätzliche Zahlungsbereitschaften für gestalterisch anspruchsvolle solaraktivierte Fassaden bestehen, wenn die Entscheidungssituation realitätsnah abgebildet werden soll. Denn es steht außer Frage, dass in der Immobilienwirtschaft für zusätzliche Qualitäten auch zusätzliche Zahlungsbereitschaften bestehen (gleich wie bei anderen Konsumgütern). Eine erste Näherung zu der Zahlungsbereitschaft für gestalterisch anspruchsvolle Fassaden im Vergleich zu einer Standard Alukassetten-Fassade bei sonst gleichen Rahmenbedingungen auf der Grundlage von Experteninterviews weist als Spannweite 10 % bis 25 % für bestimmte Zielgruppen (bspw. designorientierte Unternehmen, Unternehmen, die mit ihrer Immobilienwahl einen strategischen Nutzen im Sinne des Corporate oder Employer

Branding verfolgen) aus. Auf dieser Grundlage werden weitere Wirtschaftlichkeitsanalysen durchgeführt, die die beiden Fassadentypen differenziert betrachten. Wird im Fall der Polybox-Fassaden eine zusätzliche Zahlungsbereitschaft (bezogen auf die Summe aller Nutzungskosten) in Höhe von 10 % angesetzt, dreht sich das zuvor skizzierte Bild. In diesem Fall steigt die zu erwartende Eigenkapitalrendite des vermietenden Eigentümers gegenüber dem Basisfall um 0,2 – 0,5 % (vgl. Tab. 19 in Kapitel 5.4 (S.270)). Das Polybox-Fassadensystem ist dieser Prämisse folgend wirtschaftlich vorteilhaft für den Eigentümer, obgleich die Investitionskosten zunächst höher ausfallen. Wird entsprechend der Marktteilnehmer eine zusätzliche Zahlungsbereitschaft in Höhe von 25 % in den Berechnungen angesetzt, steigt die Differenz der zu erwartenden Eigenkapitalrendite auf 1,6 – 2,0 % (vgl. Tab. 20 in Kapitel 5.5 (S.273)). Aus der Sicht des vermietenden Eigentümers ist damit eine Polybox-Fassade *ceteris paribus* wirtschaftlich deutlich vorteilhafter als ein Gebäude mit einer *sichtbar kostenoptimierten Fassade*. Auch in diesem Betrachtungsfall stellt sich die Variante S9 am vorteilhaftesten für den Vermieter dar.

Wie damit resümierend konstatiert werden kann, bietet eine gestalterisch anspruchsvolle und zugleich solaraktivierte Fassade gegenüber einer rein auf die Baukosten hin optimierten Fassade den höheren Investitionskosten zum Trotz grundsätzlich die Möglichkeit, zusätzliche Renditen zu erzielen, sofern entsprechende Zielgruppen mit den angenommenen Zahlungsbereitschaften am Markt vorhanden sind (vgl. hierzu Kapitel 5.5 (S.273)).

Nicht-monetärer Nutzen gestalterisch hochwertiger und zugleich solaraktiver Fassaden

Neben den vordergründig rein monetär messbaren Größen sind es damit insbesondere gestalterische Qualitäten, welche die Investitionsentscheidung für oder gegen eine solaraktivierte Fassade begünstigen (vgl. hierzu auch Hegger; Drebes; Wurzbacher 2015). Diese nicht-monetären Qualitäten einer Investitionsentscheidung können in der vorliegenden Arbeit nicht abschließend behandelt und hinsichtlich der am Markt zu erwartenden Effekten analysiert werden. Allerdings erscheint eine hierfür anzuwendende Nutzen-Kosten-Analyse sinnvoll und zweckdienlich, da beim Einsatz solaraktiver Fassadenelemente der „nicht zwingend das finanzwirtschaftliche Ergebnis von Immobilien allein wertbestimmend“ (vgl. Pfnür 2011 S.71) ist. Grundsätzlich zielt die Nutzen-Kosten-Analysen darauf ab, nicht-monetäre Entscheidungskriterien transparent und in ihrer Bewertung nachvollziehbar zu machen. Hiermit wird der Zweck verfolgt, die Bewertung von Handlungsalternativen zu unterstützen. Wie bereits an verschiedenen Stellen in der vorliegenden Arbeit sind es unter anderem die folgenden nicht-monetäre, qualitative Entscheidungskriterien, die in der Investitionsentscheidung für den Einsatz gestalterisch anspruchsvoller und zugleich solaraktiver Fassadensysteme sprechen (nicht abschließend):

- Corporate Branding (sichtbare Darstellung nachhaltigkeitsbezogener Werte über die PV-aktivierte Fassade)
- Employer Branding (Stichwort: Mitarbeitergewinnung im War of Talents)
- Strategischer Nutzen für die Umsetzung der Energiewende
- Bessere (Wieder-)Vermietbarkeit an bestimmte Zielgruppen im Vergleich zu den sonst am Markt angebotenen Immobilien

Bei der Durchführung von Kosten-Nutzen-Analysen sollte darauf geachtet werden, dass diese zielgruppenspezifisch und unter Berücksichtigung der immobilienmarktlichen Rahmenbedingungen durchgeführt werden, damit hierauf aufbauend gleich konkrete Marktpotentiale abgeschätzt und wirtschaftlich erschlossen werden können.

Ableitung von Optimierungspotentialen zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit

Ungeachtet von Nutzen-Kosten-Analysen gibt es einige Optimierungspotentiale zur Steigerung der akteursbezogenen Wirtschaftlichkeit. Diese sind:

- Reduktion der Kostenstrukturen. Hierzu zählt beispielsweise die Kostenoptimierung der gegebenen Polyboxsysteme. In den meisten Fällen ist hinter dem System (äquivalent zu dem Aufbau bei der Alukassetten-Fassade) eine Betonwand integriert worden. Dieser ist energetisch in den gegebenen Systemen nahezu unwirksam und zudem aus bautechnischer Sicht obsolet. Entsprechend können die Kosten des Systems reduziert werden, wenn der Beton entfällt. Hierdurch entsteht eine potentielle Kostenreduktion des Systems, mit der die Wirtschaftlichkeit verbessert wird.
- Lineare Optimierung der solaraktiven Flächen. In dem hier beschriebenen Projekt wurde entsprechend der gängigen Planungspraxis der Einsatz der solaraktiven Fläche statisch definiert. Bei einfachen, nicht verschatteten Gebäudetypen ist dieses Vorgehen sicherlich angebracht. Doch ist bei diesem Vorgehen, insbesondere bei komplexen Gebäudetypen mit z.T. verschatteten Fassadenflächen nicht gewährleistet, ob mit der in der Planung angenommene Fläche das wirtschaftliche Optimum zwischen Investitionskosten und Erträgen abgebildet

wird. Aus der betriebswirtschaftlichen Forschung heraus betrachtet, bietet es sich an, die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von PV an der Gebäudehülle über lineare Optimierungsprozesse hin zu steigern. Im Ergebnis linearer Optimierungsprozesse würden in einem spezifischen Projekt nur diejenigen Flächen mit PV ausgestattet, die sich in der Analyse als wirtschaftlich erweisen hätten. Damit kommt ein auf die Ergebnisse für immobilienwirtschaftliche Akteure hin ausgerichteter linearer Optimierungsprozess im Ergebnis dann der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das ganze Gebäude zu Gute.

- Mengen-Degressionseffekte / Skaleneffekte.
Bei dem verstärkten Einsatz der Polybox-Fassadensysteme ist davon auszugehen, dass bestimmte Mengendegressionseffekte erschlossen werden können. Insbesondere dann, wenn im Zuge der Energiewende dergleichen Systeme flächendeckend zum Einsatz kommen, kann langfristig von sinkenden Planungs- und Baukosten ausgegangen werden.
- Finanzielle Förderung. Naturgemäß verbessert eine finanzielle Förderung die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit des Einsatzes der geförderten Bauteile. Allerdings steigert sich damit nicht die Wirtschaftlichkeit des Bauteils an sich. In diesem Kontext wäre bei einer Förderung insbesondere die Effektivität einer Förderung im Sinne übergeordneter Zielstellungen, des Klimaschutzes (bspw. €/t CO₂) oder der Energiewende (bspw. €/kWh erneuerbar erzeugtem Strom) im Vergleich mit alternativen Fördermöglichkeiten zu prüfen.

Literaturverzeichnis

BKI (2017)

BKI (Ed.). (2017): BKI Baukostenplaner 19. Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH (BKI).

BMUB (2015)

BMUB: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) – Büro- und Verwaltungsgebäude – Ökonomische Qualität Lebenszykluskosten; Berlin 2015

BMUB (2016)

BMUB: Leitfaden Nachhaltiges Bauen – Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden; Berlin 2016

DIN (2003a)

DIN: DIN V 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs (DIN V 4108-6:2003-06); Berlin 2003a

DIN (2003b)

DIN: DIN V 4701 Energetische Bewertung heiz- und raumluftechnischer Anlagen – Teil 10: Heizung, Trinkwassererwärmung, Lüftung (DIN V 4701-10:2003-08); Berlin 2003b

DIN (2011a)

DIN: DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger (DIN V 18599-1:2011-12); Berlin 2011

DIN (2011b)

DIN: DIN V 18599 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen (DIN V 18599-2:2011-12); Berlin 2011

Dr. Schiller und Partner GmbH (2011)

Dr. Schiller und Partner GmbH. (2011). DBD-KostenElemente.

Europäische Union (2010)

Europäische Union. (2010). RICHTLINIE 2010/31/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Union, L 151/13, 18.6.2010.

Europäische Union (2012)

Europäische Union. (2012). RICHTLINIE 2012/27/EU DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG. Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Union, L 315/1, 14.11.2012.

GdW (2010)

GdW: GdW Arbeitshilfe 64 - Energieeffizientes Bauen und Modernisieren. ; Berlin/Brüssel 2010

Grob (2006)

Grob, Heinz Lothar: Einführung in die Investitionsrechnung; abgerufen von: <http://www.wi1.uni-muenster.de/aw/vofi/vorwort.html>, <http://www.wi1.uni-muenster.de/aw/vofi/index.html>; Zugriff am: 30.06.2017

Hegger; Drebes; Wurzbacher (2015)

Hegger, Manfred; Drebes, Christoph; Wurzbacher, Steffen: benefit E – Gebäudeintegrierte solaraktive Systeme - Strategien zur Beseitigung technischer, wirtschaftlicher, planerischer und rechtlicher Hemmnisse; Darmstadt 2015

Heister (1962)

Heister, M.: Rentabilitätsanalyse von Investitionen – Ein Beitrag zur Wirtschaftlichkeitsrechnung; Köln 1962

Kruschwitz (2003)

Kruschwitz, Lutz: Investitionsrechnung; München 2003

Lützkendorf; Unholzer (2013)

Lützkendorf, Thomas; Unholzer, Matthias: Kennwerte zur energetischen und ökologischen Qualität von Bauwerken in deren Nutzungsphase. Begriffe und methodische Grundlagen. EnOB-Fachartikel.; Karlsruhe 2013

Müller (2017)

Müller, Nikolas D.: Städtische Wirklichkeiten – Allgemeine Prinzipien und spezifische Sinnzuschreibungen in der gesellschaftlichen Konstruktion der Stadt; Wiesbaden 2017

Müller; Pfnür (2017)

Müller, Nikolas D.; Pfnür, Andreas: (2017). Konzeptionelle Ansätze zur Umsetzung der Energiewende im Gebäudesektor – Systematisierung und Diskussion alternativer Steuerungsindikatoren für die Energie- und Klimapolitik im Gebäudesektor. Arbeitspapiere zur immobilienwirtschaftlichen Forschung und Praxis (Nr. 34, Mai 2017).

Pfnür (2002)

Pfnür, Andreas: Betriebliche Immobilienökonomie; Heidelberg 2002

Pfnür (2011)

Pfnür, Andreas: Modernes Immobilienmanagement; Berlin, Heidelberg 2011

Rolfes (2003)

Rolfes, Bernd: Moderne Investitionsrechnung – Einführung in die klassische Investitionstheorie und Grundlagen marktorientierter Investitionsentscheidungen (3. Auflage); München, Wien 2003

Thommen; Achleitner (2007)

Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Arbeitsbuch (5. Auflage ed.); Wiesbaden 2007

Thommen; Achleitner (2012)

Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht (6., vollst. überarb. Aufl.

ed.); Wiesbaden 2012

VNW (2016)

VNW: VoFi-Rechnung; abgerufen von: <http://www.vnw.de/services/beratungsangebote/vofi-rechnung-30/>; Zugriff am: 30.06.2016

Wendlandt (2013)

Wendlandt, Jürgen: (2013). Investitionsrechnung in der Wohnungswirtschaft. DW Die Wohnungswirtschaft(1/2013).

Wurzbacher; Drebes; Müller et al. (2018)

Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Müller, Nikolas D.; Kuhn, Christoph; Pfnür, Andreas: Die Entwicklung des solaren Bauens (Teil 1) in: Kuhn, Christoph; Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Pfnür, Andreas; Müller, Nikolas: Gebäudeintegrierte solaraktive Strategien: Analytische Bewertung und Entwicklung gebäudeintegrierter solaraktiver Systeme

Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018a)

Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Kuhn, Christoph: Typologiebezogene Solarstrahlungspotenziale (Teil 3) in: Kuhn, Christoph; Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Pfnür, Andreas; Müller, Nikolas: Gebäudeintegrierte solaraktive Strategien: Analytische Bewertung und Entwicklung gebäudeintegrierter solaraktiver Systeme

Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018b)

Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Kuhn, Christoph: Dynamische Betrachtungen solaradaptiver polyfunktionaler Fassaden (Teil 4) in: Kuhn, Christoph; Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Pfnür, Andreas; Müller, Nikolas: Gebäudeintegrierte solaraktive Strategien: Analytische Bewertung und Entwicklung gebäudeintegrierter solaraktiver Systeme

Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018c)

Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Kuhn, Christoph: Einbindung solaradaptiver Fassaden in das Gebäudeenergiesystem (Teil 5) in: Kuhn, Christoph; Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Pfnür, Andreas; Müller, Nikolas: Gebäudeintegrierte solaraktive Strategien: Analytische Bewertung und Entwicklung gebäudeintegrierter solaraktiver Systeme

Zimmermann (2012)

Zimmermann, Kerstin: Anwendung des Leitfadens Nachhaltiges Bauen und des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) in den Bundesbauverwaltungen – Zusatzmodul Lebenszyklusanalysen nach BNB „Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus (LCC)“; Hamm 2012

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

Zusammenfassende Bewertung solaradaptiver Gebäudehüllen (Teil 7)



Abb. 377:
 Heterogenen Gebäudebestand
 erschließen
 Fotos: Christoph Drebes / Steffen
 Wurzbacher

1. Ergebnisdiskussion

1.1. Strahlungspotenziale im Bestand erschließen

Die vorangegangenen typologischen Untersuchungen zeigen, dass der Bausektor mit seinen vielschichtigen Dach- und Fassadenflächen eine Schlüsselaufgabe in der erfolgreichen Umsetzung der Energiewende einnehmen kann. Die Hüllflächen des Gebäudebestandes bieten dabei die Chance einen signifikanten Anteil der regenerativen Energieversorgung in Deutschland zu decken. Dies betrifft konkret die Bereiche Strom und Wärme. Voraussetzung hierfür ist eine systematische Aktivierung der Hüllflächen durch solare Energiesysteme.

Bei einer Einbindung photovoltaischer Systeme in 10% aller Dach- und Fassadenflächen kann dabei ein Deckungsanteil am deutschen Nettostrombedarf von circa 10% (vgl. 5. Projektion und überschlägige Abschätzung zum Potenzial gebäudebezogener Solarenergienutzung in KAP2) erzielt werden. Würde der Anteil photovoltaischer Systeme weiter erhöht, könnten noch größere Mengen des Deutschen Nettostrombedarfs gedeckt werden. Im Rahmen der getätigten Untersuchungen wurde hierbei ein theoretischer Grenzwert einer Deckung des deutschen Nettostrombedarfs über Photovoltaik von circa 78% ermittelt. Dies würde jedoch eine Aktivierung von insgesamt 80% aller Dächer und 60% aller opaken Fassadenflächen erfordern. In der Realität werden sicherlich zahlreiche baukulturelle sowie technisch-konstruktive Rahmenbedingungen einen Ausbau in dieser Größenordnung deutlich beschneiden. Trotzdem weist die große Bandbreite zwischen einem als realistisch angenommenen und dem geschätztem theoretischen Potenzial einen Entwicklungsraum für neue Solarsysteme auf, welche den vielfältigen Ansprüchen zur Integration in die Gebäudehülle Rechnung tragen.

Ein noch größeres Potenzial zur Deckung von Energiebedarfen über Solarenergie findet sich im Wärmesektor. Eine Bereitstellung von Wärme kann dabei solarthermisch oder durch hybride Nutzung (als Wärme und Strom) geschehen. Hier zeigen die vorliegenden Untersuchungen, dass die Aktivierung von 10% der Hüllflächen des Gebäudebestandes ein realistisches Potenzial zur Deckung von 57% des gebäudebezogenen Nutzwärmebedarfs (Heizwärme und Warmwasserwärme) aufweist. Bei einer noch größeren Aktivierung von Dach- und Fassadenflächen könnte theoretisch der gesamte Wärmebedarf gedeckt werden. Begrenzend wirkt hierbei nicht die zur Verfügung stehenden Fläche, sondern vielmehr die Möglichkeit einer saisonalen Verschiebung von solaren Wärmegewinnen. Weiter zeigen die Untersuchungen die Möglichkeit einer Deckung des gesamten gebäudebezogenen Wärmebedarfs bei einer Aktivierung von gerade einmal 4,5% aller Dach- und Fassadenflächen.

Bei den Analysen zu spezifischen Solarpotenzialen wurden starke Unterschiede zwischen den jeweiligen Gebäudetypen identifiziert. Dies betrifft sowohl den Ort (Dach- oder Fassadenbereiche), als auch die Höhe anfallender Strahlungspotenziale. Das

bedeutet, dass je nach Typus unterschiedliche Prioritäten bei der Einbindung solarer Energiesysteme gesetzt werden sollten. Im Rahmen der beschriebenen Steckbriefe wurden zusammenfassend Möglichkeiten und Maßnahmen für Dächer und Fassaden jeweiliger Typen benannt. Die größten Entwicklungspotenziale werden in den Dächern der Einfamilienhäuser, Hallenbauten, größeren Zeilenbauten sowie hof förmigen Bauten identifiziert. Im Fassadenbereich finden sich zudem vielfältige Entwicklungsmöglichkeiten solarenergetischer Systeme in den Gebäudetypen der Hochhäuser, punktförmigen Bauten sowie in größeren Zeilenbauten.

Kleinteilige Dachsysteme für Einfamilienhäuser

Freistehende Einfamilienhäuser stellen mit 34% und 1.429 Mio. Quadratmetern (vgl. Bürger; Hesse; Quack 2016) den deutlich größten Anteil sowohl der der Summe der Hüllflächen, als auch in der Anzahl an Gebäuden im Bestand dar. Demgegenüber weisen die getätigten Solarstudien ein heterogenes Strahlungsbild des solaren Fingerabdrucks auf. Das bedeutet, es finden sich sowohl Dachflächen mit geringer und mit höherer Eigen- und Fremdverschattung. Untergeordnete Aufbauten wie Schornsteine oder Gauben können darüber hinaus die ohnehin kleinteiligen Dachflächen partiell stark verschatten und dadurch insbesondere die Nutzung der Photovoltaik weiter einschränken.

Insgesamt wird allein durch die enorme Anzahl an Einfamilienhausdächern ein großes Potenzial zur Entwicklung integrierter Dachsystemen gesehen. Diese kleinmaßstäblichen Systeme erfordern dabei ein hohes Maß einer geometrischen, konstruktiv-technischen sowie gestalterischen Flexibilität. Bisher finden sich derzeit nur wenige marktgängige Produkte integrierter Dachsysteme im Einfamilienhausbereich wieder. Förderpolitisch sollte aus diesem Grund sowohl der Ausbau der Solarnutzung im Einfamilienhausbereich, als auch die Entwicklung von flexiblen Systemen forciert werden.

Hallenbauten als Solarkraftwerke entwickeln

Weitere große Potenziale im Dachbereich werden speziell bei Hallenbauten identifiziert. Deren Anteil an den gesamten Dachflächen beträgt insgesamt 16%. Hier bieten die großen und zusammenhängenden Flächen der Hallendächer vielfältige Potenziale zur Einbindung solarer Energiesysteme. Da Hallendächer in der Regel visuell weniger exponiert sind, können hier weiterhin großflächigere additive Systeme zum Einsatz kommen. Konstruktiv besteht hierbei die Herausforderung in der Verankerung von Leichtbausystemen in der Dachhaut. Bisher werden vielfach Ballastierungssteine verwendet, um aufgeständerte Solarsysteme gegen Windangriff ausreichend zu sichern. Diese wiederum sind aufgrund ihres hohen Gewichtes abhängig vom Tragverhalten der Gesamtkonstruktion. Viele ältere Hallenbauten können aus diesem Grund nicht mit ballastierten Solarsystemen versehen werden. Durch eine Unterkonstruktion mit schadensfreier Durchdringung oder flächig aufgetragenen Leichtbaumodulen könnte auf eine Ballastierung verzichtet werden.

Solar aktivierter Attikabereich für zeilenartige und hofförmige Geschossbauten

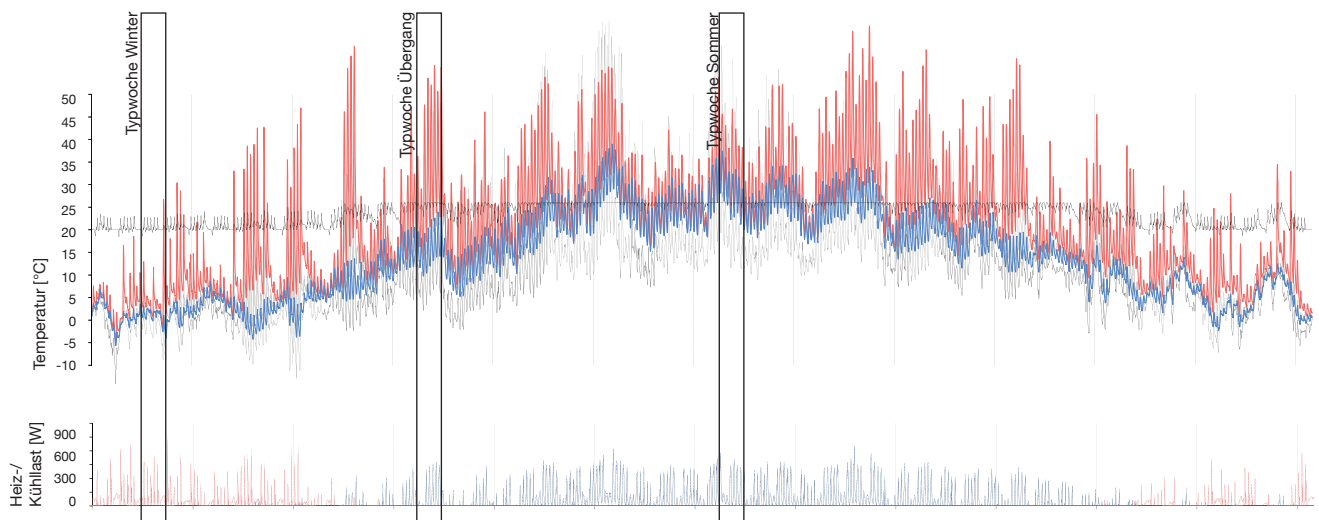
Die Typen des hofförmigen Baus und des Zeilenbaus konnten in den vorangegangenen Untersuchungen aufgrund der Datengrundlage in ihren Anteilen am gesamten Gebäudebestand nicht eindeutig quantifiziert werden. Trotzdem wird beiden Typen ein wichtiges Handlungsfeld beim Ausbau solaradaptiver Dächer zugewiesen. Die große Herausforderung liegt dabei im Umgang mit zahlreichen, im Bestand vorzufindenden Aufbauten wie Dachgauben, Brandwandüberständen, Schornsteinen oder Antennen. Die Heterogenität ist hierbei sehr groß und verlangt in aller Regel jeweils individuell angepasste Lösungen.

Bei Gebäuden mit Flachdächern sollte speziell über eine Aktivierung des Attikabereichs nachgedacht werden. Die inneren Bereiche hingegen könnten begrünt werden und damit Anforderungen des Regenwassermanagements Rechnung tragen. Solaraktive Dachflächen von Gebäuden mit Schrägdächern hingegen sollten sich optisch an die bekannten Ausdrucksformen von bestehenden Dachsteinen orientieren. Hierbei sollten ähnlich flexible und kleinteilige Gestaltungsprinzipien wie zuvor bei den Dachflächen freistehender Einfamilienhäuser berücksichtigt werden.

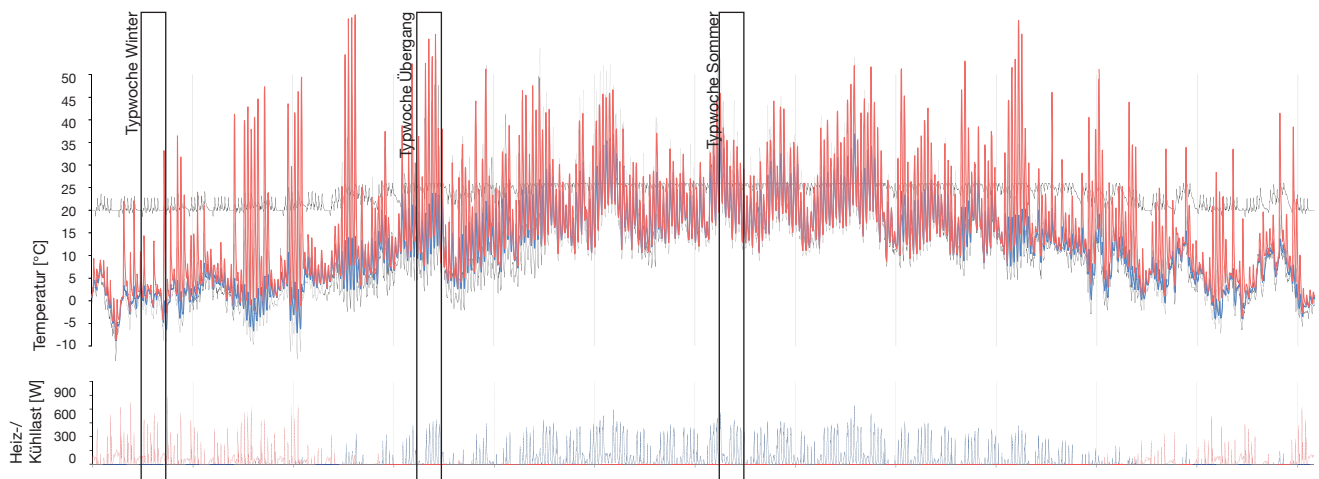
Solaradaptive Fassaden unterschiedlicher Ausprägung für alle Gebäudetypen

Die photovoltaische Aktivierung von Fassadenflächen wird den vorangegangenen Untersuchungen nach primär bei Hochhäusern und größeren punktförmigen sowie zeilenartigen Gebäuden vorgeschlagen. Hier wurden größere exponierte und gering verschattete Bereiche identifiziert, welche eine größere Energieausbeute erwarten lassen. Demgegenüber wurden auf den Fassaden kleinerer freistehender Einfamilienhäuser, Reihenhäuser sowie größeren hofförmigen Bauten größere Strahlungseinbußen durch Eigen- und Fremdverschattung identifiziert. Eine solare Stromproduktion stünde hier vor der Herausforderung partieller Verschattungen, welche eine Reihenanordnung von Modulen nochmals erschweren.

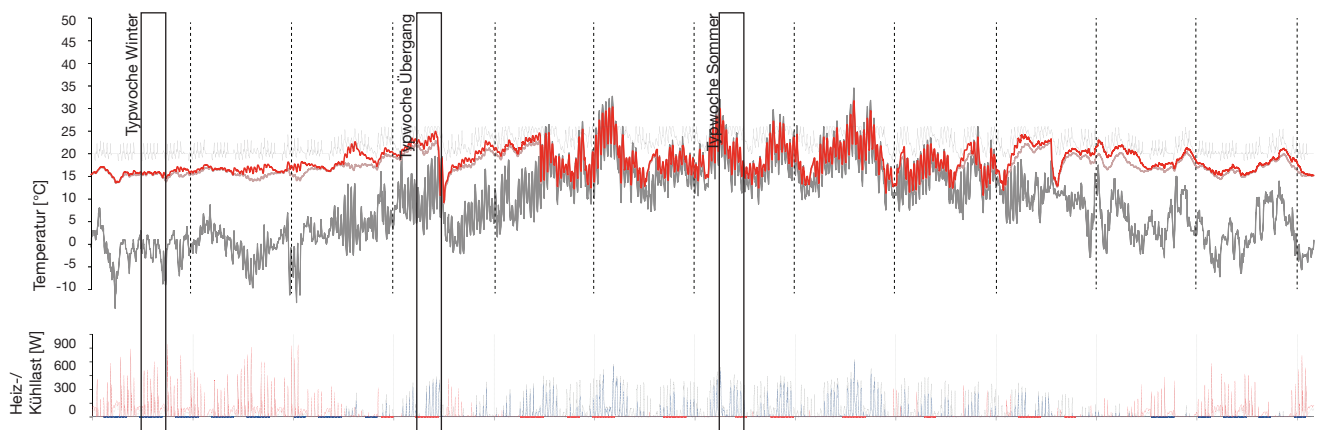
Dennoch wird eine thermisch basierte Solarnutzung auch an den stärker verschatteten Fassadenbereichen ausdrücklich empfohlen. Sowohl die Gewinnung von Wärme über wassergeführte Systeme oder über Luftkollektoren sowie die im Kapitel 3 beschriebenen solaren „Pufferzonen“ der Polybox können hier einen Beitrag zur Reduktion von Wärmeverlusten leisten. Insofern bieten die Fassaden aller Gebäudetypen das Potenzial zur Integration von solaradaptiven Systemen.



(1) Bauteil Px V2



(2) Bauteil Px V8



(3) Bauteil Px V11

Abb. 378:
Exemplarische Gegenüberstellung
des thermischen Verhaltens
des Fassadenzwischenraums in
Kombination mit der resultierenden
Heiz- und Kühlleistung des Innenraums
im Jahresgang
(1) Bauteil Px10 V2
(2) Bauteil Px10 V8
(3) Bauteil Px10 V11
Quelle: Eigene Darstellung

- Temp. Nord (FZR)
- Temp. Süd (FZR)
- Temp. Ost (FZR)
- Temp. West (FZR)
- Temp. Aussen
- Temp. Musterraum
- Kühllast Musterraum
- Heizlast Musterraum
- Kühllast Referenzraum
- Heizlast Referenzraum

1.2. Energieeinsparung durch aktive und passive solarenergienutzung an polyfunktionalen Fassaden

Das polyfunktionale Fassadenprinzip wurde energetisch beschrieben und die generelle Funktionalität in variierenden Fassadenaufbauten unter Annahme einer Büronutzung überprüft. Weiterführende Forschungen und Untersuchungen des Fassadenprinzips wären unter Annahme alternativer Gebäudenutzungen, Dimensionen der Modulraster und Bauteilschichten, sowie Verwendung alternativer Materialien zur ganzheitlichen Bewertung der Möglichkeiten des adaptiven Polyfunktionalen Fassadenansatzes sinnträchtig. Daraus resultierende, weiter differenzierende bauphysikalische Eigenschaften zeigen gegebenenfalls Erweiterungsmöglichkeiten des Einsatzspektrums innerhalb der Fassade, aber auch des Dachs oder anderer Bauteile.

Insbesondere weitere differenzierende Konfigurationen der Bauteilschichten in Kombination mit gebäudenutzungsspezifischen Solarenergienutzungen werden weitere Optimierungs-potenziale bieten. Dabei bestehen auch im Hinblick auf die Erkenntnisse der Simulationen weitere Optimierungsmöglichkeiten. Durch Definition alternativer Regelungsmechanismen auf der einen Seite aber auch einer energetisch kombinierten simulativen Betrachtung in Form elektrisch-thermischer Simulationen andererseits können weitere energetische Zusammenhänge des Fassadenprinzips beleuchtet werden und gegebenenfalls den gestalterischen Handlungsspielraum zur Nutzung von Solarenergie in der Gebäudehülle erweitern. Die Simulationen erster relevanter ausformulierter Bauteile hat gezeigt, dass durch kreative Anwendung der Grundprinzipien des Polyfunktionalen Fassadenprinzips sehr unterschiedliche energetische Eigenschaften erreicht werden können. Dadurch bietet der dem zu Grunde liegende, integrierte Umgang aus gestalterischen, energetischen und bauphysikalischen Funktionen als grundlegende Eigenschaften zukünftiger Gebäudehüllen eine konzeptoffene Herangehensweise perspektivische Anforderungen objektspezifisch, architektonisch lösen zu können.

Ausgehend von den Ergebnissen der simulierten Bauteilvarianten zeigten grundlegende Möglichkeiten und Eigenschaften zur ganzheitlichen Solarenergienutzung. Dabei zeigte das Fassadensystem unterschiedlichste adaptive Eigenschaften die das Verhalten der Innenraumkonditionen im Jahresgang nach gezielt gewünschten Eigenschaften beeinflussen kann. Auch im Hinblick auf die eingangs des Projektes angestrebte adaptive Eigenschaft des Fassadenprinzips in Abhängigkeit zur Einbausituation und den umgebenden Bedingungen bedarfsgerechte gestalterische und energetische Reaktionen zu ermöglichen ließ sich unter Betrachtung der untersuchten Bauteile erkennen. Im Teil 5 des Gebäudeenergiemodells (Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018c)) wird dieser Aspekt durch die individuelle Konfiguration der einzelnen Fassadenseiten noch weitergehend behandelt.

Beispielhaft zeigen die nebenstehenden Jahresgänge einzelner ausgewählter Bauteile (siehe Abb. 378), wie durch leichte Anpassung von Schichtenfolgen, Dimensionierungen oder gewünschten energetischen Verhaltens Die Gebäudehülle aktiv den Innenraumkomfort vorliegender Nutzungen unterstützen kann.

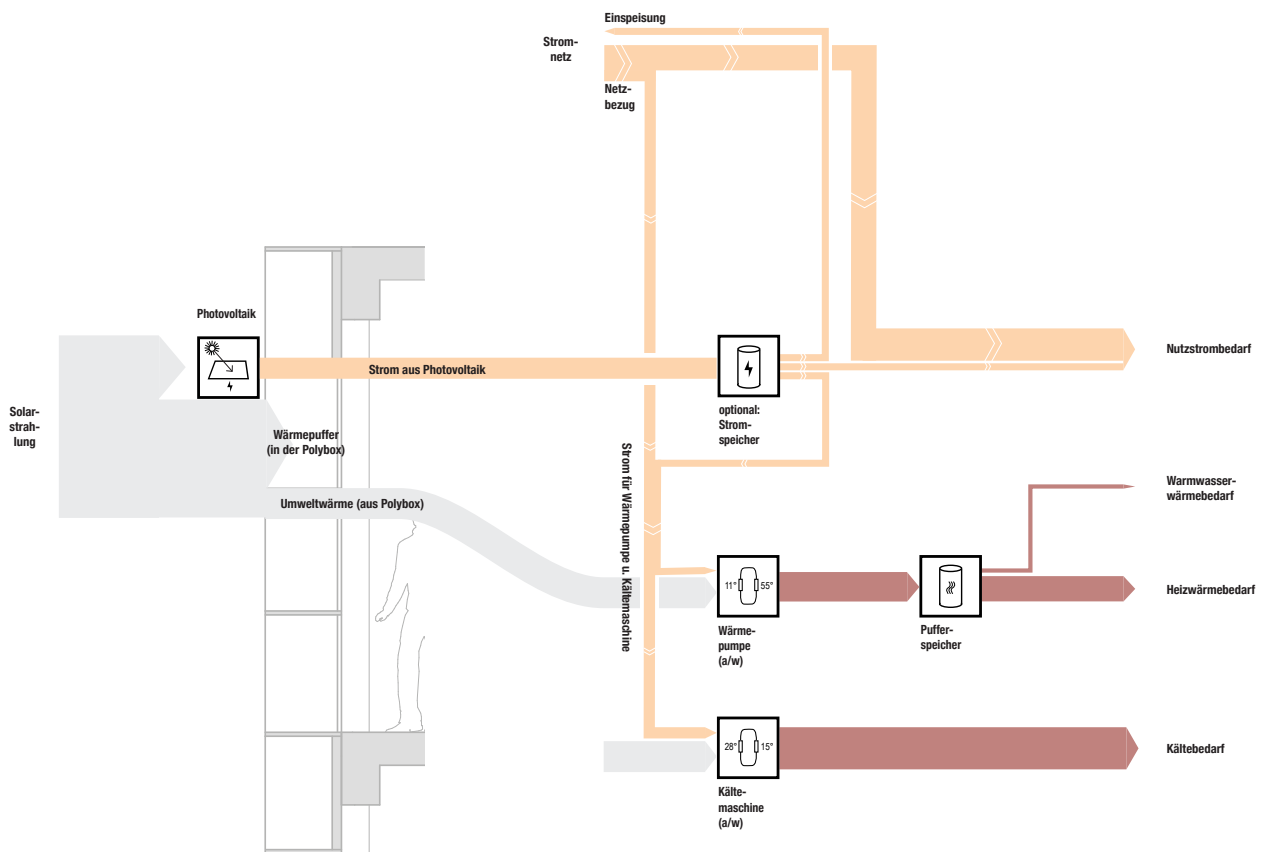


Abb. 379:
Ganzheitliche energetische
Betrachtung
Quelle: Eigene Darstellung

1.3. Einbindung solaradaptiver Energiesysteme in die Gebäudeenergiestruktur

Die aktive und passive Nutzung von Solarenergie in der Gebäudehülle bietet wie die vorangestellten gebäudebilanziellen, energetischen Betrachtungen belegen unter adaptiver Anwendung des polyfunktionalen Ansatzes deutliche Vorteile gegenüber gängigen, heutzutage eingesetzten Fassaden.

Insbesondere die Betrachtung der CO₂ Bilanz der untersuchten Px-Fassadenbauteile gegenüber der Anwendung der Referenzfassade haben gezeigt, dass unter Nutzung von Solarenergie in der Gebäudehülle aktiv der gebäudebezogene Ausstoß von CO₂ gemindert werden kann. Zudem zeigt dieser Indikator, dass die eingangs gestellte These einer Substitution von Gebäudedämmmaßnahmen auf Grund der Einbindung solarer Energiesysteme bestätigt werden können. Selbst die Szenarien S1 und S4 in denen polyfunktionale Bauteile ohne zusätzliche Dämmmaterialien verwendet sind, zeigen einen geringen CO₂ Ausstoß als das vergleichende Referenzszenario. Eine umfangreiche Strategie zur Einbindung von Solarenergie in das Energiekonzept von Gebäuden bietet daher gesamtenergetisch betrachtet ein enormes Potenzial in vielen und wesentlichen Gebäudetypologien und Nutzungen die zukünftigen Anforderungen im Hinblick auf den „CO₂-Fußabdruck“ erfüllen zu können.

Gepaart mit der variablen Ausbildung der Schichtenfolge verwendeter polyfunktionaler Bauteile lassen sich unterschiedliche bedarfsgetriebene adaptiv einsetzbare Fassadeneigenschaften erreichen. So konnte in den Szenarios S7 und S11 unmittelbar durch sensorgestützte Steuerung der Lüftungsklappen der Fassade aktiv die Innenraumtemperatur geregelt werden. Die Szenarien S2 und S5 hingegen konnten unter Einsatz reduzierter konventioneller Dämmmaterialien im Gesamtsystem annähernd gleiche Wärmebedarfe nachweisen wie sie im deutlich höher gedämmten Referenzszenario (vgl. Wurzbacher; Drebes; Kuhn 2018b) vorlagen.

Durch den Ansatz des polyfunktionalen Hüllprinzips an Gebäuden, dass eine flexible Adaption von solarenergienutzenden Eigenschaften in der gesamten Hüllfläche ermöglicht, ergibt sich die Chance den Eigennutzungsgrad an gewonnener Solarenergie zu optimieren. Durch bedarfsspezifische Konfigurationen von Fassade und Dach im Gebäudeenergiemodell, die sich mit dem Belegungsgrad für Photovoltaik gezielt an dem Lastgang der vorliegenden, gebäudeinternen Nutzung orientiert, wird sich der Ausstoß von CO₂ in den Szenarien nochmals reduzieren lassen. Auch die im Gebäudeenergiemodell angelegte Auswahlmöglichkeit unterschiedlicher Bauteilbelegungen der Fassaden eines Gebäudes entsprechend des internen Bedarfs wird sich bei vertiefenden Untersuchungen positiv auf die Energiebilanz eines Gebäudes auswirken.

1.4. Wirtschaftlichkeit von Solarfassaden gegeben

Die vorliegenden Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von Solarfassaden hat die finanziellen Effekte solaraktiver Bauteile analysiert und monetäre Optimierungspotentiale herausgearbeitet. Im Erkenntnisinteresse stand die Beantwortung der Fragestellung, welche wirtschaftlichen Effekte für immobilienwirtschaftliche Akteure zu erwarten seien, wenn gestalterisch anspruchsvolle solaraktive Systeme eingesetzt würden. Hierfür wurden in der Arbeit zunächst systematisch die spezifischen Bewertungsansätze der verschiedenen Stakeholder herausgearbeitet und in einer theoretischen Betrachtung gezeigt, dass Effizienz oder auch Wirtschaftlichkeit keine allgemeingültigen Begriffe – und damit nicht übertragbar – sind, sondern von der eingenommenen Perspektive des jeweiligen Stakeholders abhängen. Aufbauend auf diesen spezifischen Bewertungsansätzen wurde die Wirtschaftlichkeit alternativer Fassadensysteme aus den jeweiligen Perspektiven heraus analysiert.

Das Kernergebnis der Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von Solarfassaden ist, dass solaraktivierte und zugleich gestalterisch anspruchsvolle Fassadensysteme zunächst zusätzliche Investitionskosten einfordern. Resümierend kann allerdings konstatiert werden, dass eine gestalterisch anspruchsvolle und zugleich solaraktivierte Fassade gegenüber einer rein auf die Baukosten hin optimierten Fassade – den höheren Investitionskosten zum Trotz – grundsätzlich die Möglichkeit bietet, zusätzliche Renditen zu erzielen; zumindest dann, wenn entsprechende Zielgruppen und zu erwartende Zahlungsbereitschaften am Markt vorhanden sind. Vor diesem Kernergebnis kann konstatiert werden, dass solaraktivierte Bauteile aus der Sicht immobilienwirtschaftlicher Akteure wirtschaftlich sein und damit im Zuge der Energie- bzw. Wärmewende einen Beitrag leisten können.

2. Implikationen und weiterführende Forschungsfragen

2.1. Formspezifische Erhebungen zum Gebäudebestand

Implikationen für die Politik

Die Untersuchungen zu Solarpotenzialen im Gebäudebestand haben vielschichtige erschließbare Potenziale identifiziert. Hierbei konnten unterschiedliche Maßnahmen zur thermischen oder elektrischen Aktivierung je nach Gebäudetypus identifiziert und beschrieben werden. Für Bauherren und Planer wurde mit dem Prinzip des solaren „Fingerabdrucks ein Instrument entwickelt, mit welchem eine schnelle Annäherung zu erwartender Strahlungspotenziale für unterschiedliche Gebäude zu erwarten ist. Mit der Veröffentlichung der oben beschriebenen Typologiesteckbriefe wird die Hoffnung verbunden einfache und schnelle Potenzialabschätzungen von „Jedermann“ zu ermöglichen und einen Ausbau der Solarenergie damit zu befördern. Die Politik sollte für die unterschiedlichen Gebäudetypen jeweils „maßgeschneiderte“

Fördermöglichkeiten initiieren. So wird die fokussierte Entwicklung von Solarfassaden im Hochhausbau, großflächiger Dachsysteme im Hallenbau und die kombinierte- Grün- und Solarnutzung im Geschosswohnungsbau vorgeschlagen.

Implikationen für Forschung und Praxis

Eine detaillierte Hochrechnung der spezifischen Potenziale auf den gesamten deutschen Gebäudebestand konnte jedoch nicht vollumfänglich durchgeführt werden. Grund hierfür liegt in den nach wie vor lückenhaften Daten zum Gebäudebestand. Die einleitend hierfür analysierten Angaben der Literatur weichen dabei in einigen Bereichen voneinander ab.

Eine wichtige Grundlage für weitere energetische Bewertungen würde eine entsprechende umfangreiche Datenerhebung zum Gebäudebestand liefern. Basis solch einer Untersuchung können die unterschiedlichen statistischen Erhebungen (z.B. Destatis, etc.) oder die bereits flächig implementierten 3D-Geländemodelle von Geoplattformen (z.B. Google Earth, Bing Maps, etc.) dienen.

2.2. Kombinierte dynamische elektrothermische Simulation

Implikationen für die Politik

Die entwickelten und simulierten Varianten solaradaptiver polyfunktionaler Fassaden hat ein ganz unterschiedliche Verhaltensweisen identifiziert. Aktiv-passive Solarfassaden können gemäß den getätigten Untersuchungen Dämmung substituieren und damit als alternative Maßnahme zur Materialeinsparung beitragen. Aktive Gewinne sollten daher stärker in den gesetzlichen Nachweisverfahren Berücksichtigung finden. Auch ist eine weiterhin fortschreitende Verschärfung im Bereich der Wärmeverluste über die Gebäudehülle vor dem Hintergrund der identifizierten energetischen Verhaltensweisen kritisch zu bewerten. Insgesamt wird empfohlen die zukünftigen Energiestandards stärker auf den zu erwartenden CO₂ Ausstoß zu legen und gleichzeitig mehrere Wege zur Erreichung dieser Ziele zu ermöglichen.

Implikationen für Forschung und Praxis

In weiteren Untersuchungen sollten integrale elektrothermische Simulationen Anwendung finden. Das bedeutet, die in dieser Arbeit getrennt simulierten Potenziale zur solaren Strom- und Wärmeproduktion sollten in einer einheitlichen Simulationsumgebung betrachtet werden. Hier sollten auch Effekte und Wechselwirkungen zwischen Temperatur und Wirkungsgrad photovoltaischer Systeme berücksichtigt werden. Die bisher verfügbaren Simulationsprogramme können diese Aspekte bisher jedoch noch nicht in ausreichendem Maße leisten.

2.3. Investitionskosten gezielt senken

Implikationen für die Politik

Mit der Arbeit konnte gezeigt werden, dass Fassadensysteme, die nicht ausschließlich auf die maximale Energieeffizienz hin konstruiert werden, durch die solare Bauteilaktivierung einen durchaus sinnvollen Beitrag zur Energiewende leisten können. Mit einer flächendeckenden Durchsetzung solaraktivierter Bauteile im Gebäudesektor verlieren Gebäude ihren Status als reine Verbraucher damit zusehends. Vor diesem Hintergrund verweisen die Ergebnisse auf das Erfordernis hin, den sinnvollen Beitrag von Gebäuden in der Umsetzung der Energiewende neu zu konzipieren. Hierbei gilt es zu insbesondere darum, zu prüfen, inwieweit Gebäude im systemischen Kontext der Sektorenkopplung ausschließlich auf die maximale Energieeffizienz hin bewertet werden sollten (EnEV/EEWärmeG).

Fördermaßnahmen, welche die Investitionskosten reduzieren, wirken sich in jedem Fall positiv auf die Wirtschaftlichkeit für Eigentümer und Nutzer aus. Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den Berechnungsperspektiven des vermietenden Eigentümers und des nutzenden Mieters reduziert sich bei gleichen Eigenkapitalrenditeerwartungen entweder die Nettokaltmiete (der Nutzer profitiert) oder aber bei gleichbleibender Aufnahmefähigkeit/Zahlungsbereitschaft des Marktes steigt die Eigenkapitalrendite des Vermieters. Die konkreten Effekte ergeben sich aus der Höhe der Fördermaßnahmen und aus den spezifischen Rahmenbedingungen. Seitens der Politik werden gegenwärtig für den Wohngebäudebestand Steuerabschreibungen für die Durchsetzung der energetischen und klimapolitischen Ziele diskutiert. Steuerabschreibungen wirken sich in der Regel ebenfalls positiv auf die Wirtschaftlichkeit auf. In welchem Umfang hängt von den politischen Maßnahmen und den steuerlichen Bedingungen der Marktteilnehmer ab. In diesem Kontext gilt es zu einerseits prüfen, inwiefern bestimmte Fördermaßnahmen und/oder Steuerabschreibungen die Situation der Akteure verändern, um hieraus ein zugleich wirtschaftliches Optimum für die Akteure und den Fiskus ableiten zu können. Andererseits gilt es im systemischen Kontext der sektorenübergreifenden Energiewende zu klären, in welcher Höhe spezifische Steuerabschreibungen oder Fördermaßnahmen solaraktivierter Bauteile unter Berücksichtigung der damit generierten Vermeidungskosten (im Vergleich zu den Vermeidungskosten alternativer Maßnahmen zur Umsetzung von Klimaschutz oder Energiewende in anderen Bereichen) gesamtwirtschaftlich-umweltökonomisch zweckdienlich sind. Konkrete Effekte bestimmter Maßnahmen (Fördermaßnahmen und/oder Steuerabschreibungen) sind daher in jedem Fall vor der politischen Entscheidung hinsichtlich der Sinnhaftigkeit aus den verschiedenen Perspektiven zu prüfen. Resümierend kann festgehalten werden, dass zwar noch einige Fragen zu beantworten sind, um die umfangreichen Potentiale solaraktivierter und zugleich gestalterisch anspruchsvoller Bauteile für den Klimaschutz und die Energiewende zu ermitteln. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen jedoch eindrucksvoll, dass diese Fragen es wert sind, beantwortet zu werden, da solaraktivierte, gestalterisch hochwertige Fassadensysteme aus der Sicht immobilienwirtschaftlicher Akteure

gegenüber baukostenoptimierten Standardfassadensystemen wirtschaftlich vorteilhaft sein können.

Implikationen für Forschung und Praxis

Um die Größe dieses Beitrags für die Energie- bzw. Wärmewende bemessen zu können, stehen zunächst noch weitere Analysen aus, die ihr Erkenntnisinteresse insbesondere auf den Wert der vordergründig nicht-monetär messbare Qualitäten legen sollten. Hierzu zählen bspw. der Wert der Fassadengestaltung, dem Wert des Corporate Branding oder des Employer Branding über die Fassade eines Gebäudes. Dies ist deshalb besonders relevant, weil der Sachverhalt zusätzlicher Zahlungsbereitschaften für sichtbar und zugleich gestalterisch anspruchsvolle solaraktivierte, repräsentative Gebäudeteile bislang noch nicht im Fokus wissenschaftlicher Analysen stand. Die wissenschaftliche Forschung sollte daher in Zusammenarbeit mit der Praxis (Produzenten/ Investoren) klären, welche Zielgruppen in welchen Märkten welche zusätzlichen Zahlungsbereitschaften für solaraktivierte, gestalterisch anspruchsvolle Fassaden haben. Hierbei ist eine differenzierte Analyse erforderlich, die andere Faktoren, die auf die Zahlungsbereitschaft wirken (wie beispielsweise die Lage), auszuschließen vermag. Hierfür stellt die betriebswirtschaftliche Forschung diverse Methoden zur Verfügung. Darüber hinaus erscheint es zweckdienlich, sich den Möglichkeiten und Grenzen der linearen Optimierung bei der Planung von Solarfassaden zuzuwenden. Hierfür stellt die betriebswirtschaftliche Forschung ebenfalls diverse Methoden zur Verfügung, mittels derer die Wirtschaftlichkeit von solaraktivierten Fassaden bei komplexen Baukörpern und teilverschatteten Fassadenflächen im Zweifelsfall wesentlich gesteigert werden kann.

Literaturverzeichnis

Bürger; Hesse; Quack et al. (2016)

Bürger, Veit; Hesse, Tilman; Quack, Dietlinde; Palzer, Andreas; Köhler, Benjamin; Herkel, Sebastian; Engelmann, Peter: Klimaneutraler Gebäudebestand 2050; 2016; abgerufen von: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/cli-mate_change_06_2016_klimaneutraler_gebaeudebestand_2050.pdf; Zugriff am 16.09.2017

Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018b)

Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Kuhn, Christoph: Dynamische Betrachtungen solaradaptiver polyfunktionaler Fassaden (Teil 4) in: Kuhn, Christoph; Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Pfnür, Andreas; Müller, Nikolas: Gebäudeintegrierte solaraktive Strategien: Analytische Bewertung und Entwicklung gebäudeintegrierter solaraktiver Systeme

Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018c)

Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Kuhn, Christoph: Einbindung solaradaptiver Fassaden in das Gebäudeenergiesystem (Teil 5) in: Kuhn, Christoph; Wurzbacher, Steffen; Drebes, Christoph; Pfnür, Andreas; Müller, Nikolas: Gebäudeintegrierte solaraktive Strategien: Analytische Bewertung und Entwicklung gebäudeintegrierter solaraktiver Systeme

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:

Entwicklung der gesetzlichen Anforderungen an die Gebäudeenergieeffizienz anhand des spezifischen Transmissionswärmetransferkoeffizienten $H'T$; Darstellung möglicher Korridore der zukünftigen EU-Richtlinie „Niedrigstenergiegebäude“

Quelle: performative architektur;
hier abgebildet: S.14

Abb. 2:

jährliche neuinstallierte Leistung regenerativer Energiesysteme

Quelle: Hegger, Drebes, Wurzbacher (2015) auf Datengrundlage von Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2015a), Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2015b), Netztransparenz.de (2015);
hier abgebildet: S.16

Abb. 3:

Kumulierte installierte Leistung regenerativer Energiesysteme

Quelle: Hegger, Drebes, Wurzbacher (2015) auf Datengrundlage von Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2015a), Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2015b), Netztransparenz.de (2015);
hier abgebildet: S.16

Abb. 4:

Beispiel eines Plusenergiegebäudes mit geneigtem Solardach und einer nord-Süd-Ausrichtung im Stadtteil Vauban, Freiburg

Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.16

Abb. 5:

„Haus im Haus“ Prinzip mit einfacher Klimahülle und temperierten Kernzonen;
„Cubity“ Solar Decathlon Beitrag 2014 der TU Darmstadt
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.17

Abb. 6:

Baulicher Luftkollektor an einem Institutsgebäude in Freiburg; Architektengemeinschaft Pfeifer, Roser, Kuhn, Freiburg

Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.17

Abb. 7:

Wabenfassade am Konzerthaus Harpa Reykjavik; Architekt Henning Larsen Architects, Kopenhagen

Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.17

Abb. 8:

Durch Experten des Bauwesens vorgetragene Hemmnisse zur Anwendung solarer Energiesysteme in der Gebäudehülle im Lebenszyklus

Quelle: Hegger, Drebes, Wurzbacher (2015);
hier abgebildet: S.18

Abb. 9:

Methodisches Vorgehen, Input- und Output Parameter des Gebäudeenergiemodells

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.23

Abb. 10:

Dacheindeckungen mit Schiefer, Ton gebrannten Dachsteinen, Reet und Blech im Wandel der Zeit

Fotos: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.28

Abb. 11:

Holzkonstruktionen im Wandel der Zeit

Fotos: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.28

Abb. 12:

Kupferstich von Cornelius Galle: *Adspectus Incauti Dispendium*, 1601, entnommen aus: Caspary (2013 S.47);
hier abgebildet: S.29

Abb. 13:

Konstruktionsprinzipien und Gestaltungsweisen des Ziegels im Wandel der Zeit

Fotos: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.30

Abb. 14:

Verwendung von Sichtbeton als eigene Ausdrucksform der Fassade

Fotos: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.30

Abb. 15:

Prinzip des Solaren Fingerabdrucks (Beispiele: hoförmiger Baut und Hallenbau)

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.36

Abb. 16:

Gleiches Maß baulicher Dichte ($GFZ=1,0$) in Punktförmiger, zeilenartiger und Blockartiger Bebauung

Quelle: Wurzbacher(2017) auf Grundlage von: Fernandez Per & Mozas 2004 aus: Berghauser Pont & Haupt, 2010, S.13;
hier abgebildet: S.38

Abb. 18:

Gebäudeanzahl der Wohngebäude mit Mischnutzung und der Nichtwohngebäude

Quelle: Eigene Darstellung nach Bürger et al. 2016, S. 123;
hier abgebildet: S.40

Abb. 17:

Flächenverteilung des Nichtwohngebäudebestandes in Mio. m²

Quelle: Eigene Darstellung nach Bürger et al. 2016, S. 123;
hier abgebildet: S.40

Abb. 19:

Vergleichende Betrachtung verschiedener Kenngrößen der Wohn- und Nichtwohngebäude und anschließende Sortierung

Quelle: Eigene Darstellung und Hochrechnung auf Datengrundlage von von Bürger; Hesse; Quack et al. (2016);
hier abgebildet: S.42

- Abb. 20:
Anteil der (1)Dach- und (2)Fassadenflächen des deutschen Gebäudebestands
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.45
- Abb. 21:
Häufigkeitsverteilung von Gebäuden des deutschen Gebäudebestandes nach Baualtersklassen
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Bürger et al. (2016 S.112);
hier abgebildet: S.47
- Abb. 22:
Gegenüberstellung der Dachform
Fotos: Jana Weber;
hier abgebildet: S.48
- Abb. 23:
Ansichten Fassaden MFW der Baualtersklasse D, exemplarisch
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.48
- Abb. 24:
Ansichten Fassaden Hochhaus Alterbauklasse F, exemplarisch
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.48
- Abb. 25:
variierende Fassadengestaltung
Foto: Jana Weber;
hier abgebildet: S.48
- Abb. 26:
Aufbau des Simulationsmodells mit den Komponenten: 1. Rhino, 2. Grasshopper, 3. EcoTect, 4. Excel
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.50
- Abb. 27:
Darstellung der Gliederung der Hüllflächen in Dach und Wandflächen sowie einer weiteren Untergliederung in exponierte und reduzierte Bereiche
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.51
- Abb. 28:
Darstellung der automatischen Rasterung der Hüllflächen in Grasshopper
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.51
- Abb. 29:
Darstellung der Umgebung des Testgebäudes mit Bodenplatte, abstrahierten umliegenden Gebäuden und umfassenden Rand
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.51
- Abb. 30:
Red 0: Baukörper ohne Umgebung und ohne untergeordnete Bauteile
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.53
- Abb. 31:
Red 1: Baukörper mit Umgebung, jedoch ohne untergeordneten Bauteilen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.53
- Abb. 32:
Red 2: Baukörper mit Umgebung und mit untergeordneten Bauteilen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.53
- Abb. 33:
Varianz in der Anzahl Vollgeschossen untersuchter Testgebäude
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.56
- Abb. 34:
Varianz im Maß der Kompaktheit (a/V) untersuchter Testgebäude; Je höher die bauliche Dichte, desto kompakter werden Morphologien
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.56
- Abb. 35:
Sozialer Wohnungsbau der 1960er Jahre
Quelle: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.64
- Abb. 36:
Büro-Hochhäuser verschiedener Baualter
Foto: Christoph Drebes;
hier abgebildet: S.64
- Abb. 37:
Wohnungsbau der 1970er Jahre
Quelle: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.64
- Abb. 38:
Bürobau verschiedene Baualter;
hier abgebildet: S.64
- Abb. 39:
Hochhaus mit Wohnnutzung ;
hier abgebildet: S.65
- Abb. 40:
Sozialer Wohnungsbau
Foto: Christoph Drebes;
hier abgebildet: S.64
- Abb. 41:
Typische Umgebung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.65
- Abb. 42:
Typische Bauform / Volumen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.65
- Abb. 43:
Gängige Dachausführungen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.65

Abb. 44:
Bandbreiten der Geschossflächenzahl (GFZ)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.65

Abb. 45:
Bandbreiten der Grundflächenzahl (GRZ)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.65

Abb. 46:
Bandbreiten der Bruttogrundfläche (BGF)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.65

Abb. 47:
Bandbreiten der Kompaktheit (A/V)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.65

Abb. 48:
Typische Länge zu Breite des Baukörpers
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.65

Abb. 49:
Typische Dachformen und Aufbauten
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.65

Abb. 50:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von
Dachflächen bei punktförmigen Bauten
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.66

Abb. 51:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.66

Abb. 52:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.66

Abb. 53:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.66

Abb. 54:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.66

Abb. 55:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.67

Abb. 56:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.67

Abb. 57:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 2 Quelle:
Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.67

Abb. 58:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.67

Abb. 59:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Fas-
sadenflächen bei punktförmigen Bauten
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.67

Abb. 60:
Beispiele von Strahlungssituationen auf Baukörpern
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.68

Abb. 61:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.68

Abb. 62:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.68

Abb. 63:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.68

Abb. 64:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.68

Abb. 65:
Freistehendes Einfamilienhaus
Foto: Christoph Drebes;
hier abgebildet: S.70

Abb. 66:
frühes Einfamilienhaus mit Satteldach
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.70

Abb. 67:
modernes Mehrfamilienhaus
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.70

Abb. 68:
dörfliches Mehrfamilienhaus mit Mansarddach
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.70

Abb. 69:
einzelnstehendes Bürogebäude
Foto: Christoph Drebes;
hier abgebildet: S.70

Abb. 70:
Bürogebäude mit antiken Fassadenelementen
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.70

Abb. 71:
Bandbreiten der Geschossflächenzahl (GFZ)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.71

Abb. 72:
Bandbreiten der Grundflächenzahl (GRZ)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.71

Abb. 73:
Bandbreiten der Bruttogrundfläche (BGF)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.71

Abb. 74:
Bandbreiten der Kompaktheit (A/V)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.71

Abb. 75:
Typische Länge zu Breite des Baukörpers
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.71

Abb. 76:
Typische Dachformen und Aufbauten
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.71

Abb. 77:
Typische Umgebung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.71

Abb. 78:
Typische Bauform / Volumen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.71

Abb. 79:
Gängige Dachausführungen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.71

Abb. 80:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von
Dachflächen bei punktförmigen Bauten
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.72

Abb. 81:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.72

Abb. 82:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.72

Abb. 83:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.72

Abb. 84:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.72

Abb. 85:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.73

Abb. 86:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.73

Abb. 87:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.73

Abb. 88:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2;
hier abgebildet: S.73

Abb. 89:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Fas-
sadenflächen bei punktförmigen Bauten
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.73

Abb. 90:
Beispiele von Strahlungssituationen auf Baukörpern
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.74

Abb. 91:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.74

Abb. 92:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.74

Abb. 93:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.74

Abb. 94:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.74

Abb. 95:
Reihenhauszeile
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.76

Abb. 96:
Mehrfamilienhauszeile der 1970er Jahre
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.76

Abb. 97:
homogen gerasterte Bürozeile
Foto: Christoph Drebes;
hier abgebildet: S.76

Abb. 98:
städtisches Reihenendhaus
Foto: Christoph Drebes;
hier abgebildet: S.76

Abb. 99:
typische Bürozeile der 1950er Jahre
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.76

Abb. 100:
Bürozeile 1960er Jahre
Foto: Christoph Drebes;
hier abgebildet: S.76

Abb. 101:
Bandbreiten der Geschossflächenzahl (GFZ)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.77

Abb. 102:
Bandbreiten der Grundflächenzahl (GRZ)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.77

Abb. 103:
Bandbreiten der Bruttogrundfläche (BGF)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.77

Abb. 104:
Bandbreiten der Kompaktheit (A/V)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.77

Abb. 105:
Typische Länge zu Breite des Baukörpers
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.77

Abb. 106:
Typische Dachformen und Aufbauten
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.77

Abb. 107:
Typische Umgebung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.77

Abb. 108:
Typische Bauform / Volumen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.77

Abb. 109:
Gängige Dachausführungen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.77

Abb. 110:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.78

Abb. 111:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.78

Abb. 112:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von
Dachflächen bei zeilenartigen Gebäuden
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.78

Abb. 113:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.78

Abb. 114:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.78

Abb. 115:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.79

Abb. 116:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.79

Abb. 117:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.79

Abb. 118:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.79

Abb. 119:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Fas-
sadenflächen bei zeilenartigen Gebäuden
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.79

Abb. 120:
Beispiele von Strahlungssituationen auf Baukörpern
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.80

Abb. 121:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.80

Abb. 122:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.80

Abb. 123:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.80

Abb. 124:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.80

Abb. 125:
geschlossene Blockrandbebauung mit innenliegendem
Innenhof
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.82

Abb. 126:
Innenstädtisches Eckhaus mit kommerzieller Nutzung
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.82

Abb. 127:
Innerstädtischer Blockrand
Wohn- und Bürobau
Foto: Christoph Drebes;
hier abgebildet: S.82

Abb. 128:
Innerstädtischer Blockrandbebauung verschiedener Nut-
zung und Baualter
Foto: Christoph Drebes;
hier abgebildet: S.82

Abb. 129:
Blockrandbebauung mit Wohnnutzung
Foto: Steffen Wurzbacher;
hier abgebildet: S.82

Abb. 130:
Innerstädtischer Blockrand
Bürobau
Foto: Christoph Drebes;
hier abgebildet: S.82

Abb. 131:
Bandbreiten der Geschossflächenzahl (GFZ)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.83

Abb. 132:
Bandbreiten der Grundflächenzahl (GRZ)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.83

Abb. 133:
Bandbreiten der Bruttogrundfläche (BGF)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.83

Abb. 134:
Bandbreiten der Kompaktheit (A/V)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.83

Abb. 135:
Typische Länge zu Breite des Baukörpers
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.83

Abb. 136:
Typische Dachformen und Aufbauten
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.83

Abb. 137:
typische Umgebung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.83

Abb. 138:
typische Bauform / Volumen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.83

Abb. 139:
gängige Dachausführungen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.83

Abb. 140:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.84

Abb. 141:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.84

Abb. 142:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von
Dachflächen bei hofförmigen Gebäuden
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.84

Abb. 143:
Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.84

Abb. 144:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.84

Abb. 145:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.85

Abb. 146:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.85

Abb. 147:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.85

Abb. 148:

Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.85

Abb. 149:

Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Fasadensflächen bei höförmigen Gebäuden

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.85

Abb. 150:

Beispiele von Strahlungssituationen auf Baukörpern

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.86

Abb. 151:

Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED0

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.86

Abb. 152:

Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.86

Abb. 153:

Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 2

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.86

Abb. 154:

Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 2

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.86

Abb. 155:

gläsernes Bahnhofdach

Foto: Christoph Drebes;

hier abgebildet: S.88

Abb. 156:

Freistehende Logistikhalle

Foto: Christoph Drebes;

hier abgebildet: S.88

Abb. 157:

Alte Fabrikhalle

Foto: Christoph Drebes;

hier abgebildet: S.88

Abb. 158:

Museumshalle Vitramuseum

Foto: Christoph Drebes;

hier abgebildet: S.88

Abb. 159:

Baumarkthalle

Foto: Christoph Drebes;

hier abgebildet: S.88

Abb. 160:

Gewerbehalle

Foto: Christoph Drebes;

hier abgebildet: S.88

Abb. 161:

Bandbreiten der Geschossflächenzahl (GFZ)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.89

Abb. 162:

Bandbreiten der Grundflächenzahl (GRZ)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.89

Abb. 163:

Bandbreiten der Bruttogrundfläche (BGF)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.89

Abb. 164:

Bandbreiten der Kompaktheit (A/V)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.89

Abb. 165:

Typische Länge zu Breite des Baukörpers

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.89

Abb. 166:

Typische Dachformen und Aufbauten

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.89

Abb. 167:

Typische Umgebung

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.89

Abb. 168:

Typische Bauform / Volumen

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.89

Abb. 169:

Gängige Dachausführungen

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.89

Abb. 170:

Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 0

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.90

Abb. 171:

Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen
zu NBL [m²/ha] RED 0

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.90

Abb. 172:

Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von
Dachflächen bei Hallengebäuden

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.90

Abb. 173:

Solarer Fingerabdruck aller Dachflächen RED 2

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.90

Abb. 174:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.90

Abb. 175:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.91

Abb. 176:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.91

Abb. 177:
Solarer Fingerabdruck aller Wandflächen RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.91

Abb. 178:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.91

Abb. 179:
Beispiel unterschiedlicher Strahlungssituationen von Fassadenflächen bei Hallengebäuden
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.91

Abb. 180:
Beispiele von Strahlungssituationen auf Baukörpern
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.92

Abb. 181:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.92

Abb. 182:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 0
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.92

Abb. 183:
Solarer Fingerabdruck der gesamten Gebäudehülle RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.92

Abb. 184:
Flächenanteil exponierter und hoch exponierter Flächen zu NBL [m²/ha] RED 2
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.92

Abb. 185:
exponierte Fassadenflächen pro Hektar Nettobauland (spezifische Strahlung von 500 bis 750 kWh/(qm*a))
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.94

Abb. 186:
Hochexponierte Dachflächen pro Hektar Nettobauland (spezifische Strahlung von 750 bis 1000 kWh/(qm*a)) ;
hier abgebildet: S.94

Abb. 187:
theoretisches Potenzial gebäudebezogener solarer Strom- und Wärmeproduktion in Relation zum deutschen Strom- und Wärmebedarf; Quelle: Eigene Darstellung auf Datengrundlage von statista.de (2017) und BMWi (2015);
hier abgebildet: S.97

Abb. 188:
Die Flexibilisierung der Produktion und Anwendung technischer Solarenergiesysteme durch hohen Vorfertigungsgrad projektspezifischer Anwendungen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.102

Abb. 189:
Integraler Planungs-, Vorfertigungs- und Errichtungsprozess
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.102

Abb. 190:
Flexibles Raster als vorgehängtes Element und Tragstruktur solaraktiver Systeme
Foto: FG ENB, Luica Kulinsky;
hier abgebildet: S.103

Abb. 191:
Aktive und passive energetische Funktionen der Fassade
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.104

Abb. 192:
Schutz- und Kommunikationsfunktionen der Fassade
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.104

Abb. 193:
Variabilität in Dimension, Materialität und Ausführung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.105

Abb. 194:
Gestaltungsvarianz für einsehbare gebäude- und raumabschließende Bauteilschichten bieten, in teil-transparenten Bauteilen auch einsehbare innere Oberflächen beachten
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.105

Abb. 195:
Organischer Photovoltaik;
Ausdrucksformen in Farbe, Struktur und Wirkung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.107

Abb. 196:
Dünnschicht Photovoltaik;
Ausdrucksformen in Farbe, Struktur und Wirkung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.107

Abb. 197:

Kristalline Photovoltaik;
Ausdrucksformen in Farbe, Struktur und Wirkung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.107

Abb. 198:

Systemschema der Photovoltaik von der nutzbaren Solarstrahlung bis zur Systemleistung
Quelle: benefit E1;
hier abgebildet: S.109

Abb. 199:

Systemschema des Luftkollektors von der nutzbaren Solarstrahlung bis zur Systemleistung
Quelle: benefit E1;
hier abgebildet: S.109

Abb. 200:

Umgangsmöglichkeiten mit dem Grundraster als determinierende Variable in der Fassadenkonstruktion
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.110

Abb. 201:

Studien zur Auswahl möglicher Gliederungen von Fassaden zur konzeptionellen Einbindung (1) gängiger Maße und (2) Mindestanforderungen des Bürobaus zur Einbindung von Fenstern oder Anschlußmöglichkeiten von Innenwänden
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.111

Abb. 202:

Monokristalline Wafer auf transparentem Trägermaterial vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 203:

Organische Photovoltaik farbig auf transparentem Trägermaterial und Antiflex-Deckglas vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 204:

Transparente organische Photovoltaik vor Festverglasung mit sichtbarem konstruktiven Rost aus Funierschichtholz
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 205:

Transluzente organische Photovoltaik farbig vor Festverglasungen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 206:

Dünnschicht-Photovoltaik opak
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 207:

Farbiges Ausführungsbeispiel der Dünnschicht-Photovoltaik durch eingefärbtes Deck-Glas, opak
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 208:

Organische Photovoltaik farbig auf transparentem Trägermaterial und Antiflex-Deckglas vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen bei Nacht
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 209:

Farbige organische Photovoltaik individuell gefräst auf transparentem Trägermaterial mit Antiflex-Deckglas vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 210:

Monokristalline Wafer (weiß) auf transparentem Trägermaterial vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 211:

Polykristalline Photovoltaik-Elemente, exemplarisch in blauer Einfärbung als opake Fläche
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 212:

Organische Photovoltaik auf transparentem Trägermaterial und Antiflex-Deckglas vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 213:

Organische Photovoltaik auf transparentem Trägermaterial vor festverglasten und opaken Fassadenbereichen bei Nacht
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.112

Abb. 214:

Kombination schmaler, hochformatiger Fensterelemente mit kleinteiliger, opaker und farbiger Dünnschicht-Photovoltaik
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 215:

Kombination schmaler, hochformatiger Fensterelemente mit kleinteiliger, transluzenter organischen Photovoltaik und einsehbarem Holzrost
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 216:

Einbindung breiter, geschosshoher Fensterelemente in großformatigen, organischen Photovoltaik-Modulen mit Fräsung und differenzierter, farblicher Ausbildung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 217:

Ausbildung von Fensterband-Fassaden kombiniert mit liegendem Px-Format und organischer Photovoltaik auf transparentem Trägermaterial für transparente Festverglasungs- und opake Fassadenbereiche
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 218:
Fensterband-Typologie mit Sonnenschutzelementen eingebunden in liegendem Px-Fassadenraster mit organischer Photovoltaik auf transparentem Trägermaterial
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 219:
Fensterband-Typologie mit organischer Photovoltaik auf transparentem Trägermaterial vor Festverglasung bzw. opaken Fassadenbereichen bei Nacht
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 220:
Kleinteilige, organische Photovoltaik-Modulen transluzent vor Festverglasungen und opaken Polyboxelementen bei Nacht kombiniert mit Fensterelementen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 221:
Großformatige, geschosshohe Fensterelemente kombiniert mit großformatigen Dünnschicht-Photovoltaik-Paneellen als opake Flächen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 222:
Monokristalline Wafern in weiß auf großformatigem opaken bzw. transparentem Trägermaterial kombiniert mit hochformatigen Fensterelementen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 223:
Schmale, geschosshohe Fensterelemente kombiniert mit schmalen geschosshohen Modulen aus Dünnschicht-Photovoltaik (farbig-opak)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 224:
Schmale, geschosshohe Fensterelemente kombiniert mit schmalen, geschosshohen Modulen aus Dünnschicht- bzw. organischer Photovoltaik (opak bzw. transluzent)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 225:
Schmale, geschosshohe Fensterelemente eingebunden in kleinteilige, organische Photovoltaik-Module (farbig transluzent)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.113

Abb. 226:
Erwartetes thermisches Verhalten der homogenisierenden Wirkung der kleinteiligen Fassadenstruktur von (1) Px-Fassaden im Vergleich zum Verhalten geschoss- oder gebäudehoher (2) Doppelfassaden
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.114

Abb. 227:
Beispielhafte Ausdrucksformen des Px-Fassade unter Verwendung verschiedener Photovoltaikgenerationen als Oberflächen-“Material“
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.115

Abb. 228:
solaradaptive Bürofassade“Polybox“
Foto: FG ENB, Sarah Papperitz;
hier abgebildet: S.116

Abb. 229:
Exemplarischer konstruktiver Aufbau der Polybox (Maßstab 1:50)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.117

Abb. 230:
solaradaptive Bürofassade“Polybox“
Foto: FG ENB, Sarah Papperitz;
hier abgebildet: S.118

Abb. 231:
Detail des Fensteranschlusses
Foto: FG ENB, Sarah Papperitz;
hier abgebildet: S.118

Abb. 232:
Schnitt mit Anschluss Dämmpaket und Festverglasung
Foto: FG ENB, Sarah Papperitz;
hier abgebildet: S.118

Abb. 233:
Raumeindruck aus dem Büro
Foto: FG ENB, Sarah Papperitz;
hier abgebildet: S.118

Abb. 234:
Planungsauszug des exemplarischen konstruktiven Aufbaus der Polybox (Maßstab 1:20)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.119

Abb. 235:
Elemente der dynamischen Simulation: (1) Fassadenmodul, (2) Musterraum Arbeiten, (3) Musterraum Wohnen
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.120

Abb. 236:
Übersicht der Simulationsumgebung bestehend aus dem (1) Gebäude-körper, (2) Musterraum, sowie einem exemplarisch gewählten Fassadenmodul (3). Zudem zeigt die Abbildung schematisch die simulierten Orientierungen der Simulationsmodelle
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.121

Abb. 237:
Zirkulationsschema temperatur-geregelter, durchströmter Px-Fassade (Polykollektor)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.122

Abb. 238:
Zirkulationsschema Px-Fassade mit Temperaturschichtung als thermische Dämmung (Polybox)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.122

Abb. 239:
Begriffliche Definitionen zur Systematisierung der Simulationsergebnisse
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.123

Abb. 240:
piktogramatische Darstellungen der Grundsysteme: Referenzsystem (1) Polybox (2), Polykollektor (3)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.124

Abb. 241:
Schematische Darstellung und Abmessungen der simulierten Varianten des Px-Fassadenprinzips
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.125

Abb. 242:
Schematische Darstellung der Referenz-Fassade als Metallkassette
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.125

Abb. 243:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.128

Abb. 244:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.128

Abb. 245:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.129

Abb. 246:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.129

Abb. 247:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.129

Abb. 248:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.130

Abb. 249:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,

11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.130

Abb. 250:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.130

Abb. 251:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Px-Fassade nach Orientierung und während einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur im Musterraum
(Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.131

Abb. 252:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Px-Fassade nach Orientierung und während einer Übergangswoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur im Musterraum
(Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.131

Abb. 253:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Px-Fassade nach Orientierung und während einer Sommerwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur im Musterraum
(Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.131

Abb. 254:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.132

Abb. 255:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.132

Abb. 256:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.133

Abb. 257:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsi-

mulation
Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.133

Abb. 258:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsi-
mulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.133

Abb. 259:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.134

Abb. 260:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.134

Abb. 261:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.134

Abb. 262:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden
Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach
Orientierung während der Winterzeit zur daraus resultie-
renden Temperatur im Musterraum
(Betrachtungszeitraum 16.1.-22.1.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.135

Abb. 263:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden
Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach
Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur
daraus resultierenden Innenraumtemperatur
(Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.135

Abb. 264:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden
Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach
Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur
daraus resultierenden Innenraumtemperatur
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.135

Abb. 265:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fas-
sadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.136

Abb. 266:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und
Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade
(1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des
Musterraums zum Referenzraum
(2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.136

Abb. 267:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsi-
mulation
(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.137

Abb. 268:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsi-
mulation
Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.137

Abb. 269:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsi-
mulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.137

Abb. 270:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.138

Abb. 271:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.138

Abb. 272:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.138

Abb. 273:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden
Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung
in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultieren-
den Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum
16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.139

Abb. 274:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.139

Abb. 275:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.139

Abb. 276:

Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.140

Abb. 277:

Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.140

Abb. 278:

mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.141

Abb. 279:

mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.141

Abb. 280:

mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.141

Abb. 281:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.142

Abb. 282:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,

11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.142

Abb. 283:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.142

Abb. 284:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.143

Abb. 285:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.143

Abb. 286:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.143

Abb. 287:

Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.146

Abb. 288:

Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.146

Abb. 289:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.147

Abb. 290:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.147

Abb. 291:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.147

Abb. 292:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.148

Abb. 293:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.148

Abb. 294:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.148

Abb. 295:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.149

Abb. 296:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.149

Abb. 297:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.149

Abb. 298:
Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.150

Abb. 299:
Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade

(1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum
(2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.150

Abb. 300:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.151

Abb. 301:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation
Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.151

Abb. 302:
Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation
(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.151

Abb. 303:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.152

Abb. 304:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.152

Abb. 305:
(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.152

Abb. 306:
Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.153

Abb. 307:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.153

Abb. 308:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.153

Abb. 309:

Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.154

Abb. 310:

Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.154

Abb. 311:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.155

Abb. 312:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.155

Abb. 313:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.155

Abb. 314:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.156

Abb. 315:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.156

Abb. 316:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.156

Abb. 317:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.157

Abb. 318:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.157

Abb. 319:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.157

Abb. 320:

Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.158

Abb. 321:

Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum (2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.158

Abb. 322:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation (Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.159

Abb. 323:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsi-
mulation

Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.159

Abb. 324:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsi-
mulation

(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.159

Abb. 325:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung

(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.160

Abb. 326:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung

(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.160

Abb. 327:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung

(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.160

Abb. 328:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden
Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung
in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultieren-
den Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum
16.01.-22.01.17)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.161

Abb. 329:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden
Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung
in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus
resultierenden Temperatur im Musterraum
(Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.161

Abb. 330:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden
Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach
Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur
daraus resultierenden Innenraumtemperatur
(Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.161

Abb. 331:

Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fas-
sadenbauteils

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.162

Abb. 332:

Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und
Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade
(1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des
Musterraums zum Referenzraum

(2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.162

Abb. 333:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsi-
mulation

(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.163

Abb. 334:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsi-
mulation

Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.163

Abb. 335:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Muster-
raum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsi-
mulation

(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.163

Abb. 336:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung

(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.164

Abb. 337:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung

(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.164

Abb. 338:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungs-
stroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung

(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum,
11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung

Quelle: Eigene Darstellung;

hier abgebildet: S.164

Abb. 339:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.165

Abb. 340:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.165

Abb. 341:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.165

Abb. 342:

Schichtaufbau und Eigenschaften des betrachteten Fassadenbauteils

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.166

Abb. 343:

Bilanzieller Vergleich des spezifischen Jahresheiz- und Kühlenergiebedarfs des Musterraums mit Px-Fassade (1), sowie vergleichende Typwochenbetrachtungen des Musterraums zum Referenzraum

(2) Winter, (3) Übergang, (4) Sommer
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.166

Abb. 344:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Winter im Verhältnis zur Referenzsimulation

(Betrachtungszeitraum: 16.1.-22.1.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.167

Abb. 345:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Frühjahr im Verhältnis zur Referenzsimulation

Betrachtungszeitraum 10.4.-16.4.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.167

Abb. 346:

Mittlerer Temperaturverlauf und Energiebedarf im Musterraum bei Typwoche Sommer im Verhältnis zur Referenzsimulation

(Betrachtungszeitraum 10.7.-16.7.)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.167

Abb. 347:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Winter, 17.01.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 17.01.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.168

Abb. 348:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Frühjahr, 11.04.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.04.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.168

Abb. 349:

(1) Ansicht des Temperaturverlaufs und des Lüftungsstroms im Sommer, 11.07.17, 14:00 Uhr, Südorientierung
(2) Tagesgang der Temperatur im Fassadenzwischenraum, 11.07.17, 8:00-20:00 Uhr, Südorientierung

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.168

Abb. 350:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Winterwoche im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 16.01.-22.01.17)

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.169

Abb. 351:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum nach Orientierung in einer Woche der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Temperatur im Musterraum (Betrachtungszeitraum 10.04.-16.04.17)

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.169

Abb. 352:

Gegenüberstellung des Temperaturverlaufs der stehenden Luftschicht im Fassadenzwischenraum der Polybox nach Orientierung während der Übergangszeit im Verhältnis zur daraus resultierenden Innenraumtemperatur (Betrachtungszeitraum 10.07.-16.07.17)

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.169

Abb. 353:

Tabellarische Abbildung und Kurzbeschreibung der Auswahl energetisch analysierter Fassadenaufbauten im Rahmen der bauteilbezogenen Betrachtungen des polyfunktionalen Fassadenprinzips

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.171

Übersicht der einzelnen Bausteine zur energetischen und monetären Bewertung; Quelle: Wurzbacher; Drebes; Müller et al. (2018) S.23;
hier abgebildet: S.176

Abb. 355:

Input 2: Auswahlmöglichkeiten unterschiedlicher, zuvor simulierter Fassadenkonfigurationen im Gebäudeenergie-

modell;
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.178

Abb. 356:
Eingabebereiche zur Belegung der einzelnen Hüllflächen mit Photovoltaik; Hier beispielhaft 20% Dachsysteme (oben) und 50% Belegung der Nord-, Ost-, Süd- und Westfassaden;
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.179

Abb. 357:
Algorithm zur Berechnung des Maßes der Eigenversorgung in Abhängigkeit zum Anteil Photovoltaik zur Energiebezugsfläche
Quelle: Eigene Darstellung auf Datenbasis von Wurzbacher (2017);
hier abgebildet: S.181

Abb. 358:
Darstellung zur Berechnung des Grades der Eigenversorgung
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.181

Abb. 359:
Funktionsschematas unterschiedlicher Anlagentechniken
Quelle: Hegger; Dettmar; Martin et al. (2012);
hier abgebildet: S.182

Abb. 360:
Entwicklung des CO₂ Faktors im Zeitraum von 50 Jahren;
Quelle: Eigene Darstellung auf Datengrundlage von Statista.de (2016) ;
hier abgebildet: S.184

Abb. 361:
3D Darstellung zur Geometrie und städtebaulichen Einbindung des Fallbeispiels
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.185

Abb. 362:
Datensammlungen des gewählten Testgebäudes im Fallbeispiel eines freistehenden Bürobaus
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.186

Abb. 363:
Übersicht der Konfiguration von Photovoltaik in Fassaden und Dachflächen der Basisvariante und der untersuchten Szenarien S1 bis S11
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.188

Abb. 364:
Schematische Übersicht zur Einbindung der polyfunktionalen solaradaptiven Fassade in die zu Grunde gelegte Anlagentechnik
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.188

Abb. 365:
Projektaufbau benefit E2
Quelle: Wurzbacher; Drebes; Müller et al. (2018) S.23;
hier abgebildet: S.199

Abb. 366:
Alternative Bewertungsanlässe der Energie- und Klimapolitik im Gebäudesektor
Quelle: Überarbeitete Version von Müller/Pfnür (2017);
hier abgebildet: S.202

Abb. 367:
Lebenszyklus eines Gebäudes (Baukonstruktion und technische Anlagen)
Quelle: Eigene Darstellung
;
hier abgebildet: S.204

Abb. 368:
Schema zur Berechnung des Energiebedarfs (Energieflussschema nach DIN 18599) Quelle: DIN (2003b: 9);
hier abgebildet: S.205

Abb. 369:
Prozess einer Bewertung nach der als gerundiv bezeichneten zweckbezogenen Werttheorie
Quelle: Anpassung von Pfnür (2011: 76).;
hier abgebildet: S.211

Abb. 370:
Lebenszykluskostenanalyse - ausgewählte Kostenstrukturen
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Zimmermann (2012, S. 17).;
hier abgebildet: S.219

Abb. 371:
Übersicht über Methoden der Investitionsrechnung in der Bau- und Immobilienwirtschaft
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Thommen/Achleitner (2012).;
hier abgebildet: S.229

Abb. 372:
Schematische Darstellung der VoFi-Methode für den vorliegenden Betrachtungsfall
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.240

Abb. 373:
Aufbau eines Vollständigen Finanzplans aus Eigentümerperspektive (Prinzipschaubild)
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.242

Abb. 374:
Aufbau eines Vollständigen Finanzplans aus Mieterperspektive (Prinzipschaubild)Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.245

Abb. 375:
Betrachtetes Typgebäude
Quelle: Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018c);
hier abgebildet: S.248

Abb. 376:

Fassaden-Beispiele von gestalterisch anspruchsvollen Fassaden

Quelle: (von links oben nach rechts unten) Emanuel Raab, 3deluxeDesign (CC BY-SA 3.0) [Unternehmen: Leonardo Stores GmbH, Bad Driburg / Architekt: 3deluxeDesign]; ebd. [Unternehmen: Kaffee Partner GmbH, Osnabrück / Architekt: 3deluxeDesign]; CEphoto, Uwe Aranas [Unternehmen: DKV Deutsche Krankenversicherung AG, MEAG MUNICH ERGO AssetManagement GmbH, Köln / Architekt: Sauerbruch Hutton Gesellschaft von Architekten mbH]; Tuxyso (CC BY-SA 3.0) [Unternehmen: Thyssen Krupp AG, Essen / Architekt: JSWD Architekten GmbH & Co. KG]; Christian Schd (CC BY-SA 3.0) [Unternehmen: Nord LB, Hannover / Architekt: Behnisch Architekten Behnisch Architekten Partnerschaft mbB];
hier abgebildet: S.274

Abb. 377:

Heterogenen Gebäudebestand erschließen

Fotos: Christoph Drebes / Steffen Wurzbacher ;
hier abgebildet: S.290

Abb. 378:

Exemplarische Gegenüberstellung des thermischen Verhaltens des Fassadenzwischenraums in Kombination mit der resultierenden Heiz- und Kühlleistung des Innenraums im Jahresgang

(1) Bauteil Px10 V2

(2) Bauteil Px10 V8

(3) Bauteil Px10 V11

Quelle: Eigene Darstellung ;
hier abgebildet: S.294

Abb. 379:

Ganzheitliche energetische Betrachtung

Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.296

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:

Auswahl typologiebezogener Referenzbauten
Quelle: Eigene Darstellung, a.G.Deutsche Gebäudetypologie; IWU; 06/2005;
hier abgebildet: S.46

Tab. 2:

Zusammenfassung und Gliederung von Epochen des neueren Bauwesens nach Baualtersklassen.
Quelle: Eigene Darstellung auf Grundlage von Bürger et al. (2016 S.112);
hier abgebildet: S.47

Tab. 3:

Annahmen zur Ausstattung von Büroräumen;
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.121

Tab. 4:

Auswahlmöglichkeiten unterschiedlicher, zuvor simulierter Fassadenkonfigurationen im Gebäudeenergiemodell;
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.190

Tab. 5:

Ergebnisse der Gebäudegesamtenergiebilanz in der Übersicht;
Quelle: Eigene Darstellung;
hier abgebildet: S.192

Tab. 6:

Begriffsklärungen
Quelle: Eigene Zusammenfassung;
hier abgebildet: S.200

Tab. 7:

Differenzen zwischen verschiedenen Bewertungsansätzen in der Energie- und Klimapolitik
Quelle: vgl. Müller; Pfnür (2017), angepasste Version für Bürogebäude. *) Reale Eingangsdaten, starke Differenzen aufgrund spezifischer Rahmenbedingungen vor Ort möglich.;
hier abgebildet: S.226

Tab. 8:

Typologische Kennwerte des Gebäudes
Quelle: Wurzbacher; Drebes; Kuhn (2018c).;
hier abgebildet: S.248

Tab. 9:

Kostenstrukturen der Fassadenvarianten auf Gebäudeebene
Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von BKI (2017) und Dr. Schiller und Partner GmbH (2011);
hier abgebildet: S.252

Tab. 10:

Gestehungskosten alternativer Bürogebäude mit solaraktiver Fassade
Quelle: Eigene Berechnungen auf Grundlage von BKI (2017) und Dr. Schiller und Partner GmbH (2011);
hier abgebildet: S.254

Tab. 11:

Annahmen zur Finanzierung und zu kalkulatorischen Zinssätzen
Quelle: Eigene Annahmen;
hier abgebildet: S.256

Tab. 12:

Annahmen zu den Indizes der Preisentwicklung
Quelle: Eigene Annahmen;
hier abgebildet: S.257

Tab. 13:

Annahmen zur Miete
Quelle: Eigene Annahmen;
hier abgebildet: S.257

Tab. 14:

Annahmen zu den Betriebs- und Verwaltungskosten
Quelle: Eigene Annahmen;
hier abgebildet: S.258

Tab. 15:

Annahmen zur Wertermittlung und Degression
Quelle: Eigene Annahmen;
hier abgebildet: S.259

Tab. 16:

Ergebnisse von Lebenszykluskostenanalysen
Quelle: Eigene Berechnungen.;
hier abgebildet: S.262

Tab. 17:

Finanzielle Effekte für Vermieter und Mieter: Prämisse identische Renditeerwartung
Quelle: Eigene Berechnungen.;
hier abgebildet: S.266

Tab. 18:

Ergebnisse für selbstnutzende Eigentümer
Quelle: Eigene Berechnungen;
hier abgebildet: S.268

Tab. 19:

Finanzielle Effekte für Vermieter und Mieter: Prämisse mieterseitig identische Nutzungskosten
Quelle: Eigene Berechnungen.;
hier abgebildet: S.270

Tab. 20:

Finanzielle Effekte für Vermieter und Mieter: Prämisse zusätzliche Zahlungsbereitschaften für gestalterisch und solaraktivierte Fassaden in Höhe von 10 %
Quelle: Eigene Berechnungen.;
hier abgebildet: S.276

Tab. 21:

Finanzielle Effekte für Vermieter und Mieter: Prämisse zusätzliche Zahlungsbereitschaften für gestalterisch und solaraktivierte Fassaden in Höhe von 25 %
Quelle: Eigene Berechnungen;
hier abgebildet: S.276