

Marzena Husser, Walter Haase

Adaptive Verglasungssysteme
Einsatzbereiche, energetische und
tageslichttechnische Evaluierung,
Regelungsstrategien

F 3044

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-7388-0084-5

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



Adaptive Verglasungssysteme

Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische
Evaluierung, Regelungsstrategien



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek

Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák

Jun.-Prof. Dipl.-Ing. Dirk A. Schwede, PhD



Vorhabenbezeichnung:	Vergleichende Bewertung adaptiver Verglasungssysteme. Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien.
Zuwendungsempfänger:	Universität Stuttgart Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren Pfaffenwaldring 7 und 14 70569 Stuttgart
Förderkennzeichen:	SWD-10.08.18.7-12.35
Projektsumme / Förderanteil:	211.255,50 € / 153.955,50 €
Förderstelle:	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Projektleitung:	Dr.-Ing. Walter Haase
Wissenschaftliche Mitarbeiterin:	Mgr inž. arch. Marzena Husser
Phys.-techn. Assistent:	Julian Rettig
Werkstattmitarbeiter:	Jürgen Braig, Markus Berndt
Studentische Mitarbeiter:	Laura Meier, Caroline Grahl, Patrick Hoß, Marco Houchmand, Tatjana Debler, Pascal Keppler, Paul Müller, Sahar Afshoon, Jasmin Sadegh, Sophia Leistner, Ema Bllama, Liliana Draganova
Projektlaufzeit:	15.10.2012 – 30.09.2016 Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák Jun.-Prof. Dipl.-Ing. Dirk A. Schwede, PhD Pfaffenwaldring 7 und 14 70569 Stuttgart Telefon 0711 / 685 63599 Telefax 0711 / 685 63789

Titelbild: Fassadenprüfstand des ILEK, Phot.: G. Metzger, ILEK.

Der Bericht umfasst 276 Seiten. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Stuttgart, 01.07.2017

Mgr inž. arch. Marzena Husser, Dr.-Ing. Walter Haase



Danksagung

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert (Aktenzeichen II 3-F20-11-1-098 / SWD-10.08.18.7-12.35). Die Autoren bedanken sich für die Förderung.

Ein Dank gilt auch den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses:

- Dr.-Ing. Klaus-Dieter Clausnitzer vom Bremer Energie Institut (BEI),
- Dipl. Phys. Norbert Sack vom ift Rosenheim GmbH,
- Prof. Dipl.-Ing. Karlotto Schott vom IFFT Institut für Fassadentechnik Frankfurt GmbH.

Ein besonderer Dank gilt den Industriepartnern für die Zurverfügungstellung von Materialmustern und Kenndaten der Verglasungssysteme:

- Pleotint LLC,
- GLASSX AG,
- EControl-Glas GmbH & Co. KG.,
- Vetrotech Saint-Gobain International AG,
- Interpane Glas Industrie AG,
- OKALUX GmbH,
- MicroShade A/S.

Zudem danken wir:

- Rubner Haus AG – S.p.A. für die Fertigung und die Montage des Fassadentestgebäudes,
- Paul Bauder GmbH & Co. KG für das Verfügbarmachen der Dachabdichtungsfolie für das Fassadentestgebäude,
- Nimbus Group GmbH für die Lichtplanung und Zurverfügungstellung der Innenraumbeleuchtung für das Fassadentestgebäude,
- Clina Heiz- und Kühlelemente GmbH für die Unterstützung bei der Planung und Ausführung des Kühl- und Heizsystems des Fassadentestgebäudes,
- Toshiba Klimasysteme Beijer Ref Deutschland GmbH für die Zurverfügungstellung der Wärmepumpe,
- TWL-Technologie GmbH für die Zurverfügungstellung des Pufferspeichers.

Ein weiterer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Jan de Boer vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik für die Unterstützung in lichttechnischen Fragestellungen sowie Herrn Dipl.-Ing. Jens Ullmann vom Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart für die Beratung bei der Planung des Kühl- und Heizsystems des Fassadentestgebäudes. Herrn Andreas Hauke und seinem Team der Schreinerei der Universität Stuttgart, dem Team der Materialprüfanstalt Otto-Graf-Institut Stuttgart, Herrn Gerhard Bahr vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart sowie Herrn Udo Fuchs von FHD - GmbH Waiblingen vielen Dank für ihre engagierte Mitwirkung beim Einbau und bei der Inbetriebnahme der Verglasungsmuster im Fassadentestgebäude.



Inhaltsverzeichnis

- 1 Allgemeines13**
- 1.1 Einführung13
- 1.2 Zeit- und Arbeitsplanung, Projektdurchführung, Verwertungsaktivitäten13
- 2 Recherche zum Stand der Technik und zu Produkten • AP 115**
- 2.1 Datengrundlage der Recherche, Marktanalyse15
 - 2.1.1 Primärerhebung15
 - 2.1.2 Sekundärerhebung.....15
- 2.2 Recherche der abgeschlossenen Forschungsvorhaben im Bereich der Entwicklung schaltbarer Systeme 16
- 2.3 Vorstellung der im Projekt analysierten Verglasungen17
 - 2.3.1 Selbstregelnde Systeme18
 - 2.3.1.1 Thermochrome Verglasungen 18
 - 2.3.1.2 Thermotrope Systeme 20
 - 2.3.2 Steuerbare Systeme23
 - 2.3.2.1 Elektrochrome Verglasungen 23
 - 2.3.2.2 Heizglas 26
 - 2.3.2.3 Verglasungen mit Jalousien im Scheibenzwischenraum 27
 - 2.3.3 Systeminvariante Verglasungen28
 - 2.3.3.1 Systeme mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum 28
 - 2.3.3.2 Verglasungen mit integrierten Reflektionsprofilen 30
- 3 Aufbau einer Datenstruktur • AP 231**
- 4 Ergänzung der Kenndaten der recherchierten Systeme • AP 332**
- 4.1 Selbstregelnde Systeme34
 - 4.1.1 Thermochrome Verglasung: Suntuitive® Dynamic Glass (Typ Suntuitive® Azuria).....34
 - 4.1.2 Thermotropes System: GLASSX®crystal36
- 4.2 Steuerbare Systeme38
 - 4.2.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10 38
 - 4.2.2 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic.....39
 - 4.2.3 Heizglas: Ipatherm-Heizglas.....40
 - 4.2.4 Verglasung mit Jalousien im Scheibenzwischenraum: OKAFLEX Typ E.....42
- 4.3 Systeminvariante Verglasungen44
 - 4.3.1 System mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum: MicroShade® MS-A Vertical44
 - 4.3.2 Verglasung mit integrierten Reflektionsprofilen: OKASOLAR F O/U.....47
- 4.4 Verglasungen mit konstanten Eigenschaften (Referenzverglasungen)49
 - 4.4.1 Referenzverglasung 1: Zweifachwärmeschutzverglasung49
 - 4.4.2 Referenzverglasung 2: OKATHERM Funktions-Isolierglas.....49
 - 4.4.3 Referenzverglasung 3: Zweifachwärmeschutzverglasung mit außenliegenden Jalousien50



5 Energetische Betrachtungen zur Effektivität der Verglasungen • AP 4 | Analyse der Helligkeitsverteilung beim Einsatz der Verglasungen • AP 5 | Untersuchungsmethoden51

5.1 Fassadentestgebäude51

5.2 Computersimulationen57

5.2.1 Simulationsaufbau57

5.2.1.1 Modellierung der Verglasungseigenschaften mit der Software Window/Optics 57

5.2.1.2 Ecotect/Sketchup 58

5.2.1.3 TRNSYS 58

5.2.1.4 Daysim 58

5.2.2 Simulationsbedingungen59

5.2.2.1 Auswahl repräsentativer Orte 59

5.2.2.2 Auswahl repräsentativer Nutzungsszenarien: Analyse der Komfortanforderungen 63

5.2.2.3 Auswahl repräsentativer Nutzungsszenarien: Raumsimulationsmodelle 65

5.2.2.4 Auswahl repräsentativer Nutzungsszenarien: Nutzungszeiten 67

6 Regelungsstrategien für steuerbare Systeme • AP 768

6.1 Regelungsstrategie I (RS I)68

6.2 Regelungsstrategie II (RS II)70

6.3 Regelungsstrategie III (RS III)71

6.4 Regelungsstrategie IV (RS IV)75

7 Energetische Betrachtungen zur Effektivität der Verglasungen • AP 4 | Ergebnisse.....78

7.1 Selbstregelnde Systeme79

7.1.1 Thermochrome Verglasung: Suntuitive® Dynamic Glass79

7.1.2 Thermotrope Verglasung: GLASSX® crystal81

7.2 Steuerbare Systeme82

7.2.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/1082

7.2.1.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10 – ergänzende Untersuchungen (Einfluss der Schaltzeiten auf die Simulationsergebnisse) 85

7.2.1.2 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10 – ergänzende Untersuchungen (Leistungsmessungen) 87

7.2.2 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic.....89

7.2.2.1 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic – ergänzende Untersuchungen (Optimierungsansatz) 90

7.2.3 Heizglas: Ipatherm-Heizglas93

7.2.4 Verglasung mit Jalousien im Scheibenzwischenraum: OKAFLEX Typ E.....95

7.3 Systeminvariante Verglasungen97

7.3.1 System mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum: MicroShade® MS-A Vertical97

7.3.2 Verglasung mit integrierten Reflektionsprofilen: OKASOLAR F O/U98

7.4 Verglasungen mit konstanten Eigenschaften (Referenzverglasungen)98



7.4.1 Referenzverglasung 2: OKATHERM – ergänzende Untersuchungen (Einfluss der Standardisierungsmethode für Verglasungskennwerte auf die Simulationsergebnisse)99

8 Analyse der Helligkeitsverteilung beim Einsatz der Verglasungen • AP 5 | Ergebnisse.....101

8.1 Allgemeine Untersuchungen zum Blendungsrisiko101

8.2 Selbstregelnde Systeme102

8.2.1 Thermochrome Verglasung: Suntuitive® Dynamic Glass102

8.2.1.1 Blendung 102

8.2.1.2 Tageslichtnutzung 103

8.2.2 Thermotrope Verglasung: GLASSX® crystal106

8.2.2.1 Tageslichtnutzung 106

8.3 Steuerbare Systeme109

8.3.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10109

8.3.1.1 Blendung 109

8.3.1.2 Tageslichtnutzung 112

8.3.2 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic119

8.3.2.1 Blendung 119

8.3.2.2 Tageslichtnutzung 122

8.3.2.3 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic – ergänzende Untersuchungen (Optimierungsansatz) 125

8.3.3 Heizglas: Ipatherm-Heizglas131

8.3.3.1 Blendung 131

8.3.3.2 Tageslichtnutzung 131

8.3.4 Verglasung mit Jalousien im Scheibenzwischenraum: OKAFLEX Typ E134

8.3.4.1 Blendung 134

8.3.4.2 Tageslichtnutzung 134

8.4 Systeminvariante Verglasungen137

8.4.1 System mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum: MicroShade® MS-A Vertical137

8.4.1.1 Blendung 137

8.4.1.2 Tageslichtnutzung 137

8.4.2 Verglasung mit integrierten Reflektionsprofilen: OKASOLAR F O/U141

9 Anwendungsvorschläge für adaptive Verglasungen • AP 6142

9.1 Selbstregelnde Systeme142

9.1.1 Thermochrome Verglasung: Suntuitive® Dynamic Glass142

9.1.2 Thermotropes System: GLASSX® crystal142

9.2 Steuerbare Systeme143

9.2.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10143

9.2.2 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic143

9.2.3 Heizglas: Ipatherm-Heizglas144

9.2.4 Verglasung mit Jalousien im Scheibenzwischenraum: OKAFLEX Typ E144

9.3 Systeminvariante Verglasungen145

9.3.1 System mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum: MicroShade® MS-A Vertical145



9.3.2 Verglasung mit integrierten Reflektionsprofilen: OKASOLAR F O/U.....145

9.4 Übersicht der untersuchten Verglasungssysteme145

10 Anhang 1: Vergleich der Berechnungsmethoden für Verglasungskennwerte nach amerikanischen und europäischen Standards.....147

11 Anhang 2: Normative Anforderungen verschiedener Gebäudenutzungen149

11.1 Bürogebäude149

11.2 Schulbau.....151

12 Anhang 3: Analyse der Adaptationsvorgänge an ausgewählten Tagen153

12.1 Selbstregelnde Systeme.....154

12.1.1 Thermochrome Verglasung: Suntuitive® Dynamic Glass (Typ Suntuitive® Azuria).....154

12.1.1.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen 154

12.1.1.2 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand..... 162

12.1.2 Thermotropes System: GLASSX® crystal167

12.1.2.1 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand..... 167

12.2 Steuerbare Systeme.....172

12.2.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10172

12.2.1.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen 172

12.2.1.2 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand..... 185

12.2.2 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic.....187

12.2.2.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen 187

12.2.2.2 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand..... 196

12.2.3 Heizglas: Ipatherm-Heizglas.....199

12.2.3.1 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand..... 199

12.2.4 Verglasung mit Jalousien im Scheibenzwischenraum: OKAFLEX Typ E.....206

12.2.4.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen 206

12.3 Systeminvariante Verglasungen215

12.3.1 System mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum: MicroShade® MS-A Vertical215

12.3.1.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen 215

12.3.1.2 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand..... 226

12.4 Verglasungen mit konstanten Eigenschaften (Referenzverglasungen)228

12.4.1 Referenzverglasung 1: Zweifachwärmeschutzverglasung228

12.4.1.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen 228

12.4.2 Referenzverglasung 2: OKATHERM Funktions-Isolierglas.....237

12.4.2.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen 237

12.4.3 Referenzverglasung 3: Zweifachwärmeschutzverglasung mit außenliegender Jalousie242

12.4.3.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen 242

13 Verzeichnisse259

13.1 Abbildungsverzeichnis259



13.2	Tabellenverzeichnis.....	272
13.3	Formelverzeichnis.....	273
13.4	Abkürzungsverzeichnis	273
13.5	Literaturverzeichnis	273



1 Allgemeines

1.1 Einführung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Durchführung von Untersuchungen zur Ermittlung der jeweils optimalen Anwendungssituationen und geeigneter Regelungsstrategien für unterschiedliche, ausgewählte adaptive Verglasungssysteme im Bauwesen. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen als Entscheidungshilfe für den Planer dienen.

Im Rahmen des Vorhabens erfolgte das Zusammentragen und Vervollständigen der wesentlichen Kenndaten adaptiver Verglasungen zur Regelung des Licht- und Energiedurchgangs. Es wurden Messungen des thermischen Verhaltens und der Beleuchtungsverteilung in einem mit adaptiven Verglasungen ausgestatteten Fassadenprüfstand vorgenommen. Aus den funktionalen Charakteristiken und Untersuchungen zum Einfluss der Verglasungssysteme auf die Behaglichkeit und die energetische Bilanzierung wurden geeignete Regelungsstrategien abgeleitet. Anschließend erfolgte die Ausarbeitung von Vorschlägen für den energetisch und komforttechnisch optimierten Einsatz von Verglasungen mit variablem g-Wert.

1.2 Zeit- und Arbeitsplanung, Projektdurchführung, Verwertungsaktivitäten

Die reguläre Laufzeit des Projekts betrug 24 Monate (15.10.2012 bis 15.10.2014). Die ursprüngliche Zeitplanung wurde Anfang 2013 durch die vom Beratergremium vorgeschlagene Änderung des Versuchskonzepts für Messungen im Freilandfassadenprüfstand überarbeitet. Demnach erfolgte eine Verlängerung des Projekts bis zum 30.09.2016. Die Arbeitsplanung des Projekts ist in Abbildung 1-1 schematisch dargestellt.

Die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten nach Projektende haben sich bezüglich der Antragsstellung nicht verändert. Änderungen in der wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit haben sich nicht ergeben. Änderungen in der Zielsetzung erfolgten nicht. Bisher gibt es keine auf Ergebnissen des Forschungsvorhabens gründenden Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen oder erteilten Schutzrechte.

Die Verwertung der Projektergebnisse erfolgt im Rahmen von Veröffentlichungen und Vorträgen. Folgende Beiträge befinden sich zum Zeitpunkt der Berichtsabgabe in der Vorbereitung: „Towards the Applications of Adaptive Glazing Systems“ (*NEXT facades*, Graz 2017) [1], „Adaptive Glazing Systems – Survey of Systems“ (*AIM*, München 2017) [2]. Der Beitrag: „New Possibilities of Sun and Glare Protection with a Structured Switchable Glazing“ wurde auf der Konferenz *Challenging Glass 5* (Ghent 2016) präsentiert und im digital erschienenen Konferenzband veröffentlicht [3]. Der Beitrag: „Adaptiv schaltbare Verglasungen – Übersicht ausgewählter Systeme“ wurde auf der Tagung *Glasbau 2017* (Dresden 2017) präsentiert und im Tagungsband veröffentlicht [4].

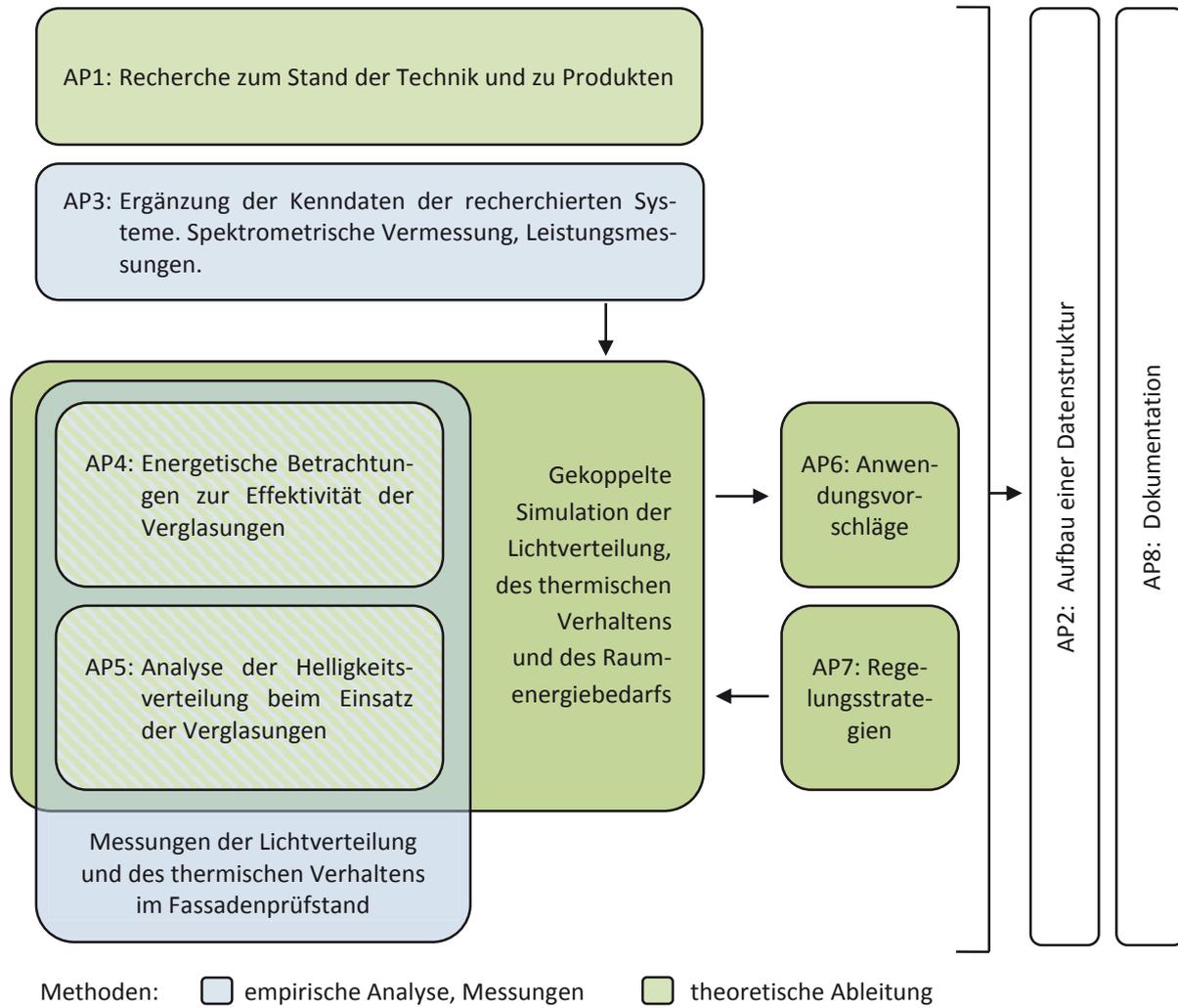


Abbildung 1-1: Arbeitsplanung. Schematische Darstellung.



2 Recherche zum Stand der Technik und zu Produkten • AP 1

2.1 Datengrundlage der Recherche, Marktanalyse

Im Rahmen des ersten Arbeitspakets wurde eine Datenanalyse durchgeführt. Es wurden dabei primäre und sekundäre Methoden der Datenerhebung angewendet, die nachfolgend erläutert werden.

2.1.1 Primärerhebung

Persönliche Befragung von Architekten [5, 6] sowie Entwicklern und Herstellern von Verglasungssystemen [7–9] zeigten ein wachsendes Marktpotential für adaptive Verglasungen für Architekturanwendungen auf. Da ein Erfolg auf dem Architekturmarkt weniger voraussehbar ist als beispielsweise auf dem Automobilmarkt, beschränken sich Hersteller mancher Systeme im ersten Schritt ihrer Markteintrittsstrategien auf Automobilverglasungen, um in naher Zukunft auf die Bedürfnisse des Architekturmarkts einzugehen [7]. Andere Hersteller, wie beispielsweise ActiveGlass [10], sehen Marktnischen im Bereich kostengünstiger, technologisch einfacher Systeme und der Reduzierung des Energiebedarfs von Verschattungssystemen. Diese Schwerpunkte gehen häufig mit der Optimierung der Tageslichtversorgung einher. Die Aufwertung der lichttechnischen Fragestellungen wird als eine der wichtigsten Aufgaben in der Entwicklung von zukunftsfähigen Fassadensystemen gesehen [9]. Aus architektonischer Sicht ist vor allem die Konkurrenzfähigkeit mit bewährten, konventionellen Verschattungssystemen hinsichtlich der Funktionsfähigkeit gefragt [5]. Darüber hinaus sind klare Definitionen der Gewährleistung, Haftung und der Schnittstellen zu Fassaden- und Haustechnikkomponenten für die Verbreitung der innovativen Verglasungen in der Praxis unabdingbar. Sobald gelungene Praxisbeispiele verfügbar sind, werden voraussichtlich weitere architektonische Einsätze folgen [6]. Das breite Spektrum der Produkte mit unterschiedlichen Eigenschaften scheint einen verstärkten Marktzugang zu befördern.

2.1.2 Sekundärerhebung

Es konnten mehrere Studien [10–12] recherchiert werden, die mithilfe statistischer Daten eine große Nachfrage des Markts nach Funktionsverglasungen aufzeigen. Für die Anwendung der adaptiven Verglasungen zur Steuerung des Licht- und Energiedurchgangs sind vor allem die Prognosen für Sonnenschutzglas von Interesse. Laut einer von der *Freedonia Group* zum Zeitpunkt des Projektbeginns durchgeführten Marktstudie [11] sollte beispielsweise die Nachfrage nach Sonnenschutzgläsern in den USA zwischen 2012 und 2017 jährlich um ca. 12,3 % steigen.

Laut *BCC Research* [12] ist der Umsatz intelligenter Verglasungen (“smart glass-based product”) seit 2009 ständig gewachsen: “\$ 883.1 million [ca. 714 Mio. €¹] in 2009 to \$ 1.2 billion [ca. 1 Mrd. €] in 2010, and was valued at nearly \$ 1.6 billion [ca. 1.3 Mrd. €] in 2011. The market is forecast to grow at a compound annual growth rate (CAGR) of 21.6 % from 2011 to 2016, reaching global revenues of nearly \$ 4.2 billion [ca. 3.4 Mrd. €] in 2016.” [12]

Die relativ hohen Kosten adaptiver Verglasungen sind dabei der wichtigste Hemmnisfaktor für ein noch schnelleres Wachstum der Nachfrage nach adaptiven Verglasungssystemen. Andere entscheidende Faktoren sind laut einer Mitteilung von *Active Glass Technologies plc* die Notwendigkeit der Stromzufuhr für Schaltung, mangelnde Dauerhaftigkeit mancher Systeme sowie lange Schalt- und Reaktionszeiten [10].

¹ Alle Angaben in € nach dem Wechselkurs vom 08.12.2014



2.2 Recherche der abgeschlossenen Forschungsvorhaben im Bereich der Entwicklung schaltbarer Systeme

Die heute am Markt und in der Entwicklung befindlichen adaptiven Verglasungssysteme erlauben durch unterschiedliche Technologien die Änderung der Licht- und/oder Energiedurchlässigkeit der Verglasung. Dadurch besitzen sie das Potential, zur Reduzierung des Gebäudeenergiebedarfs und zur Steigerung des Innenraumkomforts beizutragen und zukünftig sogar konventionelle Verschattungssysteme zu ersetzen. Um für den Planer in Zukunft eine Entscheidungshilfe im Entwurfsprozess bieten zu können, wurden im Rahmen des geförderten Forschungsvorhabens die technischen Möglichkeiten und Wirkweisen der einzelnen Systeme untersucht.

Seit Mitte der Neunziger Jahre werden zahlreiche Verglasungssysteme mit variablen Eigenschaften entwickelt und verschiedene Funktionsprinzipien untersucht. Zu erwähnen sind sowohl passive als auch aktive adaptive Systeme. Bei passiven Systemen erfolgt die Kontrolle des Licht- und /oder des Energieflusses automatisch als Reaktion auf eine Zustandsveränderung des Auslösers, wie Temperatur oder Sonnenlicht. Bei den aktiven Systemen kann sie auf der Grundlage von Sensordaten oder manuell geregelt oder gesteuert werden. Die passive Wirkweise kommt beispielsweise mit phototropen, thermotropen oder thermochromen Verglasungen zum Tragen, die aktive Wirkweise wird durch elektrochrome und gasochrome Verglasungen, Verglasungen auf Basis von Polymer-Dispersed Liquid Crystals (PDLC), Suspended-Particle-Devices (SPD) oder schaltbare Spiegel auf Metallhybridbasis repräsentiert. Im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurde eine Recherche im Bereich der diversen adaptiven Verglasungssysteme sowie der auf dem Markt verfügbaren Produkte durchgeführt und im ersten und im zweiten Zwischenbericht ausführlich behandelt. Nachfolgend werden die im Projekt analysierten Verglasungstechnologien kurz vorgestellt.



2.3 Vorstellung der im Projekt analysierten Verglasungen

Folgende Verglasungen wurden im genannten Forschungsprojekt untersucht. Es wurden jeweils Zweifachisolierverglasungen aus dem Herstellerportfolio ausgewählt.

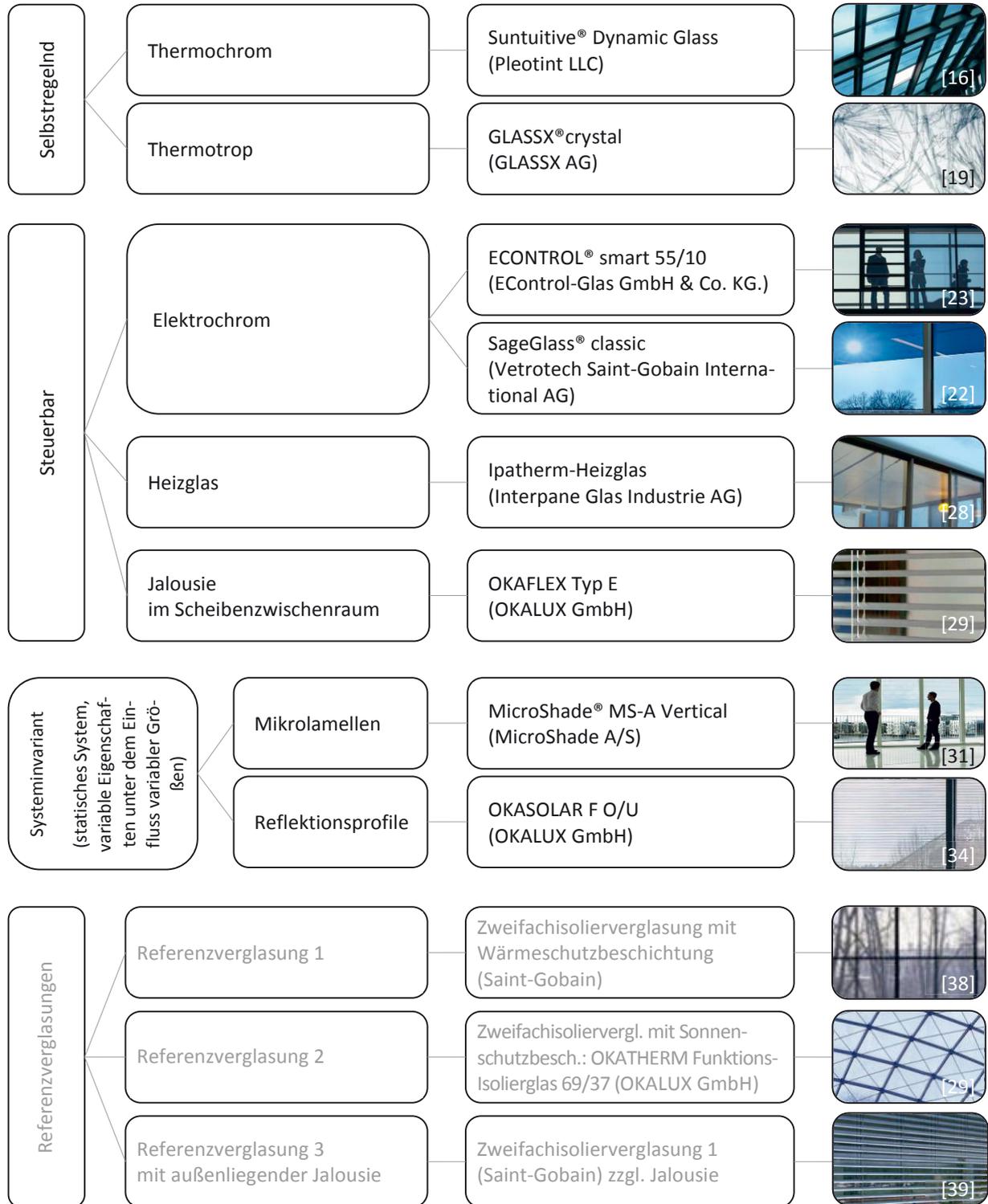


Abbildung 2-1: Übersicht der im Projekt analysierten Verglasungen

2.3.1 Selbstregelnde Systeme

2.3.1.1 Thermochrome Verglasungen

Thermochrome Verglasungen ändern ihr Transmissionsverhalten als Reaktion auf veränderliche Temperaturen. Nach bisherigem Wissensstand ist das Material mit dem größten Potenzial Vanadiumoxid [13–15]. Sein Transmissionsverhalten ändert sich temperaturabhängig aufgrund eines Metall-Halbleiter-Phasenübergangs. Unterhalb des Schaltpunktes ist das Vanadiumoxid ein Halbleiter, der Wärmestrahlen transmittiert, oberhalb dessen ein Metall, das Wärmestrahlen reflektiert. Durch Dotierung des Vanadiumoxids mit Wolfram und Fluoriden wird die Funktionsweise auf architektonische Anforderungen adaptiert. Die Schalttemperatur wird herabgesetzt, die Transmission im sichtbaren Solarspektrum wird maximiert [13, 14]. Bei der im Rahmen des Projekts untersuchten Verglasung der Firma Pleotint LLC, Suntuitive® Dynamic Glass, wird die thermochrome Schicht in einem Verbundglasaufbau mit Laminatfolie aus Polyvinylbutyral integriert, welches als Außenscheibe einer Isolierverglasung eingesetzt wird [16]. Der Aufbau von Suntuitive® Dynamic Glass ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Steigen die Temperaturen mit erhöhter Sonnenstrahlung, so färbt sich das Glas dunkel, wobei die Durchsicht erhalten bleibt. Sinkt die Sonneneinstrahlung im Verlauf des Tages, so kühlt das Glas ab und hellt sich dabei wieder auf. In der Nacht oder an kühlen, bedeckten Tagen, wenn keine direkte Strahlung vorhanden ist, bleibt das Glas hell. Das System passt sich ohne mechanische oder elektrische Hilfe den veränderlichen Wetterbedingungen an. Die Funktionsfähigkeit des Systems wird für den Temperaturbereich von 0°C bis 100°C gewährleistet. Ein Anwendungsbeispiel des Suntuitive® Dynamic Glass ist in Abbildung 2-3 aufgeführt.

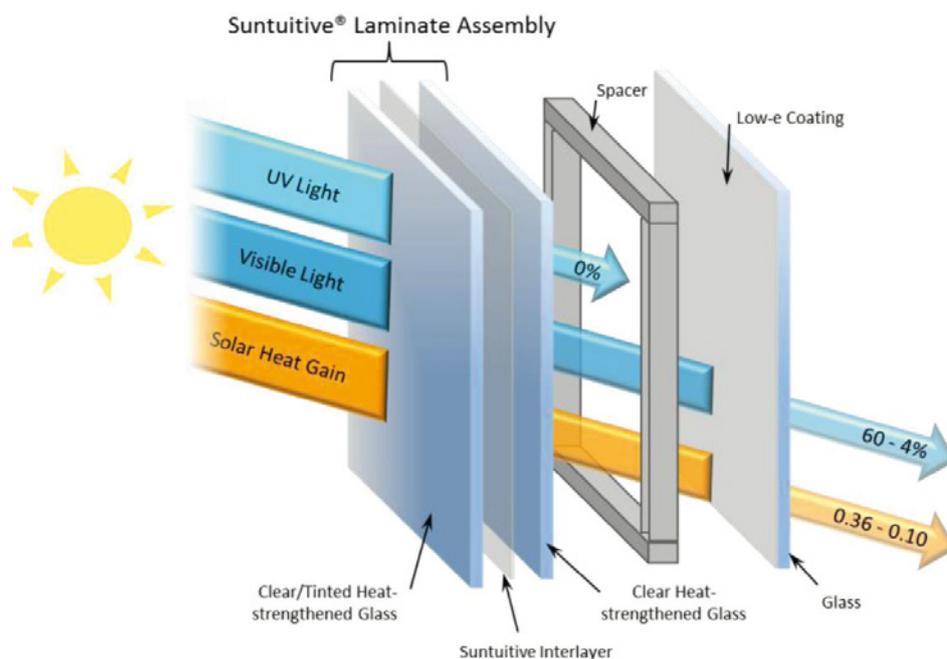


Abbildung 2-2: Prinzipskizze von Suntuitive® Dynamic Glass [17]



Abbildung 2-3: Anwendung von Suntuitive® Dynamic Glass, Hotel in Shenzhen, China [16]

2.3.1.2 Thermotrope Systeme

Thermotrope Verglasungen weisen ebenfalls temperaturabhängige Transmissionseigenschaften auf. Zu dieser Gruppe gehören beispielsweise auf Polymerblends oder auf Phasenwechselmaterialien basierende Systeme. Systeme mit Polymerblends nutzen die Eigenschaften zweier Polymere mit unterschiedlichen Brechungsindizes. Bei niedrigen Temperaturen sind die beiden Polymere vermischt, wodurch die Schicht homogen und transparent bleibt. Sobald die Temperatur über die Schalttemperatur ansteigt, erfolgt die Entmischung der Polymere, die sich in Bereiche submikroskopischer Größe trennen und so eine Streuung des einfallenden Lichts hervorrufen, sodass die Verglasung transluzent und weiß erscheint [13].

Im genannten Forschungsprojekt wurde ein Verglasungssystem mit integriertem Phasen-Wechsel-Material (phase-change material, PCM) der Firma GLASSX AG, GLASSX®crystal untersucht. Phasenwechselmaterialien oder Latentspeichermaterialien sind Stoffe, die bei einer bestimmten Temperatur ihre Phase wechseln, zum Beispiel vom festen in den flüssigen Zustand übergehen und dabei Energie speichern. Während des Schmelzprozesses nimmt das Material thermische Energie auf, beim Erstarren wird die Wärme freigesetzt. Die Temperatur des Materials bleibt während des Phasenübergangs konstant. Eine Prinzipskizze der Funktionsweise eines Phasenwechselmaterials ist in Abbildung 2-4 links dargestellt. Bei den meisten bekannten Materialien erfolgt eine „sensible Wärmespeicherung“ - die Speicherung von Wärme ist mit einer Temperaturerhöhung des Speichermaterials verbunden, die der gespeicherten Wärmemenge proportional ist (blaue Kurve). Bei der „latenten“ Wärmespeicherung in einem Phasen-Wechsel-Material erfolgt nach Erreichen der Phasenübergangstemperatur keine Erhöhung der Temperatur bis das Speichermaterial vollständig geschmolzen ist (rote Kurve) [18].

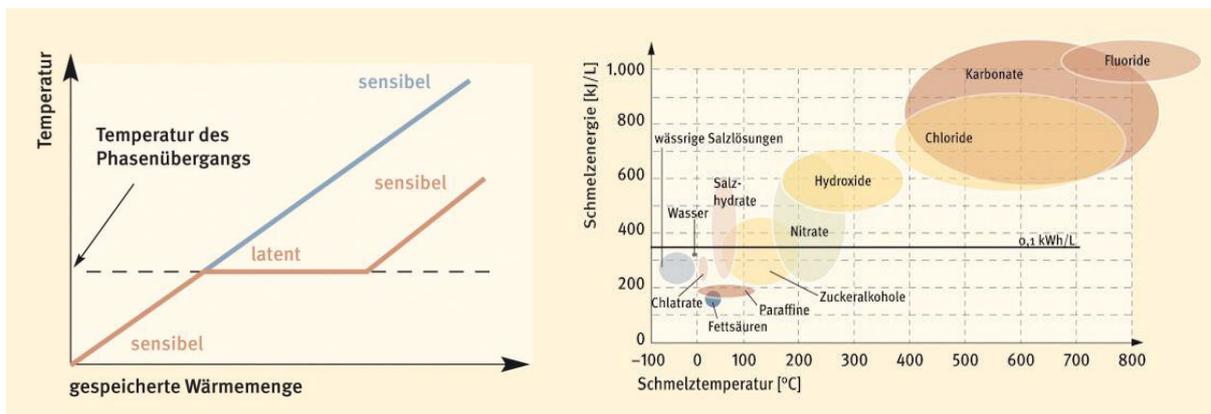


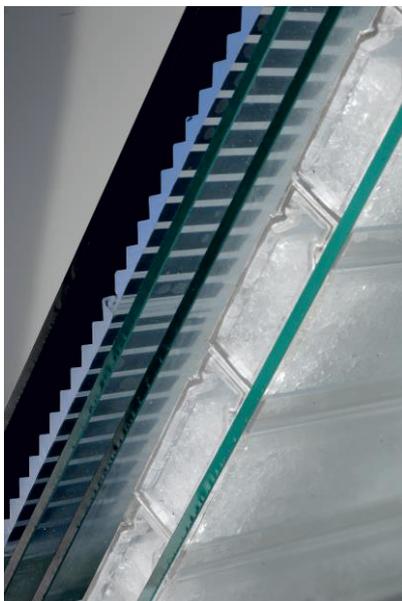
Abbildung 2-4: Links: Temperaturverlauf als Funktion der gespeicherten Wärmemenge bei sensibler und latenter Wärmespeicherung, rechts: Materialklassen, die als PCM untersucht und eingesetzt werden. © ZAE Bayern [18]

In Abbildung 2-4 rechts sind die Eigenschaften mehrerer bekannter Phasen-Wechsel-Materialien aufgeführt. Im System GLASSX®crystal wird Calciumchlorid-Hexahydrat ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) verwendet, ein Salzhydrat, dessen Schmelzpunkt bei einer Temperatur von ca. 26 °C liegt. Erwärmt sich der Raum im Sommer über diese Temperatur hinaus, so schmilzt das PCM und speichert dabei die Wärme, die sonst zu einer Überhitzung des Raums führen könnte. Das PCM lässt dabei einen großen Teil des sichtbaren Lichts passieren. Nach circa acht Stunden ist das gesamte Material geschmolzen, da jedoch die Außentemperaturen in den Abend- und Nachtstunden meistens unter den Schmelzpunkt sinken, beginnt das PCM wieder zu kristallisieren (s. Abbildung 2-5) [19]. Im Winterbetrieb wird durch die Kristallisation eine Abkühlung der Verglasungsoberfläche und des Innenraums verhindert.

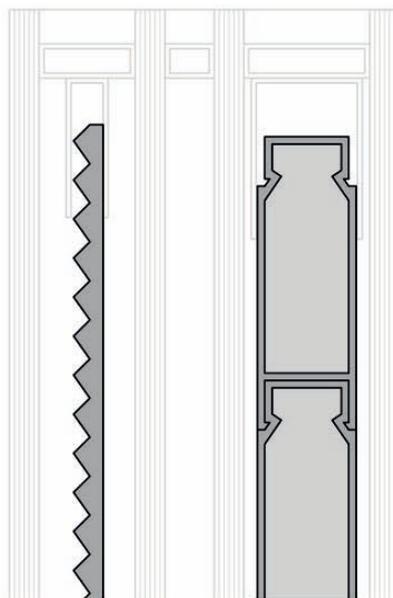


Abbildung 2-5: Kristallisationsprozess innerhalb eines GLASSX®-Verglasungsaufbaus [19]

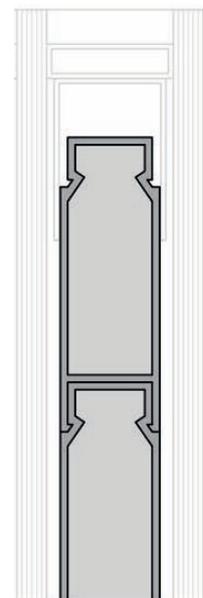
Für Architekturanwendungen wird das Wärmespeichermodul hermetisch in Polycarbonat-Profilen eingeschlossen, welche zur Verbesserung der Absorptionswirkung grau eingefärbt sind. Raumseitig wird das Element durch ein Einscheiben-Sicherheitsglas abgeschlossen, bei Ausführungen als Dreifach- oder Vierfachisoliertes Glas kann zusätzlich eine lichtlenkende Prismenplatte im Scheibenzwischenraum integriert werden (Abbildung 2-6). Im genannten Forschungsprojekt wurde eine Sonderfertigung des Systems verwendet, bei der das PCM in großflächige Zweifachisoliertverglasungen eingeschlossen wurde (Abbildung 2-7).



a.



b.



c.

Abbildung 2-6: Gängige Ausführungsformen einer GLASSX®-Verglasung: a. und b. GLASSX®crystal mit in Polycarbonat-Profilen eingeschlossenem PCM und einer Prismenplatte im Scheibenzwischenraum, c. Zweifachisoliertverglasung mit in Polycarbonat-Profilen eingeschlossenem PCM für Anwendung in Glas-Doppelfassaden und in Innenräumen als GLASSX®store [19]



Abbildung 2-7: GLASSX®crystal eingebaut im ILEK-Fassadenprüfstand, links: Zustand an einem heißen Sommertag (13.08.2015), rechts: Zustand an einem kalten Wintertag (12.02.2016)

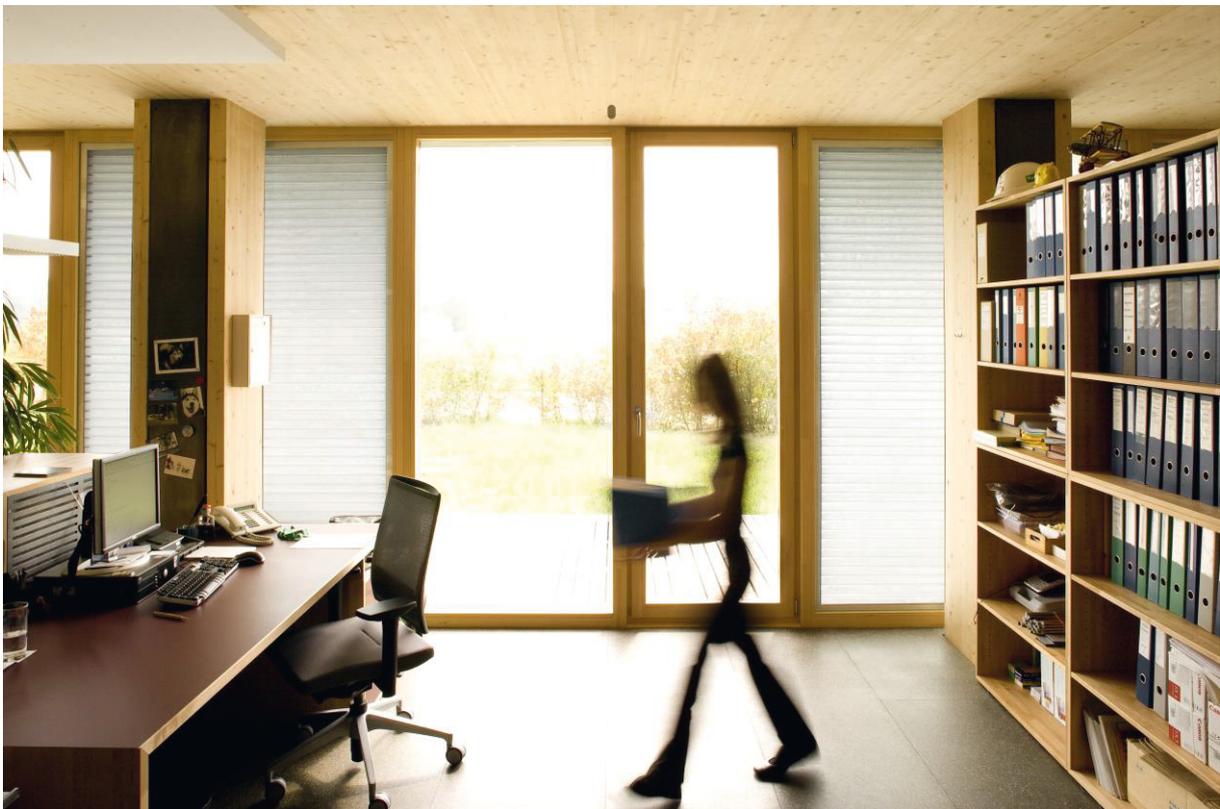


Abbildung 2-8: Anwendung von GLASSX®crystal, Marche international support office, Kempththal [19]

2.3.2 Steuerbare Systeme

2.3.2.1 Elektrochrome Verglasungen

Die Elektrochromie bezeichnet die reversible Farbänderung bzw. Transmissionsänderung eines Materials infolge einer elektrochemischen Reaktion. Hierbei kann es sich um eine Oxidation (Abgabe von Ladungsträgern) oder eine Reduktion (Ionen- und Elektronenaufnahme) handeln. Elektrochrome Elemente ändern durch Anlegen einer elektrischen Gleichspannung ihre Absorptions-, Transmissions- oder Reflexionseigenschaften. Die Transmission im sichtbaren und im nahen Infrarot-Spektralbereich wird durch die erhöhte Absorption reduziert.

Ein typischer Aufbau eines elektrochromen Systems nach Granqvist [20] ist in Abbildung 2-9 dargestellt. Das Element besteht aus folgenden fünf Schichten, die auf Glas- oder Kunststoffsubstraten aufgebracht sind: transparente, elektrisch leitfähige Oxidschicht (transparent conducting oxide, TCO), kathodische elektrochrome Schicht, ionenleitende Schicht bzw. Elektrolyt, Gegenelektrode bzw. Ionenspeicherschicht oder komplementäre anodische elektrochrome Schicht, zweite transparente, elektrisch leitfähige Oxidschicht.

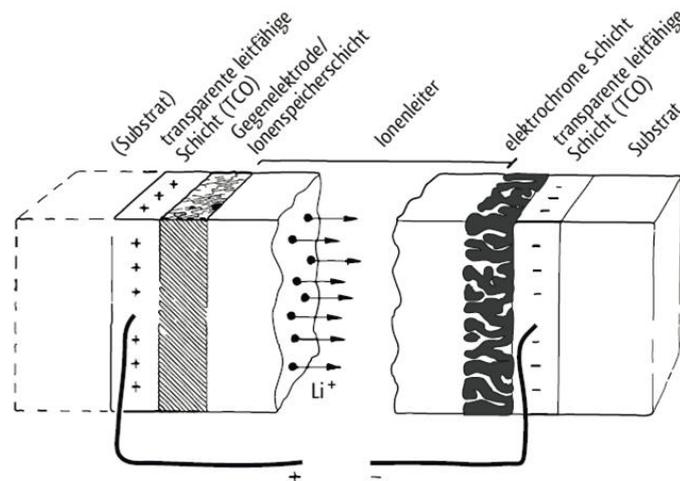
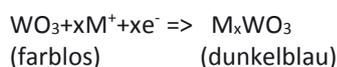


Abbildung 2-9: Typischer Aufbau eines elektrochromen Systems mit kathodischer Schicht [20]

Reine Dünnschichtaufbauten, sogenannte „all-solid-state-Elemente“, die als Ionenleiter einen Feststoffelektrolyten enthalten und auf nur einem Glas- oder Kunststoffsubstrat aufgebracht sind, sind mit einigen Nachteilen behaftet. Ihre Herstellung ist recht aufwendig. Darüber hinaus kommt es beim Anlegen von Spannungen zwischen 1 - 3 V zu großen Feldstärken, die Schäden in der 100 - 300 nm dünnen Schicht verursachen können. Somit sind reine Dünnschichtsysteme nur für kleinflächige Produkte, wie beispielsweise elektrochrome Kfz-Rückspiegel geeignet [21]. Für großflächige Produkte ist eine Kombination aus Dünnschicht- und Verbundtechnologie geeignet. Hierbei ist das System zwischen zwei Glas- oder Kunststoffsubstraten eingebettet und enthält als Ionenleiter eine Polymerfolie im μm - mm Dickenbereich. Durch diese Sandwichstruktur, die einen luftdichten Abschluss zur Umgebung ermöglicht, wird das System geschützt und somit seine Lebensdauer verlängert [21].

Wird eine elektrische Gleichspannung von maximal 5 V [22, 23] an die beiden TCO-Schichten angelegt, erfolgt ein Ionentransport (üblicherweise Li^+ - oder H^+ -Ionen) von der Ionenspeicherschicht durch den Elektrolyten in die elektrochrome Schicht. Die injizierten Ionen reagieren dort mit dem WO_3 zu H_xWO_3 bzw. Li_xWO_3 . Dieser Vorgang lässt sich in folgender Reaktionsgleichung zusammenfassen:



Formel 2-1: Reaktionsgleichung einer auf Wolframoxid basierenden elektrochromen Verglasung



Hierbei können für das M^+ folgende Ionen eingesetzt werden: H^+ , Li^+ , Na^+ , K^+ , für x gilt $0 < x < 1$ [24]. H_xWO_3 bzw. Li_xWO_3 absorbiert Licht im sichtbaren Bereich, daher erscheint das Element dunkelblau gefärbt. Wird die Spannung umgepolt, wird ein Ionentransport zurück in die Ionenspeicherschicht angeregt und die elektrochrome Schicht entfärbt sich wieder. Somit lässt sich die Energie- und Lichtdurchlässigkeit steuern [25]. Es sind unterschiedlich stark eingefärbte Zwischenstufen möglich, indem die Spannungsversorgung während des Färbeprozesses unterbrochen wird [26]. Da der Elektrolyt nahezu keine Elektronen durchlässt, bleibt der jeweilige Zustand auch nach Abschalten der elektrischen Gleichspannung erhalten. Somit wird nur zum Schalten in einen anderen Transmissionszustand elektrische Energie benötigt [25].

Im geförderten Forschungsvorhaben wurden zwei elektrochrome Verglasungssysteme untersucht: ECONTROL® smart 55/10 von der Firma EControl-Glas GmbH & Co. KG sowie SageGlass® classic des Herstellers Vetrotech Saint-Gobain International AG. Anwendungsbeispiele beider Systeme sind in Abbildung 2-10 und Abbildung 2-11 dargestellt.



Abbildung 2-10: Anwendung der ECONTROL®-Verglasung: Fraunhofer IST Braunschweig [23]



Abbildung 2-11: Anwendung von SageGlass®: Saint-Gobain Nordamerika-Zentrale, Malvern, Pennsylvania, USA, Bernardon, Jacobs, Phot.: Jeffrey Tataro [22]



2.3.2.2 Heizglas

„Heizglas“ wird eine Verglasung mit einer integrierten Heizschicht genannt. Für Anwendungen als Fassadenverglasung werden Isolierverglasungen eingesetzt, deren Innenscheibe aus einem Verbundsicherheitsglas (VSG) mit einer dünnen, transparenten Metallschicht besteht. Die Verbundglaseinheit des im Projekt untersuchten Heizglases der Firma Interpane Glas Industrie AG, Ipatherm-Heizglas, besteht aus zwei miteinander verbundenen vorgespannten Scheiben, Einscheiben-Sicherheitsglas (ESG) oder teilvorgespanntem Glas (TVG). Auf einer der beiden Scheiben befindet sich die transparente Metallschicht, welche über den Rand elektrisch kontaktiert wird. Die Metallschicht kann als elektrischer Widerstand über einen Stromanschluss erwärmt werden. Die raumseitige Glasscheibe wird dadurch ganzflächig erwärmt und gibt eine gleichmäßige Strahlungswärme nach innen ab. Ipatherm-Heizglas ist regelbar durch handelsübliche Thermostate, verfügt über eine hohe Temperaturwechsel- und Hitzebeständigkeit sowie Druck- und Biegebruchfestigkeit. Die elektrische Leistung liegt laut Aussage des Herstellers in den typischen Anwendungsfällen zwischen 20 und 800 W/m². Die Verglasung ist für Dauertemperaturen bis 60°C geeignet [27]. Das System wird meistens bei Bauvorhaben eingesetzt, bei denen optisch unauffällige, raumsparende Heizlösungen mit gleichmäßiger Strahlungswärmeabgabe erwünscht sind, wie an einem Beispiel in Abbildung 2-12 ersichtlich ist.



Abbildung 2-12: Anwendung von Ipatherm-Heizglas: Loftcube, Berlin, Werner Aisslinger [28]



2.3.2.3 Verglasungen mit Jalousien im Scheibenzwischenraum

Im Scheibenzwischenraum sind Lamellenjalousien dauerhaft gegen Schmutz und Staub sowie alle mechanischen Beeinträchtigungen geschützt. Hermetisch abgeschlossen und im Isolierglas eingebaut, gelten die Lamellen als wartungsfrei. Es ist ein relativ einfaches, mechanisches System, bei dem durch die elektrische Steuerung eine schnelle Anpassung des Lichtdurchgangs durch die Verglasung ermöglicht wird. Die elektrische Ansteuerung geschieht dabei per Fernbedienung, Schalter oder Bussystem. Im Forschungsprojekt wurde das Produkt OKAFLEX Typ E der Firma Okalux GmbH untersucht.



Abbildung 2-13: Anwendung von OKAFLEX Typ E [29]

2.3.3 Systeminvariante Verglasungen

Systeminvariante Verglasungen sind statische Systeme, die jedoch unter dem Einfluss variabler Größen variable Eigenschaften aufweisen.

2.3.3.1 Systeme mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum

Der Aufbau dieser Verglasung besteht aus einer Metallfolie mit Mikrolamellen, die im Scheibenzwischenraum auf der äußeren Scheibe aufgebracht ist. Die Mikrolamellen entstehen durch eine große Anzahl von Perforierungen in der Metallfolie, die in einem bestimmten Winkel angeordnet sind. In Abhängigkeit von der Sonnenhöhe ist die Lichtdurchlässigkeit durch die Mikrolamellen unterschiedlich. Bei hohen Einstrahlwinkeln der Sonne, wie es beispielsweise im Sommer der Fall ist, wird das Licht stark reflektiert. Ist der Sonnenhöhenwinkel flacher, so kann vergleichsweise mehr Strahlung in den Innenraum gelangen. Aufgrund der feinen Struktur der Mikrolamellen werden die Räume hinter der Verglasung mit Hilfe der diffusen Strahlungsanteile ausgeleuchtet. Das System ermöglicht eine weitgehend freie Durchsicht nach draußen. In Abbildung 2-14 ist der Aufbau eines Systems mit Mikrolamellen und dessen Funktionsprinzip dargestellt.

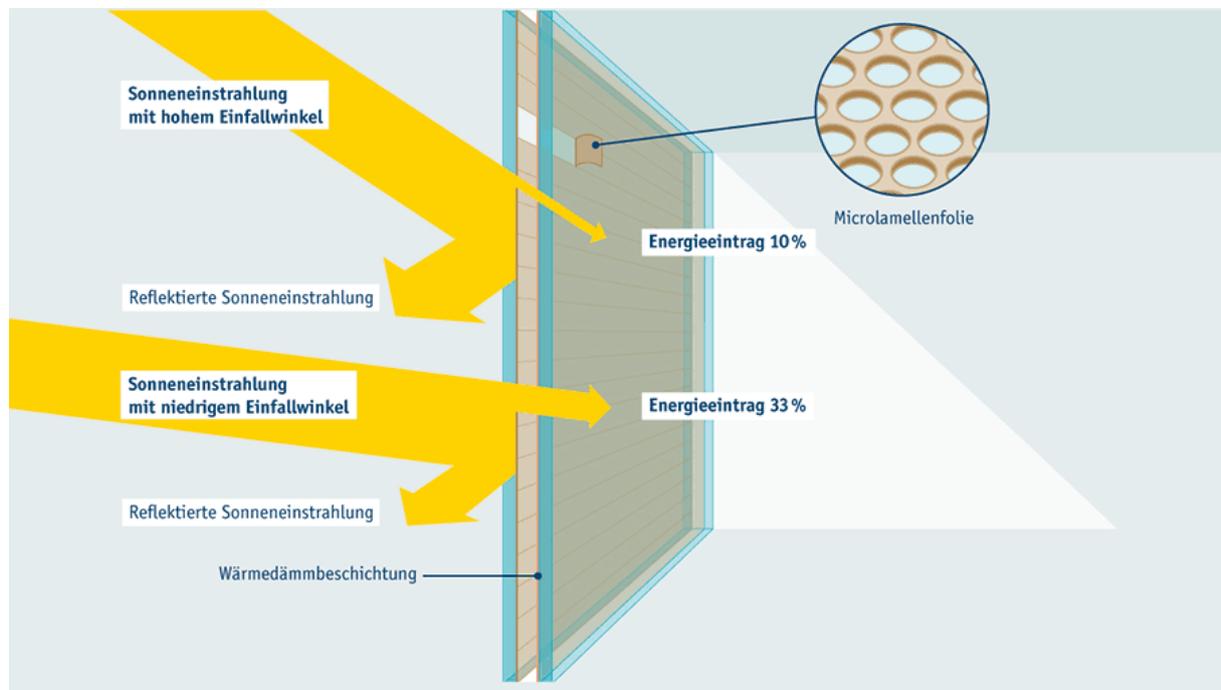


Abbildung 2-14: Funktionsweise der MicroShade®-Verglasung [30]

In Abhängigkeit vom Einsatzgebiet und der Gebäudeorientierung werden unterschiedliche Ausführungsformen der Mikrolamellen (mit unterschiedlichen Stanzungswinkeln) und der Isolierverglasungen vom Hersteller empfohlen. Im geförderten Forschungsprojekt wurde das Produkt MicroShade® MS-A Vertical von der Firma MicroShade A/S untersucht. In den Scheibenzwischenraum einer Zweifachverglasung ist ein 0,2 mm dickes Mikrolamellenband aus rostfreiem Stahl integriert, wobei zur Befestigung ein organisches Bindemittel Verwendung findet.

Eine Detailaufnahme der perforierten Folie sowie ein Anwendungsbeispiel einer MicroShade®-Verglasung sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

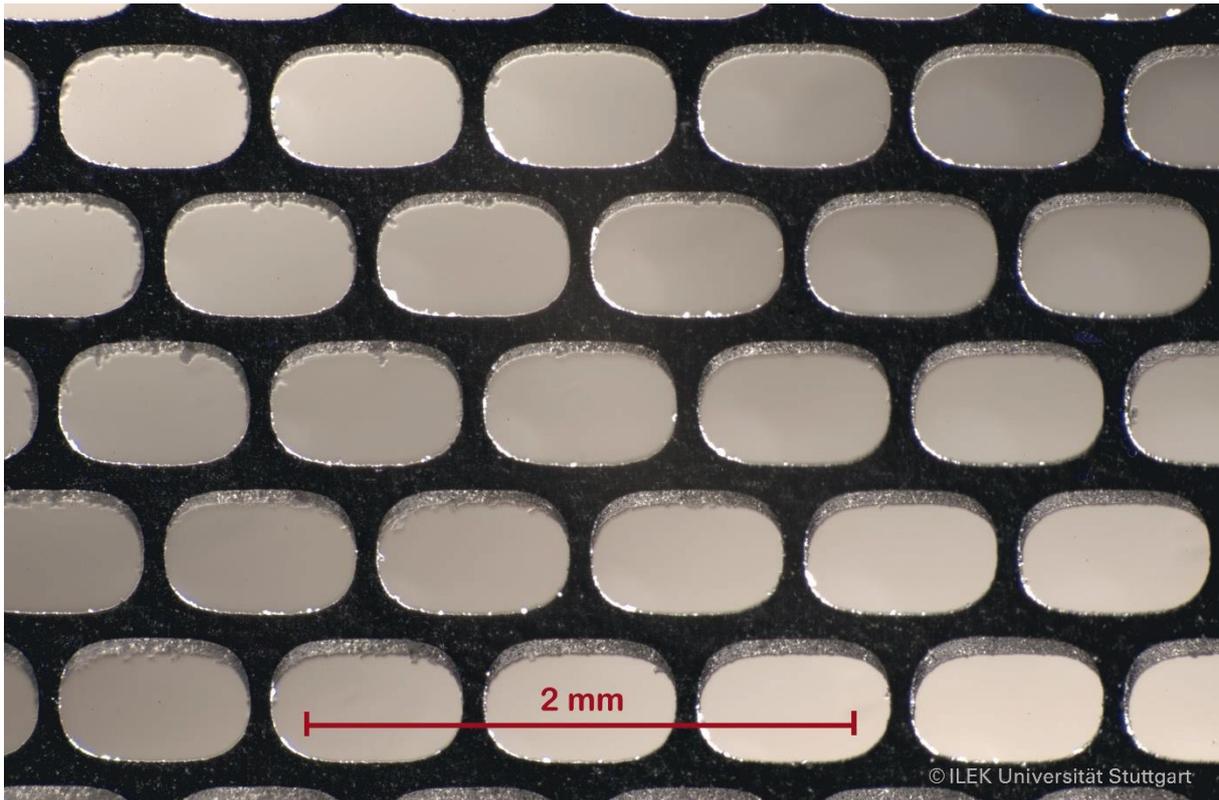


Abbildung 2-15: Mikroskopaufnahme einer perforierten MicroShade®-Folie (Phot.: ILEK)



Abbildung 2-16: Anwendung von MicroShade® (Quelle: MicroShade A/S, [31])

2.3.3.2 Verglasungen mit integrierten Reflektionsprofilen

Im Rahmen des Projekts wurde ein Tageslichtsystem untersucht, das im Scheibenzwischenraum speziell geformte, fest angeordnete Reflektionsprofile enthält: OKASOLAR F O/U der Firma OKALUX GmbH. Um die Lichtverhältnisse im Innenraum gezielt zu regulieren, hat OKALUX zwei verschiedene Lamellen-Typen entwickelt. Im unteren Bereich der Verglasung bis zu einer Höhe von 1,80 m kommt das System OKASOLAR F U zum Einsatz. Die Lamellen besitzen dort einen U-förmigen Querschnitt, wodurch sie einen Großteil der solaren Einstrahlung nach außen reflektieren. Im oberen Bereich der Verglasung werden OKASOLAR F O Lamellen mit O-förmigem Querschnitt eingesetzt, die das einfallende Tageslicht in die Raumtiefe lenken [32]. Das Funktionsprinzip des Systems ist in Abbildung 2-17 dargestellt. Durch die Kombination der beiden Lamellen-Typen OKASOLAR F O und OKASOLAR F U in einer Verglasung kann gezielt auf die Bedürfnisse im Innenraum reagiert werden. Die Querschnitte der Lichtlenkprofile sind besonders schmal, so werden lediglich 16 Millimeter für den Scheibenzwischenraum benötigt.

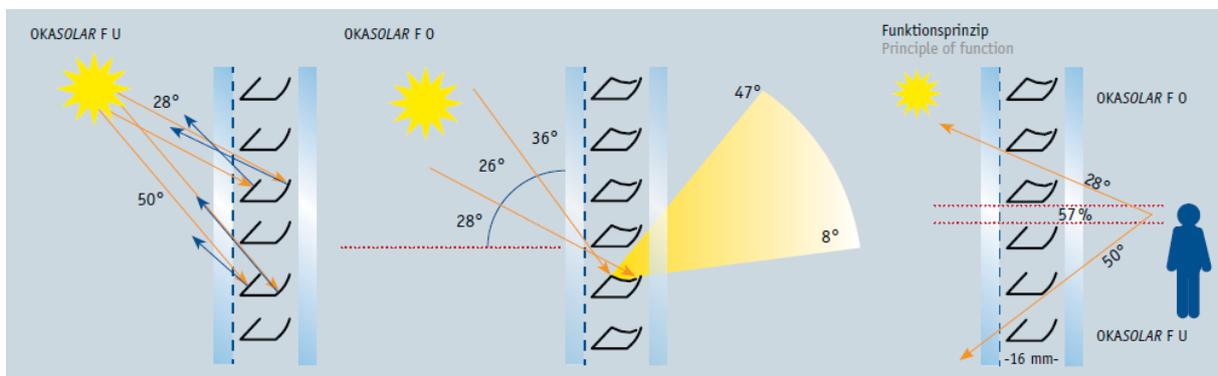


Abbildung 2-17: Funktionsweise der OKASOLAR F O/U-Verglasung [33]



Abbildung 2-18: Anwendung der OKASOLAR F-Verglasung, Profilmittel office building, Marktheidenfeld [34]



3 Aufbau einer Datenstruktur • AP 2

Die infolge der Recherche zusammengestellten Informationen wurden nach Ihrer Relevanz für Anwendungsbe-
reiche, nach Materialeigenschaften und Systemparametern ausgewertet. Um die Produktdaten verfügbar zu ma-
chen, wurde mithilfe des Programms Microsoft Access eine entsprechende Datenbank entwickelt und in Betrieb
genommen.

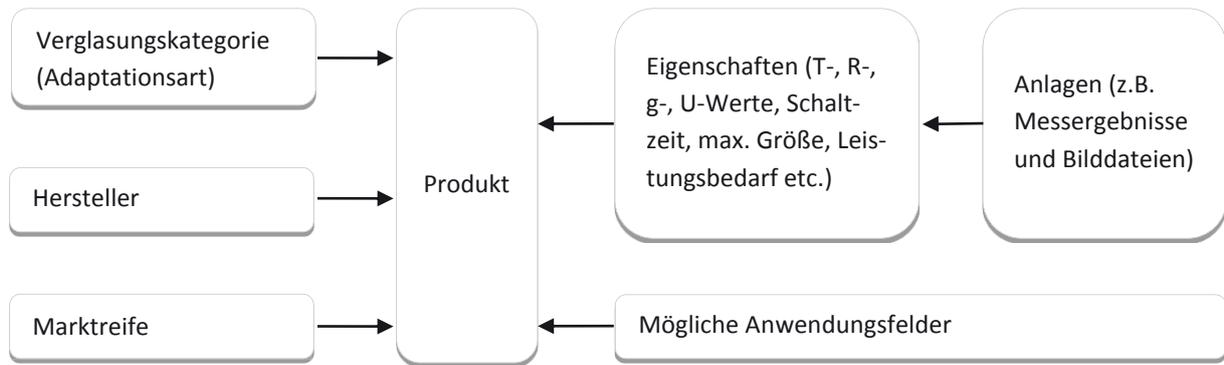


Abbildung 3-1: Schema der Datenbankstruktur. Vereinfachte Darstellung.



4 Ergänzung der Kenndaten der recherchierten Systeme • AP 3

Im Rahmen des Arbeitspakets 3 erfolgte die spektrometrische Vermessung von kleinformatigen Probekörpern. Mit einem Spektralphotometer des Typs Carry 5000 UV-VIS-NIR (Abbildung 4-1) mit zusätzlich angebrachter Ulbrichtkugel wurden spektrale Transmissions- und Reflexionswerte der Proben ermittelt. Hierzu gehören Muster des Typs GLASSX® crystal, Ipatherm-Heizglas und Microshade® MS-A Vertical. Vermessen wurde dabei der Wellenlängenbereich von 200 nm bis 2500 nm mit einer Schrittweite von 2 nm. Für die Reflexionsmessungen wurden die Proben direkt vor der Ulbrichtkugel platziert, für die Transmissionsmessungen wurden diese in die Halterungen innerhalb der Ulbrichtkugel eingesetzt. Um die Winkelabhängigkeit der MicroShade®-Probe darzustellen, wurden die Reflexionseigenschaften dieser Probe in zwei Positionen vermessen: „vertikal“ (der Einbaurichtung in einer Fassade entsprechend) und um 90° gedreht. Für das thermotrope System GLASSX® crystal wurden die Messungen in den beiden Extremzuständen, im festen Zustand und im flüssigen Zustand, durchgeführt. Während der Messungen erfolgte die Erfassung der Oberflächentemperatur der Probe. Vor der spektrometrischen Vermessung im kristallinen Zustand des PCM wurde das Muster 12 Stunden lang bei -5 °C gelagert und vor der Vermessung des flüssigen Zustands des PCM wurde die Probe in einem Ofen auf 50 °C erwärmt. Der geringe Temperaturverlust von ca. 5 °C, der jeweils auf der Probenoberfläche im Laufe einer Messung eintrat, hatte keinen sichtbaren Einfluss auf den Zustand des PCM. Die Vermessung anderer Proben fand bei Raumtemperatur statt.



Abbildung 4-1: UV/VIS – Spektrometermessplatz

Mit den Spektraldaten konnten für die Proben Mittelwerte der Transmission (T), der Reflexion (R) und der Absorption (A) im sichtbaren (vis) sowie im solaren (sol) Spektralbereich berechnet werden. Die Mittelwerte T_{vis} , R_{vis} wurden nach DIN EN 410 [35] mithilfe der spektralen Strahlungsfunktion S_λ (vgl. DIN EN 410, Tabelle 2) und des Hellempfindlichkeitsgrads V_λ für den 10°-Beobachter im Strahlungsbereich von 380 nm bis 780 nm berechnet. Die strahlungsphysikalischen Mittelwerte T_{sol} , R_{sol} wurden mithilfe der spektralen Strahlungsfunktion S_λ im Bereich von 300 nm bis 2500 nm bestimmt. Die Mittelwerte der Absorption (A_{vis} und A_{sol}) ergeben sich durch die Subtraktion der Transmissions- und Reflexionswerte im entsprechenden Spektralbereich von 1 (bzw. 100 %). Von den Herstellern der elektrochromen Gläser (ECONTROL® smart 55/10 und SageGlass® classic) sowie der thermochromen Gläser (Suntuitive® Dynamic Glass) wurden optische Eigenschaftsprofile der Systeme bereitgestellt beziehungsweise in die frei zugängliche Internationale Verglasungsdatenbank IGDB integriert.

Die wärmetechnisch relevanten Verglasungskennwerte (U-Wert, g-Wert) wurden entweder aus Herstellerinformationen oder mit dem Programm Window 7.4 berechnet. In der Praxis liegen diesen Berechnungen zwei Standards zugrunde, ein amerikanischer (National Fenestration Rating Council, NFRC) und ein europäischer Standard (Comité Européen de Normalisation, CEN), die unterschiedliche klimatische Randbedingungen als repräsentativ



für den Verglasungseinsatz definieren. Ein Vergleich dieser Standards findet sich im Anhang 1 wieder. Die von den in Europa ansässigen Herstellern zur Verfügung gestellten Verglasungsdaten basieren grundsätzlich auf dem europäischen Standard, während von Verglasungsherstellern aus dem amerikanischen Kontinent der amerikanische Standard verwendet wird. Die im Projekt zum Einsatz kommende Software Window 7.4 wurde von Lawrence Berkeley National Laboratory in den USA entwickelt, daher basiert sie auf dem NFRC Standard. Somit fand dieser Standard auch für die Kennwertberechnung und weiterführende energetische Simulationen im Projekt Verwendung. Die Auswirkung der unterschiedlichen Normwerte nach CEN und NFRC auf die Ergebnisse der energetischen Simulationen wurde am Beispiel der Referenzverglasung untersucht und als vernachlässigbar gering (ca. 1 %, s. Kapitel 7.4.1) befunden.

Die wesentlichen Kenndaten und die Aufbauten der im Projekt untersuchten Systeme werden in den nachfolgenden Kapiteln tabellarisch und graphisch dargestellt.



4.1 Selbstregelnde Systeme

4.1.1 Thermochrome Verglasung: Suntuitive® Dynamic Glass (Typ Suntuitive® Azuria)

Aufbau (von außen nach innen):

- 12 mm thermochromer Verbund:
 - 6 mm eingefärbtes Floatglas (Azuria) / Suntuitive®-Zwischenschicht / 5 mm Floatglas
- 15 mm Scheibenzwischenraum: 90 % Argon / 10 % Luft
- 6 mm Floatglas mit low-e-Beschichtung (SNX62/27, Emissionsgrad 0,02) auf Position 3 der Verglasung²

Eigenschaften:

Folgende thermische und optische Verglasungskennwerte werden aufgezeigt: der Mittelwert der Lichttransmission Tvis, der Mittelwert der Strahlungstransmission Tsol, der Mittelwert der Lichtreflexion Rvis, der Mittelwert der Strahlungsreflexion Rsol (Reflexionswerte jeweils für die Außenseite der Verglasung angegeben), der Gesamtenergiedurchlassgrad g³ und der Wärmedurchgangskoeffizient U⁴.

Die Kennwerte der Suntuitive®-Verglasung werden in Tabelle 4-1 und Abbildung 4-2 in Abhängigkeit von der Temperatur der thermochromen Zwischenschicht dargestellt. Bei 5 °C befindet sich die Verglasung im Zustand maximaler Transmission, der Temperaturbereich von ca. 60 °C - 65 °C wird für den maximalen im Sommer auftretenden Temperaturbereich angenommen. Der Zustand minimaler Transmission der Verglasung wird bei ca. 95 °C erreicht.

		U (W/m²K)	g	Tvis	Rvis	Tsol	Rsol
CEN	Suntuitive-Temp. 5 °C	1,10	0,28	0,37	-	0,12	-
	Suntuitive-Temp. 65 °C	-	0,17	0,05	-	0,02	-
NFRC	Suntuitive-Temp. 5 °C	1,10	0,23	0,37	0,07	0,12	0,06
	Suntuitive-Temp. 65 °C	1,34	0,11	0,05	0,04	0,02	0,04

Tabelle 4-1: Optische und thermische Kenndaten von Suntuitive® Dynamic Glass (Typ Suntuitive® Azuria), berechnet nach CEN-Standard (Quelle: Pleotint) und nach NFRC-Standard (Quelle: LBNL Window 7.4.6), in Abhängigkeit von der Temperatur der thermochromen Schicht

² Außenseite der Innenscheibe

³ Der g-Wert definiert die Summe aus der direkten Transmission von Solarenergie und der sekundären Wärmeabgabe durch Strahlung und Konvektion in den Raum.

⁴ Der U-Wert definiert den Wärmestromdurchgang durch die Verglasung, wenn auf beiden Seiten unterschiedliche Temperaturen herrschen. Die Einheit des U-Wertes (W/m²K) definiert die Energiemenge pro Zeiteinheit, die durch eine Fläche von einem Quadratmeter fließt, wenn sich auf beiden Seiten die Lufttemperatur um ein Kelvin unterscheidet.

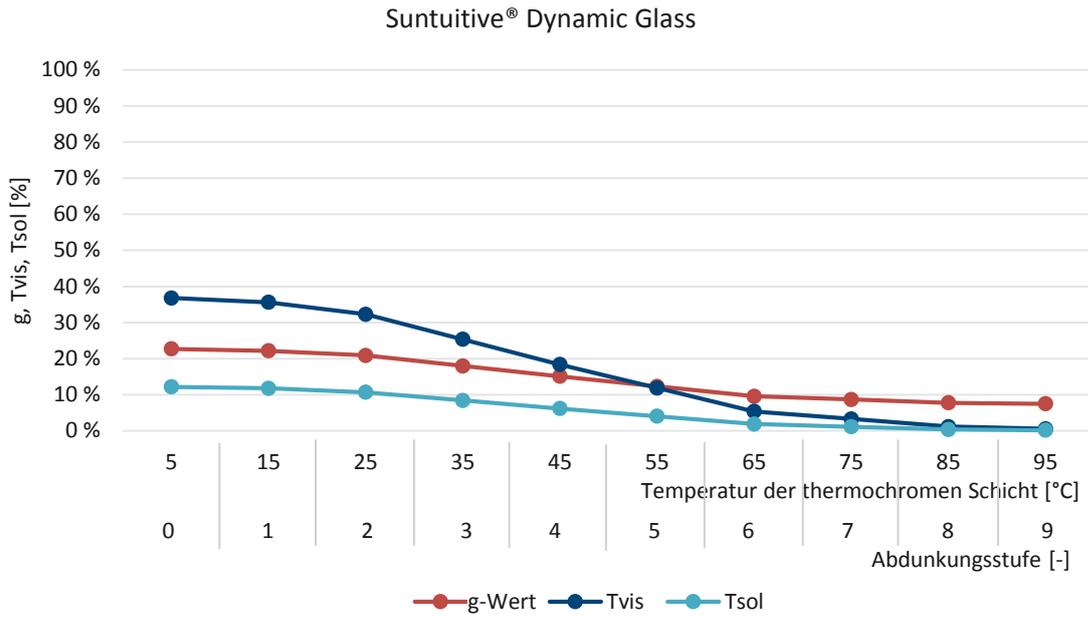


Abbildung 4-2: G-Wert, Tvis und Tsol der Suntuitive®-Verglasung in Abhängigkeit von der Scheibentemperatur (Temperatur der thermochromen Schicht) (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48)

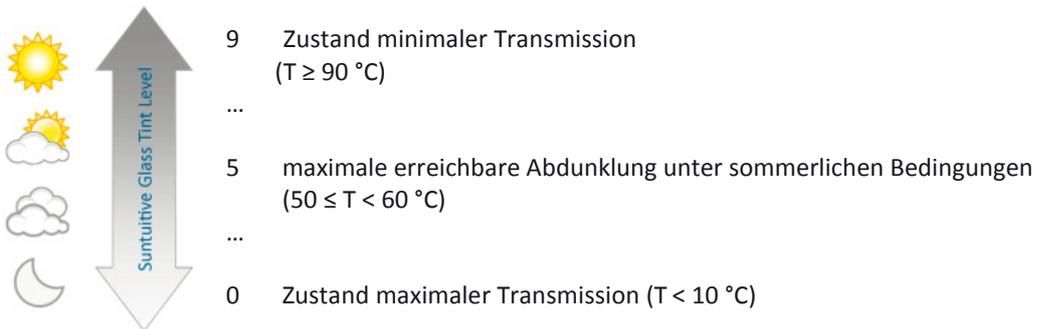


Abbildung 4-3: Zuweisung der Abdunklungsstufen von Suntuitive® Dynamic Glass. Bildquelle: Pleotint (überarbeitet)



4.1.2 Thermotropes System: GLASSX®crystal

Aufbau (von außen nach innen):

- 3 mm Weißglas
- 16 mm PCM (Calciumchlorid-Hexahydrat), Schmelzbereich 24 - 26 °C im Scheibenzwischenraum
- 3 mm Weißglas

Eigenschaften:

Für das im Projekt untersuchte System GLASSX®crystal mit zwischen zwei Weißglasscheiben eingeschlossenem PCM wurden die optischen und strahlungsphysikalischen Kennwerte mittels spektrometrischer Messungen erfasst und in Tabelle 4-2, Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 dargestellt. Die g-Werte werden für ein vergleichbares, in Abbildung 2-6 c dargestelltes Systems GLASSX®store mit in Polycarbonatprofilen und zwei Glasscheiben eingeschlossenem PCM angegeben, welches für Anwendungen in Doppelfassaden und Innenräumen vom Hersteller empfohlen wird.

		U (W/m²K)	g	Tvis	Rvis	Tsol	Rsol
GLASSX®- Probe	PCM flüssig	-	-	0,72	0,08	0,57	0,07
	PCM kristallin	-	-	0,09	0,32	0,07	0,25
GLASSX®- store	PCM flüssig	-	0,37 (±0,04)	0,04-0,55 (±0,03)	-	-	-
	PCM kristallin	-	0,33 (±0,04)	0-0,38 (±0,03)	-	-	-

Tabelle 4-2: Transmissions- und Reflexionswerte der Probe GLASSX®crystal (GLASSX®-Probe, Quelle: spektrometrische Messungen, ILEK, Elementgesamtdicke 22 mm) sowie Transmissions- und g-Werte des Systems GLASSX®store (GLASSX®store, Quelle: GLASSX AG, Elementgesamtdicke 34 mm – 38 mm).

Transmissionsmessung der Probe GLASSX®crystal

normal-hemisphärisch mit Ulbricht-Kugel
 Probentemp. PCM im flüssigen Zustand: Probentemp. 41°C - 44°C
 Probentemp. PCM im kristallinen Zustand: 4°C - 10°C
 Raumtemperatur: 24°C

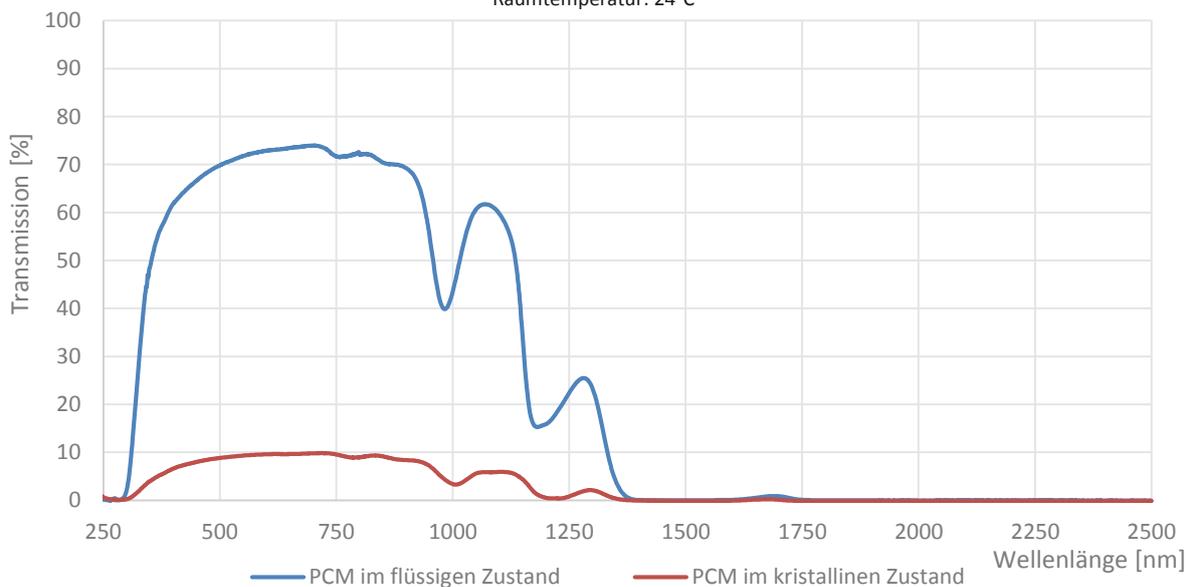


Abbildung 4-4: Transmissionsmessung der Probe GLASSX®crystal, PCM im flüssigen und im kristallinen Zustand



Reflexionsmessung der Probe GLASSX®crystal

normal-hemisphärisch mit Ulbricht-Kugel
Probestemp. PCM im flüssigen Zustand: Probestemp. 43°C - 49°C
Probestemp. PCM im kristallinen Zustand: 4°C - 10°C
Raumtemperatur: 24°C

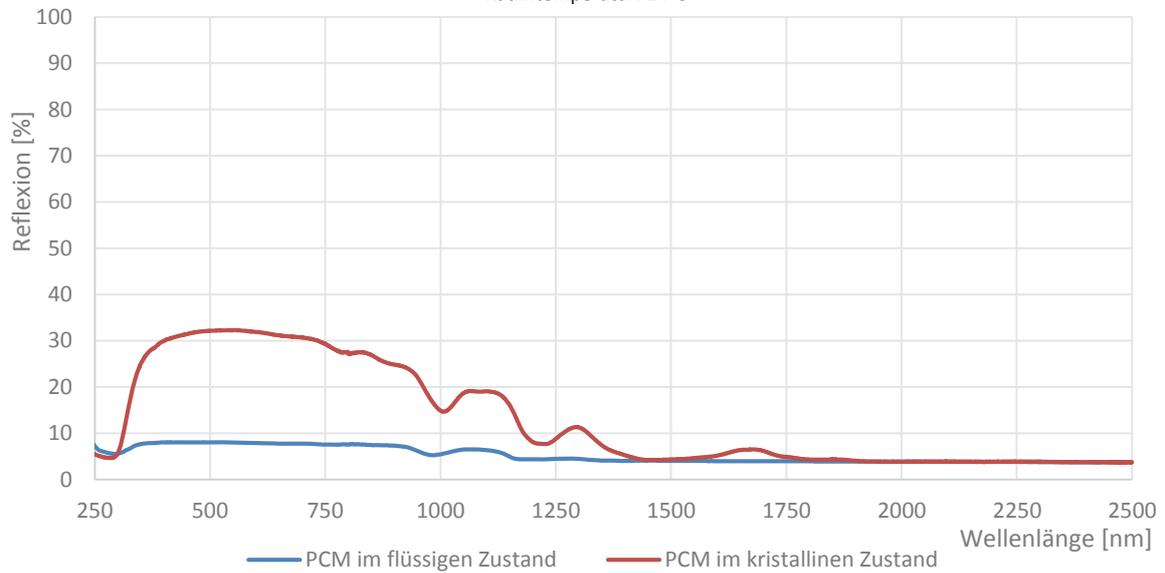


Abbildung 4-5: Reflexionsmessung der Probe GLASSX®crystal, PCM im flüssigen und im kristallinen Zustand



4.2 Steuerbare Systeme

4.2.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10

Aufbau (von außen nach innen):

- Ca. 9 mm elektrochromes Verbundglas: 4 mm Floatglas / Ionenleitfähiges Polymer / 4 mm Floatglas
- 16 mm Scheibenzwischenraum mit Argonfüllung
- 4 mm Floatglas mit low-e-Beschichtung (ClimaGuard Premium 2, Emissionsgrad 0,037) auf Position 3 der Verglasung

Eigenschaften:

Die bauphysikalischen Kennwerte der Verglasung ECONTROL® smart 55/10 wurden auf der Basis der Herstellerangaben und Berechnungen mit Window 7.4.6 für die jeweiligen Schaltzustände der Verglasung ermittelt und in Tabelle 4-3 und Abbildung 4-6 dargestellt. Der Zustand maximaler Transmission der Verglasung wird dabei als Stufe 0 und der Zustand minimaler Transmission als Stufe 4 bezeichnet.

		U (W/m²K)	g	Tvis	Rvis	Tsol	Rsol
CEN	Stufe 0	1,10	0,41	0,55	-	-	-
	Stufe 4		0,10	0,10	-	-	-
NFRC	Stufe 0	1,40	0,41	0,54	0,13	0,35	0,20
	Stufe 4		0,15	0,18	0,09	0,09	0,13

Tabelle 4-3: Kennwerte der ECONTROL®-Verglasung für zwei extreme Schaltzustände (CEN - Quelle: EControl-Glas[23], NFRC – Spektralverteilung Quelle: EControl-Glas, Mittelwerte berechnet mit LBNL Optics 5.1/Window 7.4.6)

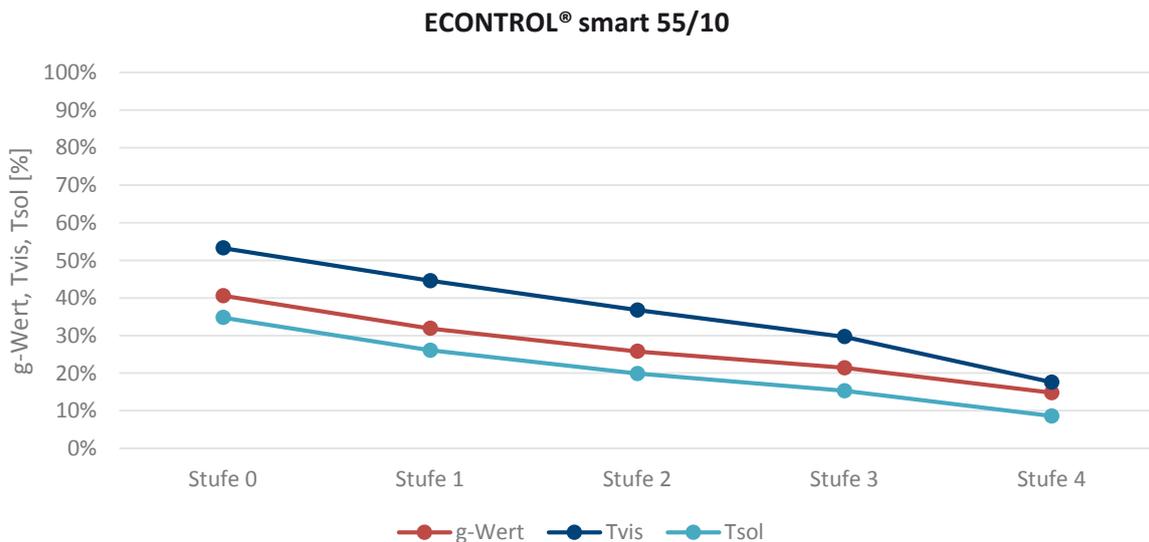


Abbildung 4-6: G-Wert, Tvis und Tsol der ECONTROL®-Verglasung in Abhängigkeit von der Schaltstufe (Spektralverteilung Quelle: EControl-Glas, Mittelwerte berechnet mit LBNL Optics 5.1/Window 7.4.6)



4.2.2 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic

Aufbau (von außen nach innen):

- Ca. 7 mm elektrochromes Verbundglas: 4 mm teilvorgespanntes Glas / DuPont Sentryglas® / 2,2 mm Klar-
glas mit elektrochromer Beschichtung
- 16 mm Scheibenzwischenraum mit Argonfüllung
- 4 mm Floatglas mit low-e-Beschichtung (SGG Planitherm One®, Emissionsgrad 0,013) auf Position 3
der Verglasung

Eigenschaften:

Die bauphysikalischen Kennwerte der Verglasung SageGlass® classic wurden auf der Basis der in der Internationalen Verglasungsdatenbank IGDB verfügbaren Spezifikationen ermittelt und in Tabelle 4-4 und Abbildung 4-7 dargestellt. Der Zustand maximaler Transmission der Verglasung wird dabei als Stufe 0 und der Zustand minimaler Transmission als Stufe 4 bezeichnet.

		U (W/m²K)	g	Tvis	Rvis	Tsol	Rsol
CEN	Stufe 0	1,00	0,35	0,57	0,16	0,28	0,18
	Stufe 4		0,09	0,01	0,06	0,00	0,08
NFRC	Stufe 0	1,35	0,33	0,58	0,16	0,28	0,18
	Stufe 4		0,07	0,01	0,06	0,00	0,08

Tabelle 4-4: Kennwerte der SageGlass® classic (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48)

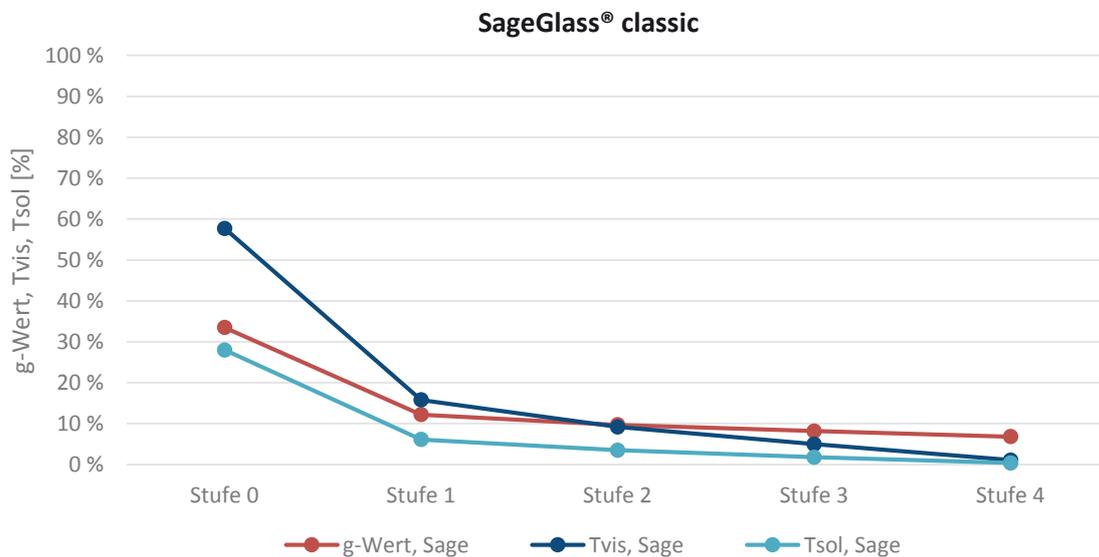


Abbildung 4-7: G-Wert, Tvis und Tsol der SageGlass® classic in Abhängigkeit von der Schaltstufe (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48)

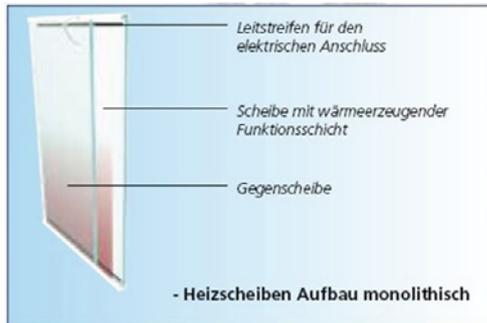


4.2.3 Heizglas: Ipatherm-Heizglas

Aufbau (von außen nach innen):

- ca. 6 mm Floatglas mit low-e-Beschichtung (iplus E, Emissionsgrad 0,037) auf Position 2 der Verglasung⁵
- ca. 12 mm Scheibenzwischenraum mit Argonfüllung
- ca. 7 mm Ipatherm-Verbundglas (VSG) mit wärmeerzeugender Funktionsschicht im Verbund

Der Aufbau des Ipatherm-Verbundglases sowie der Zweifachisolierverglasung mit integriertem Ipatherm-Verbund ist in nachfolgender Abbildung 4-8 dargestellt.



Bildquelle: Interpane Glas Industrie AG



Bildquelle: Interpane Glas Industrie AG

Abbildung 4-8: Aufbau des Ipatherm-Verbunds (links) und der Isolierverglasung mit integriertem Ipatherm-Verbundglas (rechts)

Eigenschaften:

Nachfolgend werden Kenndaten des Ipatherm-Verbunds (Ipatherm monolithisch) und der Zweifachisolierverglasung mit als Außenseibe integriertem Ipatherm-Verbund (Ipatherm Isolierglas) angegeben. Die Kenndaten des Verbunds wurden mittels spektrometrischer Vermessung ermittelt und für die anschließende Modellierung des Isolierglasaufbaus mit dem Programm Window 7 verwendet. Sie entsprechenden Spektraleigenschaften des Ipatherm-Verbunds können der Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 entnommen werden. Die Wärmedurchgangskoeffizienten (Tabelle 4-5) wurden für den „off“-Zustand der Isolierverglasung angegeben. Im eingeschalteten Zustand ergeben sich durch die Wärmegenerierung ggf. erhöhte Temperaturdifferenzen zwischen der Außen- und Innenseibe und somit andere Wärmedurchgangskoeffizienten. Dieser Effekt wurde im Forschungsprojekt nicht detailliert untersucht.

		U (W/m²K)	g	Tvis	Rvis	Tsol	Rsol	
Ipatherm monolithisch	<i>on</i>	-	-	0,91	0,09	0,66	0,10	
	<i>off</i>	-	-	0,91	0,09	0,66	0,11	
Ipatherm Isolierglas	CEN	<i>on</i>	-	0,80	0,13	0,45	0,26	
		<i>off</i>	1,23	0,52	0,80	0,13	0,45	0,26
	NFRC	<i>on</i>	-	-	0,80	0,13	0,45	0,26
		<i>off</i>	1,34	0,52	0,80	0,13	0,45	0,26

Tabelle 4-5: Kennwerte des Ipatherm-Heizglases (Ipatherm monolithisch - Quelle: spektrometrische Vermessung, ILEK, Mittelwerte berechnet, Ipatherm Isolierglas - Quelle: Mittelwerte des Ipatherm-Verbunds: ILEK, sonstige Komponenten des Isolierglasaufbaus: IGDB v48, berechnet mit LBNL Window 7.4.6)

⁵ Innenseite der Außenseibe

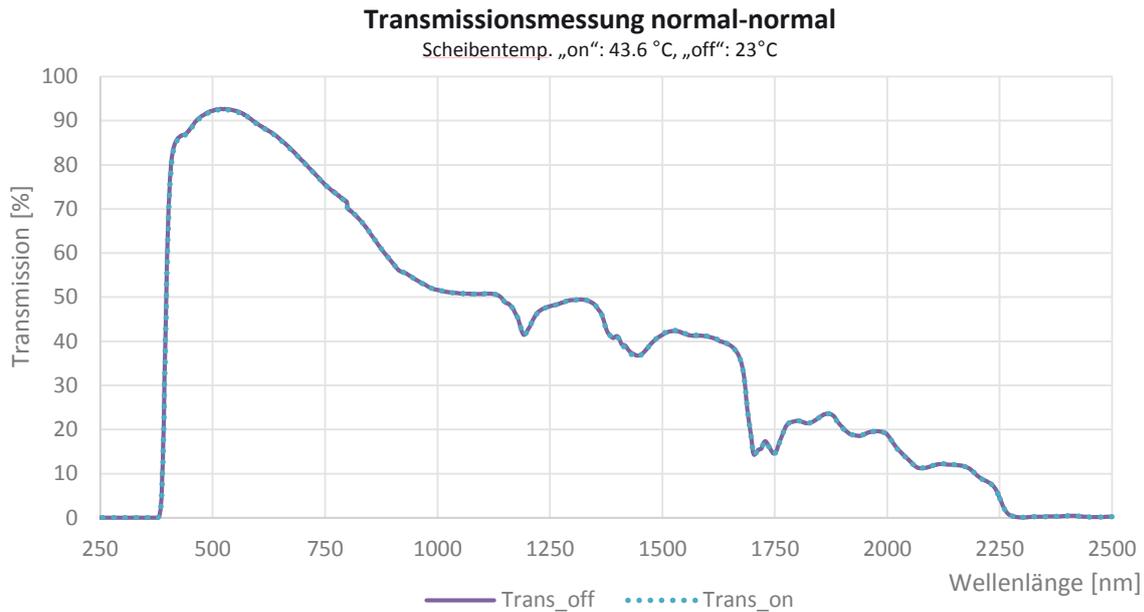


Abbildung 4-9: Transmissionsmessung der Probe Ipatherm-Heizglas (Ipatherm-Verbund) im eingeschalteten (Trans_on) und ausgeschalteten Zustand (Trans_off)

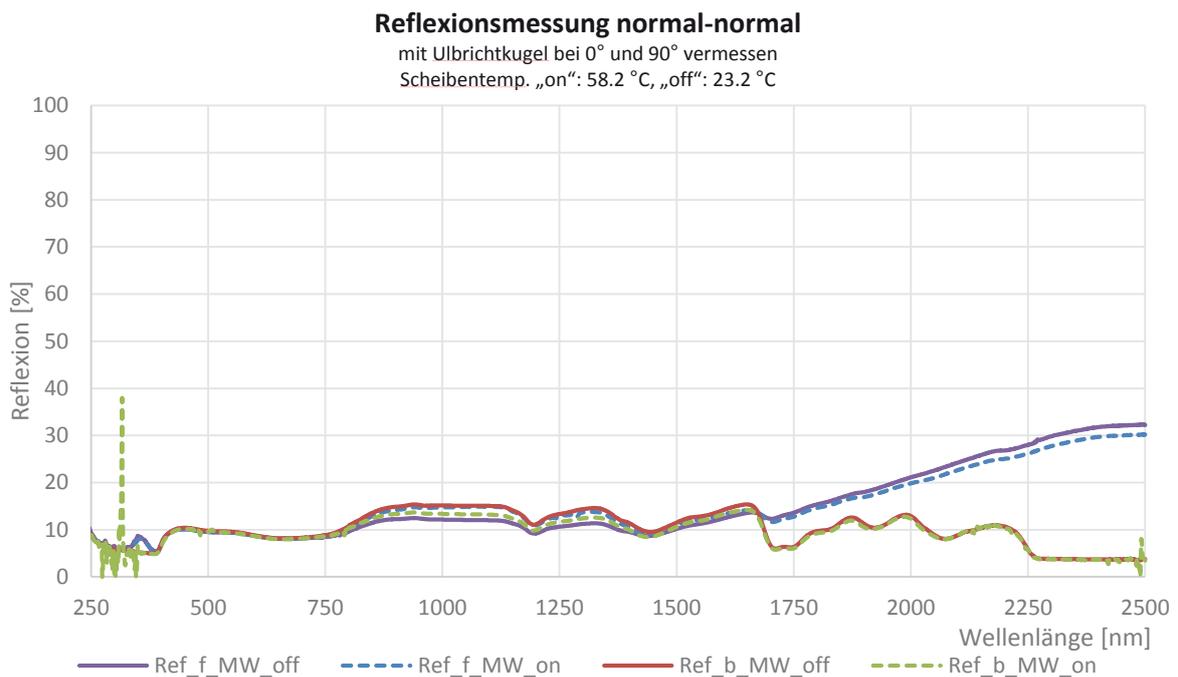


Abbildung 4-10: Reflexionsmessung der Probe Ipatherm-Heizglas (Ipatherm-Verbund) im eingeschalteten Zustand (auf der Vorderseite der Probe: Ref_f_MW_on, auf der Rückseite der Probe: Ref_b_MW_on) und im ausgeschalteten Zustand (auf der Vorderseite der Probe: Ref_f_MW_off, auf der Rückseite der Probe: Ref_b_MW_off)



4.2.4 Verglasung mit Jalousien im Scheibenzwischenraum: OKAFLEX Typ E

Aufbau (von außen nach innen):

- 6 mm Floatglas Planibel Clear mit Selektivbeschichtung (ipasal 69/37, Emissionsgrad 0,025) auf Position 2
- 29 mm Scheibenzwischenraum (90 % Krypton, 10 % Luft) mit Jalousie (Lamellen Ropaco 2901)
- 6 mm Floatglas Planibel Clear

Eigenschaften:

Für die Verglasung OKAFLEX Typ E wurden anhand von Herstellerdaten bauphysikalische Kennwerte für ausgewählte Lamellenstellungen berechnet. Die Kennwerte für den zur Verglasung senkrechten Strahlungseinfall sind in Tabelle 4-6 und in Abbildung 4-11 enthalten. Folgende „Abdunklungsstufen“ des Systems wurden dabei definiert: Stufe 0: Lamellen offen (hochgefahren), Stufe 1: Lamellen vollständig heruntergefahren, Lamellenneigungswinkel 45° zur Vertikalen, Stufe 2: Lamellen vollständig heruntergefahren, Lamellenneigungswinkel 30° zur Vertikalen, Stufe 3: Lamellen vollständig heruntergefahren und geschlossen (Lamellenneigungswinkel ca. 5° zur Vertikalen).

		U (W/m ² K)	g	Tvis	Rvis	Tsol	Rsol
CEN	Lamellen offen	1,10	0,36	0,68	0,12	0,33	0,34
	Lamellen geschlossen	-	0,11	0,01	0,48	0,00	0,50
NFRC	Lamellen offen	1,29	0,34	0,67	0,11	0,30	0,36
	Lamellen geschlossen	0,98	0,11	0,01	0,48	0,00	0,49

Tabelle 4-6: Kennwerte der OKAFLEX-Verglasung für zwei ausgewählte Lamellenstellungen (Quelle: Berechnung nach CEN-Standard - Okalux, Berechnung nach NFRC-Standard - LBNL Window 7.4.6.)

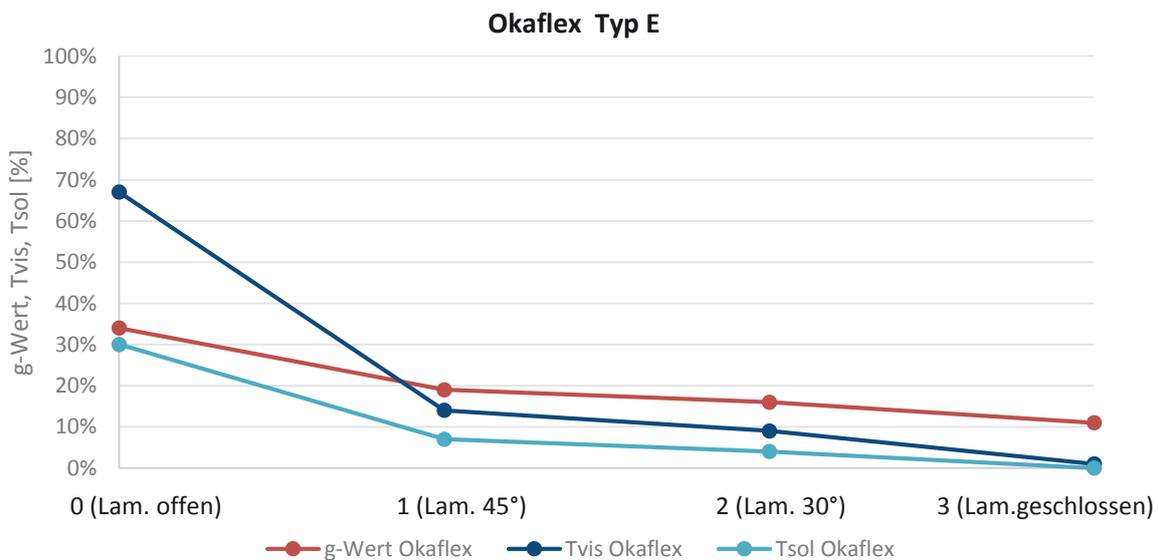


Abbildung 4-11: G-Wert, Tvis und Tsol der OKAFLEX-Verglasung in Abhängigkeit von der Lamellenposition für Strahlungseinfall senkrecht zur Verglasung



Da das OKAFLEX-System lichtlenkende Eigenschaften aufweist, sind die berechneten Kennwerte dynamische, vom Strahlungseinfallswinkel abhängige Größen. Für Strahlungseinfallswinkel 0°, 30° und 60° zur Senkrechten ergeben sich laut Herstellerangaben folgende Abhängigkeiten der Transmissionseigenschaften und Energiedurchlassgrade für die verwendeten Lamellen. In Abbildung 4-12 wurden diese für Lamellenstellungen: waagrecht, 45° und für den geschlossenen Zustand angegeben.

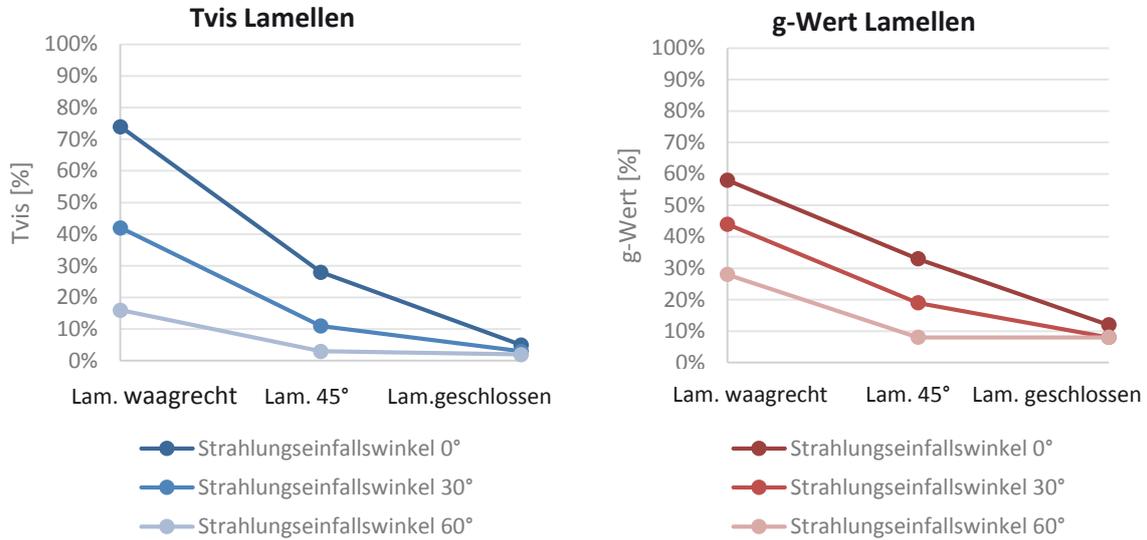


Abbildung 4-12: Tvis und g-Wert der OKAFLEX-Lamellen in Abhängigkeit der Lamellenposition und des Strahlungseinfallswinkels (Quelle: Okalux, „Infotext OKAFLEX Flexible Lichtsteuerung“)



4.3 Systeminvariante Verglasungen

4.3.1 System mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum: MicroShade® MS-A Vertical

Aufbau (von außen nach innen):

- 4 mm Floatglas (Planilux)
- 0,2 mm MicroShade® MS-A Vertical
- 16 mm Scheibenzwischenraum mit Argonfüllung
- 4 mm Floatglas mit low-e-Beschichtung (Planitherm Ultra N, Emissionsgrad 0,037) auf Position 3

Eigenschaften:

Bei der Definition der Eigenschaften der MicroShade-Verglasung spielt deren Winkelabhängigkeit eine entscheidende Rolle. Von der Firma MicroShade S/A wurde daher eine umfangreiche winkelabhängige Charakterisierung der Verglasungsaufbauten durchgeführt. Eine Zusammenstellung der Kennwerte für ausgewählte Einstrahlwinkel ist in den folgenden Tabellen dargestellt (Einstrahlwinkel senkrecht zur Verglasung jeweils als 0° - 0° bezeichnet).

		g					
		Azimut					
		0°	15°	30°	45°	60°	75°
Sonnenhöhe	75°	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01
	60°	0,10	0,10	0,08	0,06	0,03	0,02
	45°	0,22	0,21	0,19	0,15	0,08	0,02
	30°	0,30	0,29	0,27	0,23	0,14	0,03
	15°	0,35	0,34	0,32	0,28	0,18	0,04
	0°	0,40	0,39	0,36	0,31	0,21	0,04

Tabelle 4-7: Winkelabhängige g-Werte der untersuchten MicroShade®-Verglasung (Quelle: MicroShade A/S)

		Tvis						Tsol					
		Azimut						Azimut					
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
Sonnenhöhe	75°	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	60°	0,09	0,08	0,06	0,03	0,00	0,00	0,06	0,06	0,04	0,02	0,00	0,00
	45°	0,24	0,23	0,21	0,15	0,06	0,00	0,17	0,16	0,14	0,11	0,04	0,00
	30°	0,35	0,34	0,31	0,25	0,14	0,00	0,24	0,24	0,22	0,18	0,10	0,00
	15°	0,42	0,41	0,38	0,32	0,20	0,01	0,30	0,29	0,27	0,22	0,14	0,01
	0°	0,49	0,47	0,43	0,36	0,23	0,02	0,34	0,33	0,30	0,25	0,16	0,01

Tabelle 4-8: Winkelabhängige Transmissionswerte der untersuchten MicroShade®-Verglasung (Quelle: MicroShade A/S)



Sonnenhöhe	Rvis						Rsol					
	Azimut						Azimut					
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	0°	15°	30°	45°	60°	75°
75°	0,47	0,48	0,51	0,55	0,63	0,75	0,44	0,45	0,48	0,53	0,61	0,74
60°	0,29	0,30	0,33	0,38	0,48	0,63	0,28	0,29	0,31	0,36	0,45	0,61
45°	0,21	0,22	0,24	0,28	0,38	0,55	0,23	0,23	0,24	0,27	0,35	0,53
30°	0,18	0,18	0,20	0,23	0,32	0,51	0,21	0,21	0,22	0,24	0,30	0,48
15°	0,16	0,17	0,18	0,21	0,29	0,48	0,21	0,21	0,21	0,23	0,28	0,45
0°	0,17	0,18	0,19	0,21	0,28	0,47	0,22	0,22	0,22	0,22	0,27	0,44

Tabelle 4-9: Winkelabhängige Reflexionswerte der untersuchten MicroShade®-Verglasung (Quelle: MicroShade A/S)

	U (W/m²K)	g (0°)	Tvis (0°)	Rvis (0°)	Tsol (0°)	Rsol (0°)
CEN	1,13	0,40	0,49	0,17	0,34	0,22
NFRC	1,40	0,39	0,49	0,19	0,32	0,24

Tabelle 4-10: Bauphysikalische Kennwerte der untersuchten MicroShade®-Verglasung für zur Verglasung senkrechten Strahlungseinfall (CEN - Quelle: MicroShade A/S, NFRC - Quelle: LBNL Window 7.4.6)

Im Rahmen des Projekts wurden spektrometrische Messungen der Transmission- und Reflexionswerte der MicroShade®-Probe für einen senkrechten Strahlungseinfall im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 2500 nm durchgeführt. Die Spektralverläufe sind in Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 dargestellt.

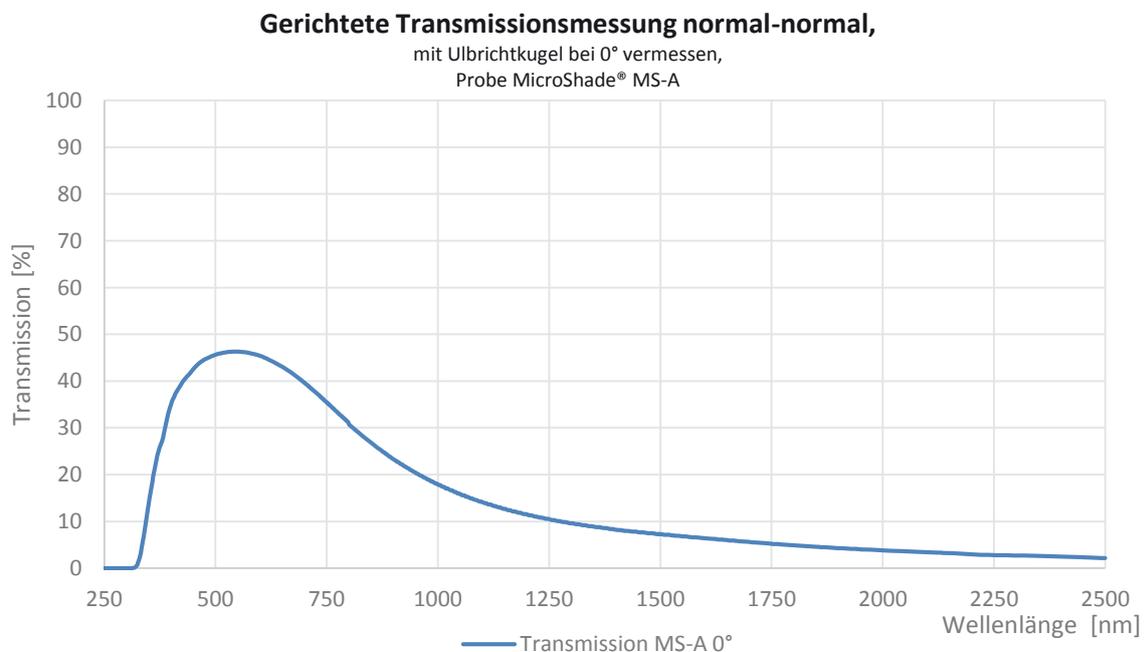


Abbildung 4-13: Gemessene spektrale Transmissionswerte der Probe MicroShade® MS-A



Gerichtete Reflexionsmessung normal-normal,
mit Ulbrichtkugel bei 0° und 90° vermessen,
Probe MicroShade® MS-A

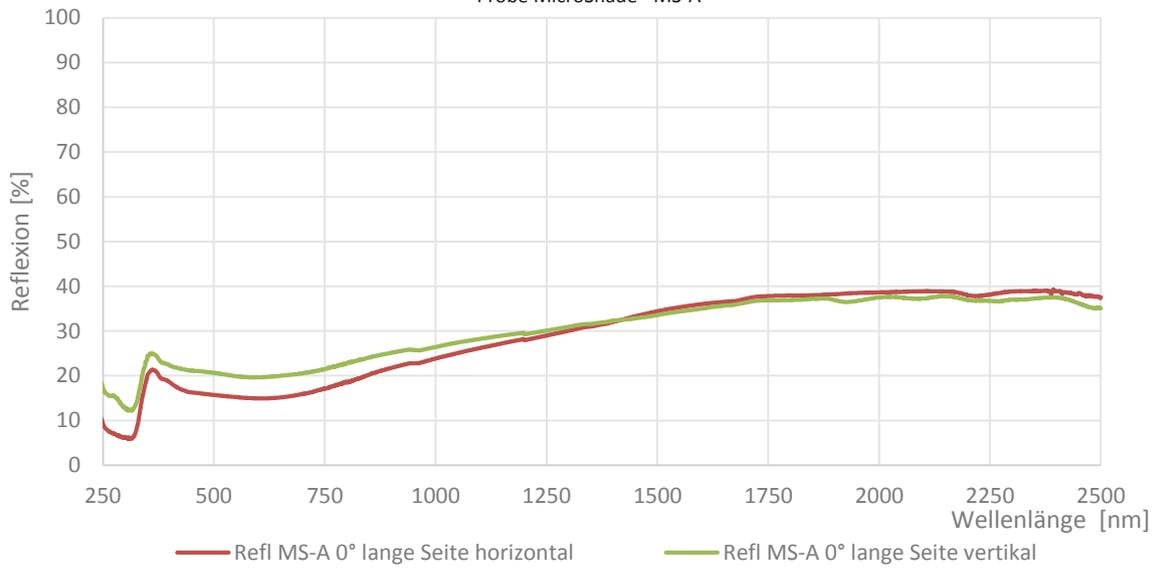


Abbildung 4-14: Gemessene spektrale Reflexionswerte der Probe MicroShade® MS-A



4.3.2 Verglasung mit integrierten Reflektionsprofilen: OKASOLAR F O/U

Aufbau (von außen nach innen):

- 6 mm Floatglas (TVG) mit Selektivbeschichtung (ipazol neutral 69/37, Emissionsgrad 0,025) auf Position 2
OKASOLAR-Einlage F O im oberen Verglasungsbereich, F U im unteren Verglasungsbereich (s. Abbildung 2-17)
- 16 mm Scheibenzwischenraum mit Kryptonfüllung
- 6 mm Floatglas (TVG)

Eigenschaften:

Die Verglasung OKASOLAR F O/U wurde größtenteils zur Lichtlenkung konzipiert, demnach spielt bei der Eigenschaftenermittlung die Winkelabhängigkeit eine große Rolle. Vom Hersteller wurden winkelabhängige Charakteristiken zur Verfügung gestellt, die der Tabelle 4-11 und der Abbildung 4-15 entnommen werden können.

	U [W/m ² K]	g	T _{vis}	R _{vis}	T _{sol}	R _{sol}	
F O	60°		0,14	0,02	-	0,03	-
	45°		-	0,09	-	0,06	-
	30°		0,20	0,11	-	0,06	-
	15°		0,25	0,25	-	0,12	-
	0°	1,10	0,31	0,40	-	0,20	-
F U	60°		0,14	0,02	-	0,03	-
	45°		-	0,02	-	0,02	-
	30°		0,15	0,03	-	0,02	-
	15°		0,23	0,22	-	0,11	-
	0°	1,10	0,31	0,40	-	0,20	-

Tabelle 4-11: Bauphysikalische Kenndaten des oberen (F O) und des unteren Verglasungsbereichs (F U) in Abhängigkeit vom Strahlungseinfallswinkel (als 0° wird ein zur Verglasung senkrechter Strahlungseinfall definiert), Quelle: Okalux, Berechnung gem. CEN-Standard

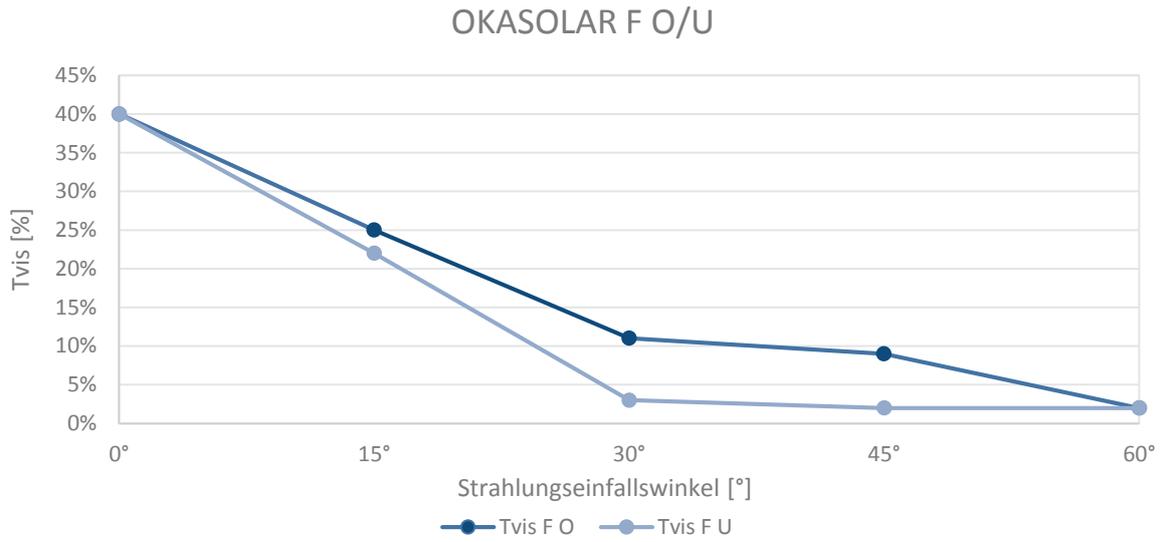


Abbildung 4-15: Winkelselektive Lichttransmission des oberen (F O) und des unteren Verglasungsbereichs (F U) (als 0° wird ein zur Verglasung senkrechter Strahlungseinfall definiert), Quelle: Okalux



4.4 Verglasungen mit konstanten Eigenschaften (Referenzverglasungen)

Zusätzlich zu adaptiven Verglasungen wurden Zweifachisoliergläser mit konstanten Eigenschaften untersucht, um mögliche Potentiale adaptiver Systeme zu erörtern. In Anlehnung an die Aufbauten der meisten analysierten adaptiven Verglasungen wurde für die numerischen Simulationen eine fiktive Referenzverglasung 1 auf der Basis von Daten aus der Internationalen Verglasungsdatenbank IGDB (International Glazing Database) [36] modelliert. Als äußeres Glas wurde ein klares Floatglas ausgewählt (Planiclear des Herstellers Saint-Gobain Glass). Der Scheibenzwischenraum ist mit Argon gefüllt. Den Raumabschluss bildet das Produkt Planitherm One des Herstellers Saint-Gobain Glass, ein Floatglas mit einer low-e-Beschichtung auf der Raum-abgewandten Seite (Position 3 der Verglasung).

Die Referenzverglasung 1 wurde zum einen ohne Verschattungsmöglichkeit und zum anderen mit einer außen liegenden Jalousie, als Referenzverglasung 3, simuliert. Die Ansteuerung der Jalousie erfolgte dabei nach einem einfachen, in den Berechnungsprozeduren des verwendeten Simulationsprogramms Daysim hinterlegten Verfahren: Die Jalousie wird bei einer Bestrahlungsstärke von 50 W/m² auf der Arbeitsfläche geschlossen. Bei geschlossener Jalousie wird die Transmission der direkten Strahlung vollständig verhindert, 25 % der diffusen Strahlung können die Jalousie jedoch passieren [37].

Darüber hinaus wurde im Projekt eine weitere Zweifach-Referenzverglasung aus dem Portfolio des Projektpartners OKALUX GmbH für den Vergleich herangezogen (Referenzverglasung 2). Es handelt sich dabei um eine Sonnenschutzverglasung OKATHERM Funktions-Isolierglas 69/37, die aus zwei Floatglasscheiben mit Argonfüllung im Scheibenzwischenraum und einer Selektivbeschichtung auf der Innenseite der Außenscheibe (Position 2) besteht. Die Eigenschaften der Referenzverglasungen sind nachfolgend detailliert vorgestellt.

4.4.1 Referenzverglasung 1: Zweifachwärmeschutzverglasung

Aufbau (von außen nach innen):

- 6 mm Floatglas (SGG Planiclear)
- 12 mm Scheibenzwischenraum mit Argonfüllung
- 6 mm Floatglas mit low-e-Beschichtung (SGG Planitherm One, Emissionsgrad 0,013) auf Position 3 der Verglasung

Eigenschaften:

	U (W/m ² K)	g	Tvis	Rvis	Tsol	Rsol
CEN	1,16	0,46	0,70	0,22	0,40	0,41
NFRC	1,29	0,47	0,70	0,22	0,40	0,41

Tabelle 4-12: Optische und thermische Kenndaten der Referenzverglasung 1 (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48)

4.4.2 Referenzverglasung 2: OKATHERM Funktions-Isolierglas

Aufbau (von außen nach innen):

- 6 mm Floatglas (Planibel Clear) mit Selektivbeschichtung (ipasol 69/37, Emissionsgrad 0,025) auf Position 2 der Verglasung
- 16 mm Scheibenzwischenraum mit Argonfüllung
- 6 mm Floatglas (Planibel Clear)



Eigenschaften:

	U (W/m ² K)	g	T _{vis}	R _{vis}	T _{sol}	R _{sol}
CEN	1,07	0,35	0,67	0,09	0,30	0,37
NFRC	1,38	0,33	0,67	0,09	0,30	0,37

Tabelle 4-13: Optische und thermische Kenndaten des OKATHERM Funktions-Isolierglases (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48)

4.4.3 Referenzverglasung 3: Zweifachwärmeschutzverglasung mit außenliegenden Jalousien

Aufbau (von außen nach innen):

Jalousie

6 mm Floatglas (SGG Planiclear)

12 mm Scheibenzwischenraum mit Argonfüllung

6 mm Floatglas mit low-e-Beschichtung (SGG Planitherm One, Emissionsgrad 0,013) auf Position 3 der Verglasung

Eigenschaften:

Die Referenzverglasung 3 findet in numerischen Simulationen Anwendung, in denen ein Vergleich mit einer außenliegenden Jalousie erfolgen soll. Im geschlossenen Zustand verhindert die simulierte Jalousie den Direktstrahlungsdurchgang sowie 75 % des Diffusstrahlungsdurchgangs durch die Verglasung. Die Transmissionseigenschaften des Systems werden in Simulationsvorgängen der verwendeten Programme (s. Kapitel 5.2.1) berechnet.



5 Energetische Betrachtungen zur Effektivität der Verglasungen • AP 4 | Analyse der Helligkeitsverteilung beim Einsatz der Verglasungen • AP 5 | Untersuchungsmethoden

Wie in Abbildung 1-1 dargestellt, basierte das Untersuchungsprogramm für die Verglasungssysteme im Projekt auf zwei Methoden. Für Analysen unterschiedlicher klimatischer und nutzungsspezifischer Einflüsse wurde eine gekoppelte Simulationsstrategie für die lichttechnische und die thermische Analyse entwickelt. Für in situ Tests wurde darüber hinaus ein Fassadentestgebäude errichtet, in dem der Einsatz geschosshoher Verglasungen unter realen Bedingungen in Büroräumen am Standort Stuttgart untersucht werden konnte. Das Testgebäude und die Simulationsstrategie werden im Folgenden vorgestellt.

5.1 Fassadentestgebäude

Zur Erfassung der Helligkeitsverteilung in Räumen erfolgte im Rahmen des Projekts die Errichtung eines Prüfstandsgebäudes. Der Prüfstand verfügt über vier Messräume der Größe von 2,00 m x 4,20 m x 2,70 m (B x T x H), die durch eine Multifunktionszone (Technik / Verkehrszone) verbunden werden. Die einzelnen Räume sind auf zwei Geschosse verteilt, um einen platzsparenden Aufbau auf der zur Verfügung stehenden Experimentierplattform zu gewährleisten. Durch den modularen Aufbau und die Flexibilität des Innenausbau kann das Gebäude an verschiedene Anforderungen angepasst werden. Im Grundaufbau ist die Südfassade der Messräume für die Aufnahme der unterschiedlichen Verglasungen ausgelegt.

Das Gebäude wurde in leichter Holzbauweise ausgeführt, mit folgenden Wand und Deckenaufbauten:

- Außenwände (Fassadenmodule, Aufbau zwischen Gefach): von innen nach außen:
OSB-Beplankung, Dampfbremse, Holzfaserdämmung 120 mm, Fassadenbahn, hinterlüftete Holzschalung
 $U=0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Innenwände (Aufbau zwischen Gefach):
OSB-Beplankung, Holzfaserdämmung 60 mm, Luftschicht ruhend 116 mm, OSB-Beplankung
 $U=0,48 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Boden gegen Außenluft: von innen nach außen (Aufbau zwischen Gefach):
OSB-Platten, Installationsebene/Luftschicht 50 mm, Dampfbremse, OSB-Platten, Holzfaserdämmung 200 mm, Unterspannbahn, OSB-Platten
 $U=0,21 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Zwischengeschossdecke (Aufbau zwischen Gefach): von unten nach oben:
OSB-Platten, Holzfaserdämmung 60 mm, Luftschicht ruhend 140 mm, OSB-Platten, Installationsebene/Luftschicht 50 mm, OSB-Platten
 $U=0,49 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Flachdach: von innen nach außen:
BSH-Decke 120 mm, OSB-Platten, Bitumenbahn, Gefälledämmung ca. 140 mm, Dichtungsbahn
 $U=0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Quelle: Rubner Haus AG – S.p.A)

Grundrisse des Fassadenprüfstands können der Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 entnommen werden. Die Fertigung und die Montage der Holzkonstruktion mitsamt der Ausfachung mit Wand- und Rahmenelementen (s. Abbildung 5-3) wurden von der Firma Rubner Haus AG – S.p.A. kostenfrei übernommen. Die Dachabdichtungsfolie wurde von der Firma Paul Bauder GmbH & Co. KG gesponsert. Die Firma Nimbus Group GmbH hat eine Lichtplanung angefertigt und dem ILEK dimmbare LED-Decken- und Pendelleuchten für den Einsatz im Prüfstandsgebäude zur Verfügung gestellt. Das Gebäude wurde mit einer Flächenheizung und -Kühlung mittels Kapillarrohrmatten der Firma Clina Heiz- und Kühlelemente GmbH ausgestattet. Mit der Unterstützung der Firma



Toshiba Klimasysteme Beijer Ref Deutschland GmbH konnte eine reversible Luft-Wasser-Wärmepumpe zur Beheizung und Kühlung der Räume eingesetzt werden. Mit einem von der Firma TWL-Technologie GmbH gesponserten Pufferspeicher wurde das Konditionierungssystem komplettiert.

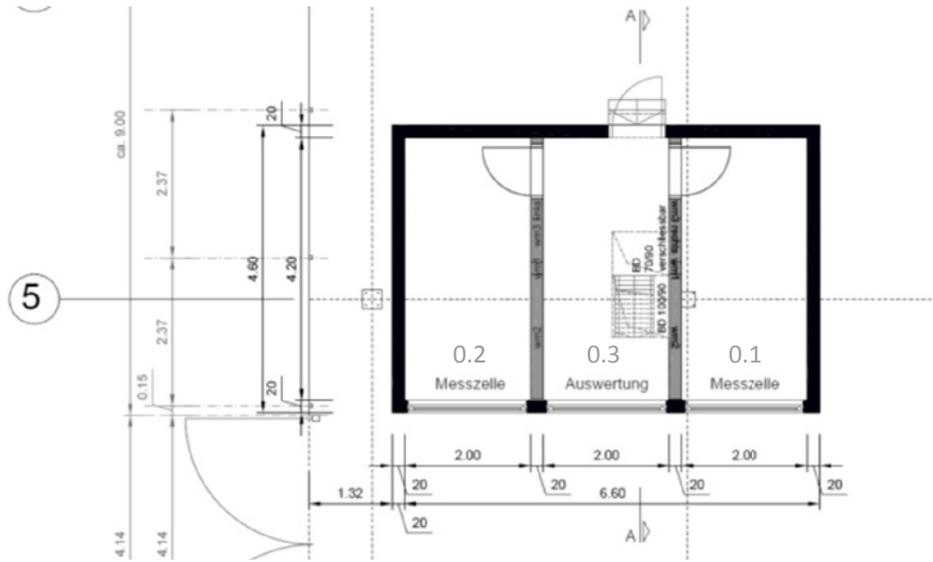


Abbildung 5-1: Konzeption des Fassadenprüfstands für die Versuche an den Verglasungen im Rahmen des Projekts – Grundriss Erdgeschoss, entsprechend der Grundvariante Obergeschoss. Copyright ILEK.

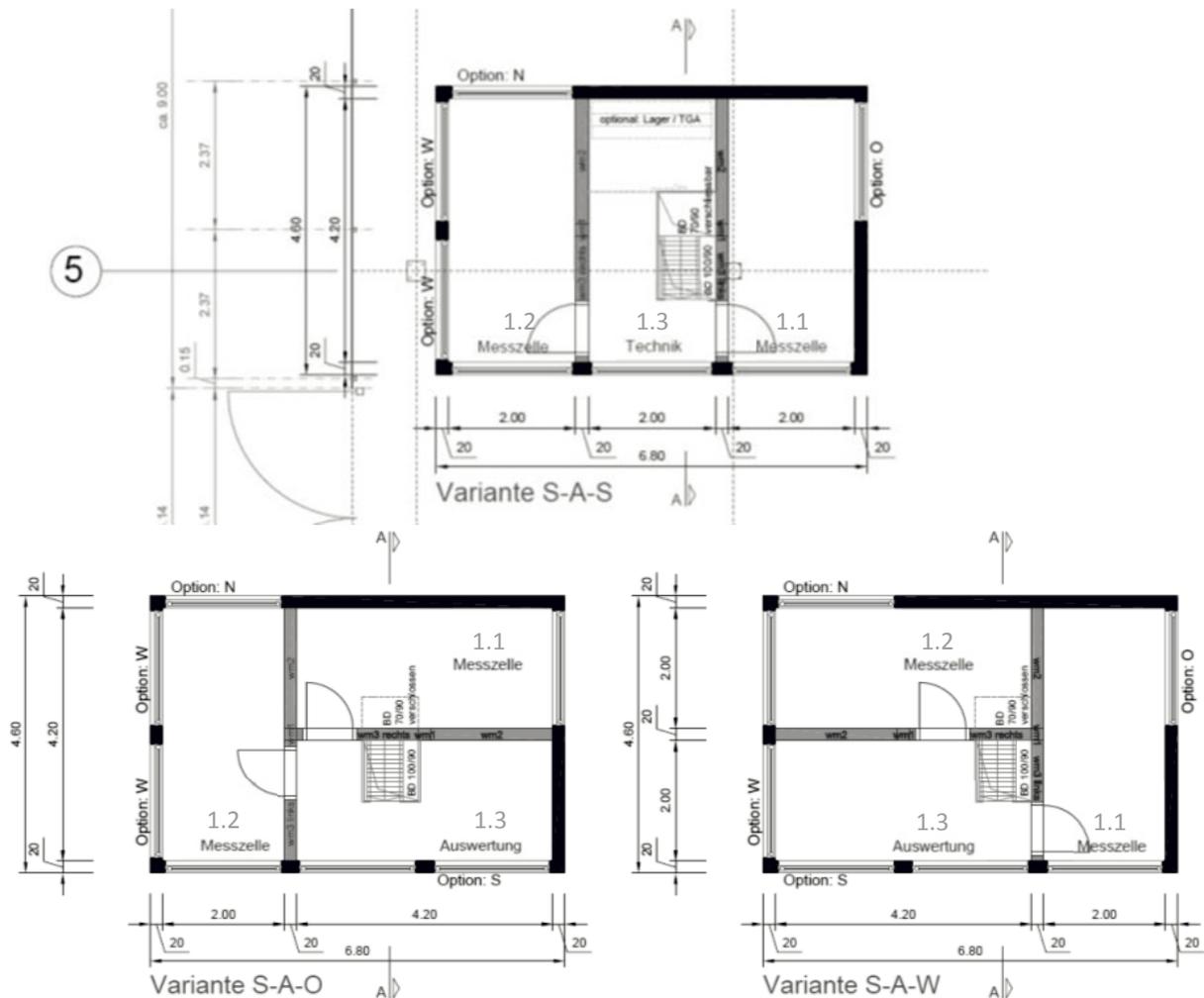


Abbildung 5-2: Konzeption des Fassadenprüfstands – Grundriss Obergeschoss. Drei unterschiedliche, mögliche Ausbaubauvarianten. Copyright ILEK.



Abbildung 5-3: Aufbau des Fassadenprüfstands – Fotodokumentation. Copyright ILEK.



Abbildung 5-4: Die erste Testkonfiguration adaptiver Verglasungen im Fassadenprüfstand. Copyright ILEK.

Die messtechnische Ausstattung des Prüfstands ist in Abbildung 5-5 schematisch und beispielhaft für einen Testraum dargestellt. Die Solarstrahlung auf die horizontale Dachfläche und die Südfassade wird mittels Pyranometer erfasst. Sonstige Wetterparameter werden von einer lokalen Wetterstation geliefert. Die visuellen und die thermischen Bedingungen im Innenraum werden mittels Beleuchtungsstärkemessköpfe, Thermoelemente und Feuchtigkeitssensoren erfasst, die in jedem Messraum verbaut sind. Die Oberflächentemperaturen der Verglasungen werden ebenfalls zeitgleich gemessen. Zusätzlich zur Festeinrichtung wurde an charakteristischen Messtagen ein mobiler Beleuchtungsstärkemesskopf eingesetzt.

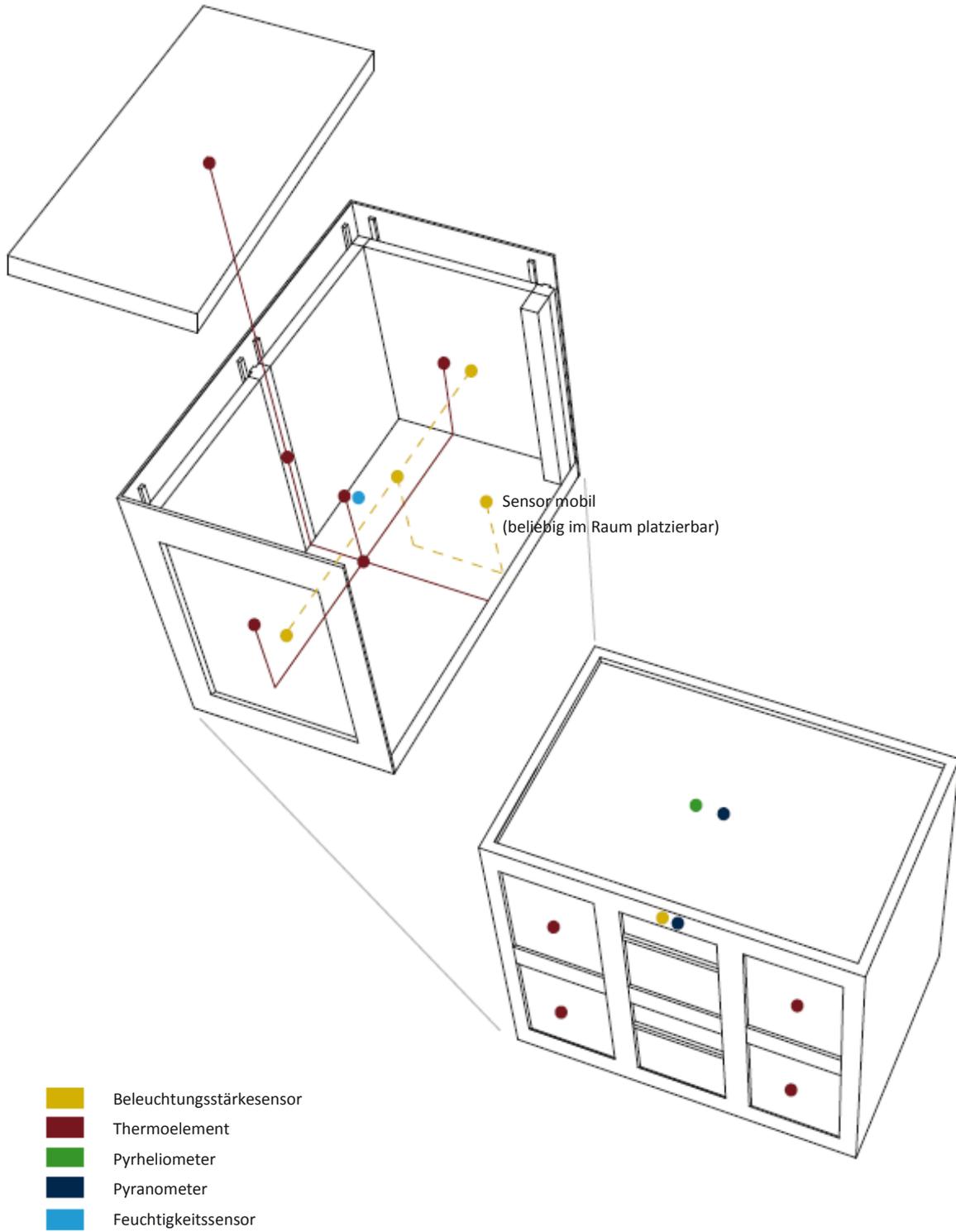


Abbildung 5-5: Sensorische Ausstattung des Fassadenprüfstands. Schematische Darstellung, Copyright ILEK.

5.2 Computersimulationen

5.2.1 Simulationsaufbau

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden energetische Analysen der adaptiven Verglasungen auf der Basis von Computersimulationen durchgeführt. Es hat sich schnell gezeigt, dass das adaptive Verhalten der Verglasungen nicht in lediglich einem Simulationsprogramm umfassend abgebildet werden kann. Daher wurde im Rahmen des Projekts eine Softwarekombination verwendet, die eine kombinierte dynamische Analyse der Beleuchtungssituation im Raum sowie des thermischen und energetischen Verhaltens des mit einer adaptiven Verglasung ausgestatteten Gebäudes ermöglicht. Die Beleuchtungssimulation wurde mithilfe des Radiance-basierten Programms Daysim ausgeführt, die anschließende energetische Analyse mit dem Programm TRNSYS. Die für diese Simulationen benötigten Gebäudemodelle konnten mithilfe der 3D-Modellierungssoftware Ecotect oder Sketchup erstellt werden. Zur Ermittlung der Verglasungseigenschaften kamen die Programme Optics und Window zur Anwendung. Die Simulationen wurden anhand statistischer Klimadatensätze in stündlichen Zeitschritten für die Dauer eines Jahres durchgeführt. Die Übersicht aller verwendeten Programme findet sich in Abbildung 5-6 wieder.

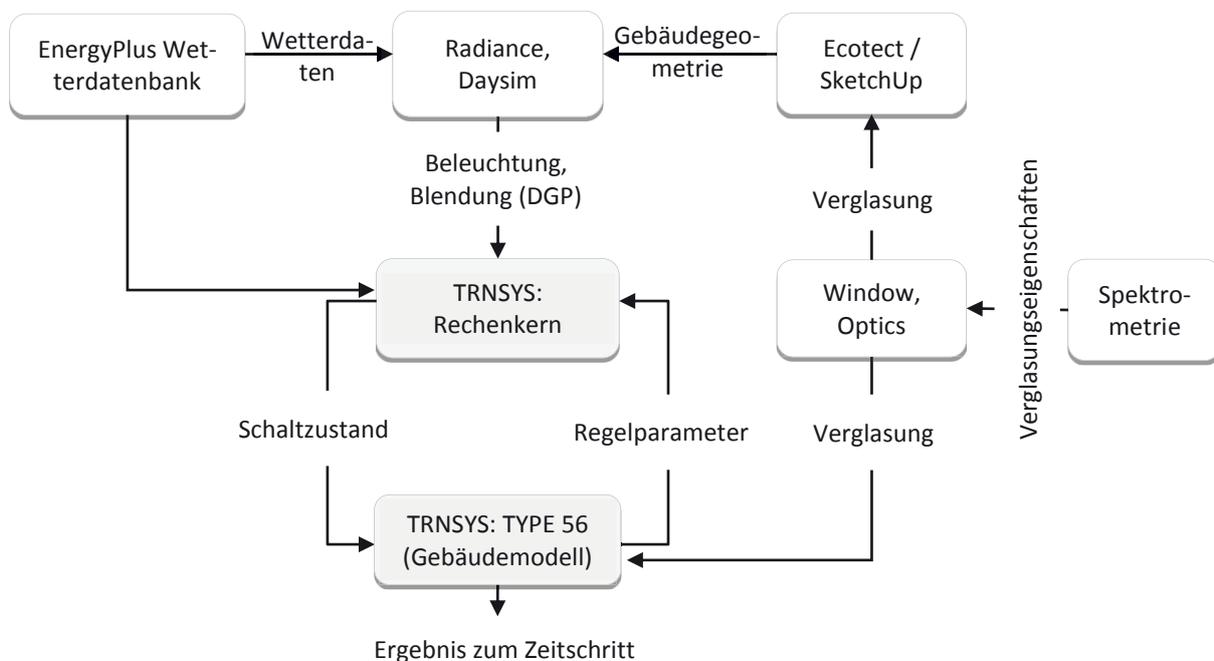


Abbildung 5-6: Kombinierte Simulationsstrategie für die lichttechnische und energetische Evaluierung

5.2.1.1 Modellierung der Verglasungseigenschaften mit der Software Window/Optics

Die zuvor ermittelten Spektraleigenschaften der Verglasungen (s. Kapitel 4) fanden in deren numerischen Modellierung Verwendung. Mit dem Softwarepaket Window / Optics konnten anhand von Spektraldaten Mittelwerte der Transmission und Reflexion sowie wärmetechnische Kennwerte ermittelt werden. Bei der Berechnungssoftware handelt es sich um das Softwarepaket des LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory). Die aktuelle Version des wärmetechnischen Moduls zur Verglasungsmodellierung, Window 7.4, kann mit anderen Werkzeugen des LBNL, wie Optics 5.1, kombiniert werden. Optics berechnet die optischen Eigenschaften eines Glases abhängig von den Spektraldaten der Transmission sowie der Reflexion auf Vorder- und Rückseite des Glases. Da das Computerprogramm in den Vereinigten Staaten von Amerika entwickelt wurde, liegen der Berechnung dieser optischen Kenngrößen der Verglasung die Standards nach NFRC zugrunde. Sind die Daten der ein-



zelenen Schichten der Verglasung bekannt, so lassen sich mit Window die Eigenschaften des gesamten Isolierglasaufbaus berechnen. Window ermöglicht die Bestimmung folgender wärmetechnischer Kennwerte in Verglasungsmitteln: Solar Heat Gain Coefficient SHGC (g-Wert), Shading Coefficient SC (b-Wert), Wärmedurchgangskoeffizient U (U-Wert), sekundärer Wärmeabgabegrad nach innen Φ_i . Zudem werden optischen Kennwerte der Transmission, Reflektion und Absorption bestimmt. Die Temperaturverteilung im vorgegebenen Glasaufbau, jeweils in der Feldmitte und auf allen Positionen des Aufbaus, kann ebenfalls ermittelt werden. Zur Berechnung der optischen Eigenschaften wird ein Matrizenverfahren verwendet, das mehrfache Reflektionen innerhalb der Isolierverglasung in die Berechnung einbezieht. Winkelabhängige Transmissions- und Reflexionsberechnungen sind in 10°-Schritten möglich. Die Berechnung des Temperaturverlaufs erfolgt in einem iterativen Matrizenverfahren unter Berücksichtigung der Wärmeleitung, der Strahlung und der natürlichen Konvektion. Weiterhin können die modellierten Verglasungen im DOE-2 Format exportieren werden, um anschließend im Gebäudemodell der Simulationssoftware TRNSYS für energetische Berechnungen Verwendung zu finden.

5.2.1.2 Ecotect/SketchUp

Die Programme Ecotect und SketchUp ermöglichen die Erstellung dreidimensionaler Gebäudemodelle. Die Gebäudemodelle können im Anschluss für die Tageslichtanalyse mit DAYSIM genutzt werden. Abbildungen der im Forschungsprojekt erstellten Gebäudemodelle finden sich im Kapitel 5.2.2.3.

5.2.1.3 TRNSYS

Zur Interpretation des Adaptationsprozesses wurde das Simulationsprogramm TRNSYS (Transient System Simulation Program) ausgewählt. Es ist eines der wenigen Programme auf dem Markt, das die Simulation der Anpassungsfähigkeit von Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung ermöglicht. TRNSYS wurde ursprünglich in den 1970er Jahren von Klein, Duffie und Beckmann für Simulationen von Solaranlagen entwickelt [40], seitdem findet seine ständige Weiterentwicklung statt. Der modulare Aufbau der Software ermöglicht die Beschreibung einzelner Komponenten als autonome Module, die vom Nutzer aus der Programmbibliothek importiert und verknüpft beziehungsweise neu programmiert werden können. Die Module werden in TRNSYS „Types“ genannt [41]. Eines dieser Module, der Type 56, repräsentiert ein dreidimensionales Gebäudemodell.

TRNSYS ist ein Programm, das transiente Simulationen für die thermisch energetische Analyse von Gebäuden und Anlagen ermöglicht. Im Gegensatz zu statischen Simulationen berücksichtigen transiente (dynamische) Simulationen zeitabhängige Einflüsse. Für energetische Gebäudeanalysen ist dies aufgrund des zeitabhängigen Klimaverlaufs eine Notwendigkeit. TRNSYS besteht aus einigen Unterprogrammen, wobei das TRNSYS Simulation Studio sowie TRNBuild als Eingabeprogramm für die Modellierung der verschiedenen Nutzungsszenarien verwendet werden. TRNBuild dient als Benutzeroberfläche zur Gebäudemodellierung (Konfiguration des Type 56). Es ermöglicht die Definition der Raumschließungsflächen sowie deren Aufbau und Materialien, das Programmieren von Heiz- und Kühlprofilen und das Einbeziehen von inneren Energiegewinnen und -verlusten [42]. Für die Simulation einer adaptiven Verglasung bietet TRNBuild keine direkte Modellierungsfunktion, dies wird jedoch durch die Zuordnung variabler Fenster-ID-Nummern erreicht, über die verschiedene Abdunklungsstufen der Verglasungen definiert werden können.

5.2.1.4 Daysim

Mithilfe des Programmpakets Radiance/Daysim können die Blendungsgefahr und die Beleuchtungsstärkeverteilung ermittelt werden und in die energetischen Simulationen im Programm TRNSYS eingebunden werden. Die Berechnungen im Programm Daysim basieren auf dem Programm Radiance, einer Raytracing-Software, die der Analyse und Visualisierung von Beleuchtungsverhältnissen in Räumen dient. Die Eingabe aller Simulationsparameter erfolgt jedoch innerhalb von Daysim, während Radiance im Hintergrund angesteuert wird. Abhängig von hinterlegten Wetterdaten für den jeweiligen Gebäudestandort und dem entsprechenden Gebäudemodell werden stündliche, zeitabhängige Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten im Innenraum eines Gebäudes während



eines Jahres berechnet. Die Berechnungen beruhen dabei auf der Backward-Raytracing-Methode. Als Outputparameter können beispielsweise die Beleuchtungsstärkeverteilung im Raum im Jahresverlauf, der Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung und das Risiko der Blendung durch Tageslicht in stündlichen Zeitschritten aus Daysim ausgelesen werden. Über ein sogenanntes Reader-Modul können diese in TRNSYS eingelesen und zur Auswertung oder zur Programmierung von Regelungsstrategien adaptiver Verglasungen verwendet werden.

Das Blendungsrisiko wird in Daysim mithilfe des Parameters Daylight Glare Probability (DGP) nach Wienold und Christoffersen [43] wie folgt ermittelt und gedeutet:

$$DGP = 5,87 \cdot 10^{-5} E_v + 9,18 \cdot 10^{-2} \log \left(1 + \sum_i \frac{L_{si}^2 \omega_{si}}{E_v^{1,87} P_i^2} \right) + 0,16$$

- L_{si} Leuchtdichte der Quelle i [cd/m²]
- ω_{si} Raumwinkel der Quelle i [sr]
- P_i Positionsindex der Quelle i
- E_v vertikale Beleuchtungsstärke [lx]

Formel 5-1: Daylight Glare Probability nach Wienold und Christoffersen [43]

Blendung	nicht wahrnehmbar	wahrnehmbar	störend	unerträglich
DGP	< ca. 0,35	ca. 0,35 – 0,40	ca. 0,39 – 0,45	> ca. 0,46

Tabelle 5-1: Statistische Interpretation des DGP-Werts nach Wienold und Christoffersen [43] (95 % Konfidenzintervall)

Ab einem DGP-Wert von ca. DGP=0,4 wird die Blendung durch Tageslicht als störend angenommen. Dieser Wert wird zur Auslegung der nachfolgenden Regelungsstrategien für schaltbare Verglasungen (Kapitel 6) verwendet.

5.2.2 Simulationsbedingungen

Um Anwendungsvorschläge für die jeweiligen adaptiven Systeme formulieren zu können, wurden verschiedene Anwendungsparameter für die Computersimulationen definiert. Die Simulationen wurden für vier repräsentative klimatische Bedingungen und drei verschiedene Nutzungsszenarien durchgeführt.

5.2.2.1 Auswahl repräsentativer Orte

Klimatische Randbedingungen stellen einen der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Fassadenplanung dar. Die Ausführung der Fassade kann je nach der geografischen Lage eines Gebäudes stark variieren. Entscheidend sind dabei so genannte Klimafaktoren (geografische Koordinaten, insbesondere die geographische Breite, Höhe über dem Meeresspiegel, Nähe zu Gewässern oder dem Meer, landschaftliche Einflüsse). Die genannten Klimafaktoren beeinflussen die Klimatelemente - die Eigenschaften eines Klimasystems. Die Elemente mit einem direkten Einfluss auf die Fassadengestaltung werden nach Hegger [44] wie folgt bezeichnet: Sonnenstrahlung (direkt und diffus), Lufttemperatur und ihre tages- bzw. jahreszeitlichen Schwankungen, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Wind, Niederschlag, Verdunstung. Vor allem die Solarstrahlung ist maßgeblich für das Verhalten der meisten untersuchten adaptiven Systeme, die Wärmegewinne und die Beleuchtungssituation im Raum verantwortlich.

Im Rahmen des Projekts wurden vier Orte mit repräsentativen klimatischen Charakteristiken definiert. Hierfür erfolgte die Unterscheidung repräsentativer Klimagebiete, zunächst über die Unterteilung der Erde in Beleuchtungsklimazonen [45]. Diese ergeben sich aus den geographischen Breiten und dem daraus resultierenden Einstrahlungswinkel der Sonne. Eine Zone charakterisiert jeweils ein Gebiet ähnlicher solarer Einstrahlung. Die Grenzen sind, wie in Abbildung 5-7 dargestellt, jeweils an den Wende- und Polarkreisen und zusätzlich am 45. Breitengrad, sodass sich die folgenden vier Hauptzonen ergeben:



- Polarzonen (von den Polarkreisen ($66^{\circ} 34'$) bis zu den Polen). Charakteristisch sind hier stark ausgeprägte Jahreszeiten mit extremen Schwankungen der Tageslänge. Da die Sonne nie höher als 47° am Himmel steht, sind die Strahlungseinträge entsprechend gering.
- Mittelbreiten (von 45° bis $66^{\circ} 34'$). Der schwankende Verlauf der Sonnenhöhe führt hier zu stark ausgeprägten Jahreszeiten und einem schwankenden Verlauf der solaren Einstrahlung.
- Subtropen (von den Wendekreisen ($23^{\circ} 26'$) bis zum Beginn der Mittelbreiten am $45.$ Breitengrad). Ausschlaggebend für die Strahlungsintensität ist hier die Tageslänge. Diese hängt maßgeblich von der Jahreszeit ab.
- Tropen (nördlich und südlich des Äquators bis zu den Wendekreisen ($23^{\circ} 26'$)). Der Einfluss der Jahreszeiten ist minimal und die Verteilung der hohen Sonneneinstrahlung fast konstant.

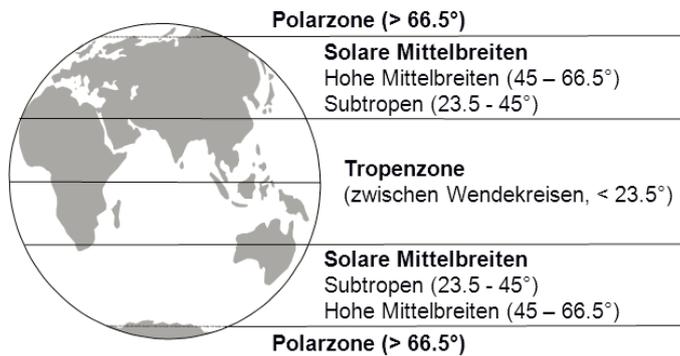


Abbildung 5-7: Aufteilung der Erde in Beleuchtungsklimazonen [46]

Die Einteilung nach Breitengraden hat einen erheblichen Einfluss auf die solare Einstrahlung. Eine graphische Überlagerung der Beleuchtungsklimazonen mit der Karte der tatsächlich auf der Oberfläche auftreffenden Jahresglobalstrahlung ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Sie verdeutlicht Übereinstimmungen, aber auch lokale Unterschiede durch Extinktion in der Atmosphäre.

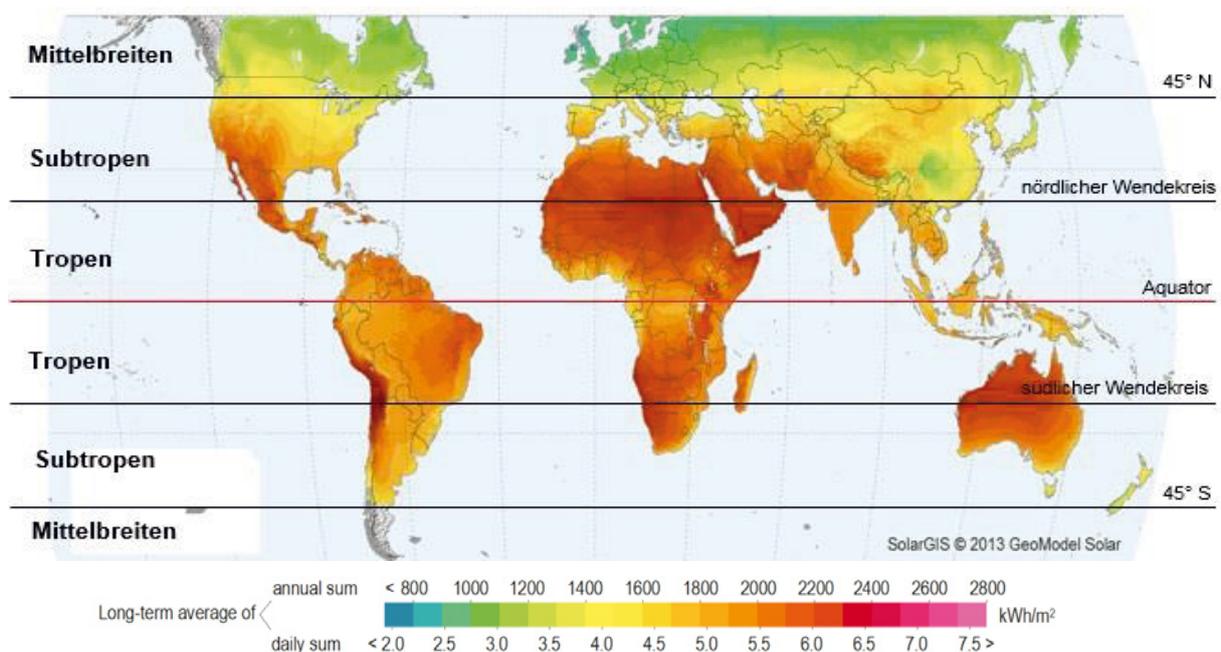


Abbildung 5-8: Überlagerung der Beleuchtungsklimazonen mit der durchschnittlichen horizontalen Globalstrahlung nach SolarGIS © 2015 Global Horizontal Irradiation (GHI) [47]



Um sowohl den Einfluss der Einstrahlung als auch der Temperatur zu berücksichtigen, wurde zusätzlich die Einteilung der physischen Klimazonen betrachtet. Vergleicht man diese mit der Verteilung der horizontalen Strahlung, lässt sich eine grobe Übereinstimmung feststellen. In der differenzierteren Einteilung nach Köppen und Geiger finden sich diese Übereinstimmungen wieder. Es ist die am häufigsten verwendete Methode der effektiven Klimaklassifikation. Grundlagen der Köppen'schen Klimaklassifikation bilden die mittleren monatlichen Werte der Lufttemperatur und der Niederschläge. Die Gebiete mit ähnlichen klimatischen Bedingungen werden mit jeweils drei Buchstaben bezeichnet. Der erste Buchstabe gibt die Klimazone an. Durch Hinzufügen eines zweiten Buchstabens lassen sich Klimatypen unterscheiden. Innerhalb der Klimatypen können durch Anfügen weiterer Buchstaben an die Klimaformel Unterschiede hervorgehoben werden. Hierbei werden Klimauntertypen gekennzeichnet. Die Erklärung der Bezeichnungen nach Heyer [48] (zitiert nach [49]) findet sich in der Tabelle 5-2 wieder.

Klimaformel	Klimazone	Klimatyp	Klimauntertyp
Dfc	Kühl-Gemäßigt-Feucht Boreales oder Schnee-Wald-Klima, min. 1 Monat über 10 °C, kühler Monat unter 0 °C	Feucht Alle Monate sind feucht; der trockenste Monat hat eine Niederschlagsmenge von mindestens 60 mm	Kühle Sommer Mitteltemperatur des wärmsten Monats unter +22 °C, ein bis drei Monate mit einer Mitteltemperatur von wenigstens +10 °C
Dfb	Kühl-Gemäßigt-Feucht Boreales oder Schnee-Wald-Klima, min. 1 Monat über 10 °C, kühler Monat unter 0 °C	Feucht Alle Monate sind feucht; der trockenste Monat hat eine Niederschlagsmenge von mindestens 60 mm	Warme Sommer Mitteltemperatur des wärmsten Monats unter +22 °C, mindestens vier Monate mit Mitteltemperaturen von wenigstens +10 °C
Cfb	Warm-Gemäßigt-Feucht Warm-gemäßigtes Klima, min. 1 Monat über 10 °C, kühler Monat zwischen 18 und 0 °C	Feucht Alle Monate sind feucht; der trockenste Monat hat eine Niederschlagsmenge von mindestens 60 mm	Warme Sommer Mitteltemperatur des wärmsten Monats unter +22 °C, mindestens vier Monate mit Mitteltemperaturen von wenigstens +10 °C
Csa	Warm-Gemäßigt-Feucht Warm-gemäßigtes Klima, min. 1 Monat über 10 °C, kühler Monat zwischen 18 und 0 °C	Sommertrocken Trockenzeit im Sommer der betreffenden Halbkugel Der trockenste Sommermonat hat weniger als 40 mm	Heiße Sommer Mitteltemperatur des wärmsten Monats über +22 °C

Tabelle 5-2: Erklärung der Klimaformeln europäischer Klimaregionen

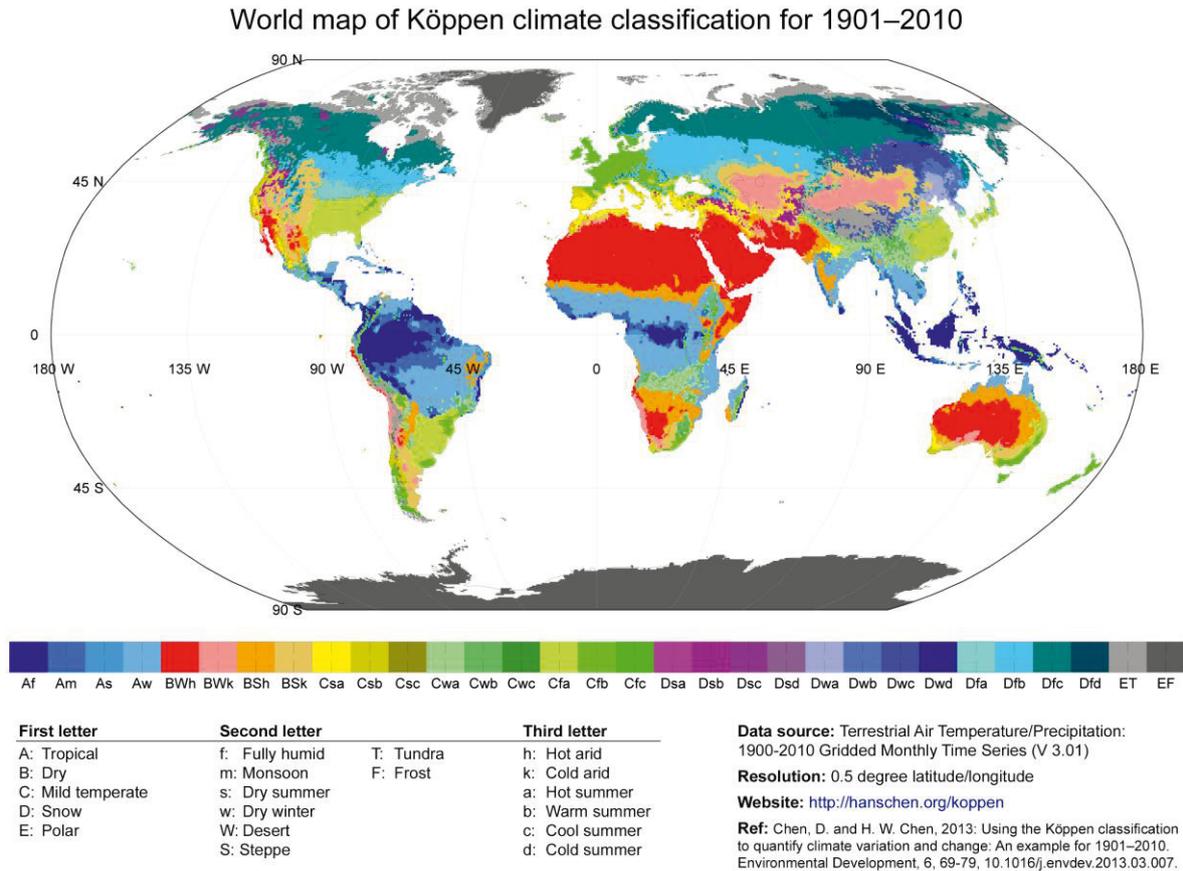


Abbildung 5-9: Weltkarte der Köppen-Geiger Klimazonen nach Chen und Chen („data source: global observational dataset by Kenji Matsuura and Cort J. Willmott“) [50]

Durch die Überlagerung der vorgestellten Klassifikationen wurden beispielhafte, für verschiedene Klimatypen repräsentative Standorte für die Simulation ausgewählt. Dabei erfolgt die Auswahl nach folgenden Prinzipien:

- Prinzip 1: Alle Orte sollen ungefähr auf einer Längsachse liegen (0° - 25° Ost)
- Prinzip 2: Alle Orte sollen auf der nördlichen Hemisphäre liegen
- Prinzip 3: Flächengroße Klimatypen und Untertypen werden entsprechend stärker gewichtet
- Prinzip 4: Repräsentiert der Ort nur einen bestimmten Klimatyp, sollte er möglichst zentral in der jeweiligen Zone liegen
- Prinzip 5: Der gewählte Klimatyp sollte im Zeitverlauf möglichst konstant sein (es wurden relative klimatische Änderungen im Zeitraum von 1901 bis 2010 nach Chen [50] analysiert)
- Prinzip 6: Bei verschiedenen Klimatypen wird der durchschnittlichste gewählt (beispielsweise bei Unterteilung nach Temperatur)
- Prinzip 7: Wenn kein „durchschnittlicher Klimatyp“ ermittelt werden kann (zum Beispiel bei zwei Klimatypen: Sommertrocken und Wintertrocken), wird der repräsentative Ort möglichst auf der Grenze gewählt
- Prinzip 8: Es werden nur Orte gewählt, für die Klimadaten zur Verfügung stehen

In der nachfolgenden Tabelle und in Abbildung 5-10 werden die gewählten repräsentativen Orte zusammengefasst. Deren Klimadaten werden aus der in den Simulationsprogrammen hinterlegten Datenbank importiert und für thermische und lichttechnische Simulationen verwendet.



	Stadt	Land	Breitengrad	Längengrad	Beleuchtungs- klimazone	Köppen-Gei- ger Klimazone
1.	Helsinki	Finnland	60° 10' N	24° 56' O	Mittelbreiten	D
2.	Stuttgart	Deutschland	48° 46' N	9° 10' O	Mittelbreiten	C
3.	Valencia	Spanien	39° 29' N	0° 2' W	Subtropen	C
4.	Accra	Ghana	5° 03' N	0° 13' W	Tropen	A

Tabelle 5-3: Übersicht und Lage der gewählten repräsentativen Orte

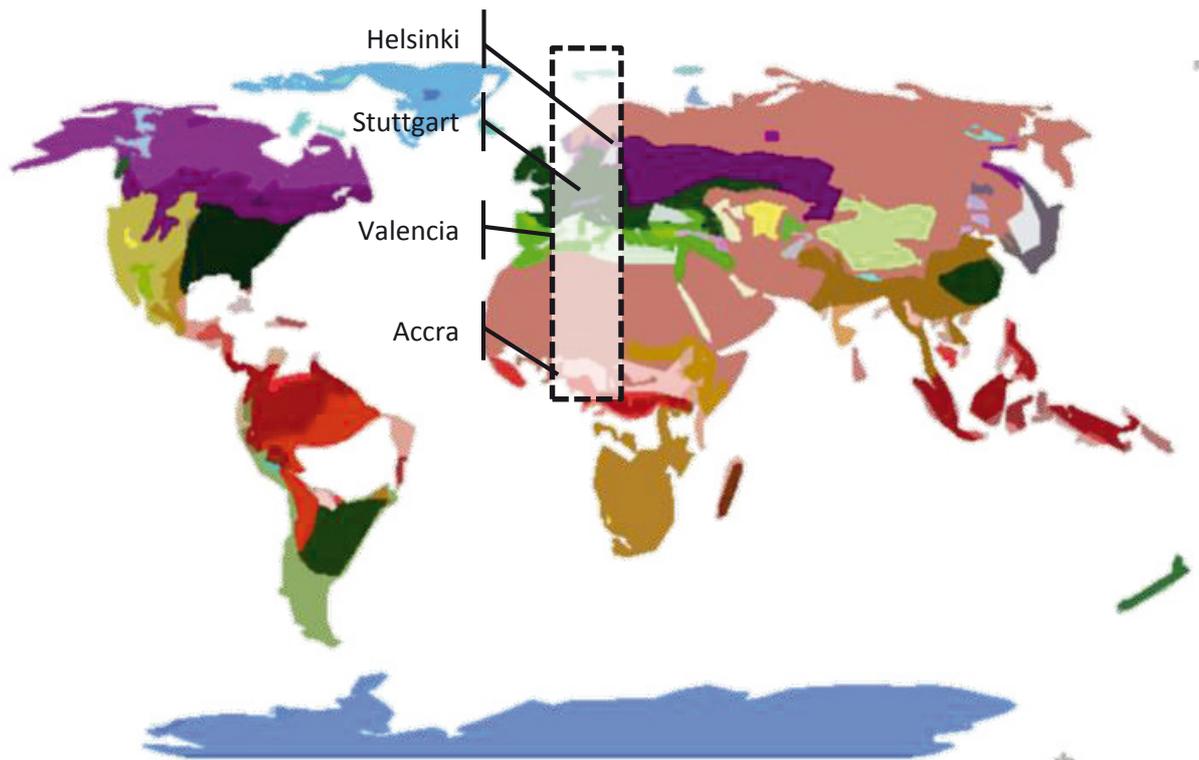


Abbildung 5-10: Lage der gewählten repräsentativen Orte

Um den Einfluss des Klimas bei den Simulationen zu berücksichtigen, wurden im Rahmen der numerischen Simulationen Wetterdatensätze eines Testreferenzjahres (Typical Meteorological Year, TMY) verwendet. Diese Datensätze beruhen auf realen Witterungsverhältnissen und bilden den charakteristischen Jahresverlauf des entsprechenden Standorts nach. Hierfür wurden die klimatischen Bedingungen am Standort über mehrere Jahre (teilweise bis zu 30 Jahre) analysiert, um im Anschluss ein typisches jährliches Klimaprofil zu entwickeln [51]. Da ein TMY den üblichen Klimaverlauf eines Jahres darstellt, werden bei der Nutzung dieser Daten keine klimatischen Extremsituationen simuliert.

5.2.2.2 Auswahl repräsentativer Nutzungsszenarien: Analyse der Komfortanforderungen

Des Weiteren wurden drei repräsentative Gebäudetypologien mit unterschiedlichen Nutzungsszenarien und Bauarten ausgesucht und in die Simulationen einbezogen. Hierfür wurden im Rahmen des Projekts die Komfortanforderungen für verschiedene Nutzungsszenarien analysiert.



Verwaltungsgebäude

Laut Hartwig [52] haben insbesondere Büro- und Verwaltungsbauten Anforderungen an den Innenraumkomfort und die Energieeffizienz, deren Erfüllungsgrad durch eine entsprechende Fassadengestaltung wesentlich beeinflusst werden kann. Im Allgemeinen werden Bürobauten durch folgende Faktoren charakterisiert:

- besonders hohe Anforderungen an den visuellen und thermischen Komfort
- hohes Sparpotential bei der Beleuchtungsenergie
- großer Bedarf an nutzungsspezifischen, automatisierten Regelungssystemen
- verschärfte Überhitzungsproblematik wegen hoher interner Wärmequellen
- häufig hoher Glasanteil bei den Fassaden
- hohe Anforderungen hinsichtlich Imagewirkung [52].

Aufgrund dieser Anforderungen und der besonders hohen Potentiale zur Integration adaptiver Fassadensysteme wurden vor allem Verwaltungsgebäude als Grundlage der lichttechnischen und energetischen Modellierung verwendet. Innerhalb dieser Nutzung wurden sowohl ein Einzelbüro als auch ein Großraumbüro als repräsentative Raumtypologien ausgewählt. Die Anforderungen an die Beleuchtungsstärkeniveaus, die Tageslichtversorgung, die Leuchtdichten, den Blend- und Sonnenschutz, die Farbwiedergabe, die Sichtverbindung mit dem Außenraum und die Temperaturen an Arbeitsplätzen sind im Anhang 2 zusammengefasst. Für die Beleuchtungsanalysen im Projekt wurden hauptsächlich die Anforderungen an das Beleuchtungsstärkeniveau am Arbeitsplatz (min. 500 lx), an den Tageslichtquotienten (min. 0,75 % und Mittelwert min. 0,9 % in halber Raumtiefe und in 1 m Abstand von Seitenwänden, min. 2 % am Arbeitsplatz) und an die Leuchtdichteverteilung (Zwischen der Infeldleuchtdichte⁶ und dem näheren Umfeld⁷ Leuchtdichtekontraste von 1:3 und zwischen der Infeldleuchtdichte und dem ferneren Umfeld ein Verhältnis von 1:10, die Leuchtdichte von Fenstern bzw. Kunstlichtquellen und benachbarten Flächen soll ein Verhältnis von 1:40 nicht überschreiten) [54–56] betrachtet. Bezüglich des thermischen Komforts wird die Temperaturspanne von 20 °C bis 26 °C (empfohlen Gebäudekategorie II nach DIN EN 15251) als Richtwertebereich in die energetischen Simulationen und zur Auslegung der Regelungsstrategien herangezogen.

Schulbauten

Zusätzlich zur Büronutzung wurde eine Schulnutzung simulatorisch untersucht. Die Komfortanforderungen hierzu finden sich im Anhang 2 wieder. Grundsätzlich entsprechen die Anforderungen an Temperatur und Leuchtdichteverteilung denen der Büronutzung. Lediglich die minimale für die Sehaufgabe erforderliche Beleuchtungsstärke beträgt im genannten Nutzungsfall 300 lx. Eine besondere Bedeutung gewinnt hier die Besonnung (direkter Strahlungseinfall), der eine positive psychologische Wirkung zugeschrieben wird.

⁶ Das Infeld wird an einem Büroarbeitsplatz durch die Grenzen des Bildschirms, der Tastatur und evtl. des bearbeiteten Dokuments auf dem Schreibtisch definiert. Im Allgemeinen wird das Infeld ohne häufige und große Blickwechsel erreicht.

⁷ Als primäres Umfeld an einem Büroarbeitsplatz wird gewöhnlich die Arbeitsfläche definiert, zu deren Betrachtung eine Kopfbewegung nötig ist. Das sekundäre (fernere) Umfeld ist das maximale optische Feld in einem Arbeitsraum. Durch die Bewegung des Kopfs oder des Oberkörpers wird das sekundäre Umfeld erst durch die Raumbegrenzungsflächen (Wand, Decke, Boden) begrenzt. Die durch Fenster wahrgenommene Umgebung wird als tertiäres Umfeld bezeichnet [53].

5.2.2.3 Auswahl repräsentativer Nutzungsszenarien: Raumsimulationsmodelle

Für die numerischen Simulationen wurden nachfolgend beschriebene Nutzungsszenarien ausgewählt und modelliert:

- ein Einzelbüro in leichter Holzbauweise,
- ein Großraumbüro in Massivbauweise,
- ein Klassenraum in Massivbauweise.

Einzelbüro

Das Einzelbüro stellt ein Pendant zum Testraum des Fassadentestgebäudes dar. Die Dimensionen der Testräume im Fassadenprüfstand sind vergleichbar mit denen von Zellenbüros, welche als weit verbreitetes Bürokonzept gelten. Die Abmessungen eines Raums betragen jeweils 4,2 m x 2,0 m (8.40 m²) bei einer lichten Raumhöhe von 2,7 m. Aus den „Technischen Regeln für Arbeitsstätten – Raumabmessungen und Bewegungsflächen“ ergibt sich in einem Zellenbüro für den Flächenbedarf ein Richtwert von 8 bis 10 m² je Arbeitsplatz einschließlich Möblierung und anteiliger Verkehrsflächen im Raum [57]. Innerhalb des Raums ist daher ein Arbeitsplatz vorgesehen, für welchen der visuelle Komfort eines potentiellen Nutzers analysiert wird. Der Nutzer befindet sich in sitzender Position 1,20 m vor der Fassade und blickt in Richtung Süden. Die Südfassade des Gebäudes ist vollflächig verglast, mit einem Glasflächenanteil von 84 %. Um eine Vergleichbarkeit der Mess- und Simulationsergebnisse zu ermöglichen, wurde für das Simulationsmodell die gleiche Konstruktion wie im Fassadentestgebäude vorwiegend verwendet.

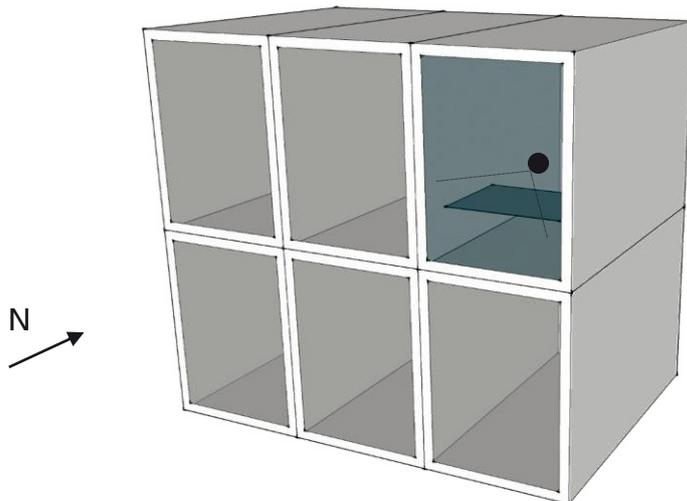


Abbildung 5-11: Simulationsmodell des Fassadenprüfstands (des Einzelbüros)

Großraumbüro

Als weiterer Modellraum wird ein Großraumbüro mit den Abmessungen 30 m x 15 m (450 m²) bei einer Raumhöhe von 3 m gewählt. Beide Längsfassaden des Raums sind flächig verglast, die Fenstergröße beträgt 77 m², der Fensterflächenanteil jeweils 85 %. Die verglasten Längsseiten zeigen in Richtung Süden und Norden. Die geschlossenen Wände werden im Simulationsmodell als angrenzend an weitere Großraumbüros behandelt. Innerhalb des Raums sind 40 Arbeitsplätze angeordnet, dies entspricht einem Flächenbedarf von 11,25 m² je Arbeitsplatz. Drei dieser Arbeitsplätze in der Raummitte werden für die Analyse des visuellen Komforts als repräsentativ ausgewählt. Die repräsentativen Nutzer blicken in Richtung Westen.



Für die Simulation des Großraumbüros wurde die in der Baupraxis für diese Typologie meist verwendete Massivbauweise angenommen. Das Simulationsmodell wurde mit typischen Wand und Deckenaufbauten aus der TRN-SYS-Datenbank aufgebaut:

- Außenwände: von innen nach außen:
Beton 100 mm, Stahlwolle 60 mm, Fassadenbahn, hinterlüftete Fassadenplatten
 $U=0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Innenwände:
Porenbeton 120 mm
 $U=2,13 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Decken: von unten nach oben:
abgehängte Akustikdecke, Luftschicht, tragende Betondecke
 $U=1,21 \text{ W/m}^2\text{K}$

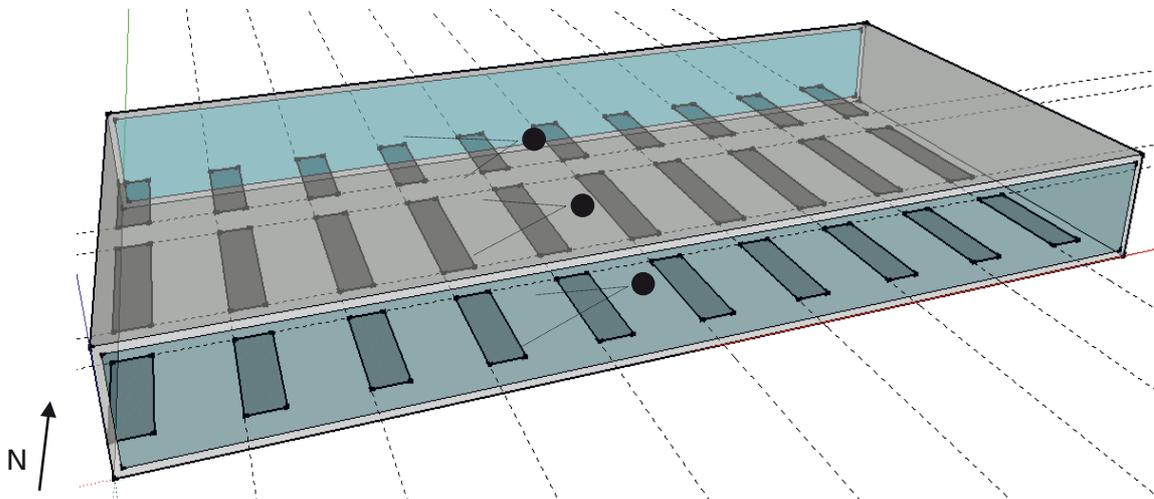


Abbildung 5-12: Simulationsmodell des Großraumbüros

Klassenraum

Der simulierte Klassenraum hat Raumabmessungen von 9 m x 7 m (63 m^2) bei einer lichten Raumhöhe von 3 m. Die Südfassade des Raums ist vollflächig verglast (der Fensterflächenanteil beträgt 84 %). Sonstige Wände grenzen an weitere Räume an. Innerhalb des Klassenraums sind 16 Schüler-Arbeitsplätze angeordnet. Zwei Arbeitsplätze in Raummitte werden für die Analyse des visuellen Komforts als repräsentativ betrachtet. Die repräsentativen Schüler blicken entsprechend der Anordnung der Möblierung nach Westen. Für die Ermittlung der internen Wärmelasten wird angenommen, dass sich 16 Schüler und ein Lehrer im Raum befinden. Für das Gebäudemodell des Klassenraums wird dieselbe Massivbauweise wie im Fall des Großraumbüros verwendet.

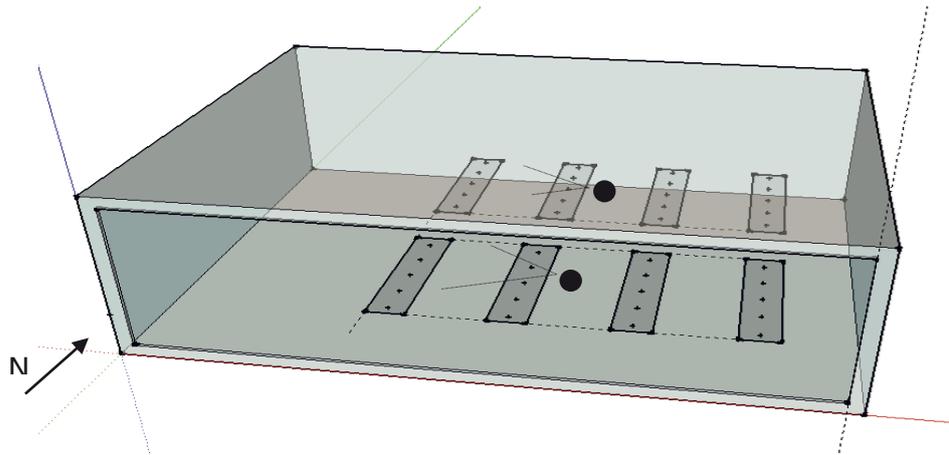


Abbildung 5-13: Simulationsmodell des Klassenraums

5.2.2.4 Auswahl repräsentativer Nutzungsszenarien: Nutzungszeiten

Für die untersuchten Nutzungsszenarien wurde ein Belegungsprofil definiert. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde dieses einheitlich für alle drei Szenarien angenommen. Die Zeitspanne von Montag bis Freitag jeweils von 8.00 Uhr bis 17.00 Uhr wurde als Zeit der Nutzenanwesenheit definiert. Für die Beleuchtungssimulationen wurden zusätzlich drei Pausen pro Tag angenommen. Zur Mittagszeit verlassen die Nutzer den Raum für eine Stunde sowie am Vormittag und am Nachmittag für insgesamt 30 Minuten. Während der Zeiten, in denen der Raum nicht besetzt ist, ist keine künstliche Beleuchtung erforderlich.



6 Regelungsstrategien für steuerbare Systeme • AP 7

Im ersten Zwischenbericht wurde die Analyse diverser, in der Literatur vorzufindender Regelungsstrategien für adaptive Verglasungen dokumentiert. Deren Zusammenfassung ist in der Tabelle 6-1 dargestellt. Die Regelungsansätze basieren grundsätzlich auf messbaren oder simulierbaren Parametern, beispielsweise der Außentemperatur, für die jeweils ein oberer und ein unterer Schwellenwert definiert werden. Unterschreitet der Parameterwert den unteren Schwellenwert, wird die Verglasung in den Zustand maximaler Transmission versetzt. Überschreitet der Parameterwert den oberen Schwellenwert, wird die Verglasung maximal abgedunkelt. Zwischen den Schwellenwerten wird sie meistens stufenweise abgedunkelt.

		Regelungsstrategien					
		Außentemperatur	Solarstrahlung	Tageslicht	Energie (Energiegewinn)	Zeitplan	Kühllasten
Parameter	Schwellenwerte für Außentemperatur	Schwellenwerte für Globalstrahlung auf der Scheibenoberfläche	Schwellenwerte für Beleuchtungsstärke im Raum	Maximierung der Energiegewinne / Minimierung des Energiebedarfs (künstliche Beleuchtung vernachlässigt), Schwellenwerte für Temperatur	Nutzeranwesenheit, beispielsweise Abdunklung in der Mittagszeit / Änderung der Strategie während der Arbeitszeiten	Vorhandensein der Kühllasten in der vergangenen Stunde	

Tabelle 6-1: Regelungskonzepte für elektrochrome Verglasungen gemäß Literaturrecherche [58]

Die Empfehlungen der recherchierten Autoren bezüglich optimaler Regelungsstrategien variieren stark. In den meisten Literaturquellen wird auf die Notwendigkeit hingewiesen, mehrere Parameter in Betracht zu ziehen. Häufig werden die Strategien: *Tageslicht* für das Ziel Energieeinsparung für die künstliche Beleuchtung und *Kühl-lasten* oder *Solarstrahlung* für die Minimierung des Gesamtenergiebedarfs als effektivste Strategien definiert, eine Differenzierung nach Nutzeranwesenheit- und -abwesenheitszeiten wird dabei empfohlen.

Im Projektrahmen wurden die Möglichkeiten der Übertragung dieser Konzepte auf die Projektbedingungen untersucht. Als Ergebnis dieser Untersuchung wurden Kombinationen mehrerer Regelungsstrategien entwickelt. Darüber hinaus wurden weitere Parameter in Betracht gezogen, nämlich die Innenraumtemperatur, die Solarstrahlung (auf der Scheibenoberfläche), die Tageslichtsituation (Beleuchtungsstärke im Raum), der Energieeintrag. Zusätzlich wurde Blendung als Parameter untersucht. Die Simulationsprogramme bieten die Möglichkeit, Blendungsgefahr im Raum anhand des berechneten DGP-Werts (vgl. Formel 5-1 und Zwischenbericht II [59]) einzuschätzen.

6.1 Regelungsstrategie I (RS I)

Das erste Konzept, die Strategie RS I, wurde wie folgt definiert: der Abdunklungsgrad einer schaltbaren Verglasung soll bei einer Raumtemperatur zwischen 20 und 26 °C variiert werden. Das Konzept einer auf der Innentemperatur basierten stufenweisen Abdunklung einer adaptiven Verglasung ist in Abbildung 6-1 dargestellt.

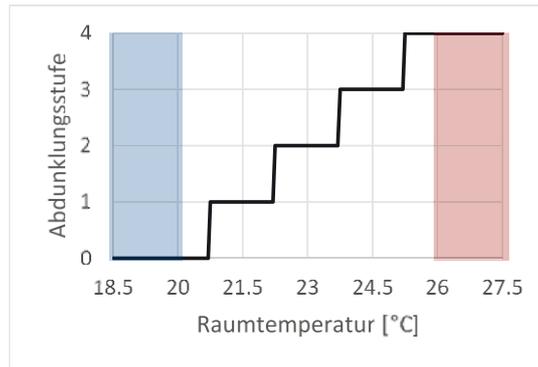


Abbildung 6-1: Temperaturbasierte Abdunklung (rot: Heizungsbereich, blau: Kühlungsbereich)

Durch eine Abdunklung der Scheibe werden solare Gewinne minimiert, wodurch der Kühlenergiebedarf reduziert werden kann. Analog dazu kann durch die Erhöhung der Lichttransmission der Verglasung bei niedrigen Temperaturen eine Reduktion des Heizenergiebedarfs erzielt werden. Das Aufhellen der Scheiben findet jedoch nur unter der Bedingung statt, dass bei 95 % der Nutzer keine störende Blendung auftritt (statistische Interpretation des DGP-Werts $< 0,4$). Außerhalb des genannten Temperaturbereichs wird das Kühl- und Heizsystem eingesetzt. Diese Strategie ist in Abbildung 6-2 schematisch und in Abbildung 6-3 detailliert dargestellt.

I. Temperatur- und Blendungsbasierte Regelung

1. Raumtemperatur zwischen 20 °C und 26°C – Abdunklungsgrad stufenweise anpassen

2. Blendung reduzieren (DGP-Wert)

Abbildung 6-2: Regelungsstrategie I (RS I), schematische Darstellung

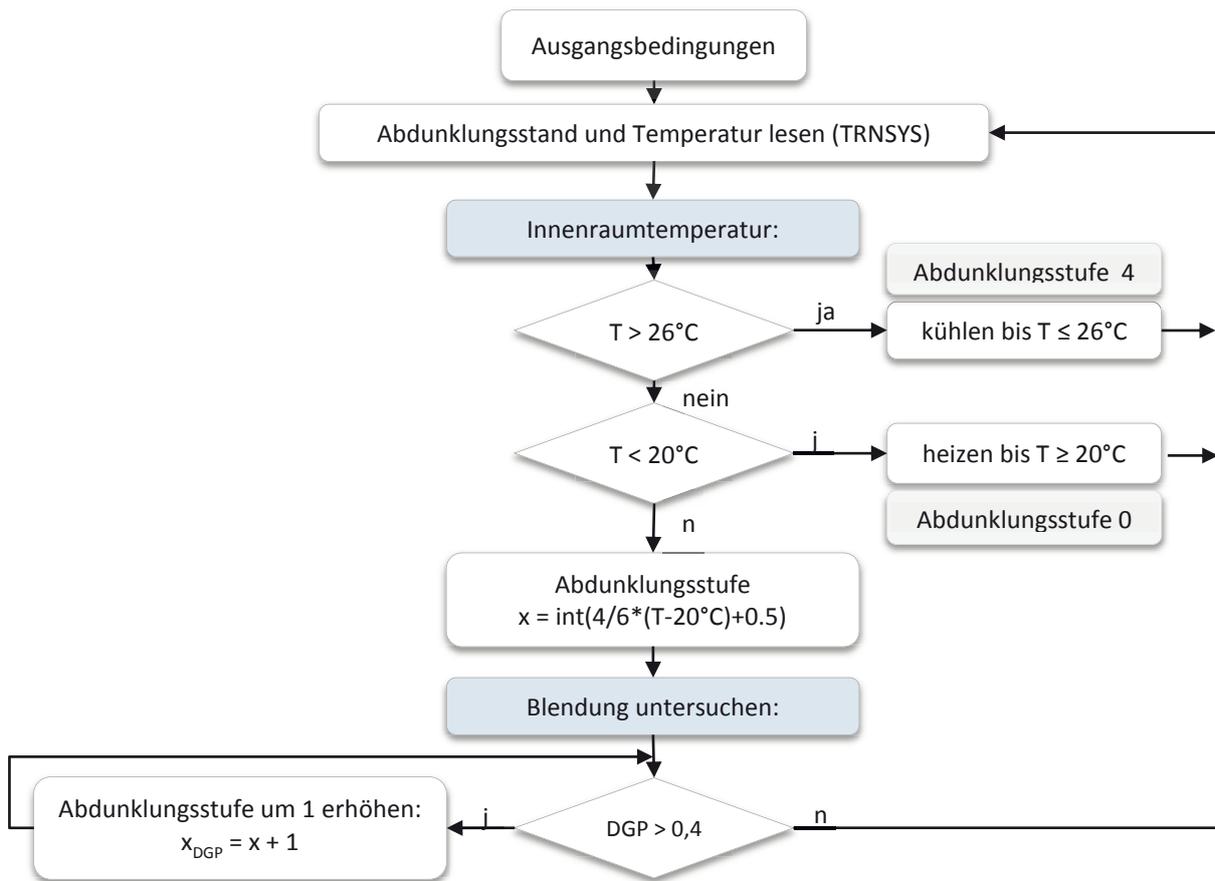


Abbildung 6-3: Regelungsstrategie I (RS I), detaillierte Darstellung für vier Abdunklungsstufen

6.2 Regelungsstrategie II (RS II)

Durch die blendungs- und temperaturmotivierte Abdunklung der Verglasung in der Strategie RS I wird die Tageslichtversorgung des Raums grundsätzlich auf einem niedrigen Niveau gehalten. Abdunklungsvorgänge können häufig dazu führen, dass trotz eines ausreichenden Tageslichtangebots künstliche Beleuchtung zugeschaltet werden muss, um die erforderliche Beleuchtungsstärke von 500 lx auf der Arbeitsfläche im Büro sicher zu stellen [60]⁸. Aus diesem Grund wurde die Strategie 2 entwickelt, die der Gewährleistung der minimalen empfohlenen Beleuchtungsstärke im Raum dient. Unterschreitet die Beleuchtungsstärke bei der sich einstellenden thermisch motivierten Abdunklung den erforderlichen Wert von 500 lx, so soll die Transmission der Verglasung erhöht werden, bis die erforderliche minimale Beleuchtungsstärke oder die maximale Transmission erreicht ist. Diese Strategie ist in Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 dargestellt.

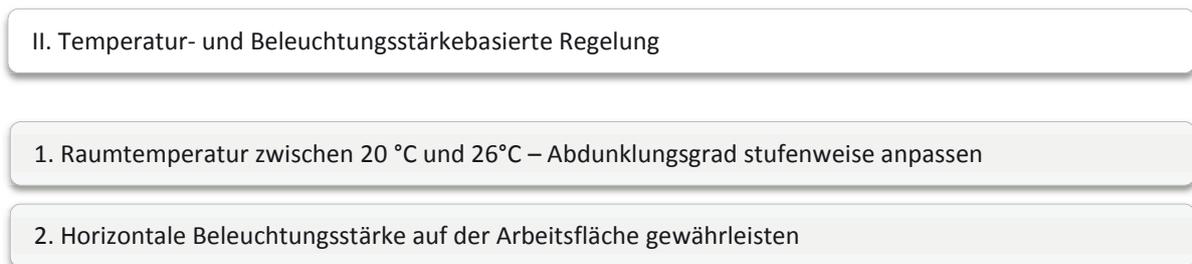


Abbildung 6-4: Regelungsstrategie II (RS II), schematische Darstellung

⁸ Für Empfehlungswerte für verschiedene Nutzungen s. Zwischenbericht II [59]

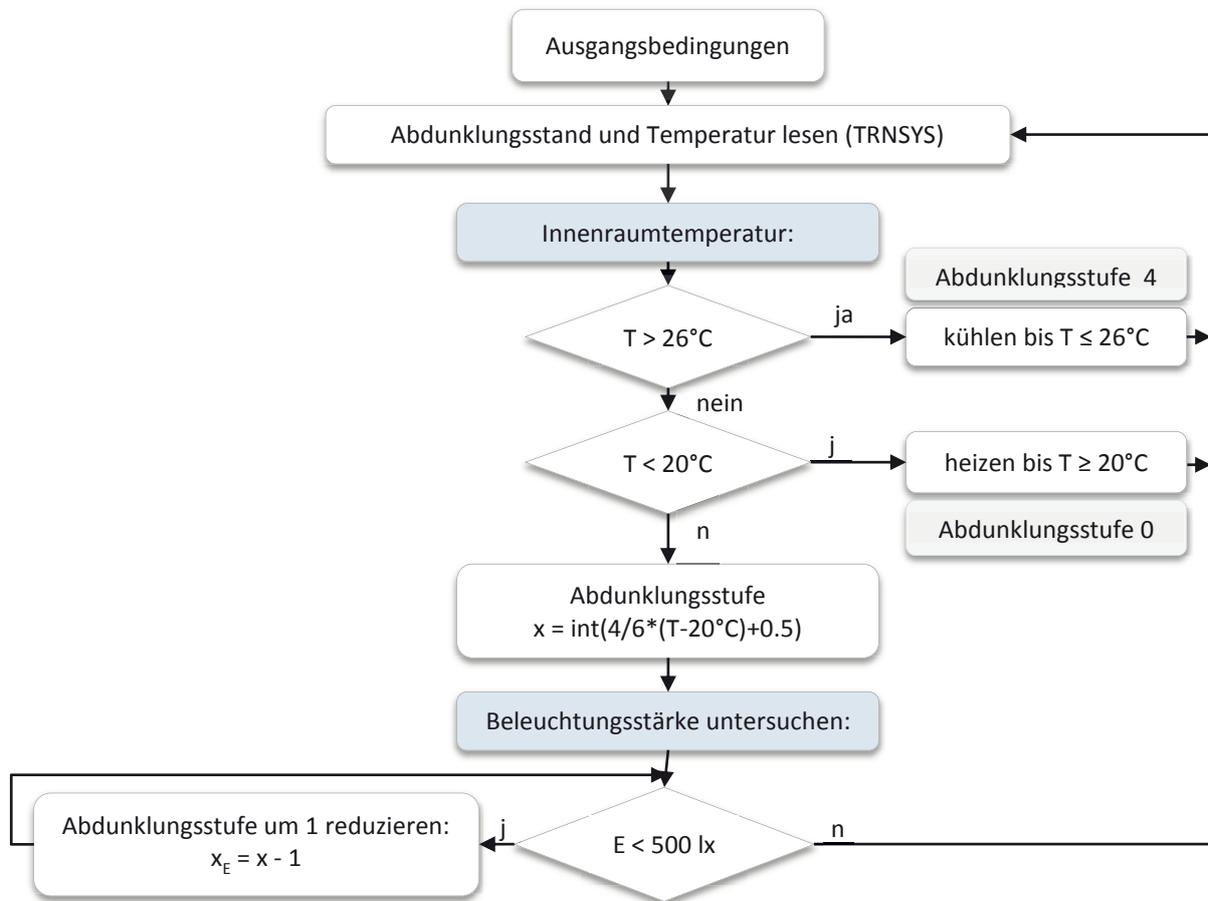


Abbildung 6-5: Regelungsstrategie II (RS II), detaillierte Darstellung für vier Abdunklungsstufen

6.3 Regelungsstrategie III (RS III)

Bereits aus der Analyse der Ansteuerungskonzepte I und II ist ersichtlich, dass die einzelnen Parameter des visuellen und des thermischen Komforts häufig im Gegensatz zueinander stehen. Das Erreichen der für das Komfortempfinden optimalen Temperatur durch die Anpassung des Verglasungszustands hat an mehreren Tagen im Jahr Einbußen am visuellen Komfort zur Folge. Durch die Einführung des Parameters Beleuchtungsstärke wird die Tageslichtausnutzung verbessert, jedoch stellen diese beiden Einflussparameter gegensätzliche Anforderungen an den Transmissionsgrad der Verglasung, da sowohl eine Abdunklung (temperaturbedingt) als auch eine Aufhellung (beleuchtungsstärkebedingt) im gleichen Schritt erforderlich werden kann. Um der negativen Korrelation entgegen zu wirken, wird die Scheibe horizontal in zwei Felder geteilt. Das obere Feld soll dabei die Aufgabe des erforderlichen Blendschutzes erfüllen (Feld „Blendung“), während das untere Feld der ausreichenden Bereitstellung von Tageslicht dient (Feld „Beleuchtung“). Abbildung 6-6 zeigt den Ablauf der erweiterten Regelstrategie.

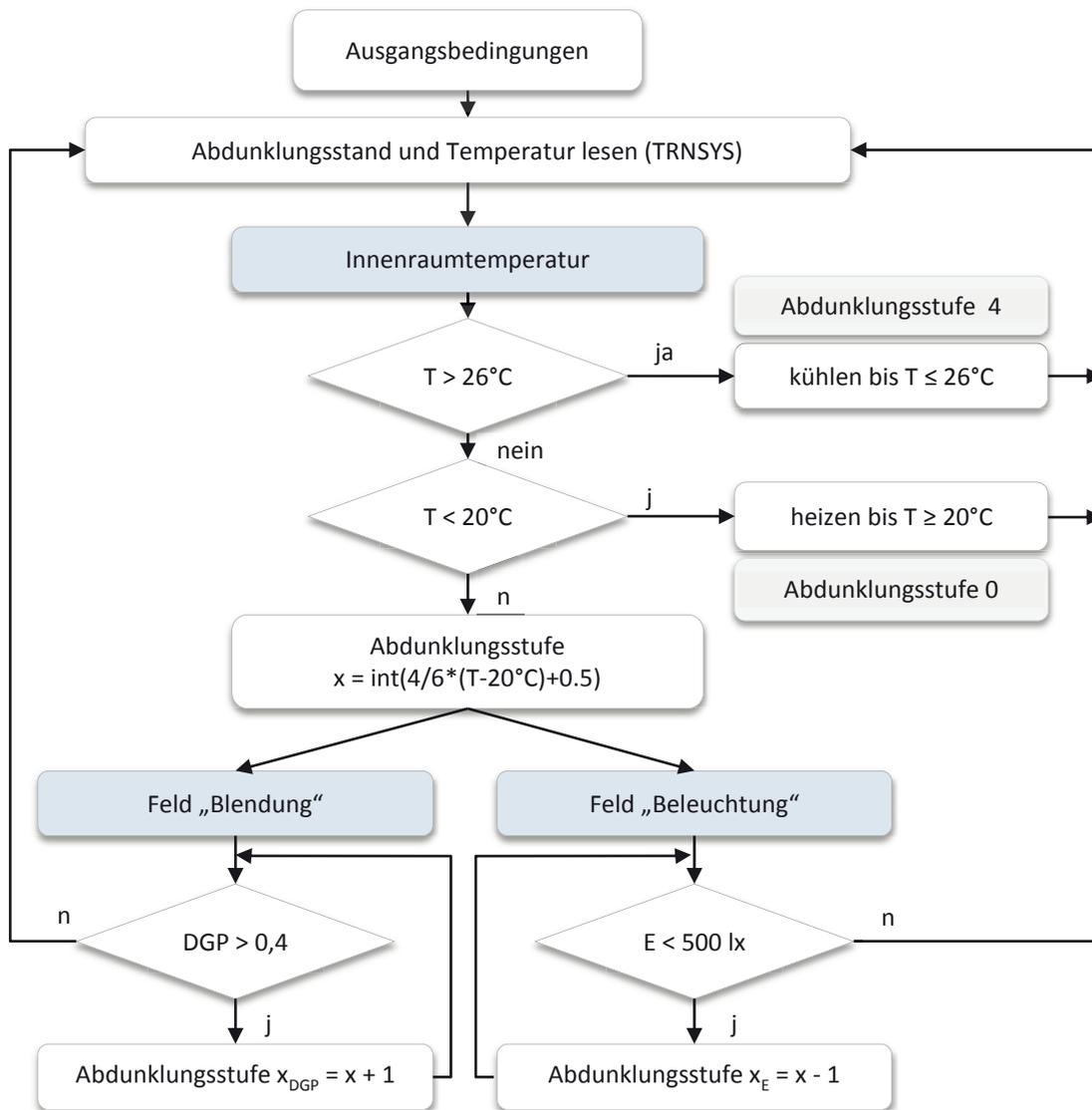


Abbildung 6-6: Regelungsstrategie III (RS III), detaillierte Darstellung für vier Abdunklungsstufen

Um die Größe der beiden definierten Felder zu bestimmen, erfolgte eine Analyse der direkten Blendung im Nutzungsszenario Fassadenprüfstand. Innerhalb eines Jahres wurde in minutlichen Zeitschritten der Vektor zwischen dem aktuellen Sonnenstand und dem Auge des potentiellen Nutzers bestimmt und geprüft, ob und wo dieser die Verglasung des betrachteten Raums schneidet. Hieraus ergibt sich in Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs der Sonne ein Bereich innerhalb der Verglasung, durch welchen der Nutzer eine direkte Blendung erfährt. In Abbildung 6-7 ist die direkte Blendung für den potentiellen Nutzer des Fassadenprüfstands am Standort Stuttgart an den vier Tagen ausgewählter Sonnenstände (längster Tag, kürzester Tag, Tag-und-Nacht-Gleiche) innerhalb eines Jahres dargestellt.

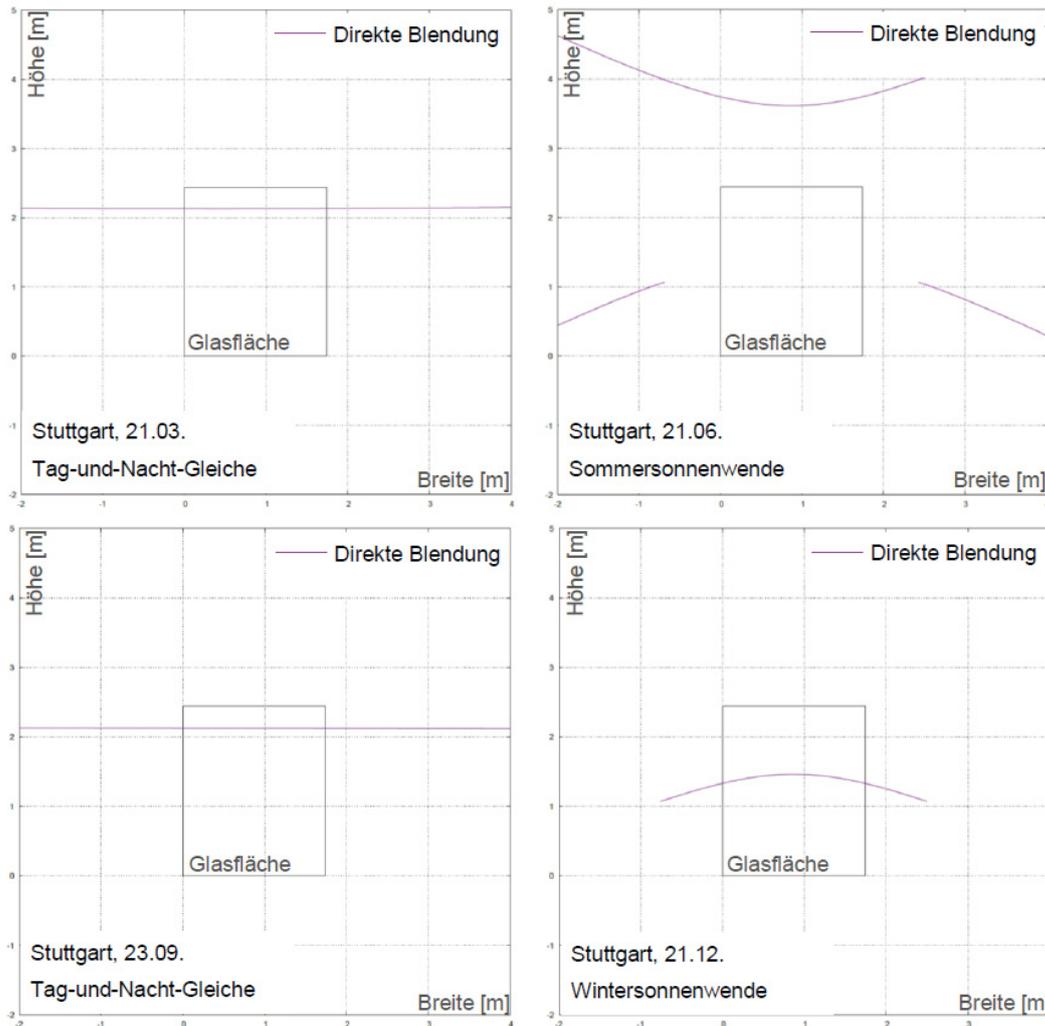


Abbildung 6-7: Direkte Blendung an den ausgewählten Sonnenständen während eines Jahres im Fassadenprüfstand, Stuttgart. In Lila wurden Blendkurven der direkten Blendung für die Südfassade dargestellt.

Aus der Abbildung wird ersichtlich, wie sich der Stand der Sonne auf die direkte Blendung des Nutzers auswirkt. Verlaufen die Blendkurven durch die Verglasungsfläche, so besteht die Gefahr einer direkten Blendung für den Nutzer. Die Tag-und-Nacht-Gleiche kennzeichnet die Tage des Jahres, an denen die Sonne den Himmelsäquator überquert. Für beide Tage ergibt sich am Standort Stuttgart eine nahezu konstante direkte Blendung in einer vertikalen Höhe von 2,1 m über der Oberkante des Fußbodens (OK FFB). Zum Zeitpunkt der Sommersonnenwende, die durch den mittäglichen Jahreshöchststand der Sonne definiert ist, ergibt sich am Standort Stuttgart kein Schnittpunkt mit der Verglasung, der Nutzer erfährt demnach keine direkte Blendung. Anders verhält es sich zum Zeitpunkt der Wintersonnenwende, während der die Sonne die geringste jährliche Mittagshöhe erreicht. Hier bewegt sich der Bereich direkter Blendung während des Zeitraums von Sonnenauf- bis Sonnenuntergang in einer Höhe von 1,33 m bis 1,46 m über FFB. Über das gesamte Jahr betrachtet ergibt sich aus den ermittelten Werten ein Verlauf der direkten Blendung. Dieser ist in Abbildung 6-8 dargestellt. Das Schaubild zeigt jeweils den Höchststand sowie den Tiefststand des Schnittpunktes am jeweiligen Tag, sofern sich dieser innerhalb der Verglasung befindet und bietet die Grundlage zur Unterteilung der Fensterfläche in Felder „Blendung“ und „Beleuchtung“. Die gleiche Analyse für alle Standorte (Abbildung 6-9) zeigt, dass die Unterteilung der Fensterfläche in halber Höhe in Europa ihren Zweck gut erfüllt. In Accra ergibt sich während des gesamten Jahres keine direkte Blendung des Nutzers, da der Sonnenwinkel stets ausreichend groß ist, daher erfolgte an diesem Standort keine Teilung des Fensters.

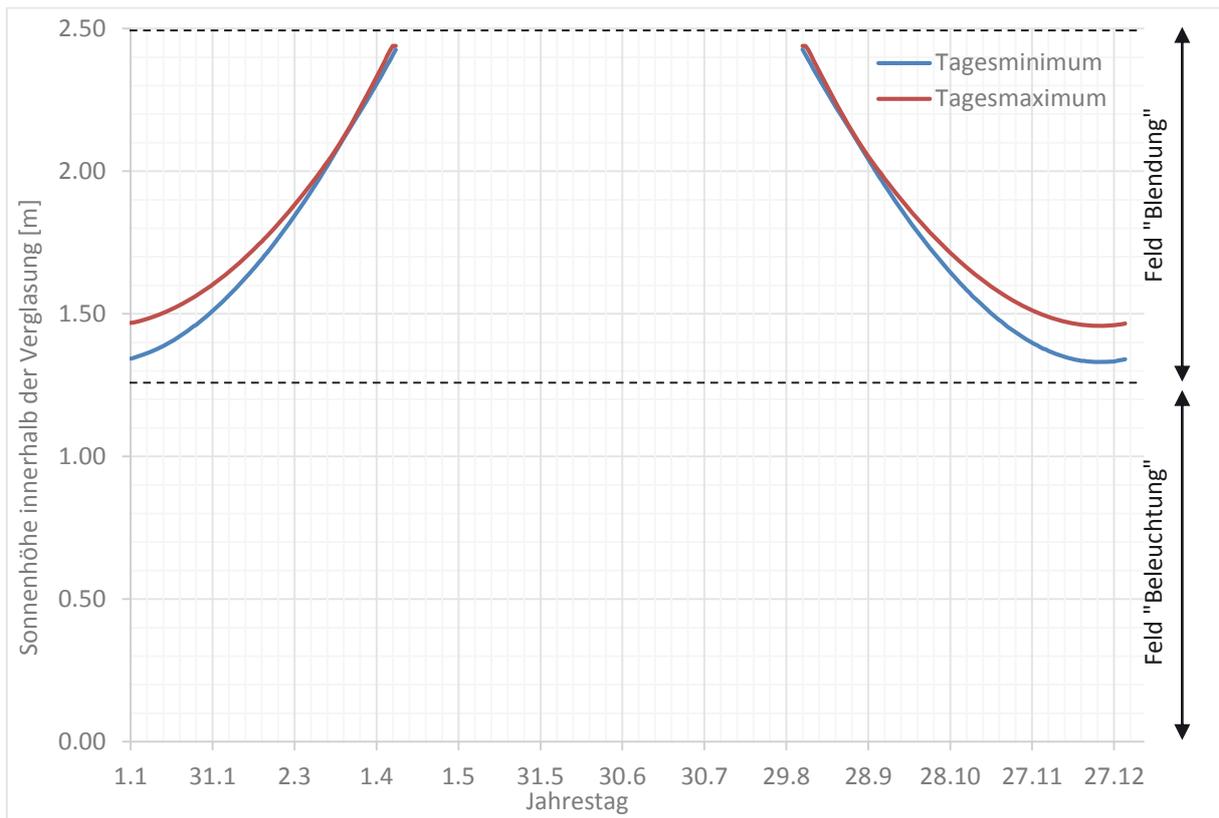


Abbildung 6-8: Verlauf der Tageshöchst- und Tagesminimalhöhen der Sonnenposition im Fester innerhalb eines Jahres im Fassadenprüfstand in Stuttgart

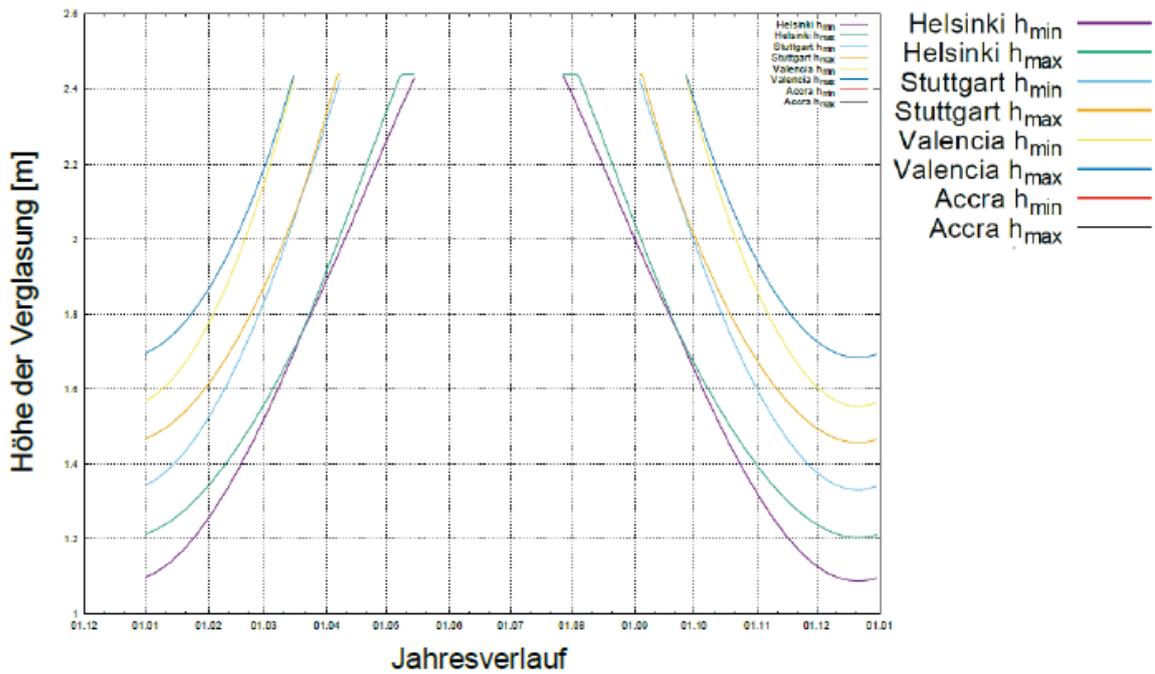


Abbildung 6-9: Verlauf der Tageshöchst- und Tagesminimalhöhen der Sonnenposition im Fester innerhalb eines Jahres im Fassadenprüfstand an allen Standorten

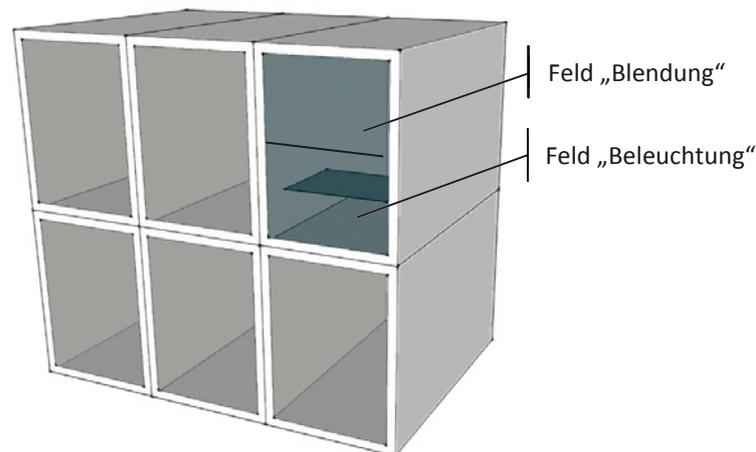


Abbildung 6-10: Simulationsmodell des Fassadenprüfstands (Einzelbüro) mit Fensterunterteilung

6.4 Regelungsstrategie IV (RS IV)

Des Weiteren wurde im Projektverlauf eine Regelung adaptiver Verglasungen nach der Bestrahlungsstärke untersucht, da die solare Strahlungsleistung eine Ursache für die Raumerwärmung ist. Eine direkte Reaktion auf diese dient somit der Vorbeugung der sommerlichen Überhitzung. Bestimmte Werte der Bestrahlungsstärke auf der Fassade haben sich bereits bei mehreren Autoren⁹ als Indikator für die Betätigung von Jalousien erwiesen.

Die Regelungsstrategie wurde nach dem gleichen Prinzip aufgebaut wie die bereits vorgestellten Strategien. Innerhalb des Bereichs zwischen der unteren und der oberen Schwelle (I_{min} und I_{max}) der Bestrahlungsstärke auf die Südfassade wurde eine Verglasung stufenweise abgedunkelt (s. Abbildung 6-11).

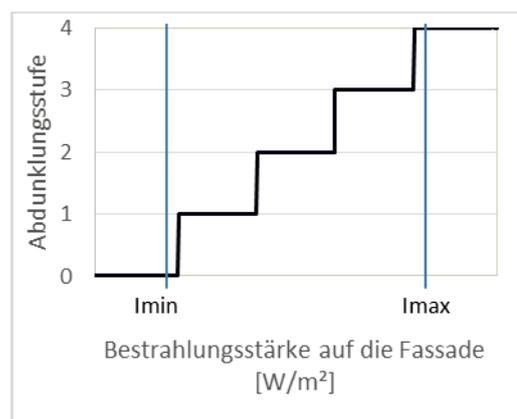


Abbildung 6-11: Bestrahlungsstärkebasierte stufenweise Abdunklung

⁹ Review nach [61]



IV. Strahlungsbasierte Regelung

Bestrahlungsstärke auf die Fassade zwischen I_{min} und I_{max} – Abdunklungsgrad stufenweise anpassen

Abbildung 6-12: Regelungsstrategie IV (RS IV), schematische Darstellung

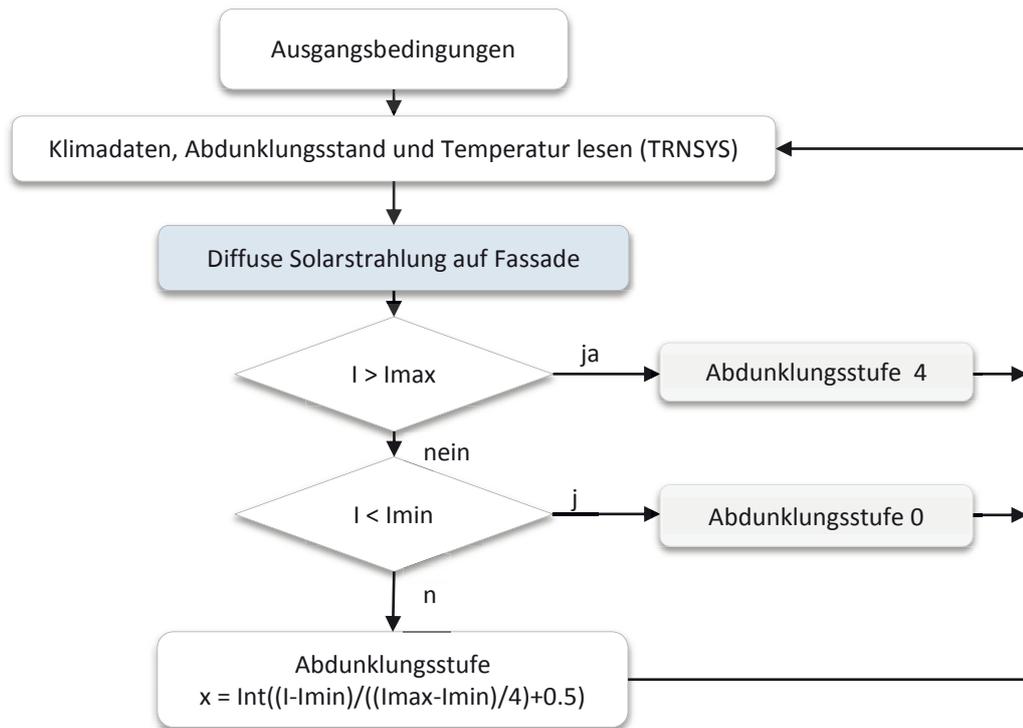


Abbildung 6-13: Regelungsstrategie IV (RS IV), detaillierte Darstellung für vier Abdunklungsstufen

Die Herausforderungen dieser Strategie waren die Auswahl der ausschlaggebenden Strahlungsart (global, direkt, diffus) und die Definition der Schaltwerte I_{min} und I_{max}.

Wie aus der Analyse der Jahresverläufe der drei Strahlungsarten (Abbildung 6-14, links) ersichtlich wird, entspricht der Diffusstrahlungsverlauf den Anforderungen an einen treffsicheren Parameter für die Regelung der Südverglasung. Während der Heizperiode (rot markiert) ist ein Heizenergiebedarf zu erwarten, daher sollte eine adaptive Verglasung zu dieser Zeit hohe Transmissionswerte aufweisen. Während der Kühlperiode (blau) sollte der hohe Kühlenergiebedarf durch niedrige Transmissionswerte der Verglasung reduziert werden und in der Übergangszeit (gelb) ist eine treffsichere Schaltung der Verglasung gefragt. Ein Vergleich dieses Anforderungsprofils mit dem Verlauf der Diffusstrahlung zeigt, im Gegensatz zu den beiden anderen Strahlungsarten, eine Korrelation zum erwünschten Abdunklungsverlauf auf. Durch niedrige Intensitäten in Heizperioden und hohe Intensitäten in Kühlperioden eignet sie sich als Regelungsparameter.

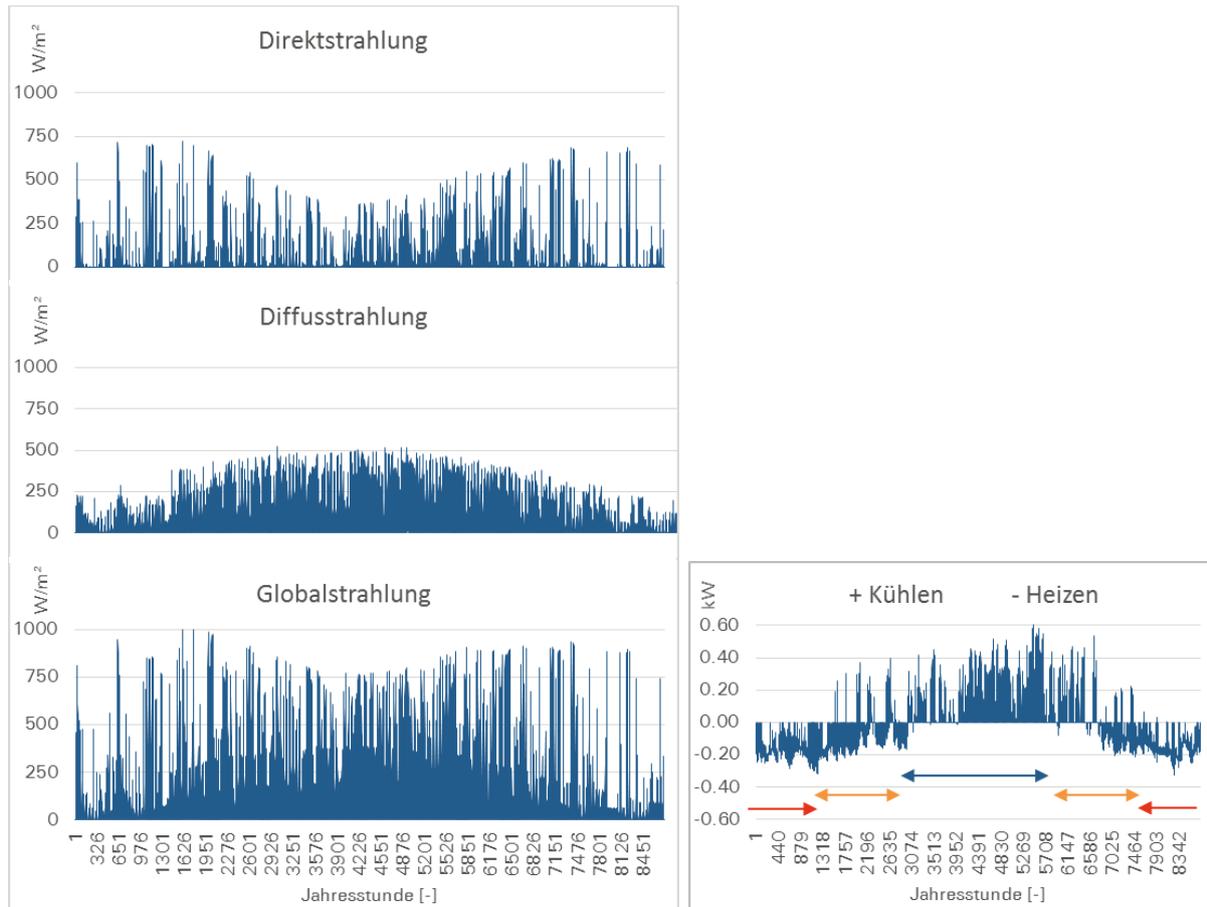


Abbildung 6-14: Links: Jahresverläufe der Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung auf die Südfassade in Stuttgart. Rechts: Energiebedarf des Einzelbüros im Jahresverlauf (Januar bis Dezember), qualitativ dargestellt (Fassadenprüfstand, Stuttgart, konstanter Transmissionsgrad der Verglasung).

Die Definition der unteren und oberen Schwellenwerte der Diffusstrahlung ist stark abhängig von der Gebäudeorientierung und dem Einsatzort. Es wurden drei verschiedene Kombinationen untersucht: $(I_{min}, I_{max}) = (30 W/m^2, 400 W/m^2)$, $(I_{min}, I_{max}) = (30 W/m^2, 150 W/m^2)$ und $(I_{min}, I_{max}) = (15 W/m^2, 400 W/m^2)$.

7 Energetische Betrachtungen zur Effektivität der Verglasungen • AP 4 | Ergebnisse

Wie im Kapitel 5.2 erläutert, wurden mithilfe der Software TRNSYS Berechnungen der Jahresenergiebedarfe der mit adaptiven Verglasungen ausgestatteten repräsentativen Räume durchgeführt. Analysiert wurden jeweils ein Einzelbüro (Fassadenprüfstand / FP), ein Großraumbüro (GB) und ein Klassenzimmer (KL) an vier Standorten: Helsinki, Stuttgart, Valencia, Accra. Die jeweiligen adaptiven Verglasungen wurden dabei mit zwei Referenzverglasungen verglichen. Diese waren eine Zweifachisolierverglasung (Referenzverglasung 1, in den nachfolgenden Diagrammen als „Ref“ bezeichnet) und eine Zweifachisolierverglasung mit einer außenliegenden Jalousie (Referenzverglasung 3, in den nachfolgenden Diagrammen als „Jal“ bezeichnet).

Die Energiebedarfe wurden darüber hinaus sowohl für die leeren Räume als auch für die Räume mit internen Wärmegewinnen während der Nutzungszeiten (s. Kapitel 5.2.2.4) berechnet. Es wurden hierfür folgende Belegungsszenarien angenommen:

- Einzelbüro (Fassadenprüfstand):

Personen	1 Nutzer à 150 W Wärmeabgabe ¹⁰
Geräte	1 Stück à 230 W Wärmeabgabe ¹¹
Beleuchtung	6,7 W/m ² auf 8,4 m ² ¹²

- Klassenraum:

Personen	16 Schüler und 1 Lehrer à 150 W Wärmeabgabe
Beleuchtung	6,7 W/m ² auf 63,0 m ²

- Großraumbüro:

Personen	40 Nutzer à 150 W Wärmeabgabe
Geräte	40 Stück à 230 W Wärmeabgabe
Beleuchtung	6,7 W/m ² auf 450,0 m ²

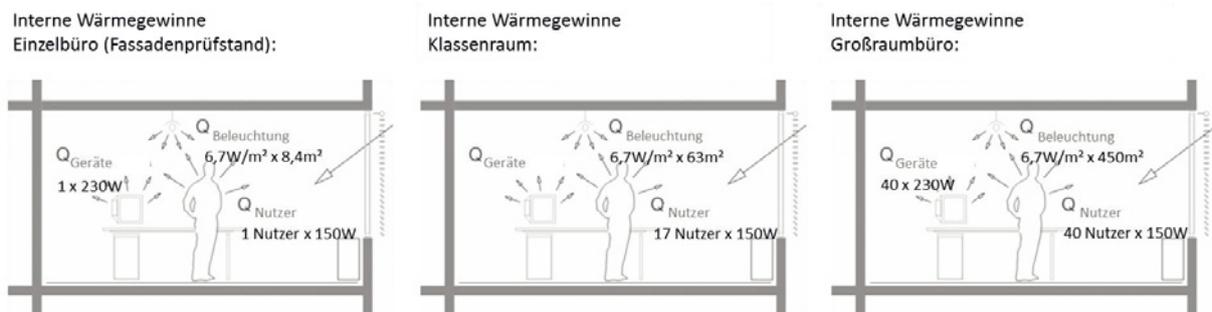


Abbildung 7-1: Belegungsszenarien der drei untersuchten Nutzungen für die Ermittlung interner Wärmegewinne (Bildquelle: www.educate-sustainability.eu, überarbeitet)

¹⁰ Die Höhe der Wärmeabgabe basiert auf der DIN EN ISO 7730 "Ergonomie der thermischen Umgebung" und bezieht sich auf die gesamte berechnete Wärmeabgabe (sensibel + latent) bei sitzender Tätigkeit und leichter Büroarbeit. Dies entspricht einer sensiblen Wärmeabgabe von 75 W/Person. Der entsprechende Anteil der Wärmeabgabe wird in TRNSYS-Berechnungsverfahren herangezogen.

¹¹ 1 leistungsfähiger PC mit Farbbildschirm pro Person, mit einer Leistung von 230 W, eingeschaltet während der Zeit von 8:00 Uhr bis 17:00 Uhr an 5 Tagen pro Woche (vgl. VDI 2078 (2015): Wärmezufuhr von Arbeitshilfen bei Bürotätigkeiten = 100 bis 300 W/Person für CAD/CAE-Arbeitsplätze)

¹² Gemäß Produktspezifikation für LED-Leuchten im ILEK-Fassadenprüfstand (Quelle: Nimbus Group GmbH)



Repräsentative Ergebnisse der energetischen Analysen sind für die jeweiligen Verglasungen nachfolgend dargestellt.

Zusätzlich zur energetischen Bilanzierung wurden mithilfe der Simulationsprogramme Analysen des energetischen, thermischen und tageslichttechnischen Verhaltens der mit adaptiven Verglasungen ausgestatteten Räume an repräsentativen Tagen durchgeführt. Die Tagesauswertungen, sowohl anhand von Simulationen als auch von Messungen im Fassadenprüfstand, finden sich im Anhang 3.

7.1 Selbstregelnde Systeme

7.1.1 Thermochrome Verglasung: Suntuitive® Dynamic Glass

Für die Simulation der selbstregelnden Systeme musste ihr systemspezifisches Schaltverhalten nachgebildet werden. Die simulierte thermochrome Suntuitive®-Verglasung dunkelt in Abhängigkeit von der Temperatur ab. Die Temperatur der thermochromen Schicht wurde demnach im Simulationsprogramm TRNSYS zu jedem Simulationszeitschritt berechnet¹³. Anschließend wurde die diesem Wert nach Abbildung 4-2 entsprechende Abdunklungsstufe für die Dauer des nächsten Simulationszeitschrittes (1 Stunde) angenommen. Zum nächsten Zeitschritt wurde die Temperaturberechnung wiederholt und die Abdunklungsstufe gegebenenfalls neu gewählt.

Unterschritt die Raumtemperatur im Simulationsmodell den Heizschaltpunkt von 20 °C oder überschritt sie den Kühlschaltpunkt von 26 °C, so wurde entsprechend die Heiz- oder Kühlanlage eingeschaltet. Unterschritt die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche den Wert 500 lx, so wurde die Deckenbeleuchtung aktiviert.

Auf diese Weise ergaben sich folgende berechnete Jahresenergiebedarfe für Heizung, Kühlung und Beleuchtung für die Standorte: Helsinki, Stuttgart, Valencia und Accra, jeweils für drei Raumtypen (Fassadenprüfstand / FP, Klassenraum / KL und Großraumbüro / GB) beim Einsatz der Suntuitive®-Verglasung (Suntuitive), der Referenzverglasung 1 (Ref) und der Referenzverglasung 3 (Jal).

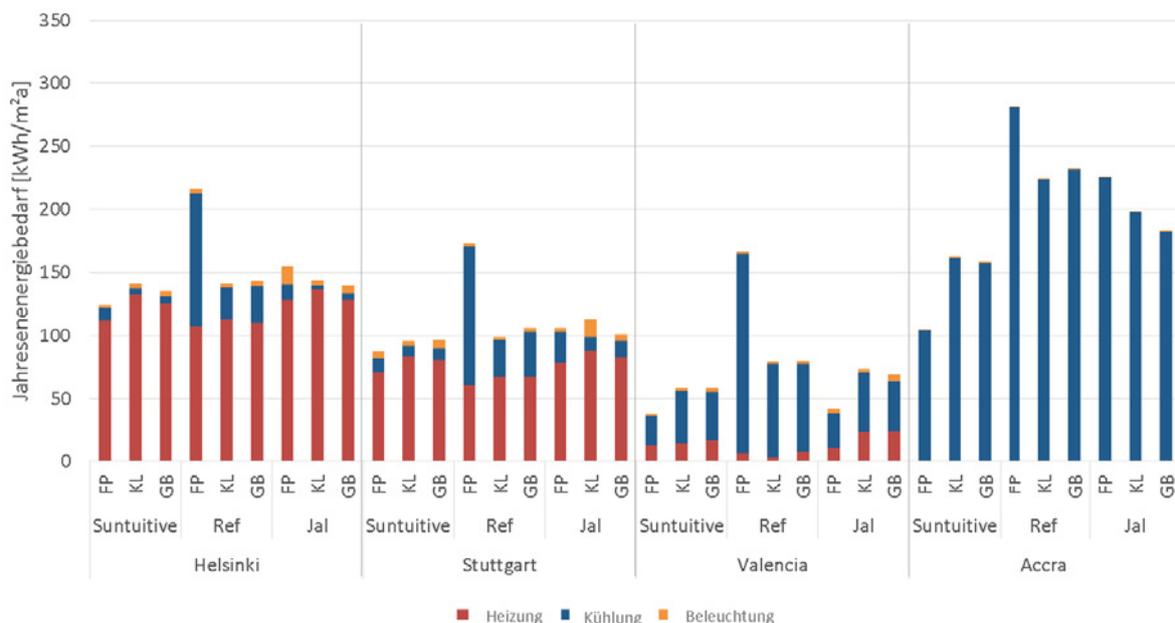


Abbildung 7-2: Jahresenergiebedarfe (ohne interne Wärmegewinne)

¹³ Hierfür wurde anhand der Oberflächentemperaturen des thermochromen Verbunds und der Wärmeleitfähigkeiten der Glasscheiben des Verbunds die Temperatur der thermochromen Zwischenschicht berechnet.

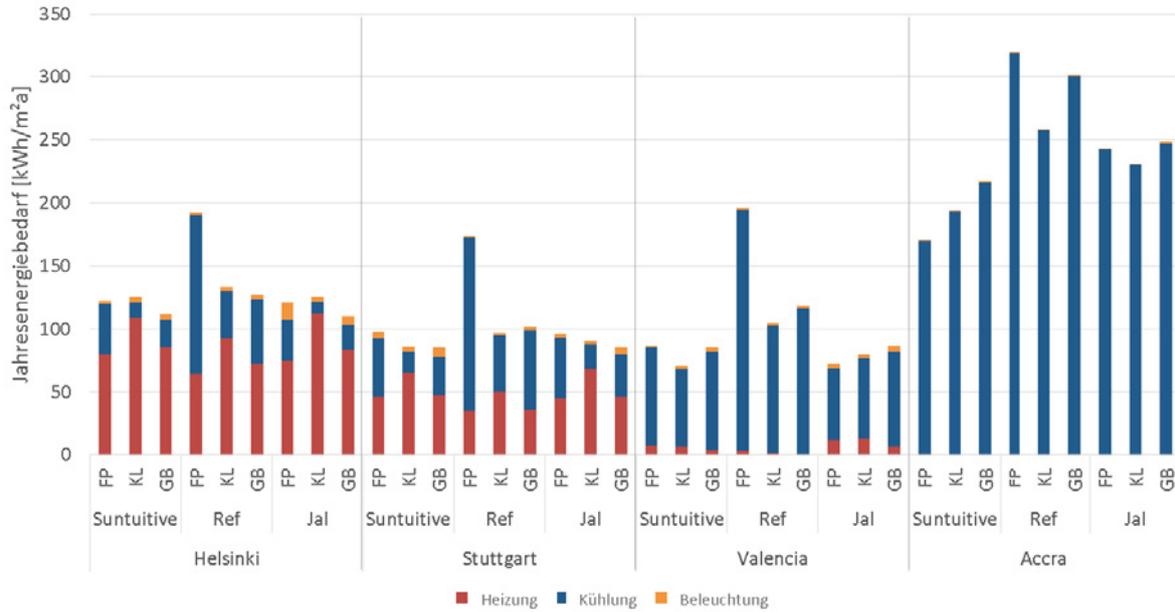


Abbildung 7-3: Jahresenergiebedarfe (mit internen Wärmegevinnen)

Der Vergleich zeigt, dass sich beim Einsatz der Referenzverglasung bezogen auf die Grundfläche der höchste Energiebedarf für den Fassadenprüfstand ergibt, gefolgt vom Großraumbüro und vom Klassenraum, deren Gesamtenergiebedarfe bezogen auf die Grundfläche auf einem sehr ähnlichen Niveau liegen. Der insbesondere bei der Referenzverglasung 1 (Ref) deutliche Unterschied zwischen den Großraumnutzungen und dem Fassadenprüfstand resultiert hauptsächlich aus dem erhöhten Kühlenergiebedarf für das Nutzungsszenario Fassadenprüfstand. Als Gründe sind hier die leichte Bauweise des Fassadenprüfstands sowie die große Fensterfläche bezogen auf die Grundfläche anzuführen. Durch den Einsatz eines Sonnenschutzsystems wird der außergewöhnlich hohen Aufheizung dieses Raums vorgebäugt. Dieser Effekt kann sowohl bei herkömmlichen Sonnenschutzsystemen (Jal), als auch bei der Suntuitive®-Verglasung beobachtet werden.

Die Suntuitive®-Verglasung trägt entscheidend zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs im Vergleich mit den Referenzverglasungen bei. Dies ist insbesondere an heißen Standorten zu erkennen. Jedoch auch an kalten Standorten wie Helsinki zeichnet sich bei dieser Verglasung eine Reduktion des Kühlenergiebedarfs ab. Im Vergleich mit der Verglasung mit außenliegender Jalousie sind niedrigere Beleuchtungsenergiebedarfe der thermochromen Verglasung an den meisten Standorten auffällig. Dies lässt darauf schließen, dass die untersuchte Suntuitive®-Verglasung einen effektiven Sonnenschutz bietet bei gleichzeitiger Gewährleistung einer besseren Raumausleuchtung als beim konventionellen, außenliegenden Sonnenschutz.



7.1.2 Thermotrope Verglasung: GLASSX®crystal

Für die thermotrope Verglasung GLASSX®crystal wurden im Rahmen des Projekts keine numerischen Simulationen durchgeführt, da diese vom Projektpartner übernommen wurden. Die Erstellung von numerischen Modellen der Phasenwechselmaterialien war im Projektumfang nicht vorgesehen. Stattdessen wurde für die GLASSX-Verglasung ein Monitoringprogramm erstellt und im Fassadenprüfstand realisiert. Die ausgewählten Monitoringergebnisse finden sich im Anhang 3 wieder. Am Beispiel einer Temperaturanalyse für Mitte November 2015 bei ausgeschaltetem Heiz- und Kühlsystem lässt sich die Charakteristik des PCM-Systems ablesen. An klaren Tagen stieg die Außentemperatur um die Mittagszeit an. Am 16.11.2015 überstieg sie sogar die Schmelzpunktemperatur des verwendeten PCM. Anschließend konnte eine konstante Scheibeninnentemperatur über mehrere Stunden beobachtet werden (vgl. Systembeschreibung, Kapitel 2.3.1.2). Abends und nachts sank die Außentemperatur häufig unter 10 °C, wobei die Absenkung der Scheibeninnentemperatur nur sehr langsam erfolgte, sodass bis in die Mitternachtsstunden eine komfortable raumseitige Oberflächentemperatur von mindestens 20 °C herrschte. Durch die Strahlungswärme der Scheibe könnte der Heizenergiebedarf im analysierten Zeitraum effektiv vermindert werden. Darüber hinaus ist bereits an den Novembertagen zu sehen, dass potentielle Temperaturspitzen im Raum aufgrund der Solareinstrahlung durch den Einsatz von PCM im Scheibenzwischenraum wesentlich vermindert werden können. Sogar bei Scheibenaußentemperaturen von 30 °C am frühen Nachmittag des 16.11.2015 erfolgte keine Überhitzung des Innenraums. Die Innentemperatur blieb unter 24 °C, sodass kein Kühlenergiebedarf entstand.

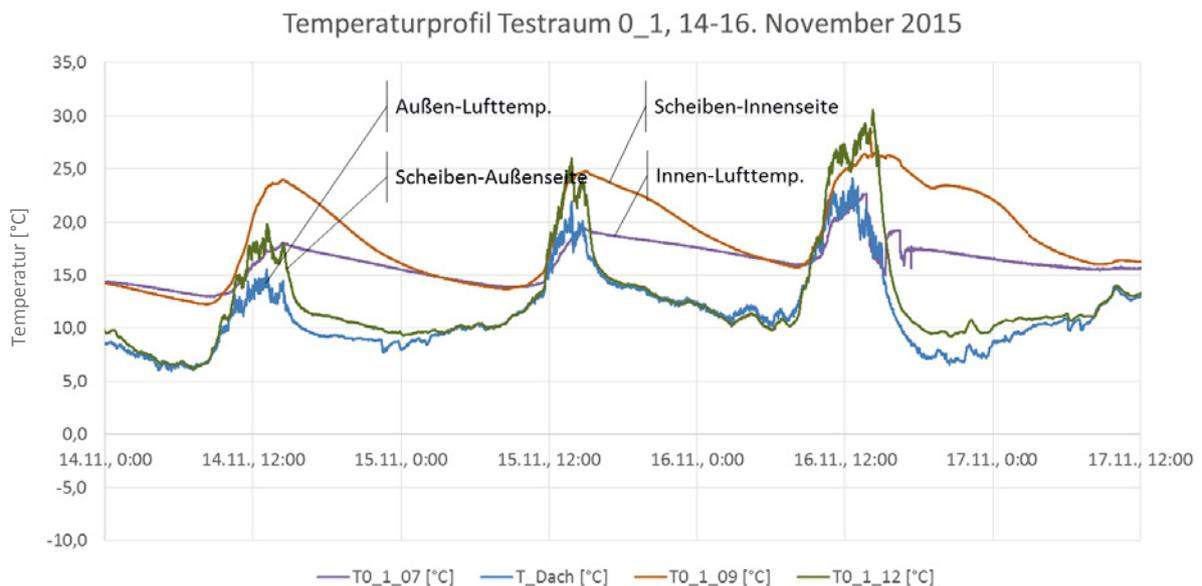


Abbildung 7-4: Thermische Analyse von GLASSX®crystal im Testraum 0_1 des Fassadenprüfstands im November 2015. Gemessene Temperaturwerte: T0_1_07 – Innenraumtemperatur in Raummitte, T_Dach – Außentemperatur erfasst auf dem Dach des Fassadenprüfstands, T0_1_09 – Oberflächentemperatur der Verglasung auf der Raumseite, T0_1_12 – Oberflächentemperatur der Verglasung auf der Außenseite.



7.2 Steuerbare Systeme

7.2.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10

Als Basis für energetische Analysen der elektrochromen Verglasung wurde zunächst die Regelungsstrategie RS I verwendet. Zu Zeiten der Nutzeranwesenheit im Raum erfolgte die Regelung der Verglasung demnach anhand der Faktoren Blendung und Innenraumtemperatur, wobei der Faktor Blendung priorisiert wurde. Zu Zeiten, in denen der Nutzer nicht anwesend war (s. Kapitel 5.2.2.4), erfolgte die Regelung ausschließlich nach der Innenraumtemperatur in der Spanne zwischen 20 °C und 26 °C. Nachfolgend sind die berechneten Jahresenergiebedarfe für die vier Standorte und drei Raumtypen beim Einsatz der ECONTROL®-Verglasung (EC), der Referenzverglasung 1 (Ref) und der Referenzverglasung 3 (Jal) dargestellt.

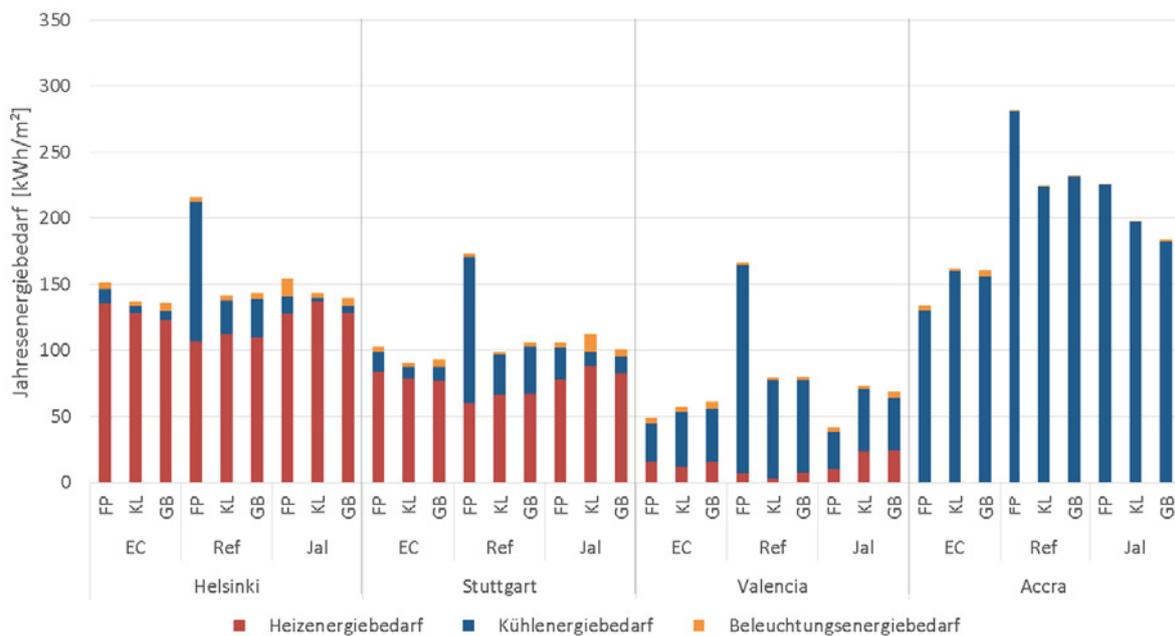


Abbildung 7-5: Jahresenergiebedarfe (ohne interne Wärmegewinne), RS I

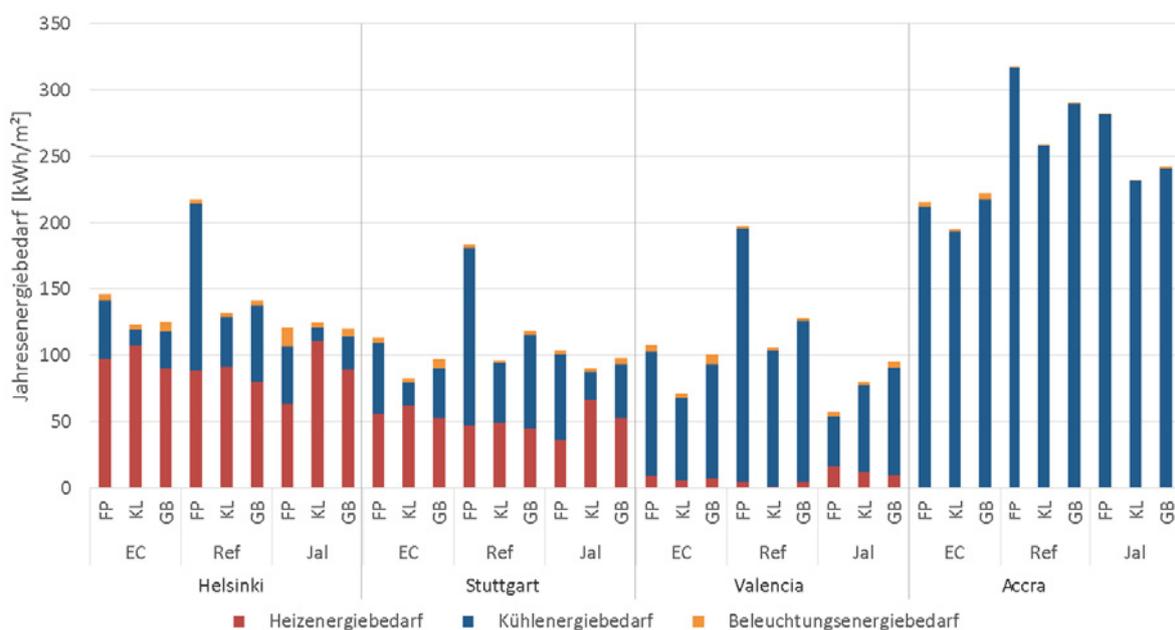


Abbildung 7-6: Jahresenergiebedarfe (mit internen Wärmegewinnen), RS I



Für die elektrochrome Verglasung ergibt sich bereits mit der Regelungsstrategie RS I in allen analysierten Fällen ein niedrigerer Kühlenergiebedarf als bei der Referenzverglasung 1 (Ref), während der Heizenergiebedarf über dem Wert dieser Referenzverglasung liegt. Diese Tatsache begründet sich in der Möglichkeit der Transmissionsänderung der elektrochromen Gläser, da Abdunklungsvorgänge die solaren Energieerträge in den Raum mindern. Ist die Referenzverglasung mit einer Verschattungsmöglichkeit ausgestattet (Jal), so verringert sich der Energiebedarf der Räume mit der Referenzverglasung, wobei er in heißen Klimazonen weiterhin über dem Bedarf der Räume mit der elektrochromen Verglasung liegt. In kühleren Gegenden sind die Gesamtenergiebedarfswerte beim Einsatz einer herkömmlichen Verschattung und einer ECONTROL®-Verglasung ähnlich. Die einzelnen Energiebedarfsarten werden nachfolgend detaillierter betrachtet.

Der reduzierte Kühlenergiebedarf resultiert in der verwendeten Regelungsstrategie I aus Abdunklungsvorgängen, die durch die Innenraumtemperatur bedingt sind. Dies erfolgt hauptsächlich während der Kühlperiode. Durch die Blendung verursachte Abdunklungsvorgänge entstehen auch während der Heizperiode. Die hierdurch verminderten solaren Energieerträge erfordern einen zusätzlichen Heizenergiebedarf, der bei der Referenzverglasung nicht entsteht. Gleichzeitig erhöht sich durch die Transmissionsminderung der Energiebedarf für künstliche Beleuchtung, welcher bei der elektrochromen Verglasung in allen Fällen über dem Energiebedarf der Referenzverglasung 1 liegt. Der gleiche Effekt zeigt sich bei der Betrachtung der Simulationsergebnisse der Referenzverglasung 3 mit Verschattungsmöglichkeit.

Um die Effektivität der verwendeten Strategie I zu validieren, wird nachfolgend eine Vergleichsanalyse mit weiteren Strategien II, III und IV (s. Kapitel 6) für den Fassadenprüfstand, für die Standorte Stuttgart und Accra aufgeführt. Im Rahmen der Strategie IV wurden verschiedene Kombinationen der unteren und der oberen Schwellenwerte der Bestrahlungsstärke untersucht: 1.) (I_{\min} , I_{\max}) = (30 W/m², 400 W/m²), 2.) (I_{\min} , I_{\max}) = (30 W/m², 150 W/m²), 3.) (I_{\min} , I_{\max}) = (15 W/m², 400 W/m²) und zusätzlich 4.) (I_{\min} , I_{\max}) = (400 W/m², 800 W/m²) für den Standort Accra. Die Ergebnisse dieser Vergleichsanalyse sind in der nachfolgenden Abbildung 7-7 zusammengefasst.

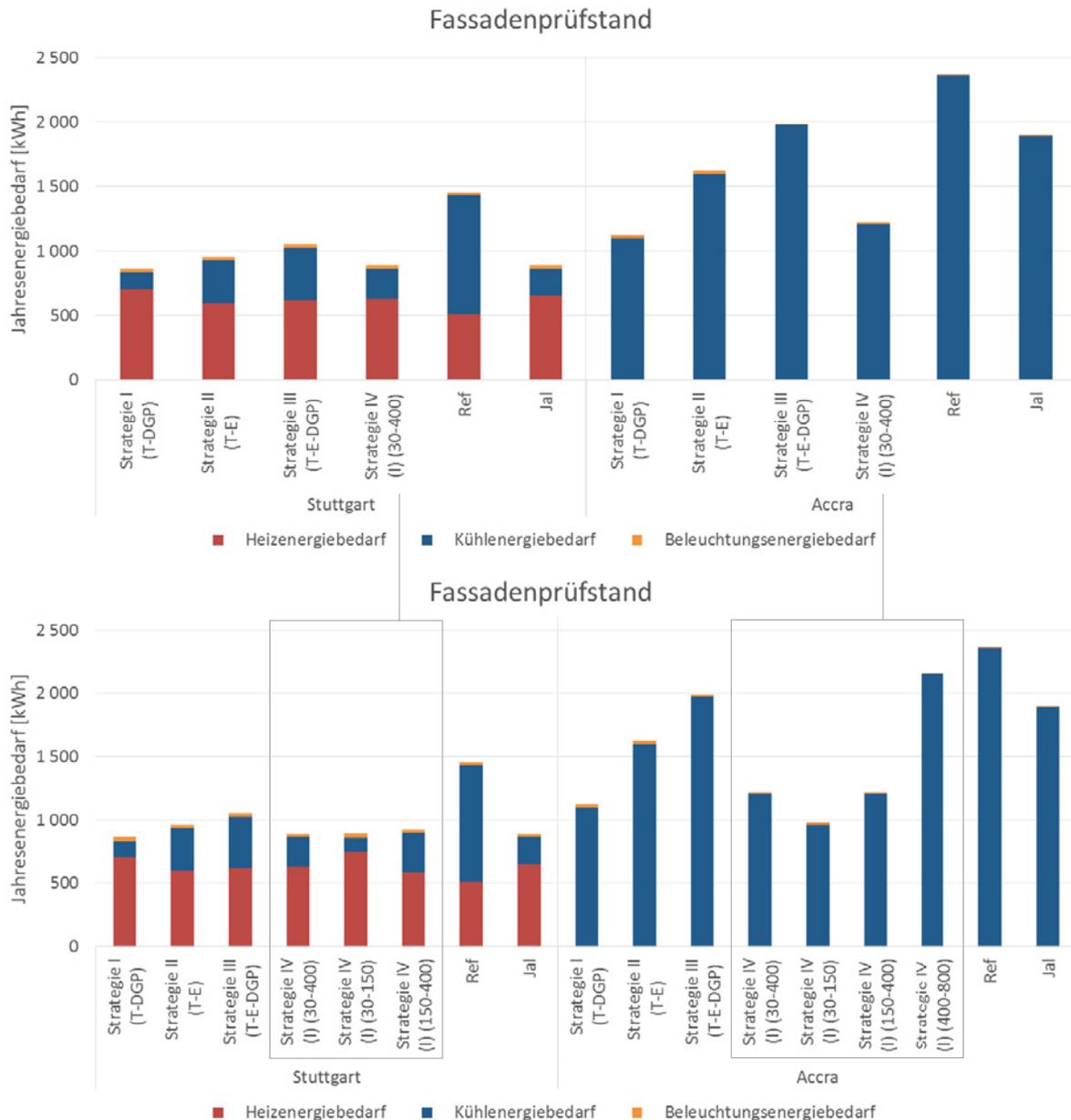


Abbildung 7-7: Jahresenergiebedarf im Fassadenprüfstand – Vergleich der Regelungsstrategien (ohne interne Wärmegewinne)

Die in Abbildung 7-7 dargestellten Simulationsergebnisse lassen darauf schließen, dass die Regelungsstrategie I trotz ihrer Einfachheit sehr große Energieeinsparnisse ermöglicht. Da sie zu höheren Abdunklungshäufigkeiten der Verglasung in der Heizsaison führt als die anderen Strategien, hat sie einen höheren Heizenergiebedarf als diese zur Folge. Dennoch wirkt sich die Reduktion des Kühlenergiebedarfs infolge dieser Regelung positiv auf die Gesamtenergiebilanzierung aus. Diese Auswirkung ist insbesondere in kühlungsdominierten Regionen, wie Accra, ausschlaggebend, jedoch auch in Stuttgart ermöglicht sie die Reduktion des Gesamtenergiebedarfs auf ein vergleichbares Niveau wie beim Einsatz der RS IV oder einer Verglasung mit externer Verschattung. Die Strategien II und III führen an beiden Standorten zu erhöhten Energieverbräuchen. Die Effektivität der Strategie IV ist maßgeblich von der Definition der Schwellenwerte der Bestrahlungsstärke abhängig. Die Bestrahlungsstärke auf die Fassade ist darüber hinaus von der geografischen Lage des Gebäudes abhängig. Im Allgemeinen führen niedrige Schwellenwerte zur Erhöhung des Heizenergiebedarfs und des Beleuchtungsenergiebedarfs sowie zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs. Hohe Schwellenwerte führen zur Erhöhung des Kühlenergiebedarfs.

Die Kombination (I_{min}, I_{max}) = (30 W/m², 400 W/m²) erwies sich als die energetisch effektivste Kombination. Dennoch sollte dabei auf den Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung ein Augenmerk gerichtet werden. Dieser Energiebedarf ist zwar um ein vielfaches niedriger als der Kühl- und der Heizenergiebedarf, er gibt aber Auskunft über die visuellen Komfortbedingungen im Raum, die im Kapitel 8 detailliert untersucht werden. Eine Analyse des Beleuchtungsenergiebedarfs ist in Abbildung 7-8 dargestellt.

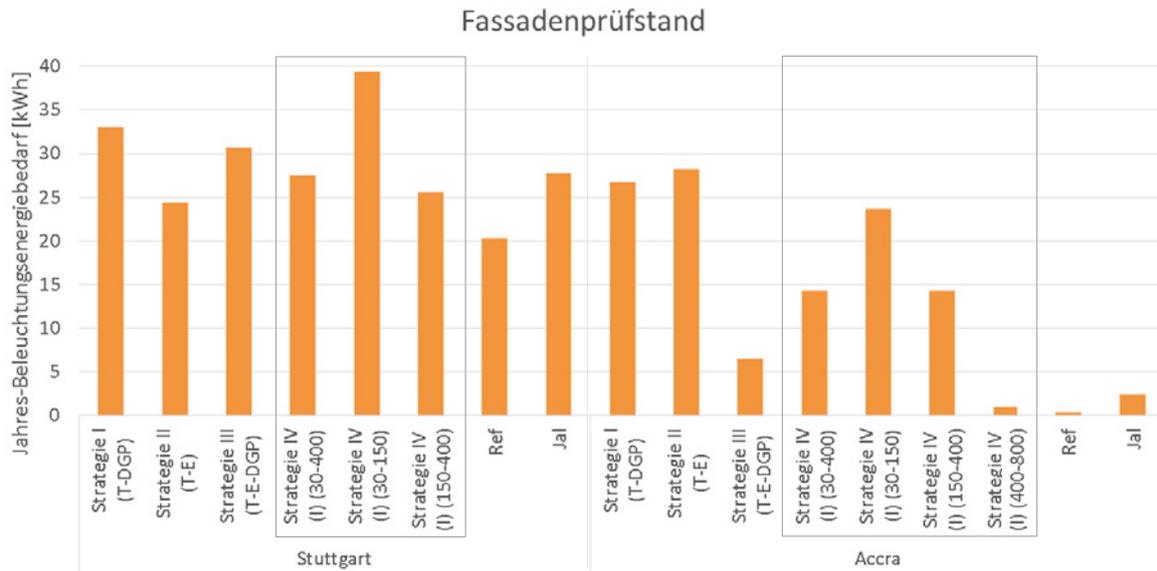


Abbildung 7-8: Jahresenergiebedarf für künstliche Beleuchtung im Fassadenprüfstand – Vergleich der Regelungsstrategien

Am Standort Stuttgart sind die Unterschiede im Beleuchtungseinsatz zwischen den meisten Regelungsstrategien gering. Bei den gesamtenergetisch effektivsten Strategien I und IV (I_{min}, I_{max}) = (30 W/m², 400 W/m²) weist der Beleuchtungsenergiebedarf vergleichsweise niedrige Werte auf, obwohl diese im Fall der Strategien II und IV (I_{min}, I_{max}) = (150 W/m², 400 W/m²) geringfügig unterschritten werden. In Accra sind diese Unterschiede gravierender. Die Verwendung hoher Schwellenwerte der Strategie IV (in Anlehnung an ein hohes Solarstrahlungsangebot an diesem Standort) und die Strategie III würden zu besonders niedrigen Beleuchtungsenergieverbräuchen, aber auch zu sehr hohen Kühlenergieverbräuchen führen. Die Verwendung von „häufig abdunkelnden“ Strategien I, II, IV (30, 150) ermöglicht zwar Einsparungen beim Kühlenergiebedarf, verursacht jedoch eine intensive Nutzung der künstlichen Beleuchtung, die bei einem südlichen Standort zu hinterfragen wäre. Ob für diesen Standort der Einsatz einer elektrochromen Verglasung sinnvoll sein kann, wird im Kapitel 8 weiterführend untersucht.

7.2.1.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10 – ergänzende Untersuchungen (Einfluss der Schaltzeiten auf die Simulationsergebnisse)

Die Mehrzahl der verfügbaren Simulationsprogramme bietet keine Möglichkeit, die charakteristische zeitliche Verzögerung bei Schaltvorgängen elektrochromer Verglasungen in den bauphysikalischen Berechnungen zu berücksichtigen. Im geförderten Forschungsprojekt wurden Jahressimulationen in Zeitschritten von 60 min durchgeführt, mit der Annahme, dass jede Zustandsänderung einer adaptiven Verglasung innerhalb dieses Zeitschritts abgeschlossen sein würde. Um einen möglichen Einfluss der Verzögerung bei den Schaltvorgängen auf die Simulationsergebnisse zu evaluieren, wurde im ersten Schritt die Schaltdauer der im Fassadenprüfstand eingebauten ECONTROL®-Verglasung gemessen und anschließend eine Vergleichssimulation mit neuen, der Schaltdauer entsprechenden Zeitschritten durchgeführt.



Die Schaltdauer elektrochromer Verglasungen hängt bekanntlich von mehreren Faktoren ab, maßgeblich von der Scheibengröße und -geometrie sowie der Temperatur der Scheibenoberfläche [62]. Sonneneinstrahlung und hohe Außentemperaturen bewirken dabei einen erheblich schnelleren Schaltvorgang als es bei niedrigen Temperaturen der Fall ist. Um exakte Angaben hinsichtlich der Schaltdauern zu erhalten, erfolgten experimentelle Untersuchungen im Fassadenprüfstand des ILEK. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. In Orange ist der zeitliche Verlauf der Schaltvorgänge zwischen den verschiedenen Abdunklungsstufen abgebildet. Es wurden dabei unterschiedliche Reihenfolgen der angesteuerten Schaltstufen untersucht: alle Stufen nacheinander (Schaltprogramm 0-1-2-3-4-3-2-1-0) oder nur ausgewählte Stufen (0-2-4-2-0, 0-4-0 und 0-3-0). Der zugehörige Verlauf der gemessenen Beleuchtungsstärke im Raum ist in Rot angegeben. Hierzu wurde ein Sensor an der Innenseite der 182 cm x 122 cm großen Verglasung angebracht (im Abstand von 66 cm horizontal und 90 cm vertikal von der rechten unteren Ecke). Dargestellt sind die relativen Beleuchtungsstärkewerte. Bezugsgröße (100 %) ist die gemessene Beleuchtungsstärke bei vollständig entfärbter Verglasung.

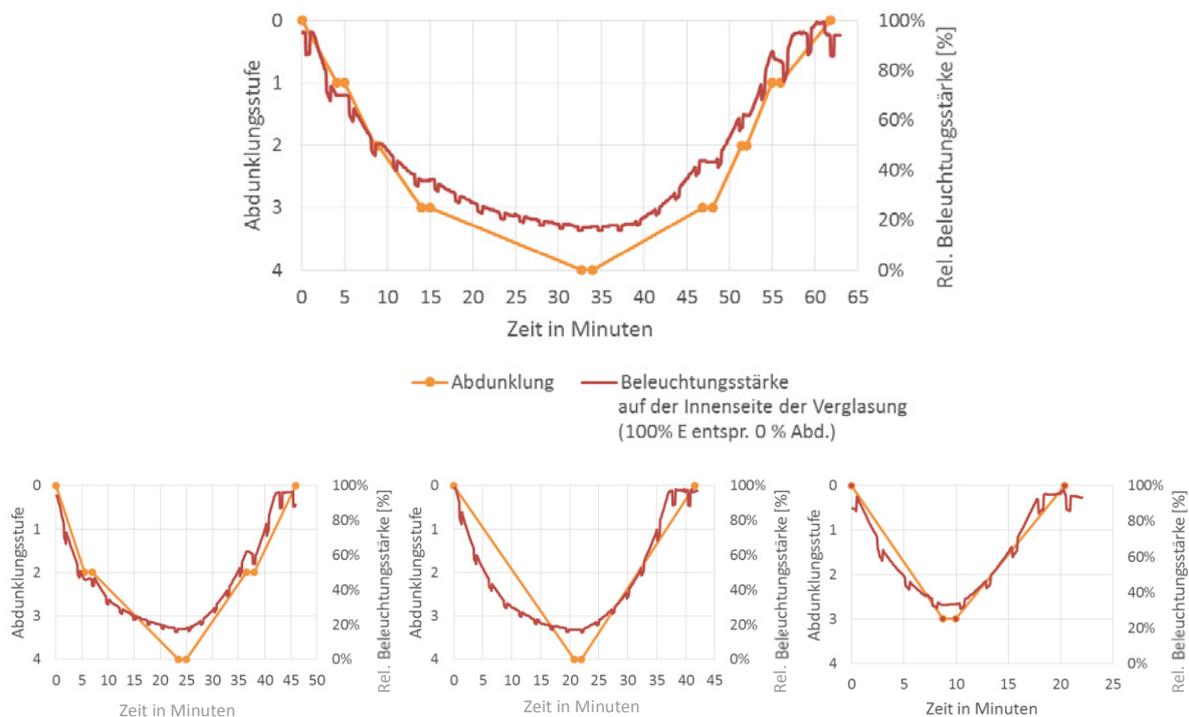


Abbildung 7-9: Analyse des Schaltverhaltens der ECONTROL®-Verglasung im Fassadenprüfstand am wechselhaften Frühlingsstag 27.04.2016 (Außentemperatur zwischen 5°C und 10°C, Globalstrahlung auf die Horizontale zur Mittagszeit ca. 1000 W/m²). Oben: Schaltprogramm Stufe 0-1-2-3-4-3-2-1-0, unten (von links nach rechts): Schaltprogramm Stufe 0-2-4-2-0, Schaltprogramm Stufe 0-4-0, Schaltprogramm Stufe 0-3-0.

Wurden die einzelnen Schaltstufen jeweils nacheinander angesteuert, so ergaben sich für die Stufen 0 bis 3 ähnliche Schaltzeiten von weniger als 5 Minuten. Eine Ausnahme bildeten Schaltvorgänge, die die Abdunklungsstufe 4 einbezogen, da hier deutlich höhere Schaltzeiten benötigt wurden. Der Schaltvorgang vom hellen in den dunklen Zustand war dabei zeitintensiver als die Aufhellung. Zum Schalten zwischen der Stufe 0 und 4 wurden ca. 20 min benötigt.

Auf der Basis der durch die Messungen gewonnenen Erkenntnisse wurde eine beispielhafte Simulation des Fassadenprüfstands (Einzelbüro) mit einem Zeitschritt von 20 Minuten durchgeführt. Die ECONTROL®-Verglasung wurde dabei nach der Strategie I angesteuert. Die Reaktion auf einen Schaltvorgang trat in der Variante 1 der Simulation sofort ein, in der Variante 2 wurde sie um 20 min verzögert (war ein Abdunklungsvorgang erforderlich, so wurden die berechneten solaren Gewinne erst nach Ablauf der gesamten Schaltdauer vermindert).



Simulationszeitschritt	Jahresenergiebedarf [kW/m ² a]			Max. Differenz [kW/m ² a]	Max. Differenz [%]
	60 min	20 min Variante 1	20 min Variante 2		
Helsinki	151,23	150,79	151,25	0,46	0,30
Stuttgart	102,79	102,77	103,15	0,39	0,37
Valencia	49,28	49,00	49,34	0,34	0,69
Accra	133,80	133,75	133,77	0,05	0,03

Tabelle 7-1: Auswirkung des Simulationszeitschritts auf den simulierten Jahresenergiebedarf im Fassadenprüfstand

Die Anpassung des Zeitschritts von 60 Minuten auf 20 Minuten hatte keine bedeutende Auswirkung auf das Simulationsergebnis. Bezogen auf einen Quadratmeter lagen die Differenzen zwischen den Jahresenergiebedarfen des Einzelbüros, berechnet mit den drei Simulationsvarianten (60 min, 20 min Variante 1, 20 min Variante 2), unterhalb 0,7 %. Die auftretenden Abweichungen können demzufolge bei dem analysierten Szenario als vernachlässigbar klein angenommen werden. Diese Erkenntnis lässt sich qualitativ auch auf die Simulationen anderer adaptiver Verglasungen übertragen.

7.2.1.2 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10 – ergänzende Untersuchungen (Leistungsmessungen)

Ein vermeintlicher Nachteil der steuerbaren Systeme ist die für deren Betrieb notwendige Energiezufuhr. Um diese zu evaluieren, wurde eine Energiebedarfsmessung für die im Fassadenprüfstand eingebaute ECONTROL®-Verglasung im Betrieb vorgenommen. Der Energiebedarf eines Systems kann durch die zeitliche Integration der gemessenen Leistung bestimmt werden.

Die Leistungsmessung erfolgte mit dem Leistungsmessgerät R&S Hameg HM8115-2. Gemessen wurde die komplette Steuereinheit inklusive Steckernetzteil. Um das Steckernetzteil an das Leistungsmessgerät anschließen zu können, wurde der Adapter HZ 815 verwendet. Die Messwerte (Spannung, Strom, Leistung) wurden im Sekundenintervall mit der gleichnamigen Software HM8115-2 ausgelesen. Aufgrund des Messaufbaus floss der Energiebedarf des Netzteils in das Messergebnis maßgeblich ein. Die Grundleistung des Netzteils ist aus der nachfolgenden Abbildung 7-10 ablesbar, die die Ergebnisse der Messung für einen warmen Frühlingstag visualisiert.



sonniger Frühlingstag (02.03.2017)

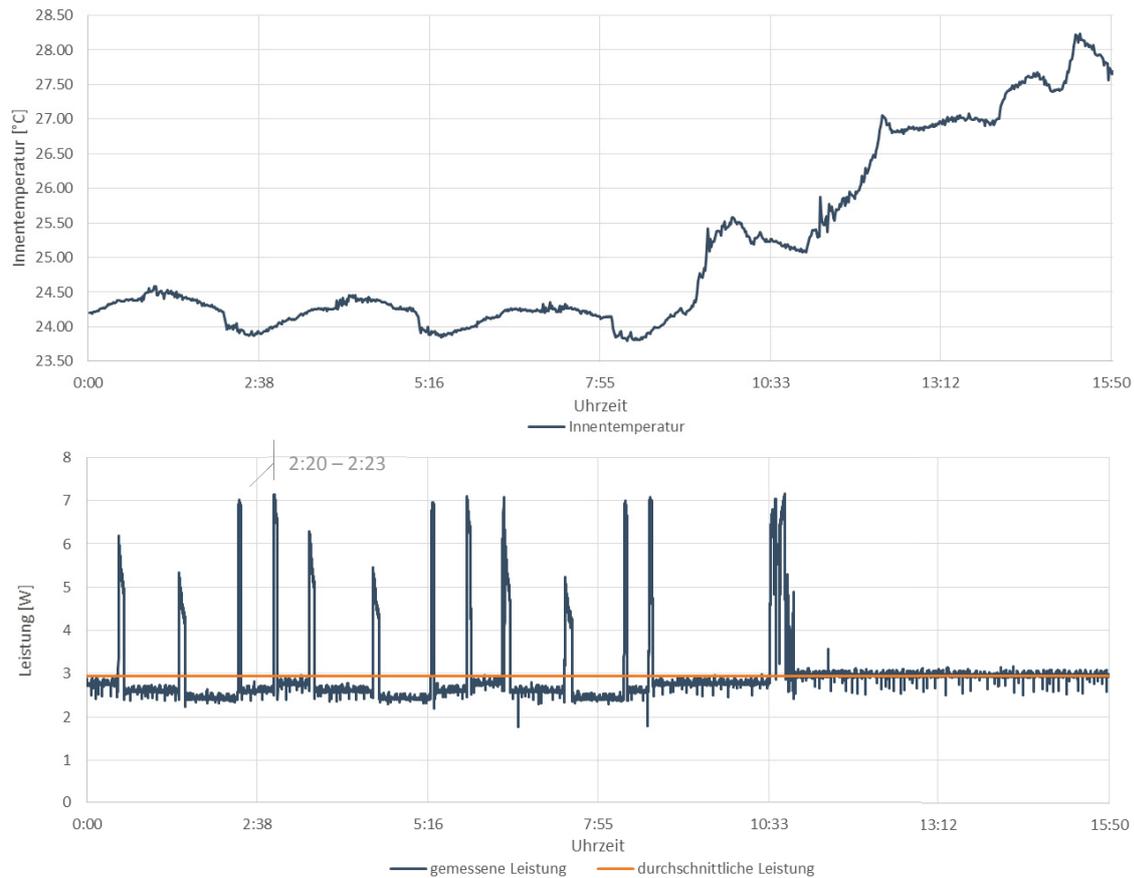


Abbildung 7-10: Leistungsaufnahme der ECONTROL®-Verglasung an einem sonnigen Frühlingstag 02.03.2017

In der Nacht wurde der Testraum beheizt, tagsüber stieg die Innenraumtemperatur aufgrund der Sonneneinstrahlung auf bis zu ca. 28 °C an. Die ECONTROL®-Verglasung war durchgehend temperaturabhängig angesteuert worden (vgl. Regelungsstrategie RS I, Kapitel 6.1), auch nachts, um ausreichend viele Schaltzyklen einbeziehen zu können. Den Temperaturschwankungen entsprechend wurden Schaltvorgänge eingeleitet. Nur während der Schaltvorgänge trat ein erhöhter Leistungsbedarf auf. Beispielhaft für die Zeitspanne 2:20 Uhr – 2:23 Uhr ergab sich ein Energiebedarf von ca. 600 Ws über dem Grundniveau. Sobald die Temperatur von ca. 25 °C überschritten wurde, erfolgte die Schaltung der Verglasung in den Zustand maximaler Abdunklung.

Die durchschnittliche an diesem Tag gemessene Leistung betrug ca. 3 W, was einer flächenbezogenen Leistung von 0,66 W/m² (Verglasungsfläche) entspricht. Dieser Wert bildet jedoch, wie in Abbildung 7-10 erkennbar, hauptsächlich den Grundleistungsbedarf des Netzteils ab. Da der Leistungsbedarf des Netzteils weder konstant noch getrennt messbar ist, kann keine genaue Abgrenzung der Energiebedarfe durch das Netzteil und die Verglasung definiert werden. Der sich durch die Schaltvorgänge ergebende Energiebedarf der ECONTROL®-Verglasung ist so gering, dass seine genaue Erfassung mit der vorhandenen Messtechnik nicht möglich ist.



7.2.2 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic

Als Basis für energetische Analysen der elektrochromen Verglasung SageGlass® classic wurde zunächst ebenfalls die Regelungsstrategie RS I verwendet. Nachfolgend sind die berechneten Jahresenergiebedarfe für die vier Standorte und die drei Raumtypen beim Einsatz des SageGlass® classic (SAGE), der Referenzverglasung 1 (Ref) und der Referenzverglasung 3 (Jal) dargestellt.

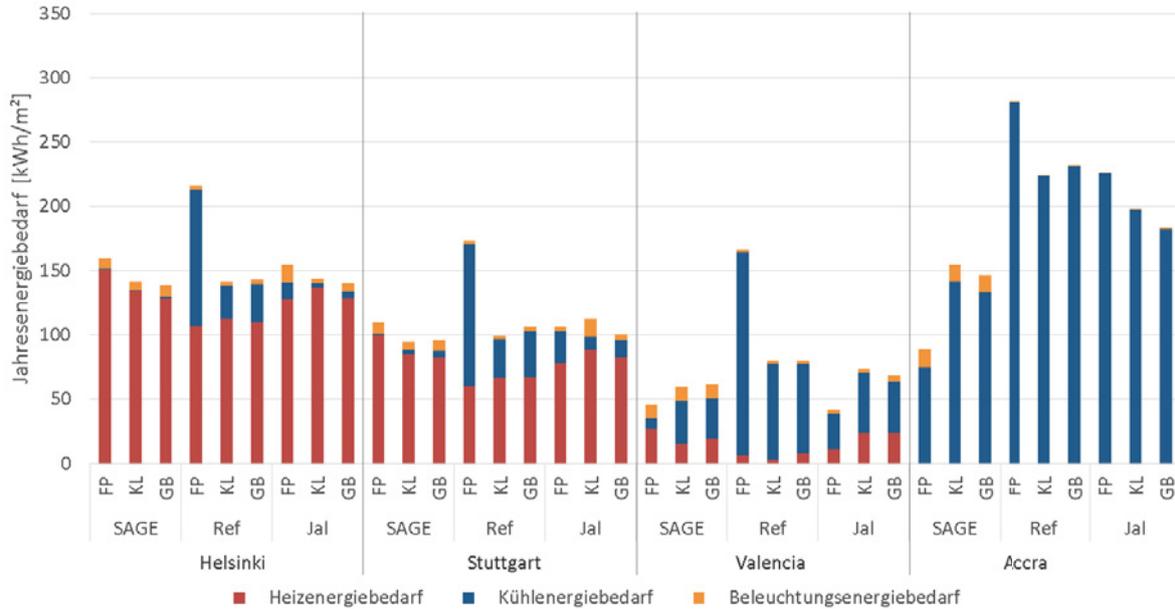


Abbildung 7-11: Jahresenergiebedarfe (ohne interne Wärmegewinne)

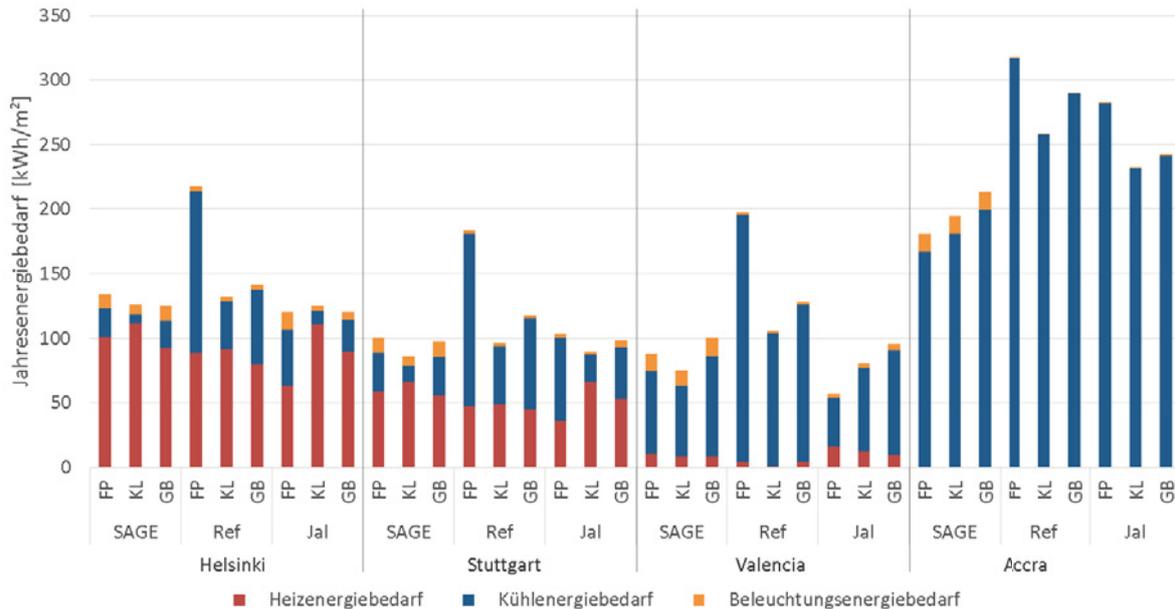


Abbildung 7-12: Jahresenergiebedarfe (mit internen Wärmegewinnen)

Das nach der Strategie I geregelte SageGlass® wirkt sich äußerst positiv auf den Kühlenergiebedarf der analysierten Räume aus, wodurch es sich für den Einsatz in warmen Klimazonen besonders eignet. Dennoch ist sowohl der Heizenergiebedarf als auch der Beleuchtungsenergiebedarf beim Einsatz des SageGlass® in den meisten Fällen nicht wesentlich niedriger oder sogar höher als beim Einsatz einer Verglasung mit externer Jalousie, da die Abdunklungsvorgänge zur Reduzierung solarer Wärmegewinne und der Lichttransmission führen.



Ist die Referenzverglasung mit einer Verschattungsmöglichkeit ausgestattet (Ja), so verringert sich der Gesamtenergiebedarf, wobei er in heißen Klimazonen weiterhin über dem Bedarf des Raums mit elektrochromer Verglasung liegt. In kühleren Gegenden sind die Gesamtenergiebedarfswerte beim Einsatz einer herkömmlichen Verschattung und einer SageGlass®-Verglasung ähnlich.

Auffällig beim Einsatz von SageGlass® classic sind die relativ hohen Energiebedarfswerte für künstliche Beleuchtung, die aus einer sehr niedrigen erreichbaren Transmission der Verglasung im dunkelsten Zustand resultieren (vgl. Kapitel 4.2.2). Die hohen Beleuchtungsenergiebedarfe bei der Ansteuerung nach der Strategie I lassen auf eine hohe Häufigkeit des Auftretens dieser minimalen Transmissionsstufe und somit auf eine verringerte Tageslichtversorgung der Räume schließen (detaillierte Helligkeitsanalyse s. Kapitel 8). Eine Strategie, die die Beleuchtungsstärke im Raum als Regelungsparameter einschließt, würde hierfür Abhilfe bieten. Wie Abbildung 7-13 zeigt, führt solch eine Strategie (II) zum erwünschten Effekt. In kühleren Klimazonen wirkt sie sich ebenfalls positiv auf den Gesamtenergiebedarf aus, in warmen Klimazonen verursacht sie jedoch eine erhebliche Erhöhung des Kühlenergiebedarfs.

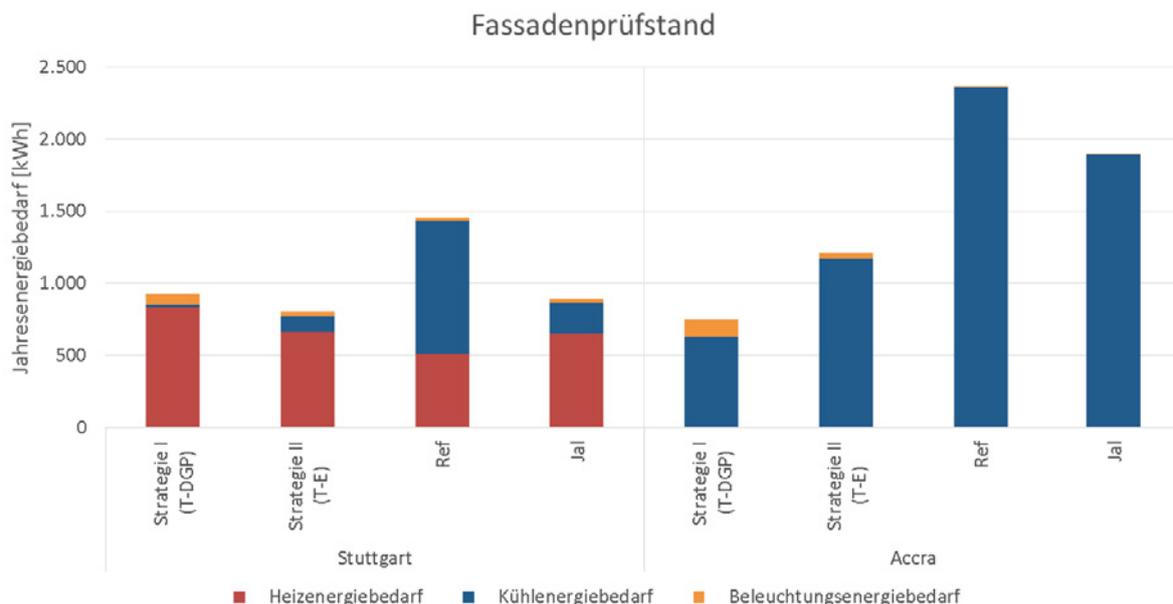


Abbildung 7-13: Jahresenergiebedarfe im Fassadenprüfstand mit SageGlass® classic – Vergleich der Regelungsstrategien (Simulation ohne interne Wärmegewinne)

Ein anderer Ansatz zur Verringerung der hohen Beleuchtungsenergieniveaus könnte eine Veränderung der Schaltstufenverteilung sein. Dieser Ansatz wird nachfolgend erläutert.

7.2.2.1 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic – ergänzende Untersuchungen (Optimierungsansatz)

Die Analyse der Verglasungseigenschaften (Kapitel 4.2.2) hat gezeigt, dass die Schalhubausnutzung nicht linear verläuft. Die Verglasung schaltet bereits in der zweiten Abdunklungsstufe in eine sehr geringe Transmission. Im Rahmen des Projekts wurde die nachfolgend erläuterte These untersucht. Nach dem großen Verdunklungsunterschied zwischen der Stufe 0 und der Stufe 1 verliert die Verglasung an Anpassungsfähigkeit. Daher wurde im Projekt ein Simulationsmodell einer modifizierten Schaltstufeneinteilung der elektrochromen Verglasung erstellt, in dem ein linearer Verlauf der visuellen Transmission innerhalb der Schaltstufen angenommen wurde. Deren Auswirkung auf den Raumenergiebedarf und die Wirksamkeit hinsichtlich der Verbesserung der Tageslichtversorgung (s. Kapitel 8) wurden analysiert.



In Abbildung 7-14 werden die einzelnen Abdunklungsstufen der ursprünglichen SageGlass®-Verglasung (Sage) mit der modifizierten (Sage mod) verglichen. Da die Abdunklungsstufen 0 und 4 unverändert bleiben, überlagern sich ihre Werte im Diagramm. Für die modifizierte Verglasung ergibt sich ein linearer Verlauf der visuellen Transmission Tvis. In Abhängigkeit hiervon wurden der Energiedurchlassgrad g und die solare Transmission Tsol mit dem Programm Window berechnet. Die drei Zwischenstufen der modifizierten Verglasung ermöglichen jeweils eine höhere Lichtdurchlässigkeit Tvis, lassen jedoch auch höhere solare Warmegewinne zu. Sie sollen eine deutlich differenziertere Schaltung der Verglasung ermöglichen.

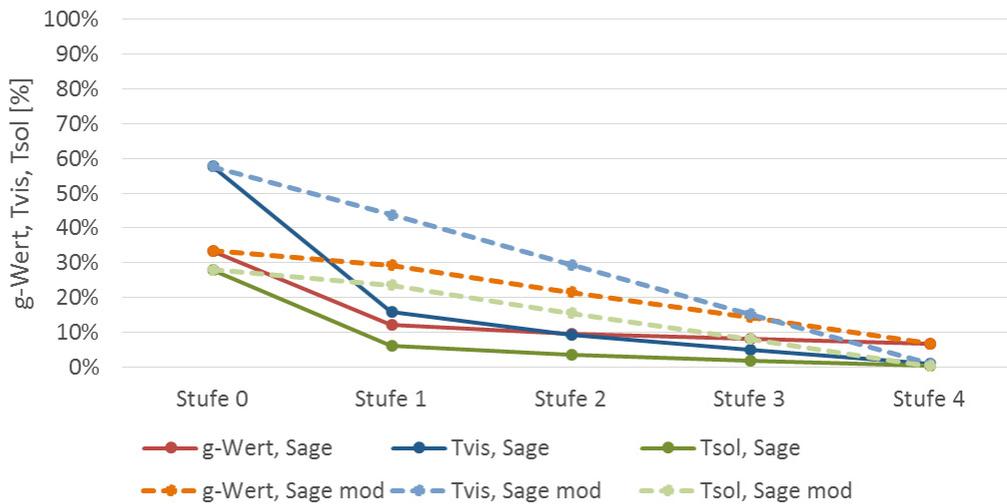


Abbildung 7-14: Vergleichende Darstellung der Abdunklungsstufen der ursprünglichen SageGlass® (Sage) mit dem modifizierten Schaltstufenmodell desselben Systems (Sage mod)

In der nachfolgenden Abbildung 7-15 ist die Auswirkung der Änderung des Schaltverhaltens auf den Gesamtenergiebedarf des Einzelbüros am Beispiel von Stuttgart und Accra bei der Verwendung der Regelungsstrategie I dargestellt.

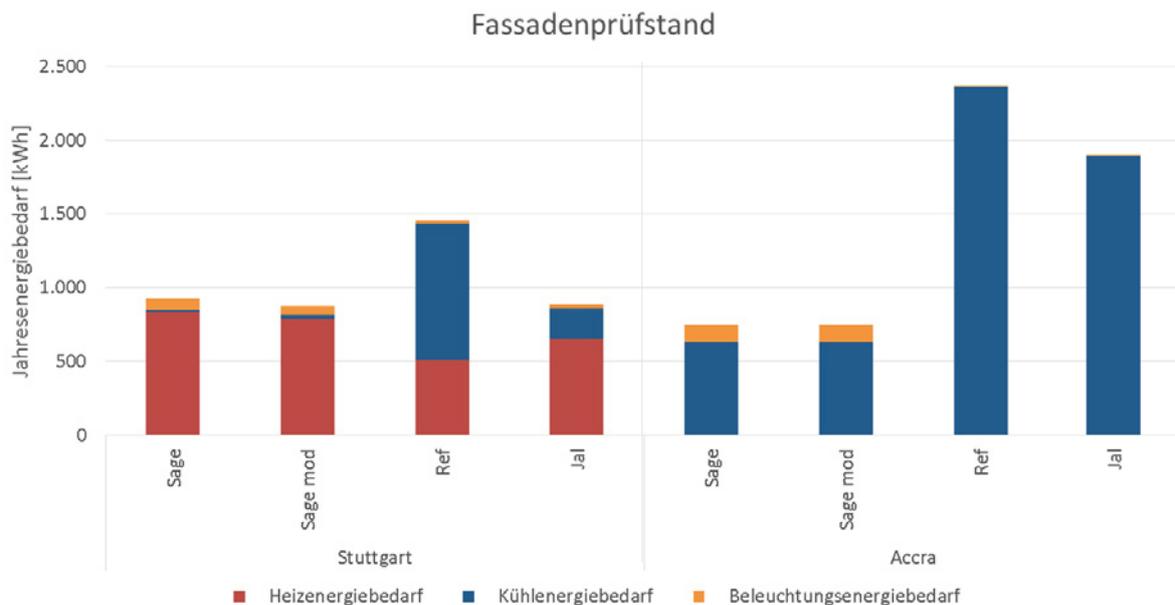


Abbildung 7-15: Jahresenergiebedarfe im Fassadenprüfstand – Vergleich der Verglasungsmodelle „Sage“ und „Sage mod“ sowie Referenzverglasungen 1 (Ref) und 3 (Jal) (Strategie RS I ohne interne Warmegewinne)



Am Standort Stuttgart kann die positive Auswirkung der Änderung des Schaltprofils in Abbildung 7-15 beobachtet werden. Sie erfüllt ihr Ziel durch die merkliche Verringerung des Beleuchtungsenergiebedarfs. Darüber hinaus resultiert sie in einem geringfügig reduzierten Gesamtenergiebedarf. Am Standort Accra lässt sich bei der Verwendung der Regelungsstrategie I keine sichtliche Änderung des Energiebedarfs feststellen, was anhand einer Analyse der Abdunklungshäufigkeiten im Kapitel 8 näher untersucht wird. Wird die Regelungsstrategie III zur Ansteuerung der modifizierten Verglasung verwendet, so fällt der Beleuchtungsenergiebedarf weiter, der Kühlenergiebedarf steigt jedoch insbesondere an warmen Standorten erheblich an. Dieser Effekt ist in Abbildung 7-16 veranschaulicht.

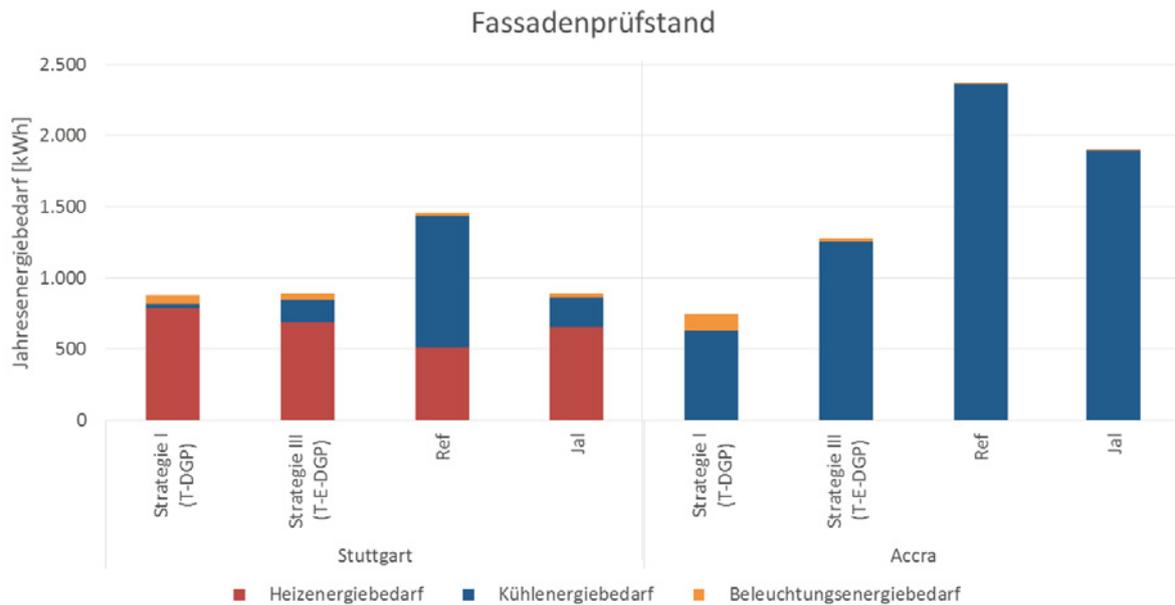


Abbildung 7-16: Jahresenergiebedarfe im Fassadenprüfstand – Vergleich der Strategien I und III für die modifizierte elektrochrome Verglasung. Energiebedarfe der Referenzverglasung 1 (Ref) und 3 (Jal) wurden ebenfalls aufgetragen.

Grundsätzlich führt der Modifizierungsansatz zur Verminderung des Heiz- und Beleuchtungsenergiebedarfs, jedoch ebenso zu einer Erhöhung des Kühlenergiebedarfs. Auf den benötigten Gesamtenergiebedarf wirkt sich der Einsatz der modifizierten Verglasung dennoch bei beiden untersuchten Regelungsstrategien, an allen Standorten, mit Ausnahme von Accra, positiv aus.



7.2.3 Heizglas: Ipatherm-Heizglas

Für das Heizglas Ipatherm wurden Leistungsmessungen im ILEK-Fassadenprüfstand durchgeführt. Die Energiebedarfe und das thermische Verhalten des Musterraums wurden für den Einsatz der Ipatherm-Verglasung und einer herkömmlichen Radiatorheizung¹⁴ als Wärmequelle verglichen. Der Testraum wurde vom 01.03.2016 bis zum 04.04.2016 mit der Radiatorheizung beheizt. Ipatherm-Heizglas war eingebaut, aber nicht in Funktion. Vom 05.04.2016 bis zum 30.04.2016 wurde der Testraum mit dem geschosshohen Ipatherm-Heizglas-Muster in der Südfassade beheizt, die Radiatorheizung war ausgeschaltet. Ein Auszug aus dem Wettererfassungsprotokoll für diesen Zeitraum mit aufgetragenen Heizungsarten ist in Abbildung 7-17 zu sehen.

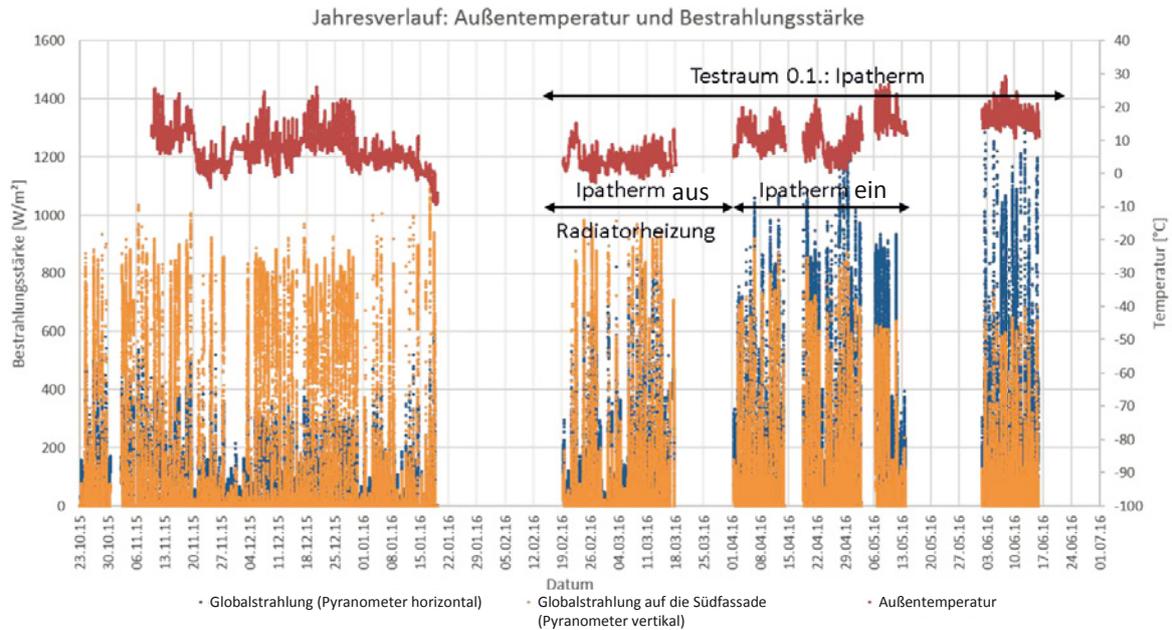


Abbildung 7-17: Monitoring der Außentemperatur und der Bestrahlungsstärke im ILEK-Fassadenprüfstand mit Visualisierung unterschiedlicher Heizungsarten (Radiatorheizung / Ipatherm-Heizglas)

In der folgenden Abbildung 7-18 ist der Vergleich der Energiebedarfe für beide Systeme im Testzeitraum und der Vergleich des thermischen Verhaltens für beispielhafte Tage mit ähnlichen Außenbedingungen dargestellt. Die durchschnittliche Außentemperatur an diesen Tagen betrug ca. 6 °C. Der 14.03.2016 (Radiatorheizung) war ein kalter, sonniger Tag. Der 26.04.2016 (Ipatherm-Heizung) war ein kalter, bewölkter Tag, die Globalstrahlungsintensität war jedoch ähnlich wie am 14.03.2016. Der 27.04.2016 war ein kalter, sonniger Tag, die Globalstrahlungsintensität auf die Horizontale zur Mittagszeit lag um ca. 250 W/m² höher als am 14.03.2016.

¹⁴ Voltomat HEATING Radiator, Ausführung mit Thermostat, 3 Heizstufen, Leistung 2500 W, Nennspannung 230 V, Abmessungen L x B x H = 480 mm x 240 mm x 630 mm

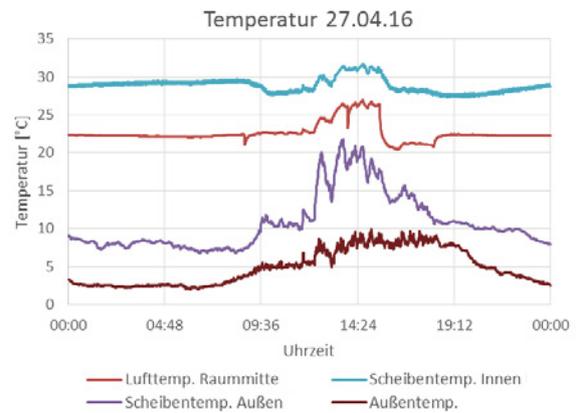
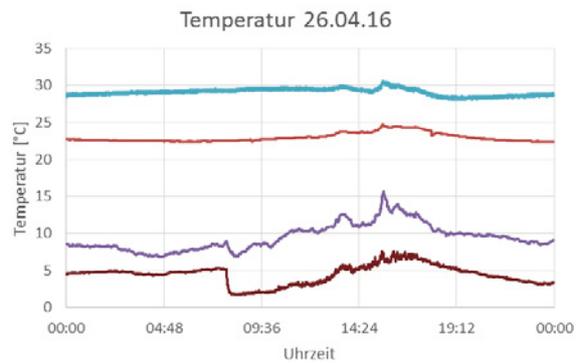
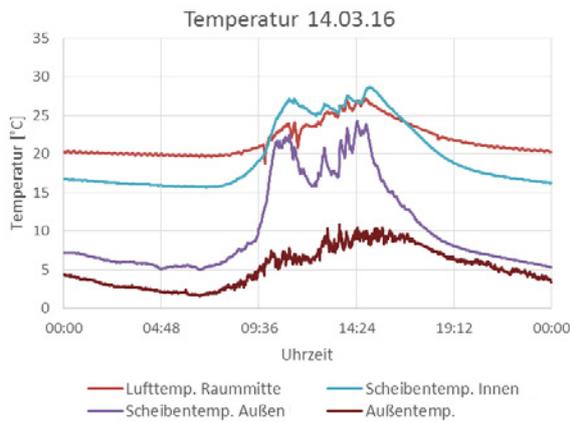
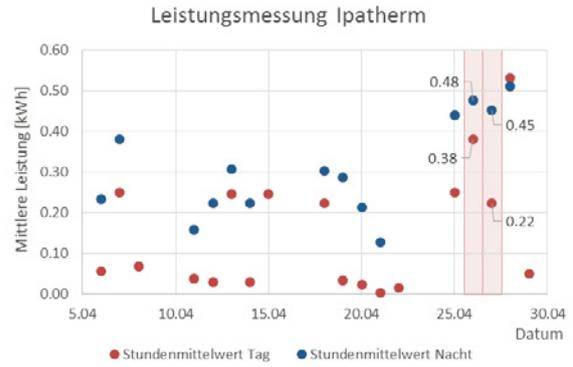
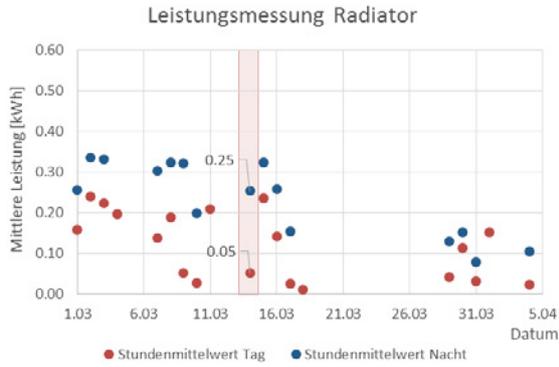


Abbildung 7-18: Thermisch-energetische Analyse der Ipatherm-Verglasung

An sonnigen Tagen ist eine Reaktion der Raumtemperatur auf die Solareinstrahlung bemerkbar, zudem stellt sich die Raumtemperatur (ca. 23°C) mit der Ipatherm-Heizglas schneller ein als mit der Radiatorheizung. Insgesamt hat das Ipatherm-Heizglas einen etwas höheren Leistungsbedarf als die Radiatorheizung. Es ermöglicht allerdings eine bessere Kontrolle der Lufttemperatur und konstantere Innenraumklimabedingungen. Dies kann mit der Reduktion der Konvektion (flächige Strahlungsheizung) begründet werden und wirkt sich positiv auf das Behaglichkeitsempfinden im Raum aus. Eine Senkung des Leistungsbedarfs des Systems könnte durch die Auslegung der Verglasung als Dreifachisolierverglasung erreicht werden.



7.2.4 Verglasung mit Jalousien im Scheibenzwischenraum: OKAFLEX Typ E

Die OKAFLEX-Verglasung wurde im Rahmen der numerischen Simulationen nach der Regelungsstrategie RS I angesteuert. Nachfolgend sind die berechneten Jahresenergiebedarfe für die vier Standorte und drei Raumtypen beim Einsatz der OKAFLEX-Verglasung (Okaflex), der Referenzverglasung 1 (Ref) und der Referenzverglasung 3 (Jal) dargestellt.

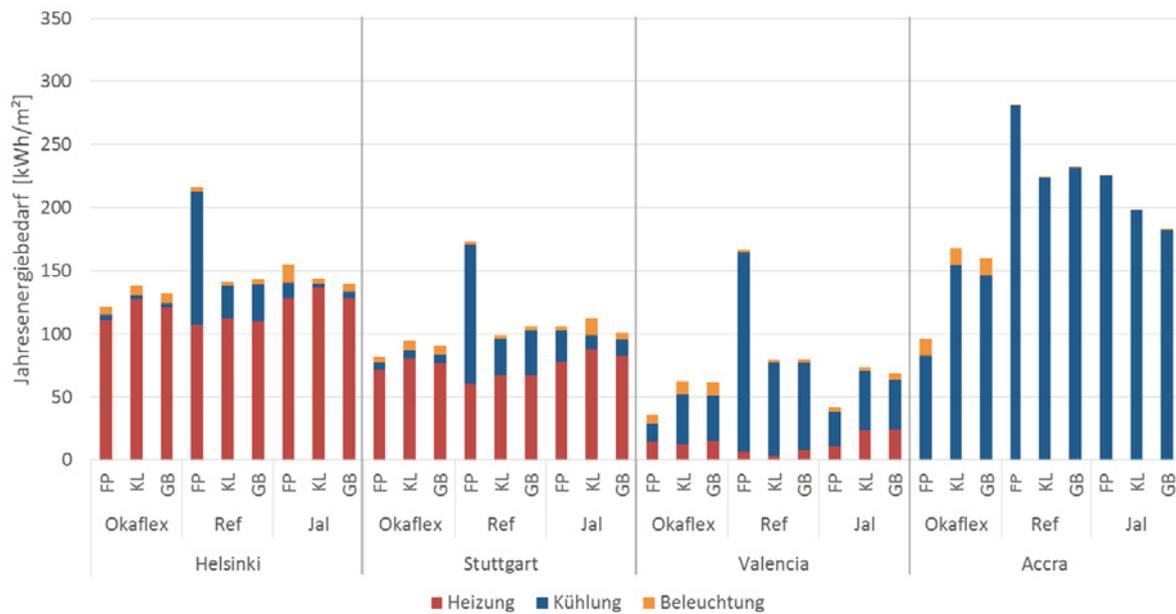


Abbildung 7-19: Jahresenergiebedarfe (Simulation ohne interne Wärmegewinne)

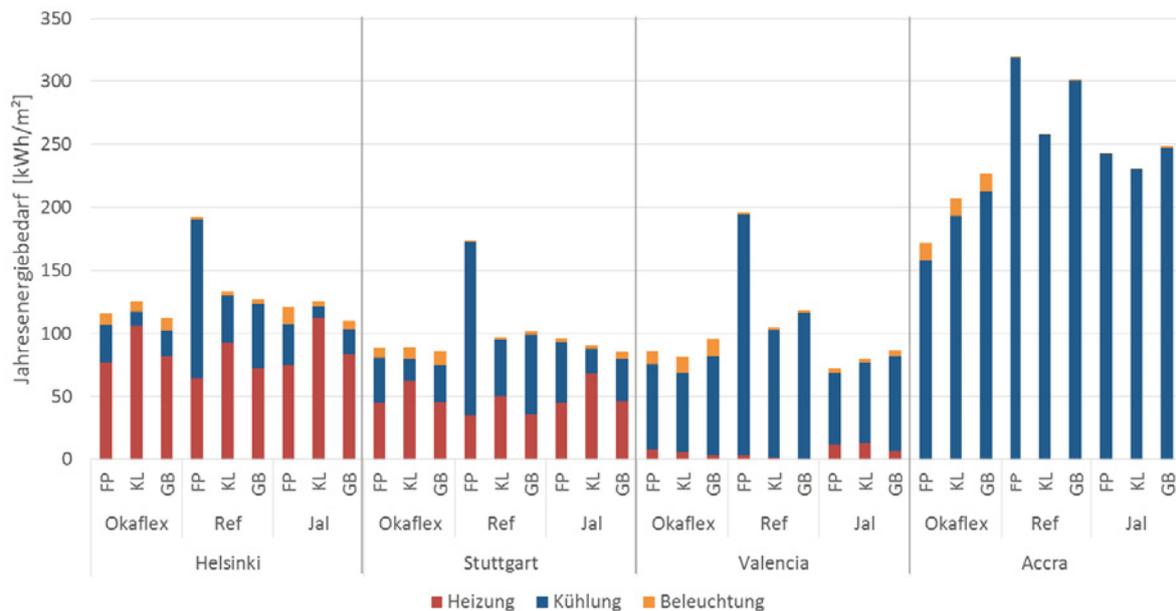


Abbildung 7-20: Jahresenergiebedarfe (Simulation mit internen Wärmegewinnen)

In Stuttgart und Valencia werden bei der Verglasung OKAFLEX Typ E die niedrigsten Gesamtenergieverbräuche der untersuchten Standorte erreicht. Der Jahresenergiebedarf beim Einsatz der OKAFLEX-Verglasung ist vergleichbar gut oder besser als derjenige der Referenzverglasung mit außenliegender Jalousie. Die in den meisten Fällen höheren Beleuchtungsenergiebedarfe im Vergleich mit der Referenzverglasung mit außenliegender Jalousie



sie beruhen auf den unterschiedlichen Regelungsstrategien der Lamellen (OKAFLEX – temperatur- und blendungsbasierte Regelung, Referenz – bestrahlungsstärkebasierte Regelung mit 25 % Durchlässigkeit für Diffusstrahlung im geschlossenen Zustand). Insgesamt lässt sich feststellen, dass insbesondere bei kühlungsintensiven Standorten die nach der Regelungsstrategie I angesteuerte OKAFLEX-Verglasung effektiv zur Reduktion des Gebäudeenergiebedarfs beiträgt. Dennoch lässt der relativ hohe Energiebedarf für künstliche Beleuchtung auf ein geringes resultierendes Tageslichtangebot im Raum schließen. Die Ergebnisse einer Tageslichtanalyse werden daher im Kapitel 8 vorgestellt.



7.3 Systeminvariante Verglasungen

7.3.1 System mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum: MicroShade® MS-A Vertical

In der folgenden Abbildung 7-21 und Abbildung 7-22 sind die Jahresenergiebedarfe für die vier Standorte und die drei Raumtypen beim Einsatz der MicroShade®-Verglasung (MS), der Referenzverglasung 1 (Ref) und der Referenzverglasung 3 (Jal) dargestellt, jeweils ohne interne Wärmegewinne und mit Einbeziehung der internen Wärmegewinne der analysierten Räume.

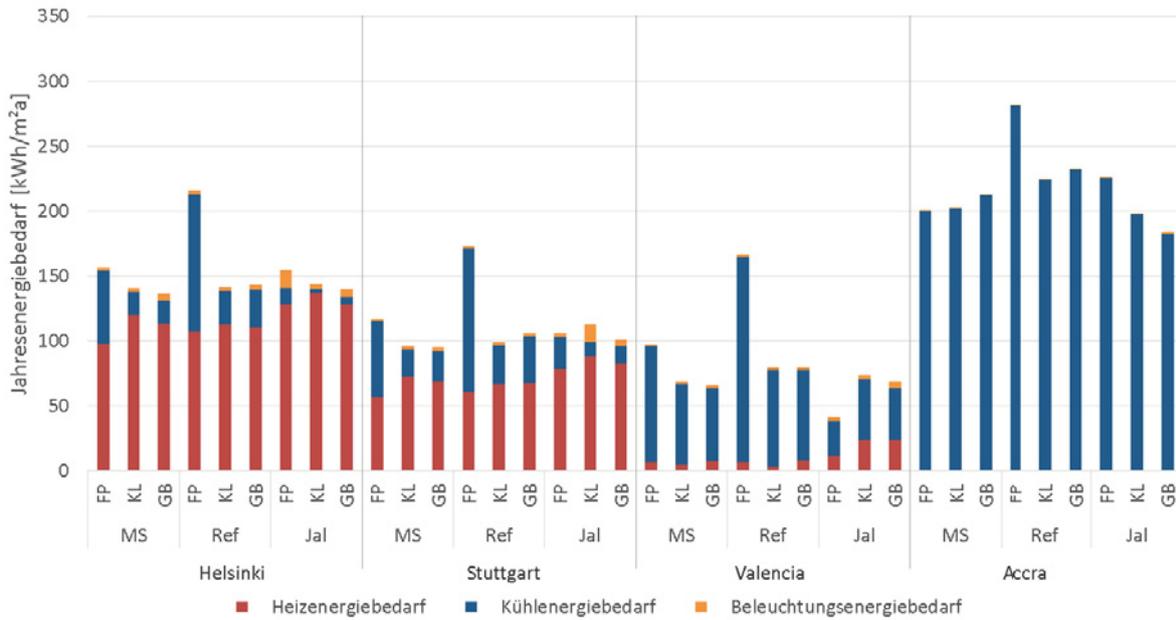


Abbildung 7-21: Jahresenergiebedarfe (ohne interne Wärmegewinne)

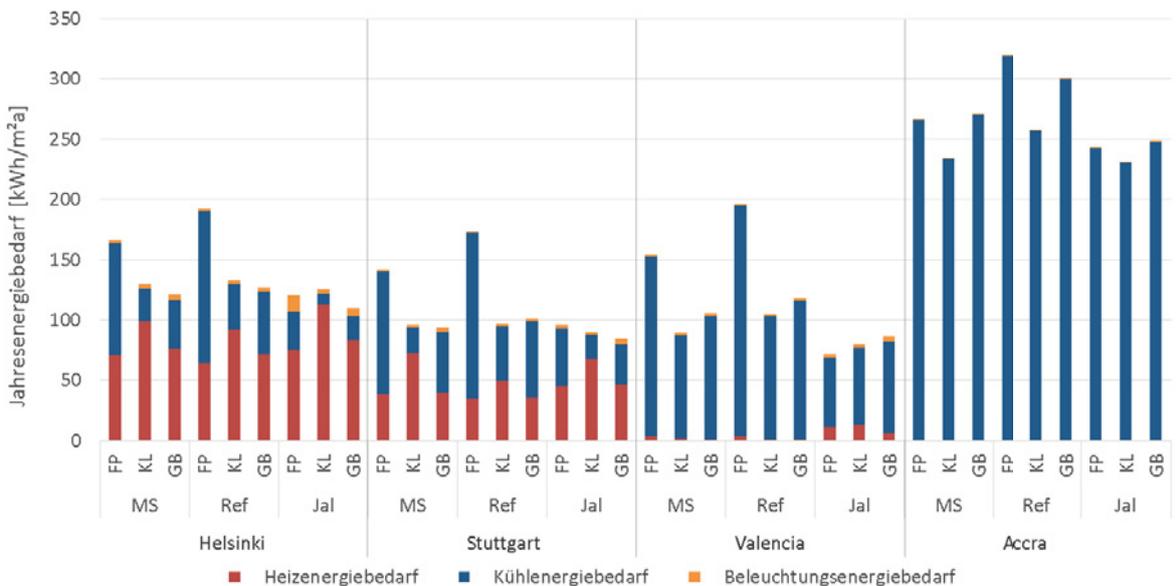


Abbildung 7-22: Jahresenergiebedarfe (mit internen Wärmegewinnen)

Der Energiebedarfsvergleich der MicroShade®-Verglasung mit Referenzverglasungen zeigt, dass aus gesamtenergetischer Sicht die Verwendung eines konventionellen außenliegenden Jalousiebehangs geringfügig effektiver wäre. Der Vorteil der MicroShade®-Verglasung gegenüber dem Jalousiesystem zeigt sich in visuellen Aspekten,



insbesondere im Erhalt der Sichtverbindung nach außen. Die spiegelt sich auch in einem niedrigen Beleuchtungsenergiebedarf wieder. Zudem bleibt die MicroShade®-Verglasung jederzeit funktionsfähig, da die Sonnenschutzfolie im Schiebezwiseenraum vor Windeinflüssen geschützt ist. Außenliegende Jalousien dagegen müssen bei starker Windeinwirkung in die Parkposition gefahren werden. Im Vergleich mit der Referenzverglasung 1 wird das Energieeinsparpotential der MicroShade®-Verglasung sichtbar. Insbesondere im Fassadenprüfstand resultiert der Einbau einer MicroShade®-Verglasung in einem wesentlich niedrigeren Jahresheizenergiebedarf als im Raum mit der Referenzverglasung 1.

7.3.2 Verglasung mit integrierten Reflektionsprofilen: OKASOLAR F O/U

Die energetischen Simulationen der OKASOLAR-Verglasung werden derzeit im Rahmen weiterer Untersuchungen am ILEK geführt. Die Ergebnisse hierzu sind zur Veröffentlichung im Rahmen eines wissenschaftlichen Artikels vorgesehen.

7.4 Verglasungen mit konstanten Eigenschaften (Referenzverglasungen)

Zur Vervollständigung der energetischen Analysen adaptiver Verglasungen wird nachfolgend ein Vergleich der Jahresenergiebedarfe der drei Referenzverglasungen (Referenzverglasung 1 (Ref), Referenzverglasung 2 (Okatherm) und Referenzverglasung 3 (Jal)) für alle Standorte, für die Nutzungsszenarien Fassadenprüfstand (FP) und Klassenraum (KL) vorgestellt.

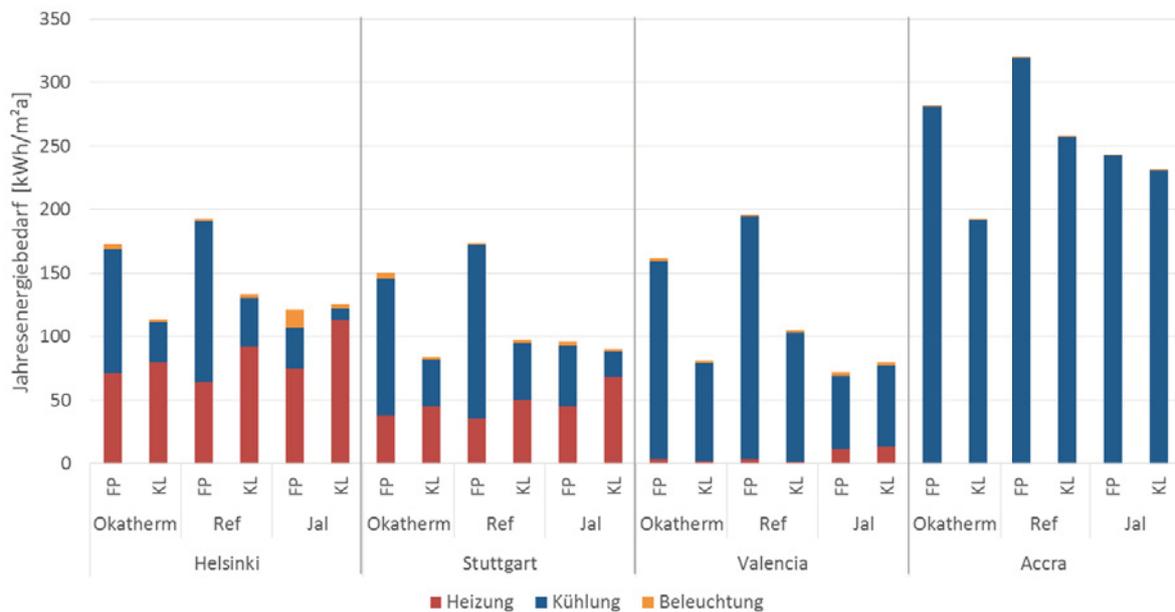


Abbildung 7-23: Jahresenergiebedarfe der Referenzverglasungen (Simulation mit internen Wärmegewinnen)

Es ist ersichtlich, dass der Einsatz der Referenzverglasung 1 für alle Standorte und für beide Nutzungsszenarien die höchsten Energiebedarfe verursacht. Die Referenzverglasung 2 mit einer Sonnenschutzbeschichtung führt je nach Nutzungsszenario und Raumgröße zur Entstehung höherer (im Fassadenprüfstand) oder niedrigerer (im Klassenraum an fast allen Standorten) Energiebedarfe als beim Einsatz der Referenzverglasung 3.



7.4.1 Referenzverglasung 2: OKATHERM – ergänzende Untersuchungen (Einfluss der Standardisierungsmethode für Verglasungskennwerte auf die Simulationsergebnisse)

Wie im Kapitel 4 erläutert, wurden in den vorgestellten energetischen Simulationen Verglasungskenndaten verwendet, die nach dem, im Berechnungsprogramm Window hinterlegten, NFRC-Standard ermittelt wurden. Um die Auswirkung der unterschiedlichen Standardisierungsmethoden CEN und NFRC (s. Anhang 1) auf die Simulationsergebnisse zu evaluieren, wurde eine Vergleichsanalyse der Referenzverglasung 2 in der Südfassade des Fassadenprüfstands exemplarisch durchgeführt. In die energetische Simulation des Raums flossen die entsprechend nach CEN und NFRC berechneten Verglasungskennwerte (s. Kapitel 4.4.2) ein. Die Ergebnisse der Vergleichsanalyse sind in der nachfolgenden Abbildung 7-24 und Abbildung 7-25 dargestellt.

Die Unterschiede der Gesamtenergiebedarfe betragen für alle untersuchten Standorte durchschnittlich ca. 1 % und nie mehr als 2 % und wurden somit als vernachlässigbar klein bewertet. Signifikante Abweichungen der Simulationsergebnisse durch eine Änderung der Kennwertermittlungsmethode für die Verglasungen konnten dadurch ausgeschlossen werden.

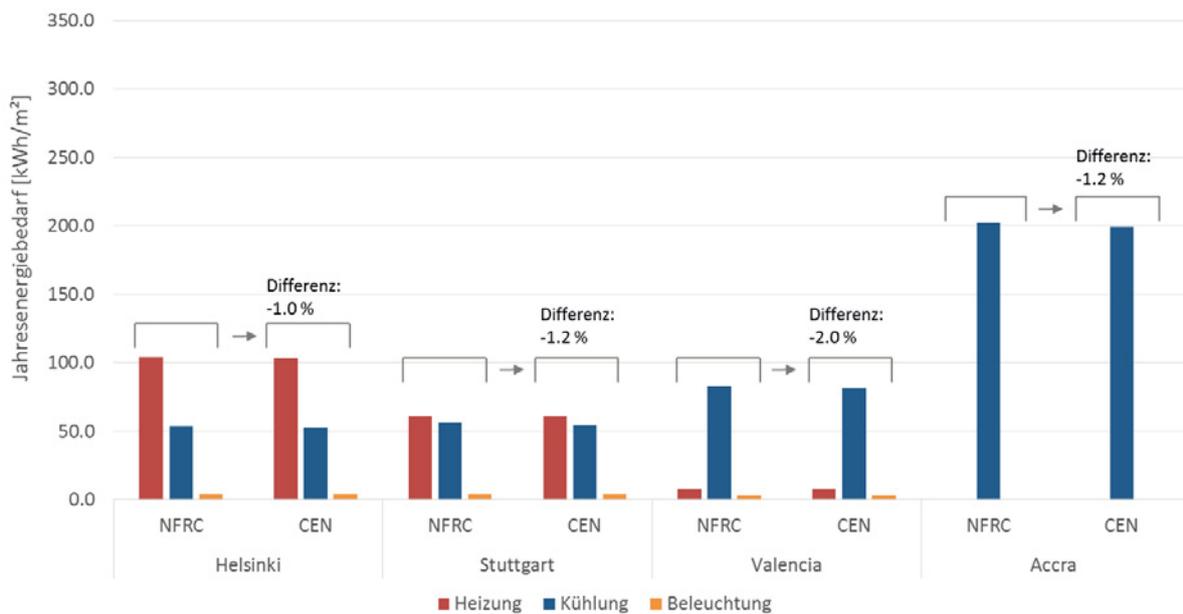


Abbildung 7-24: Jahresenergiebedarfe der Referenzverglasung 2 im Fassadenprüfstand bei der Verwendung des CEN- und des NFRC-Standards zur Berechnung der Verglasungskennwerte (Simulation ohne interne Wärmegewinne). Verglichen werden die jeweiligen Gesamtenergiebedarfe für Heizung, Kühlung und Beleuchtung.

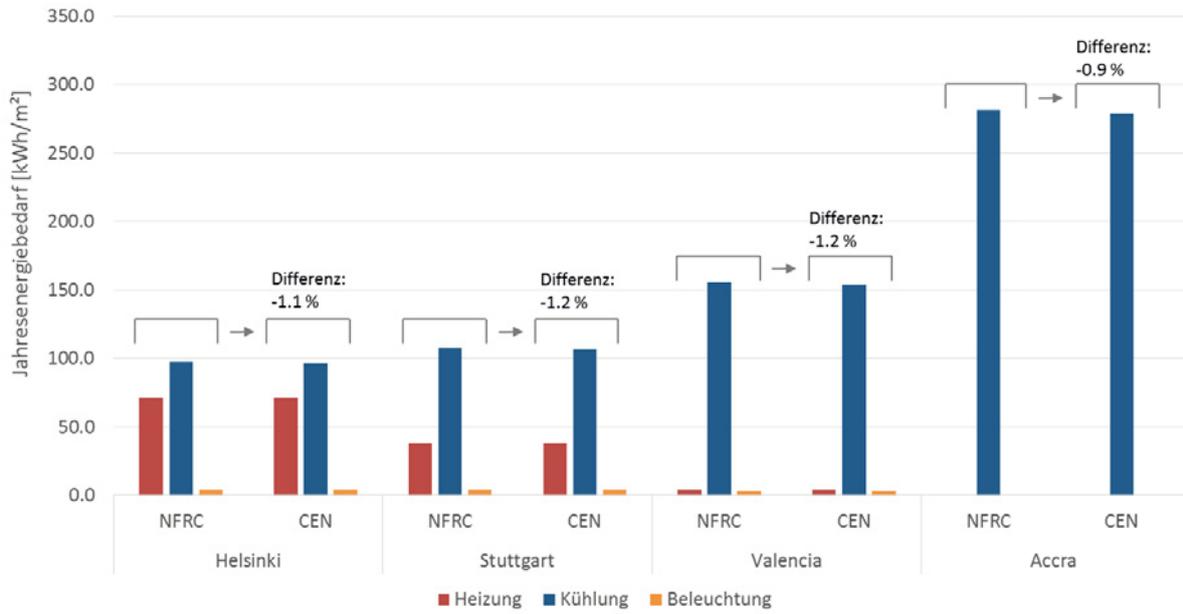


Abbildung 7-25: Jahresenergiebedarfe der Referenzverglasung 2 im Fassadenprüfstand bei der Verwendung des CEN- und des NFRC-Standards zur Berechnung der Verglasungskennwerte (Simulation mit internen Wärmege-
winnen). Verglichen werden die jeweiligen Gesamtenergiebedarfe für Heizung, Kühlung und Beleuchtung.



8 Analyse der Helligkeitsverteilung beim Einsatz der Verglasungen • AP 5 | Ergebnisse

8.1 Allgemeine Untersuchungen zum Blendungsrisiko

Eine Analyse der Verteilung der Überschreitungen des DGP-Grenzwerts (vgl. Formel 5-1) von 0,4 zeigt auf, dass es in den Nutzungsszenarien Großraumbüro und Klassenraum mit der Referenzverglasung 1 jeweils einen Zeitraum gibt, während dessen keine Blendung auftritt. Die Mitte dieses Zeitraums bildet auf der nördlichen Hemisphäre die Sommersonnenwende am 21. Juni, zu welcher die Sonne senkrecht über dem nördlichen Wendekreis steht. Somit sind die während des Tages erreichten Elevationswinkel groß genug, um eine störende direkte Blendung der Nutzer auszuschließen. Im Fassadenprüfstand tritt aufgrund der besonderen Position des Nutzers im Raum das Phänomen eines völlig blendfreien Zeitraums nicht auf, jedoch ist auch hier eine geringere Wahrscheinlichkeit der Blendung um die Sommersonnenwende zu beobachten.

Am nördlichsten der vier Standorte, Helsinki, wird der DGP-Grenzwert von 0,4 im Großraumbüro und im Klassenraum unabhängig von der betrachteten Verglasung jeweils etwa während der zwei Monate vor und nach der Sommersonnenwende zu keiner Stunde überschritten. Am Standort Stuttgart tritt dieses Ereignis während der drei Monate vor und nach der Sonnenwende auf. Am Standort Valencia entsteht vom 13. März bis zum 03. Oktober keine Blendung des Nutzers (ca. 3,5 Monate vor und nach der Sommersonnenwende) und am Standort Accra beträgt der Zeitraum ohne Blendung etwa 4,5 Monate vor und nach der Sommersonnenwende. Der Zeitraum ohne auftretende Blendung verlängert sich somit je südlicher der betrachtete Standort auf der Nordhalbkugel liegt. Zur Veranschaulichung wird dieser Sachverhalt in Abbildung 8-1 für das Nutzungsszenario Klassenraum dargestellt.

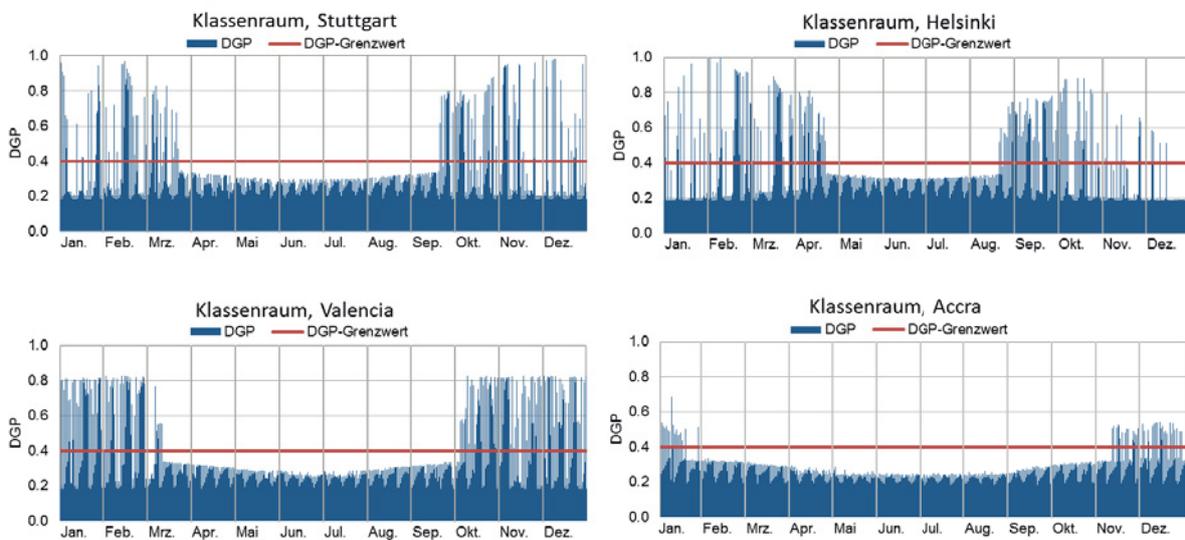


Abbildung 8-1: Simulation der Blendungswahrscheinlichkeiten im Jahresverlauf für den Klassenraum an den ausgewählten Standorten für die Referenzverglasung 1

8.2 Selbstregelnde Systeme

8.2.1 Thermochrome Verglasung: Suntuitive® Dynamic Glass

8.2.1.1 Blendung

In der nachfolgenden Abbildung 8-2 sind zusammenfassend die prozentualen Häufigkeiten der Zeiten aufgelistet, während deren die DGP-Werte bei Einsatz der analysierten Suntuitive®-Verglasung (Suntuitive) den Grenzwert von 0,4 überschreiten. Da die konventionelle Referenzverglasung 1 (REF) keine Möglichkeit zur Verhinderung von Blendung bietet, dienen deren Blendwerte als Ausgangswerte zur Überprüfung des Potentials der adaptiven Verglasungen zur Vermeidung von Blendung. Für die Referenzverglasung ohne Jalousie sind die Überschreitungshäufigkeiten ebenfalls angegeben. In die Auswertung wurden nur die Zeiten der Nutzeranwesenheit einbezogen (s. Kapitel 5.2.2.4).

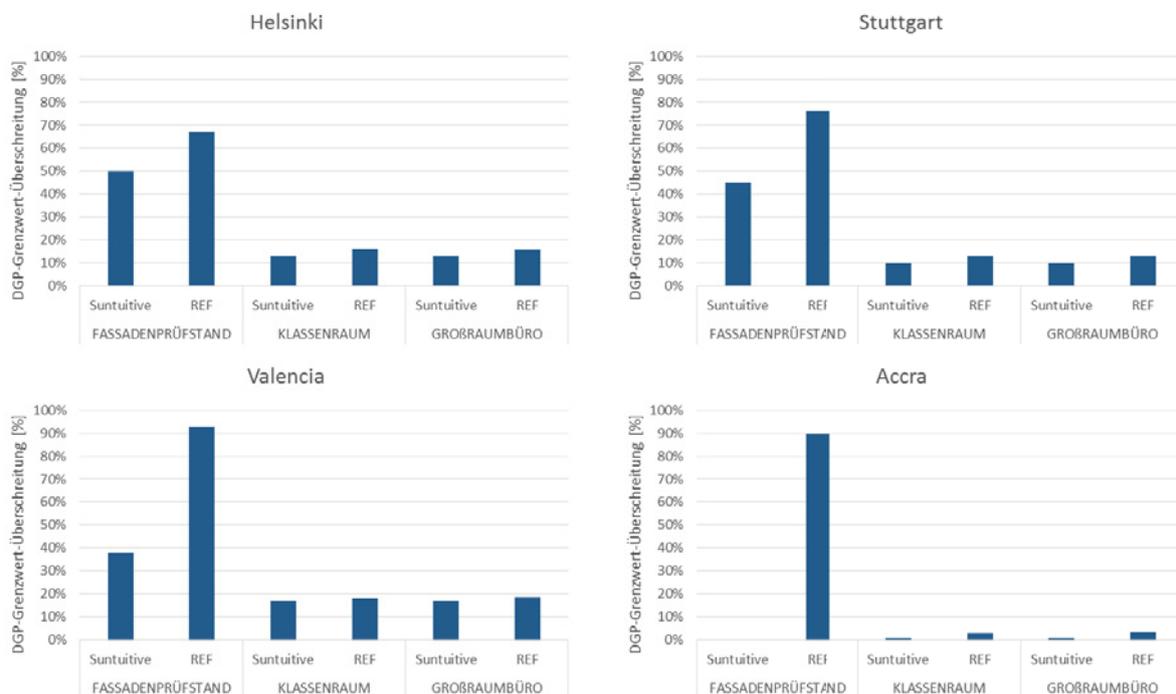


Abbildung 8-2: Häufigkeit der DGP-Grenzwertüberschreitung während der Nutzeranwesenheit

Gemäß der Analyse trägt die Suntuitive®-Verglasung insbesondere an südlichen Standorten erheblich zur Reduzierung des Blendungsrisikos bei. Im Nutzungsszenario Fassadenprüfstand wird es dort um über 50 % gegenüber der Referenzverglasung reduziert.

Experimentell wurde die Blendungsgefahr beim Einsatz der Suntuitive®-Verglasung mittels Leuchtdichtemessungen im Fassadenprüfstand untersucht. In Abbildung 8-3 ist eine Messung der Leuchtdichten im Testraum 1.1. des Fassadenprüfstands mit einer Suntuitive®-Verglasung in der Südfassade an einem sonnigen Frühlingstag (Scheibentemperatur 25 °C, Tvis = ca. 32 %) dokumentiert. Für die Messungen wurde eine Leuchtdichtekamera P144F der Marke Westboro Photonics verwendet.



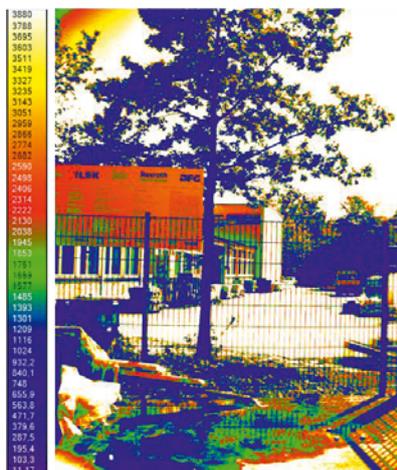
Außenraum



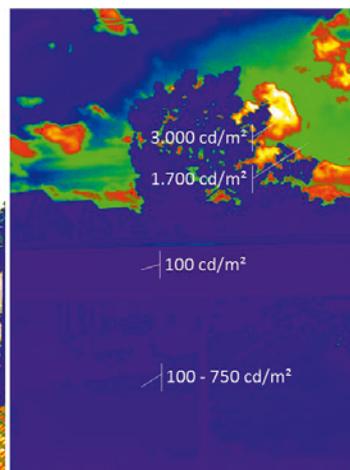
Messaufbau im Außenraum



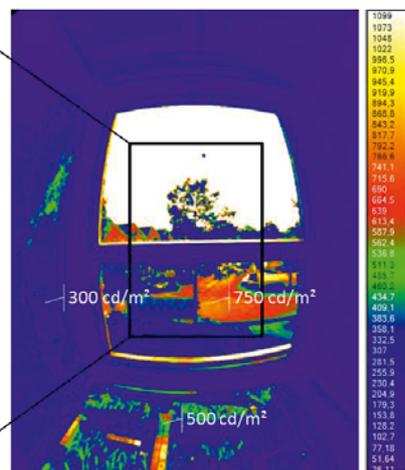
Messaufbau im Innenraum
Testraum 1.1., Suntuitive-Vergrasung



Außenraum, Leuchtdichtemessung
(Graufilter ND3 verwendet)



Suntuitive Dynamic Glass,
Leuchtdichtemessung
(Graufilter ND3 verwendet)



Testraum 1.1., Leuchtdichtemessung

Abbildung 8-3: Leuchtdichtemessungen im Fassadenprüfstand. Sonniger Frühlingstag 25.05.2016, Temperatur der Innenscheibe: 25 °C. Oben: Dokumentation der Messvorrichtung (bestehend aus Leuchtdichtemesskamera, Stativ und Laptop; Aufnahmen mit Spiegelreflexkamera), unten: Leuchtdichtendarstellung in Candela/m² (Aufnahmen mit Leuchtdichtekamera).

Es ist ersichtlich, dass die temperaturbedingte Scheibenabdunklung für ein komfortables Niveau der maximalen Leuchtdichten sorgt. Dieses beträgt je nach angenommenen Rahmenbedingungen 2.500 cd/m² bis 4.000 cd/m² [56]. Im Innenraum wahrgenommene Himmelsleuchtdichten am Tag der Messung liegen im Bereich von 1.700 cd/m² bis ca. 3.000 cd/m². Die Leuchtdichtekontraste im fassadennahen Bereich (angenommene Nutzerposition nach Kapitel 5.2.2.3) betragen größtenteils bis zu 1:10, in Extremfällen bis ca. 1:30. Somit ist gemäß der experimentellen Analyse keine Blendung im Testraum zu erwarten.

8.2.1.2 Tageslichtnutzung

Weiterhin wurde für das Suntuitive® Dynamic Glass der Aspekt der Tageslichtnutzung näher untersucht, da dieser den visuellen Komfort des Nutzers ebenfalls entscheidend beeinflusst. Wie bereits in der Analyse der Jahresbilanzen dargelegt, erhöht der Einsatz abdunkelbarer Gläser den Beleuchtungsenergiebedarf, da durch Abdunklungsvorgänge zusätzliche künstliche Beleuchtung benötigt wird, um die normativen Helligkeitsvorgaben zu er-



füllen. Aus diesem Grund wurde untersucht, inwiefern das Fenster trotz der Abdunklungsvorgänge seiner Funktion als Tageslichtquelle gerecht werden kann. Die folgenden Diagramme stellen dar, wie häufig sich die analysierte Verglasung in den verschiedenen Abdunklungsstufen befand. Es wurde der Zeitraum eines Jahres herangezogen und jeweils für das gesamte Jahr und während der Anwesenheitszeit des Nutzers betrachtet.

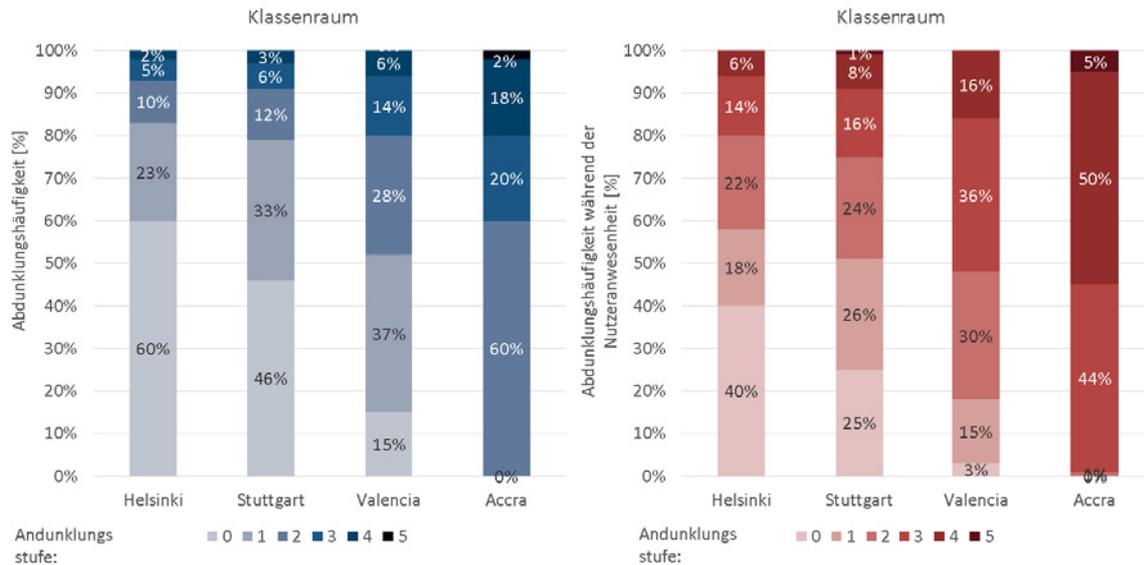


Abbildung 8-4: Abdunklungshäufigkeiten der Suntuitive-Verglasung während des Jahres. Links: bei Betrachtung des jeweils ganzen Tages (24 h) über den Zeitraum eines ganzen Jahres, rechts: während der Nutzungszeiten. Die Zuweisung der Abdunklungsstufen entspricht der Abbildung 4-2.

Die einzelnen Diagramme zeigen deutlich die Auswirkung des Standorts auf die Häufigkeit der einzelnen Abdunklungsstufen. Für die Häufigkeit der Abdunklungsstufe 0 ergibt sich ein ausgeprägtes Gefälle in der Nord-Süd-Richtung der Standorte. Umgekehrt verhält es sich für die Abdunklungsstufe 5, deren Häufigkeit in Nord-Süd-Richtung ansteigt.

Ausgehend von den auftretenden Häufigkeiten der einzelnen Abdunklungsstufen wurde die Tageslichtautonomie, definiert als der zeitliche Anteil zu welchem die erforderliche Beleuchtungsstärke von 500 lx auf der Arbeitsfläche ausschließlich durch Tageslicht sicher gestellt werden kann, näher betrachtet. Grundsätzlich ist eine hohe Tageslichtautonomie anzustreben, um den visuellen Nutzerkomfort zu erhöhen und um Energie für künstliche Beleuchtung einzusparen. Dennoch müssen die Faktoren Blendung und Überhitzung weiterhin in Betracht gezogen werden. Der empfohlene Minimalwert für die Tageslichtautonomie beträgt 30 % [63]. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Tageslichtautonomie an den vier unterschiedlichen Standorten, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum, für die Suntuitive®-Verglasung (Suntuitive), die Referenzverglasung 1 (Ref) und die Referenzverglasung 3 mit außenliegender Jalousie (Jal).

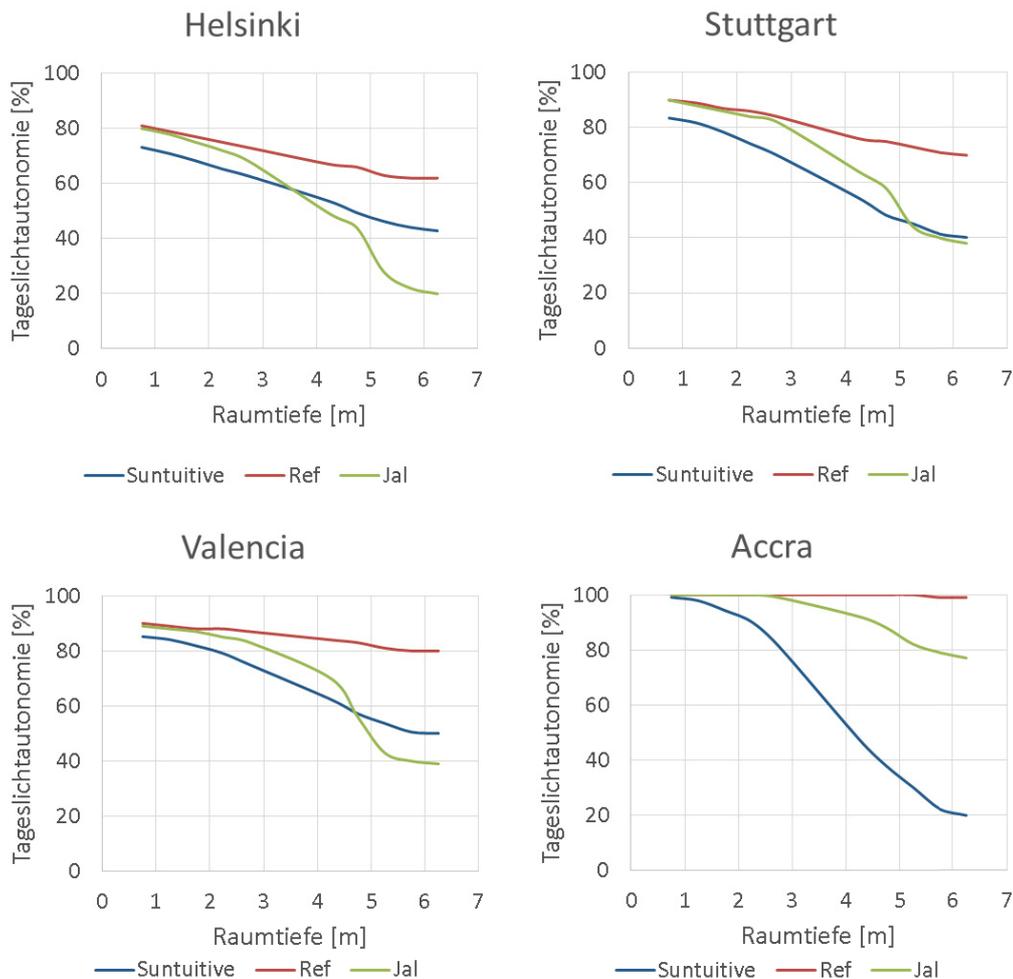


Abbildung 8-5: Tageslichtautonomie, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum, für Suntuitive® Dynamic Glass (Suntuitive), Referenzverglasung 1 (Ref) und Referenzverglasung 3 (Jal).

Aufgrund ihrer stets hohen visuellen Transmission ermöglicht die Referenzverglasung 1 im Klassenraum an allen Standorten die höchste Tageslichtautonomie. In Helsinki werden in Abhängigkeit der Distanz zur Südfassade Werte von 81 % bis 62 % erreicht. In Stuttgart und Valencia beträgt die Tageslichtautonomie in 0,75 m Abstand zur Südfassade sogar 90 %. In Stuttgart sinkt sie mit dem Betrachten der gesamten Raumtiefe auf 70 % und in Valencia sind selbst bei dieser Raumtiefe noch 80 % Tageslichtautonomie möglich. In Accra erreicht die Tageslichtautonomie nahezu konstant über die Raumtiefe einen Wert von 100 %. Künstliche Beleuchtung ist demnach nie notwendig. Der Einsatz der Suntuitive®-Verglasung resultiert zwar in niedrigeren Tageslichtautonomiewerten als bei der Referenzverglasung, diese überschreiten jedoch mit Ausnahme von Accra immer den empfohlenen Wert von 30 %.



8.2.2 Thermotrope Verglasung: GLASSX®crystal

8.2.2.1 Tageslichtnutzung

Für die thermotrope Verglasung GLASSX®crystal wurden im Rahmen des Projekts Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Testraum des Fassadenprüfstands an sonnigen und bewölkten Tagen durchgeführt. Die Beleuchtungsstärkewerte wurden auf der horizontalen Ebene, auf der Höhe von 75 cm über dem Fußboden erfasst und sind nachfolgend dargestellt. Gemessen wurde im Raster von 50 cm (in Richtung Raumbreite) und 60 cm (in Richtung Raumtiefe). Für die Auswertung wurden für jede Messreihe Diagramme der Beleuchtungsstärkeverteilung im Innenraum erstellt. Darüber hinaus wurde für jede Messreihe der Tageslichtquotient berechnet. Dieser ist definiert als das Verhältnis der Beleuchtungsstärke im Raum zur Beleuchtungsstärke auf die Horizontale draußen bei bedecktem Himmel. Die entsprechende Quotientenbildung wurde von den Autoren auch für wolkenlose Tage angewandt. Die Beleuchtungsstärke- und die Tageslichtquotientenverteilung im Innenraum können den nachfolgenden Abbildungen entnommen werden.

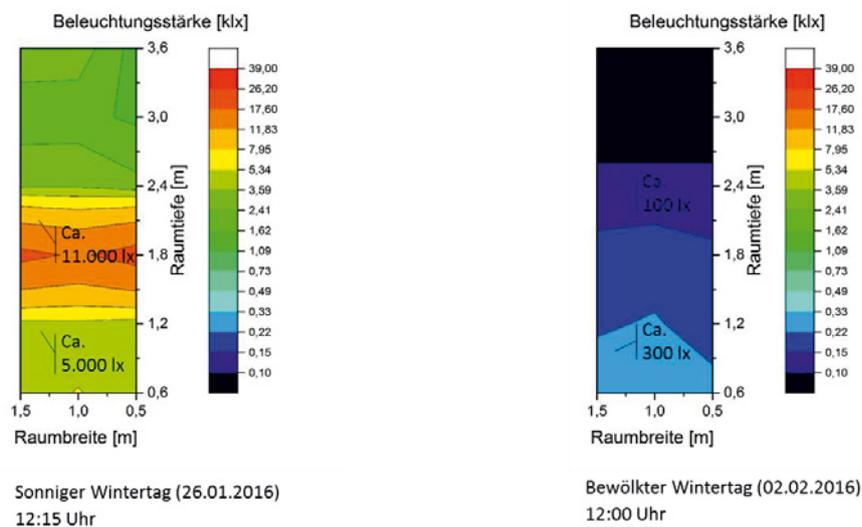


Abbildung 8-6: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Fassadenprüfstand beim Einsatz von GLASSX®crystal zur Mittagszeit. Links: sonniger Wintertag (26.01.2016), rechts: bewölkter Wintertag (02.02.2016).

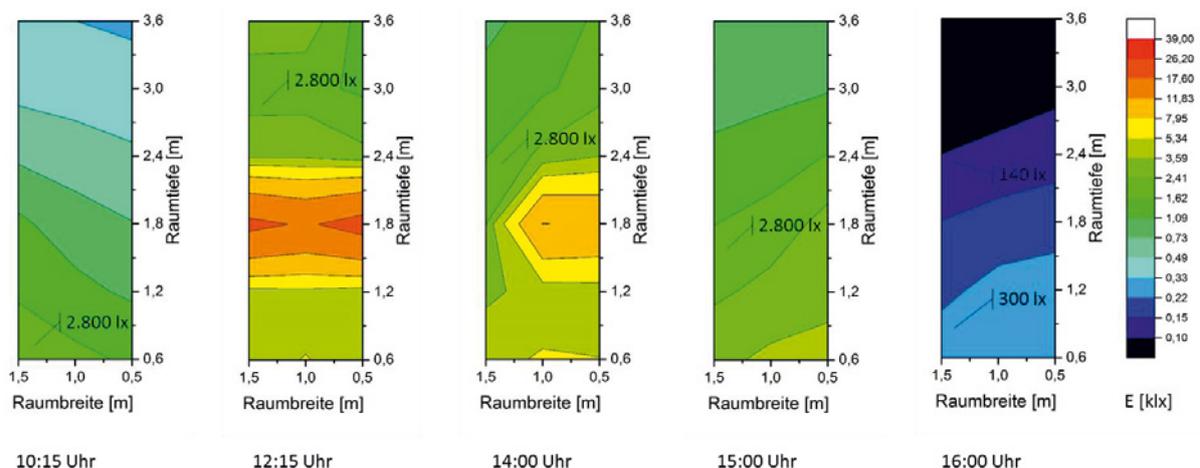


Abbildung 8-7: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Tagesverlauf beim Einsatz von GLASSX®crystal (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Wintertag (26.01.2016))

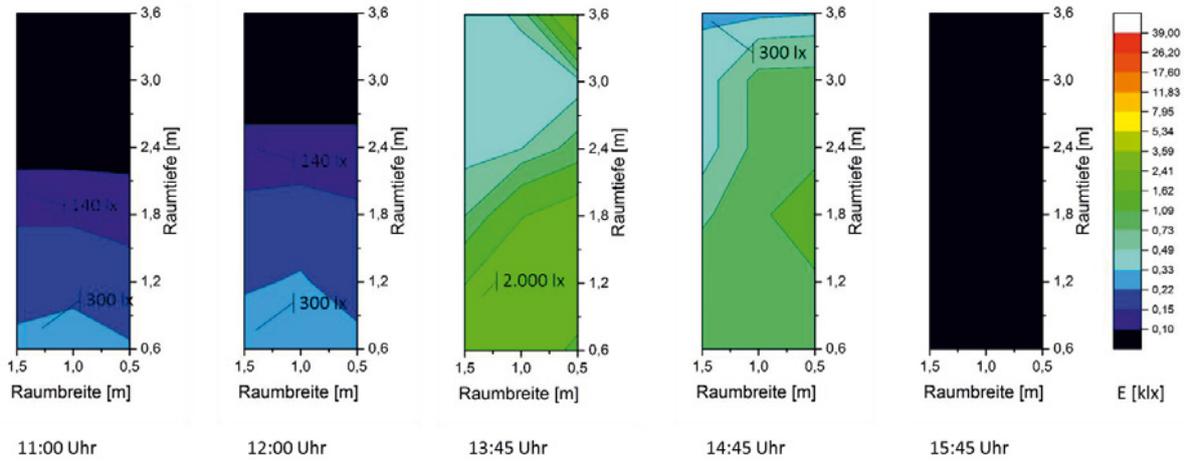


Abbildung 8-8: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Tagesverlauf beim Einsatz von GLASSX®crystal (Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Wintertag (02.02.2016))

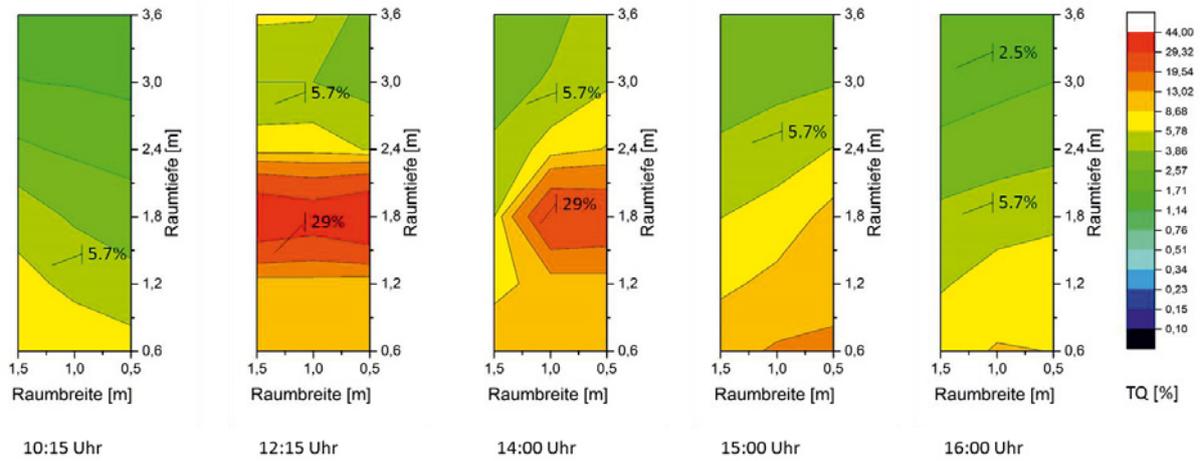


Abbildung 8-9: Tageslichtquotient im Tagesverlauf beim Einsatz von GLASSX®crystal (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Wintertag (26.01.2016))

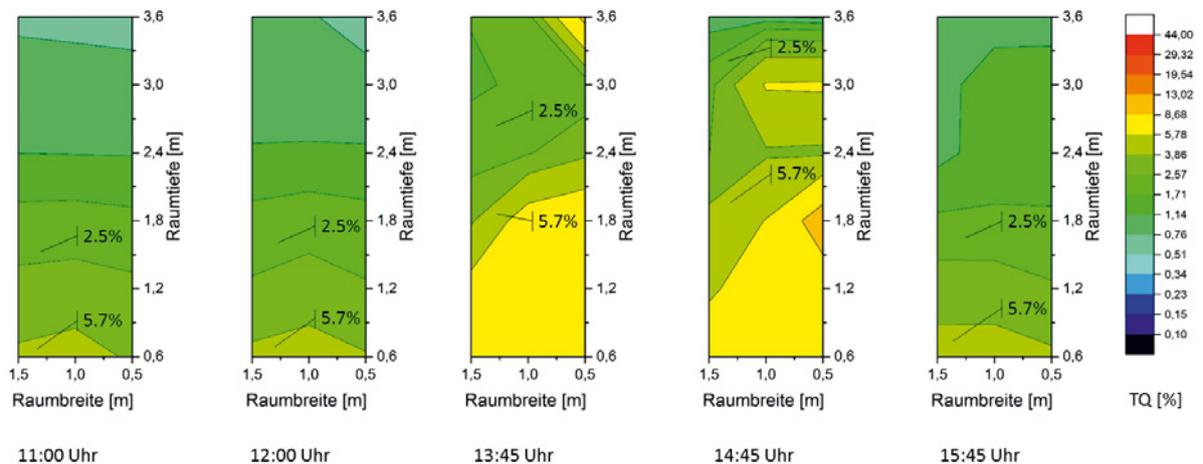


Abbildung 8-10: Tageslichtquotient im Tagesverlauf beim Einsatz von GLASSX®crystal (Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Wintertag (02.02.2016))



Die im Fassadenprüfstand eingebaute GLASSX®-Fassade bestand aus drei PCM Modulen, welche zu allen Messzeitpunkten größtenteils kristallisiert waren, wie in Abbildung 8-11 dargestellt. Durch den nicht kristallisierten Bereich mit einer höheren Lichttransmission ergaben sich im Testraum heller ausgeleuchtete Bereiche, deren Position vom Sonnenstand abhängig war.

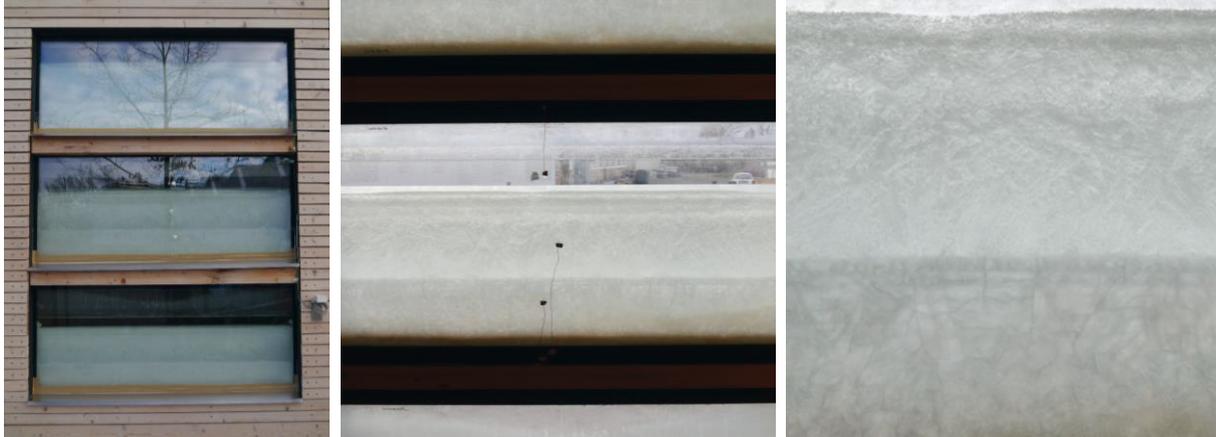


Abbildung 8-11: GLASSX®crystal im ILEK-Fassadenprüfstand an einem kalten Wintertag (12.02.2016). Links: Außenansicht, Mitte und rechts: Detailstudien des Phasenübergangs.

Wie im Kapitel 5.2.2.2 erläutert, wird nach DIN 5034-1 ein Tageslichtquotient von mindestens 2 % am Arbeitsplatz und mindestens 0,75 % in halber Raumtiefe und in 1 m Abstand von den Seitenwänden für Arbeitsräume gefordert. Darüber hinaus soll an Büroarbeitsplätzen eine Mindestbeleuchtungsstärke von 500 lx eingehalten werden, wobei ein Niveau von 300 lx in ausschließlich durch Tageslicht versorgten Arbeitsräumen als ausreichend erachtet wird. Am bewölkten Wintertag wurden lediglich im fassadennahen Bereich (bis zur Raumtiefe von ca. 1 m) die Mindestwerte für eine ausreichende Beleuchtungsstärke zu allen Messzeitpunkten erreicht. Der Tageslichtquotient lag an diesem Tag jedoch immer über dem Grenzwert.

Somit lässt sich an klaren Wintertagen und einem geringen Solarstrahlungsangebot ein hohes Potential des GLASSX®-Systems zur Unterstützung der Raumausleuchtung feststellen. An den meisten Messzeitpunkten wurden mit GLASSX®crystal als einzige Lichtquelle im Raum die normativen Mindestwerte der Raumhelligkeit für eine Arbeitsplatzanordnung im fassadennahen Bereich erreicht, obwohl eine Durchsicht im großen Teil der Fassade nicht gegeben war. Aufgrund des fehlenden Sichtbezuges nach außen zu Zeiten der großflächigen Kristallisation ist der Einsatz von GLASSX®crystal in Fassadenbereichen mit erforderlichem Bezug zum Außenraum problematisch. Zur Unterstützung der Raumausleuchtung durch transluzente Flächen erwies sich das System als sehr gut geeignet.



8.3 Steuerbare Systeme

8.3.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10

8.3.1.1 Blendung

Zur Detektierung des Blendungsrisikos beim Einsatz der ECONTROL®-Verglasung (EC) wurden die Häufigkeiten der DGP-Grenzwert-Überschreitung berechnet und in der nachfolgenden Abbildung 8-12 aufgetragen. Dargestellt sind die Ergebnisse im Vergleich zur Referenzverglasung 1 (REF) für drei untersuchte Nutzungsszenarien sowie für die vier Standorte. In die Auswertung wurden nur die Zeiten der Nutzeranwesenheit einbezogen. Die elektrochrome Verglasung wurde dabei nach der Strategie RS I angesteuert.

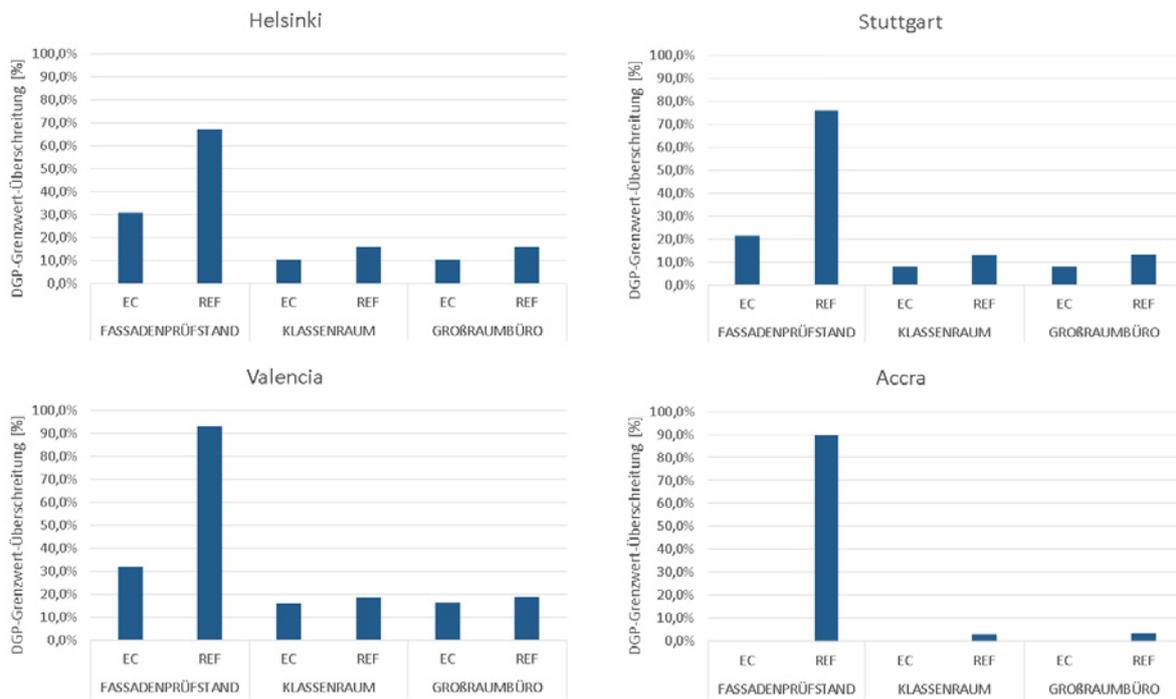


Abbildung 8-12: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts während der Nutzeranwesenheit (ECONTROL® smart 55/10 angesteuert nach Strategie RS I)

Die Übersichten zeigen, dass der Einsatz der ECONTROL®-Verglasung eine sehr gute Möglichkeit zur Verminderung von Blendung bietet, diese allerdings, mit Ausnahme von Accra, nicht komplett verhindert werden kann. Im Fassadenprüfstand treten stets häufigere Überschreitungen aufgrund der Blickrichtung des Nutzers auf. Im Fassadenprüfstand blickt dieser in Richtung Süden und somit direkt in die Blendquelle, während die Nutzer im Großraumbüro und im Klassenraum in Richtung Westen blicken und damit seitlich zur Blendquelle sitzen.

Maßgeblich für das Potential der Verglasung zur Verhinderung von Blendung ist der Zustand der minimalen Transmission. Daher wird in der folgenden Abbildung für die Nutzungsszenarien Fassadenprüfstand und Klassenraum die Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts beim ständigen Einsatz der Grenzzustände maximaler (Schaltstufe St 0) und minimaler Transmission (St 4) dargestellt. Diese wird mit der Häufigkeit verglichen, die sich anhand der festgelegten Regelstrategie I ergibt (RS 1).

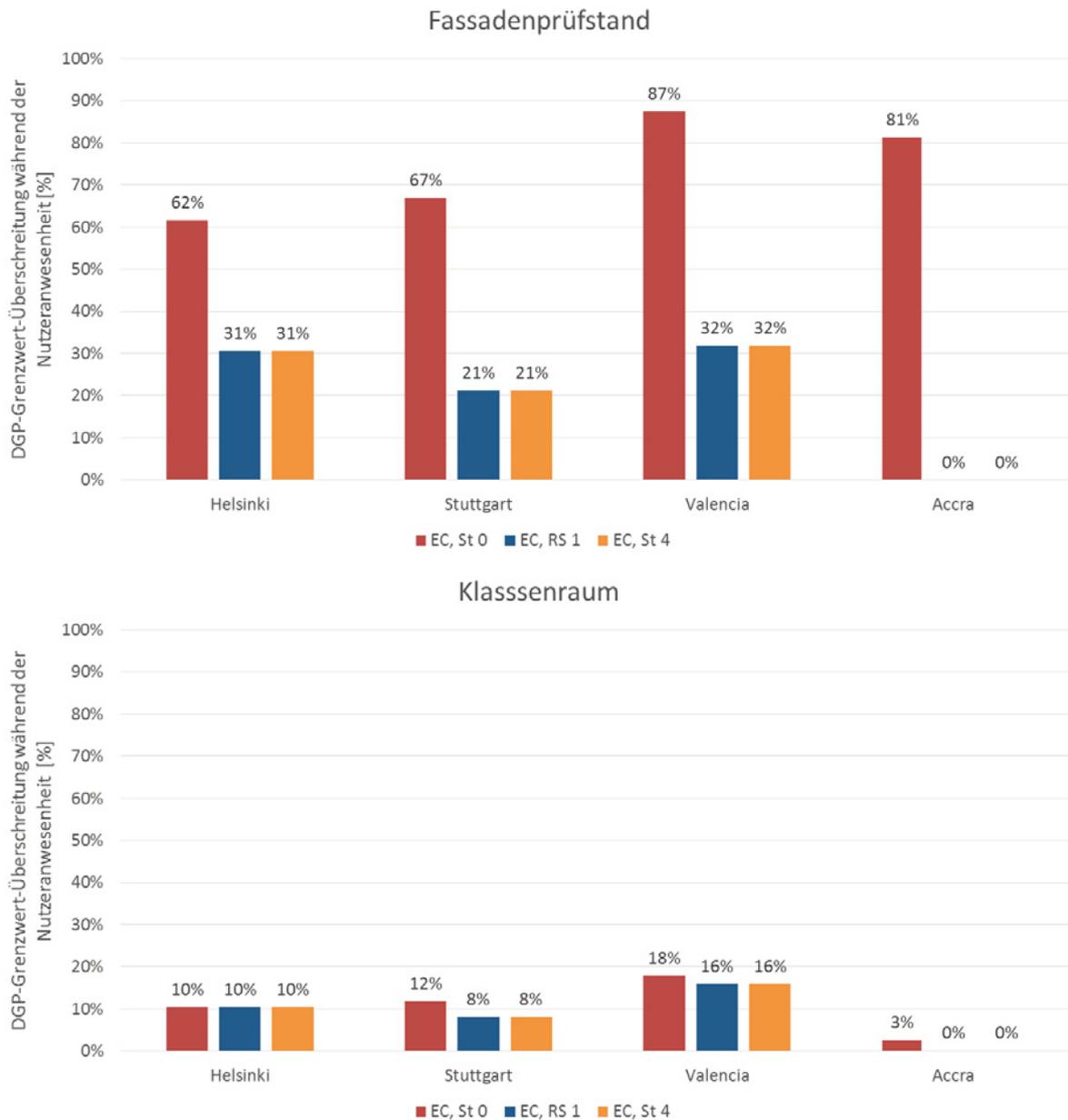


Abbildung 8-13: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts bei Anwesenheit des Nutzers (Strategie I (EC, RS 1), bei Einstellung der EC-Verglasung in den Schaltgrenzzuständen (EC, St 0 und EC, St 4))

Die aufgezeigten Häufigkeiten der Überschreitung des DGP-Grenzwerts belegen, dass die angewandte Regelstrategie RS I in Bezug auf die Vermeidung von Blendung bereits optimal ist. Die Regelung der elektrochromen Verglasung ermöglicht in allen Fällen die identische Blendhäufigkeit wie der Zustand minimaler Transmission. Eine vollständige Vermeidung der Blendung ist allerdings ohne weitere Blendschutzmaßnahmen an den meisten Standorten nicht möglich.

Experimentell wurden die Blendeffekte beim Einsatz der ECONTROL®-Verglasung beispielhaft mit der Leuchtdichtekamera evaluiert, wie in Abbildung 8-14 für den Zustand maximaler Transmission dargestellt.

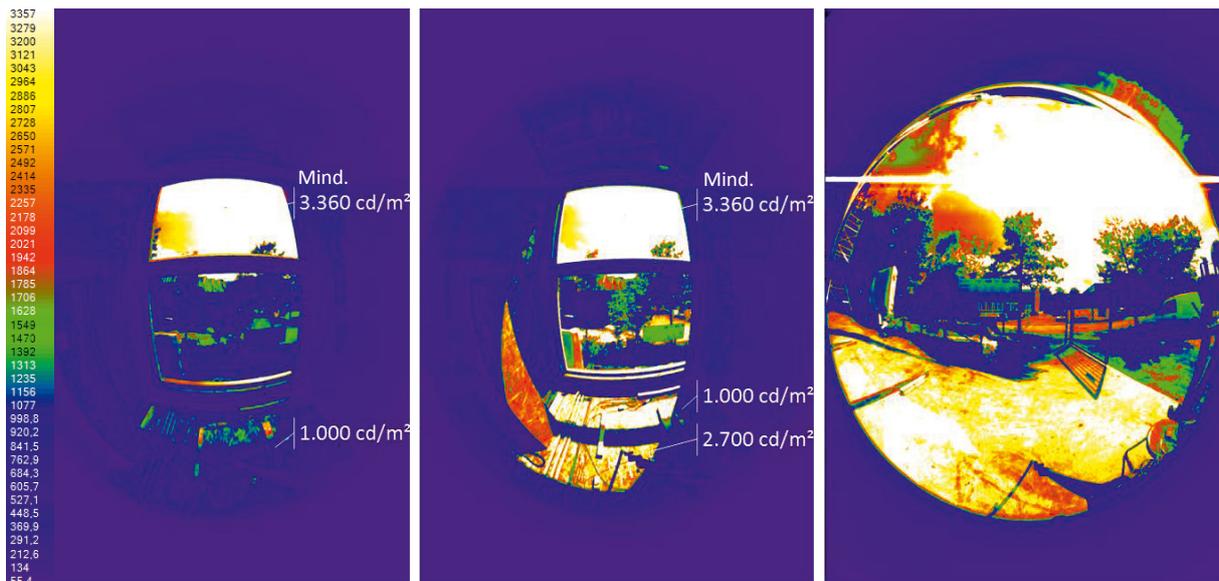


Abbildung 8-14: Messungen der Leuchtdichteverteilung (Abdunklungsstufe 0, Fassadenprüfstand, Stuttgart, wechselhafter Frühlingstag (25.05.2016)). Links: Innenraumaufnahme bei Bewölkung, Mitte: Innenraumaufnahme beim klaren Himmel, rechts: Außenaufnahme beim klaren Himmel.

Unter sowohl sonnigen als auch bewölkten Bedingungen zeigen die Messbilder relativ hohe Leuchtdichtekontraste von über 1:10 im fassadennahen Bereich. Um die hohen Leuchtdichten des Fensters genau bestimmen zu können, war eine Messvorrichtung mit einem sehr großen Dynamikumfang notwendig. Hierfür wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit am ILEK [64] eine Spiegelreflexkamera Canon EOS 600D entsprechend kalibriert und zur softwaregestützten Ermittlung der Leuchtdichte verwendet. Ein Vergleich der Leuchtdichteverteilung beim Zustand maximaler und minimaler Transmission der ECONTROL®-Verglasung an einem sonnigen Sommertag ist in Abbildung 8-15 dargestellt.



Abbildung 8-15: Messungen der Leuchtdichteverteilung (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Sommertag, 13:30 Uhr, Außenbeleuchtungsstärke ca. 90 klx). Oben: Aufnahmen mit Blickrichtung nach Süden, unten: Aufnahmen mit Blickrichtung nach Westen. Links: Abdunklungsstufe 0, rechts: Abdunklungsstufe 4 der ECONTROL®-Verglasung.



Insbesondere in Bereichen der direkt besonnten Arbeitsfläche und des Himmels sind beim Zustand maximaler Transmission der ECONTROL®-Verglasung (Abdunklungsstufe 0) an sonnigen Sommertagen sehr hohe Leuchtdichtewerte zu erwarten. Diese betragen bei der abgebildeten Messreihe entsprechend ca. 7.500 cd/m² (Himmel) bis zu 15.000 cd/m² (weiße, stark reflektierende Arbeitsfläche). Dies entspricht Leuchtdichtekontrasten von bis zu 11:1 (Himmel- zur Dokument-Leuchtdichte) und 23:1 (Arbeitsfläche- zur Dokument-Leuchtdichte). Durch die Abdunklung der Verglasung in den Zustand minimaler Transmission (Abdunklungsstufe 4) wurden die Leuchtdichtekontrastwerte nur unwesentlich verändert, die maximalen Absolutwerte der Leuchtdichte befanden sich jedoch im komfortablen Bereich (Arbeitsflächenleuchtdichte unter 5.000 cd/m², Himmelsleuchtdichte unter 3.000 cd/m²). Dies lässt auf die Fähigkeit der ECONTROL®-Verglasung zur Reduzierung der potentiell blendungserregenden Leuchtdichten schließen. Darüber hinaus wird der Einfluss der Raumflächen deutlich erkennbar. Durch den Einsatz hoch reflektierender Flächen können im Raum viel höhere Leuchtdichten entstehen als im Fensterbereich, welche durch die Verglasungseigenschaften nur in geringem Maße reduziert werden können, ohne zur Komfortminderung in anderen Raumbereichen zu führen. Die Wahl der Raummaterialien ist somit von gleich großer Wichtigkeit wie die Wahl des Verglasungssystems. Empfehlungen hierzu finden sich in der Norm DIN EN 12464-1.

8.3.1.2 Tageslichtnutzung

Um die Versorgung der Räume mit Tageslicht durch die ECONTROL®-Verglasung im Jahresverlauf zu evaluieren, wurde das Schaltverhalten des Systems detailliert betrachtet. In den folgenden Diagrammen sind die berechneten Häufigkeiten der einzelnen Abdunklungsstufen dargestellt, die mit Regelungsstrategie I in drei Nutzungsszenarien sowie für vier untersuchte Standorte ermittelt wurden. Der Wert oberhalb der einzelnen Säulen stellt die Summe der visuellen Transmission der einzelnen Abdunklungsstufen gewichtet nach ihrer Häufigkeit dar (durchschnittlicher Lichttransmissionsgrad bei den gegebenen Randbedingungen).

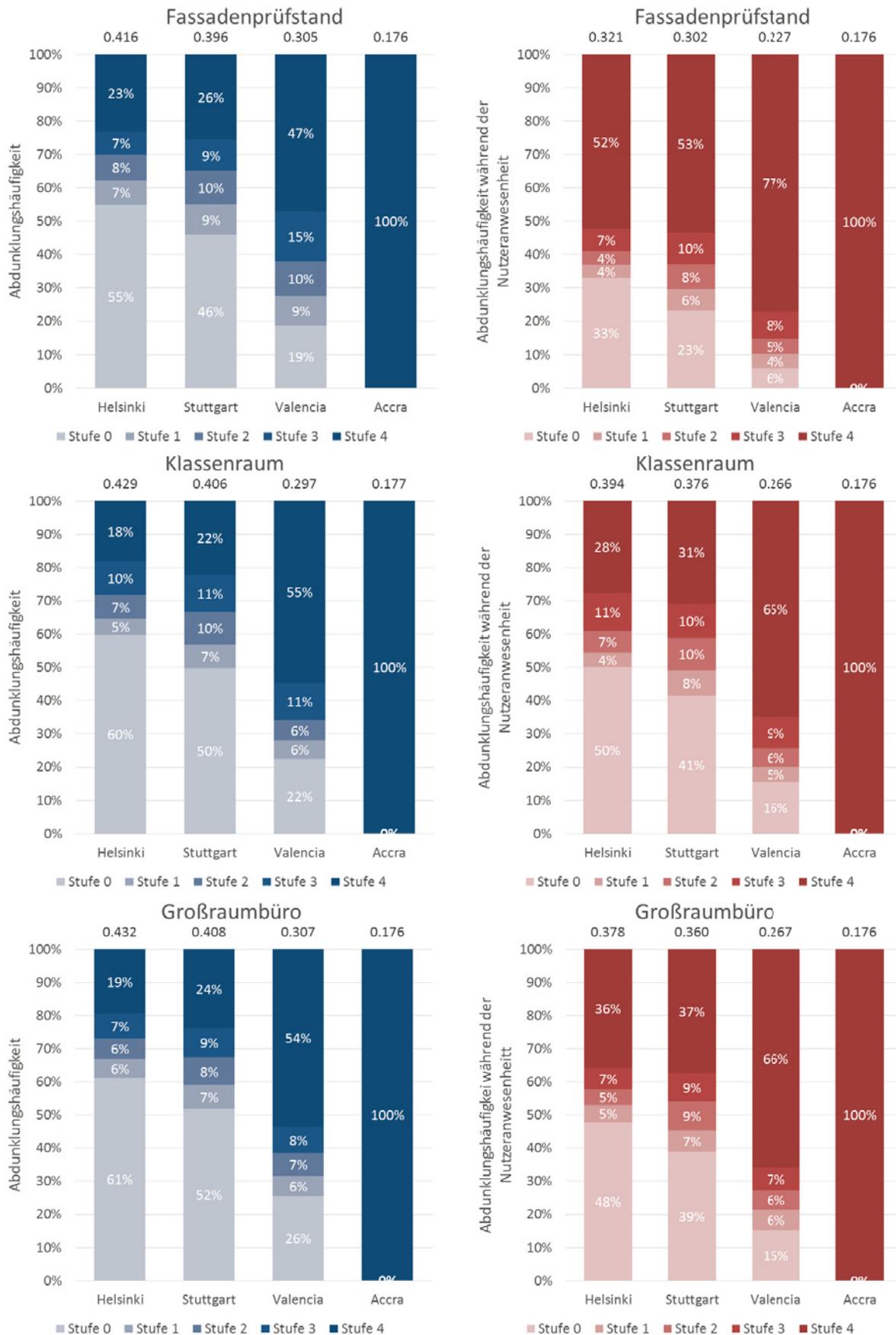


Abbildung 8-16: Abdunklungshäufigkeiten der nach RS I angesteuerten ECONTROL®-Verglasung während des Jahres. Links: über das gesamte Jahr, rechts: während der Nutzungszeiten.



Die einzelnen Diagramme in Abbildung 8-16 zeigen deutlich die Auswirkung des Standorts auf die Häufigkeit der einzelnen Abdunklungsstufen bei Anwendung der Regelungsstrategie I. Für die Häufigkeit der Abdunklungsstufe 0 ergibt sich ein ausgeprägtes Gefälle je weiter südlich der Standort liegt. Umgekehrt verhält es sich für die Abdunklungsstufe 4, deren Häufigkeit in Nord-Süd-Richtung der Standorte ansteigt. In Accra befindet sich die ECON-TROL®-Verglasung stets im komplett abgedunkelten Zustand. Dieses Verhalten ist für alle Nutzungsszenarien zu beobachten, unabhängig davon, ob das gesamte Jahr oder nur die Anwesenheitszeit des Nutzers betrachtet wird. Die Adaptivität der Verglasung wird an diesem Standort bei Anwendung der RS I nicht ausgenutzt.

In der nachfolgenden Abbildung 8-17 ist die Analyse der Abdunklungshäufigkeiten beim Einsatz der Regelungsstrategie III beispielhaft für Stuttgart und Accra im Fassadenprüfstand dargestellt. Wie im Kapitel 6.3 erläutert, wird bei der Strategie III eine Zweiteilung der Verglasung in ein Blendschutzfeld (oberer Verglasungsbereich) und ein Beleuchtungsfeld (unterer Verglasungsbereich) angewendet. In der nachfolgenden Abbildung werden die Helligkeitskombinationen beim maximal aufgehellten Beleuchtungsfeld in Stuttgart differenziert dargestellt. Sonstige Kombinationen werden nach der Helligkeit des unteren Feldes zusammengefasst¹⁵. Der Wert oberhalb der einzelnen Säulen stellt die Summe der visuellen Transmission der einzelnen Abdunklungsstufen gewichtet nach ihrer Häufigkeit dar.

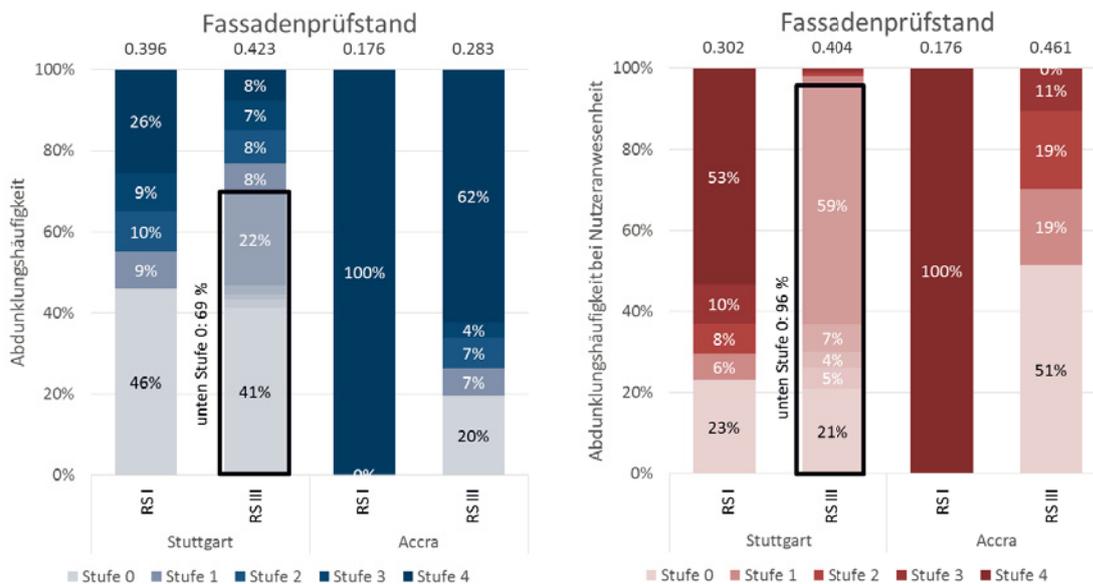


Abbildung 8-17: Abdunklungshäufigkeiten der ECONCONTROL®-Verglasung während des Jahres in Stuttgart und Accra. Links: über das gesamte Jahr, rechts: während der Nutzungszeiten. Vergleich der Strategien RS I und RS III.

Wie erwartet, bewirkt die Anwendung der Regelstrategie III in allen betrachteten Fällen eine insgesamt „heller“ eingestellte Verglasung. Die Veränderung während des gesamten Jahres resultiert ausschließlich aus den veränderten Häufigkeiten während der Anwesenheitszeit des Nutzers. Zu Zeiten, während deren der Nutzer nicht anwesend ist, wird das Glas weiterhin ausschließlich nach der Innenraumtemperatur angesteuert. Am Standort Stuttgart führt die Regelstrategie III während der Arbeitszeiten zu einer nahezu ständigen Schaltung des unteren Fensterfeldes in die Abdunklungsstufe 0. Am häufigsten tritt mit 59 % folgender Schaltzustand ein: Das untere Feld der Verglasung befindet sich im Zustand maximaler Transmission, um zur Tageslichtnutzung beizutragen und das obere Feld der Verglasung befindet sich im Zustand minimaler Transmission, um den Nutzer vor Blendung zu schützen.

¹⁵ Beginnend bei dem Wert der Ordinate von 0 % sind folgende Helligkeitskombinationen abgetragen: 00 („komplett hell“), 10 („oben Stufe 1, unten Stufe 0“), 20 („oben Stufe 2, unten Stufe 0“), 30 („oben Stufe 3, unten Stufe 0“), 40 („oben Stufe 4, unten Stufe 0“), x1 („oben alle vorkommenden Stufen zusammengefasst, unten Stufe 1“), x2 („oben alle vorkommenden Stufen zusammengefasst, unten Stufe 2“), x3 („oben alle vorkommenden Stufen zusammengefasst, unten Stufe 3“), x4 („oben alle vorkommenden Stufen zusammengefasst, unten Stufe 4“).



Am Standort Accra führte die zuvor betrachtete Regelstrategie I zu einer permanenten Nutzung des Zustands minimaler Transmission. Die Anwendung der Regelstrategie III schafft hier Abhilfe, sodass nun alle Abdunklungsstufen eingesetzt werden. Über das gesamte Jahr betrachtet bleibt weiterhin die Abdunklungsstufe 4 mit jeweils 62 % der häufigste Schaltzustand der betrachteten elektrochromen Verglasung in Accra.

Diese Schaltcharakteristik spiegelt sich in der Tageslichtautonomie, deren Werte für die vier analysierten Standorte nachfolgend abgebildet sind.

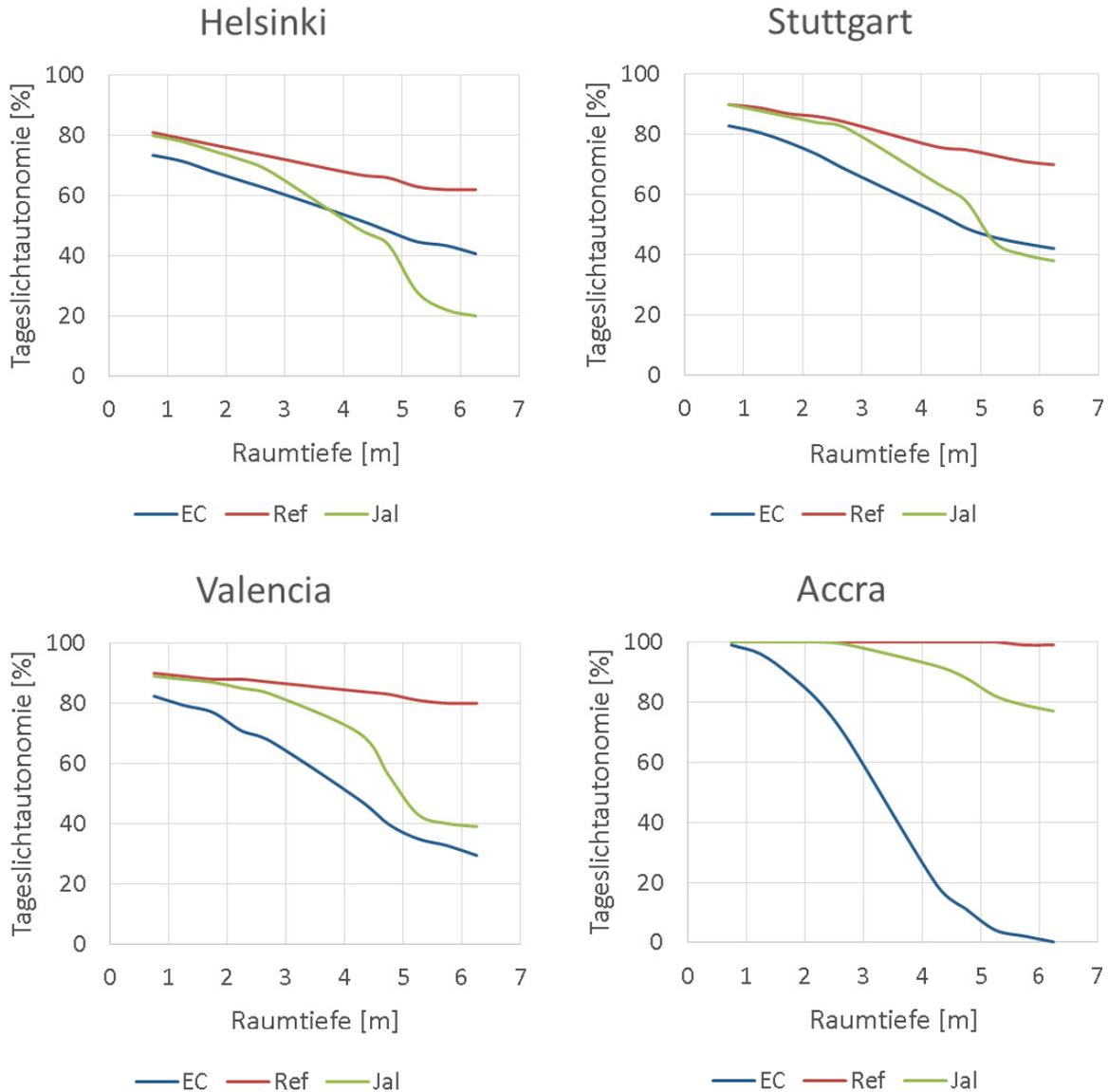


Abbildung 8-18: Tageslichtautonomie, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum, für ECONTROL®-Verglasung angesteuert nach Strategie RS I (EC), Referenzverglasung 1 (Ref) und Referenzverglasung 3 (Jal).

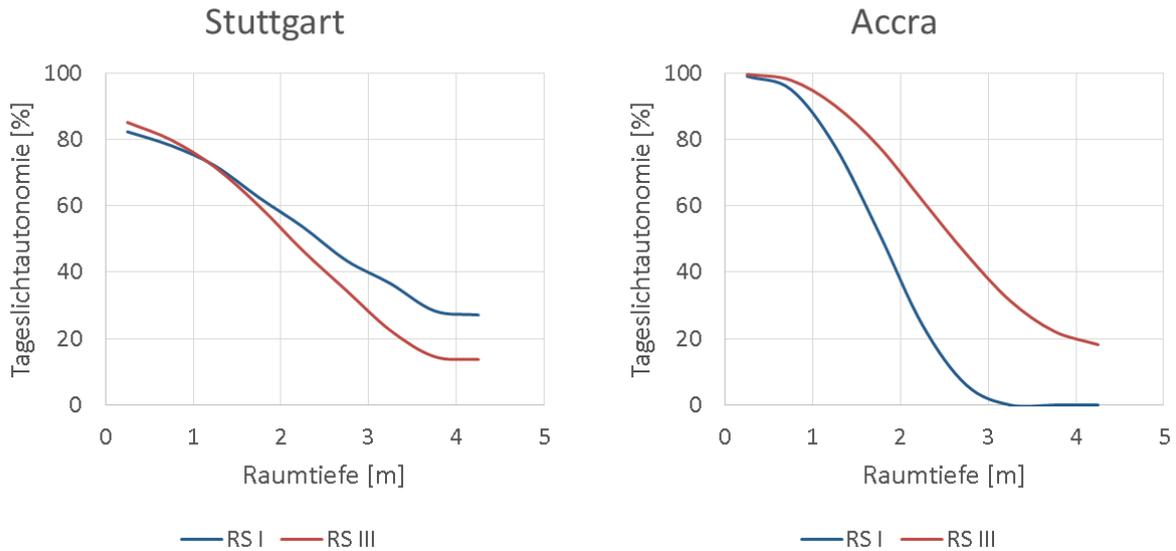


Abbildung 8-19: Tageslichtautonomie beim Einsatz der ECONTROL®-Verglasung – Vergleich der Strategien RS I und RS III in Stuttgart und Accra

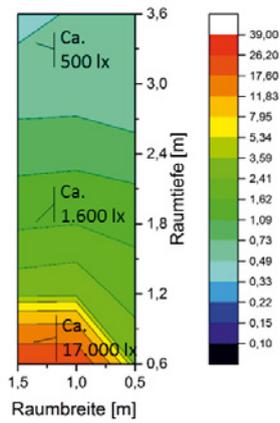
Die nach der Strategie I angesteuerte ECONTROL®-Verglasung ermöglicht an allen Standorten recht hohe Tageslichtautonomien und somit eine gute Tageslichtnutzung. In Helsinki variieren die Werte von 73 % am südlichen Rand der Arbeitsfläche bis hin zu 41 % in 6 m Raumtiefe. In Stuttgart, Valencia und Accra werden am südlichen Rand weiterhin Werte über 80 % erreicht. Die Tageslichtautonomie nimmt jedoch bei höheren Raumtiefen deutlich ab, in Stuttgart sinkt sie auf 42 %, in Valencia auf 30 % und in Accra auf 0 %.

Am Standort Stuttgart führen die Teilung der Verglasung und die Anwendung der Strategie III zu einer verbesserten Tageslichtautonomie in der Fensternähe. Jedoch bereits in einem Drittel der Raumtiefe ist diese Verbesserung nicht mehr gegeben. Da besonders in Fensternähe die Tageslichtnutzung stark von der Höhe der Öffnung abhängig ist, würde eine Drei-Teilung des Fensters eine Möglichkeit darstellen, eine verbesserte Tageslichtnutzung in der Raumtiefe zu bewirken.

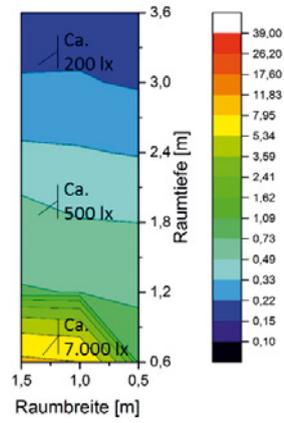
In Accra hingegen verbessert sich die Tageslichtautonomie bei Anwendung der Regelstrategie III merklich. Während der obere Fensterbereich am Standort Stuttgart häufig zur Blendungsreduzierung abgedunkelt wird, tritt in Accra dieser Effekt aufgrund der höheren Sonnenstände nicht ein. Durch die Einbeziehung des Parameters Beleuchtungsstärke in die Regelungsstrategie wird dort die Tageslichtversorgung des Raums verbessert.

Die Raumhelligkeitsverteilung unter verschiedenen Wetterbedingungen und Schaltzuständen der ECONTROL®-Verglasung wurde für den Standort Stuttgart experimentell im Fassadenprüfstand validiert. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Messergebnisse der Beleuchtungsstärkemessung und der Tageslichtquotientenermittlung im Testraum 1.2. an sonnigen und bewölkten Frühlingstagen visualisiert. Die Beleuchtungsstärkewerte wurden auf der horizontalen Ebene, auf der Höhe von 75 cm über dem Fußboden erfasst und sind nachfolgend in Grundrissen dargestellt. Gemessen wurde im Raster von 50 cm (in Richtung Raumbreite) und 60 cm (in Richtung Raumtiefe). Zur Berechnung des Tageslichtquotienten¹⁶ wurden die auf diese Weise erfassten Beleuchtungsstärkewerte im Innenraum und die Außenbeleuchtungsstärkewerte auf die Horizontale vor der Fassade herangezogen.

¹⁶ Verhältnis der Innenbeleuchtungsstärke zur Außenbeleuchtungsstärke beim bewölkten Himmel

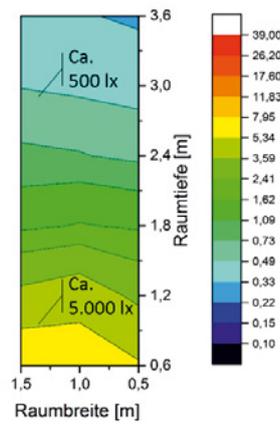


Abdunklungsstufe 0
Sonniger Frühlingtag (21.04.2016)
11:45 Uhr

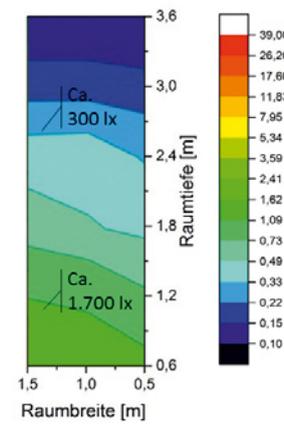


Abdunklungsstufe 4
Sonniger Frühlingtag (04.05.2016)
11:50 Uhr

Abbildung 8-20: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Fassadenprüfstand beim Einsatz von ECON-TROL® smart 55/10 (Stuttgart, sonniger Frühlingtag, Beleuchtungsstärke außen: 114 klx – 120 klx)



Abdunklungsstufe 0
Bewölkter Frühlingtag (04.04.2016)
13:15 Uhr



Abdunklungsstufe 4
Bewölkter Frühlingtag (21.06.2016)
12:35 Uhr

Abbildung 8-21: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Fassadenprüfstand beim Einsatz von ECON-TROL® smart 55/10 (Stuttgart, bewölkter Frühlingtag, Beleuchtungsstärke außen: 32 klx – 40 klx)

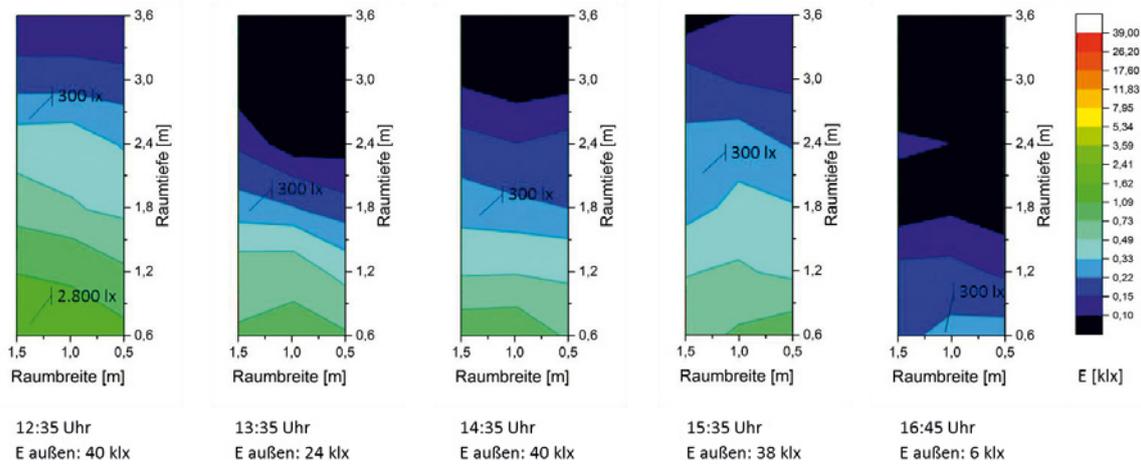


Abbildung 8-22: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Tagesverlauf beim Einsatz von ECONTROL® smart 55/10 (Abdunklungsstufe 4, Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Sommertag (21.06.2016))

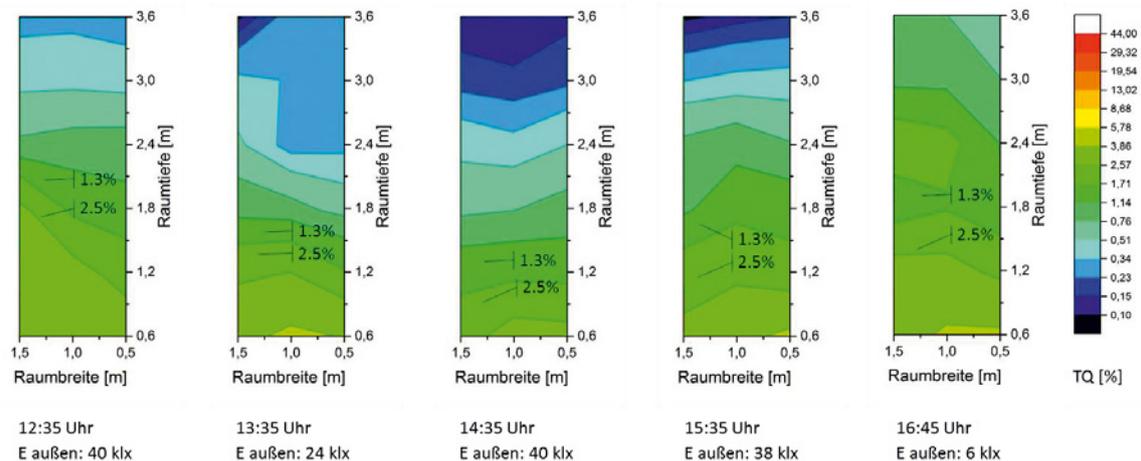


Abbildung 8-23: Tageslichtquotient im Tagesverlauf beim Einsatz von ECONTROL® smart 55/10 (Abdunklungsstufe 4, Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Sommertag (21.06.2016))

Beim Zustand maximaler Transmission der elektrochromen Verglasung (Stufe 0) wird sowohl an sonnigen als auch an bewölkten Frühlingstagen eine sehr gute Raumausleuchtung gewährleistet, wie die Abbildung 8-20 und Abbildung 8-21 (links) belegen. Beim Zustand minimaler Transmission (Stufe 4, Abbildung 8-20 und Abbildung 8-21 rechts) wird das Helligkeitsniveau im Raum erheblich reduziert. Sogar am sonnigen Tag des 04.05.2016 fällt die Beleuchtungsstärke in der Raummitte unter 500 lx. Das sowohl am sonnigen als auch am bewölkten Tag bis zur Raumtiefe von ca. 2,6 m erreichte Niveau von 300 lx wird allerdings nach DIN 5034-1 als ausreichend für ausschließlich mit Tageslicht beleuchtete Räume erachtet. Größere Raumtiefen werden bei einer maximal abgedunkelten ECONTROL®-Verglasung nicht ausreichend für eine Bürotätigkeit ausgeleuchtet. Erwähnenswert ist jedoch, dass in der vollen Raumtiefe zur Mittagszeit eine Beleuchtungsstärke > 100 lx gegeben ist, die gemäß DIN 12464-1 für Hintergrundbereiche und Verkehrszonen im Büro zugelassen ist.

Der für Arbeitsräume geforderte Tageslichtquotient von 0,75 % in Raummitte bei einem Abstand zu den Seitenwänden von 1 m wird zu jedem Zeitpunkt erreicht. Der für die Arbeitsplätze vorgesehene Tageslichtquotient von 2 % wird zu allen fünf Messzeitpunkten des Tages bis zur Raumtiefe von ca. 2 m eingehalten.



8.3.2 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic

8.3.2.1 Blendung

Die Analyse der Häufigkeiten der DGP-Grenzwertüberschreitung für SageGlass® classic (SAGE) wird in Abbildung 8-24 abgebildet. Zum Vergleich werden die entsprechenden Werte für die Referenzverglasung 1 (REF) aufgetragen.

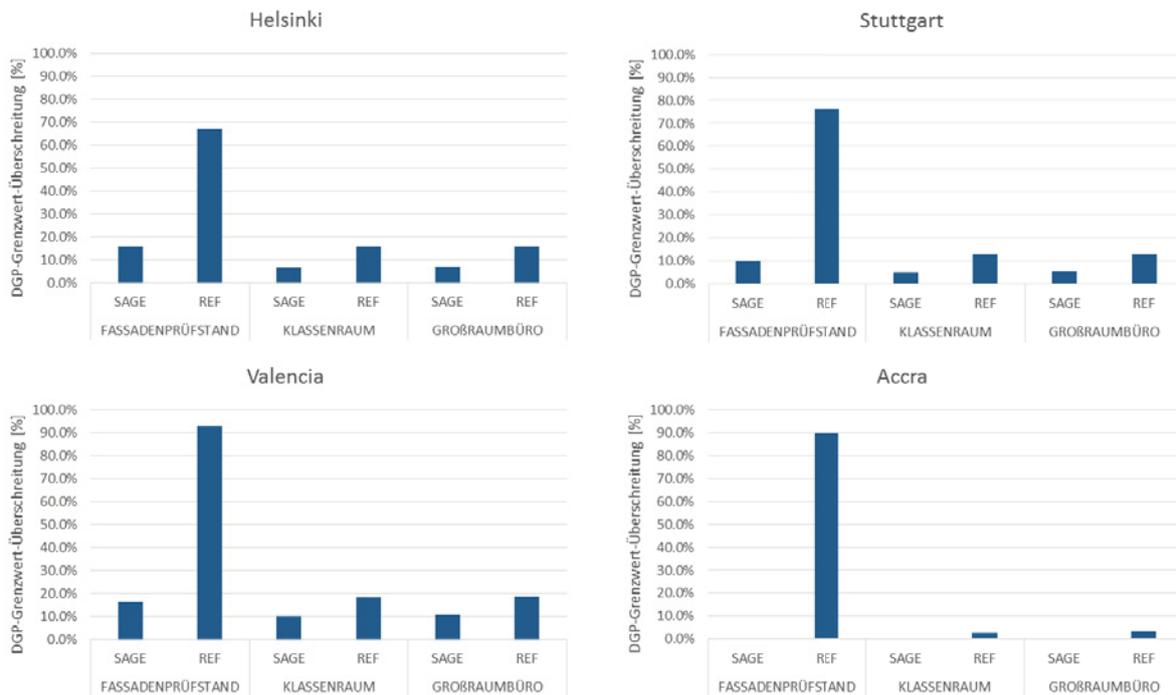


Abbildung 8-24: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts während der Nutzeranwesenheit (Strategie I (T-DGP))

Während der Zeiten, in denen prinzipiell Blendung auftreten kann, soll die elektrochrome Verglasung durch Abdunklungsvorgänge in der Lage sein, den Nutzer hinreichend vor Blendung zu schützen. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die SageGlass®-Verglasung ein besonders hohes Potential zur Vermeidung von Blendung besitzt, da der DGP-Grenzwert beim Einsatz dieser Verglasung äußerst selten überschritten wird. Grund hierfür ist die niedrige visuelle Transmission dieser Verglasung im abgedunkelten Zustand von 1 %. Die visuelle Transmission der Referenzverglasung beträgt im Vergleich dazu 70 %.

Die aufgeführten Simulationsergebnisse entstanden bei der Ansteuerung der Verglasung nach der Strategie RS I. Der Einfluss der Regelungsstrategie auf die Ergebnisse wurde durch die Berechnung der entsprechenden Häufigkeiten im Bezug auf die Grenzzustände der Verglasung untersucht. Wie aus der nachfolgenden Abbildung 8-25 ersichtlich wird, können die Blendungshäufigkeiten auch bei einer durchgehend maximalen Abdunklung der Verglasung nicht weiter reduziert werden. Somit ist die Regelungsstrategie bezüglich der Blendungsminimierung optimal.

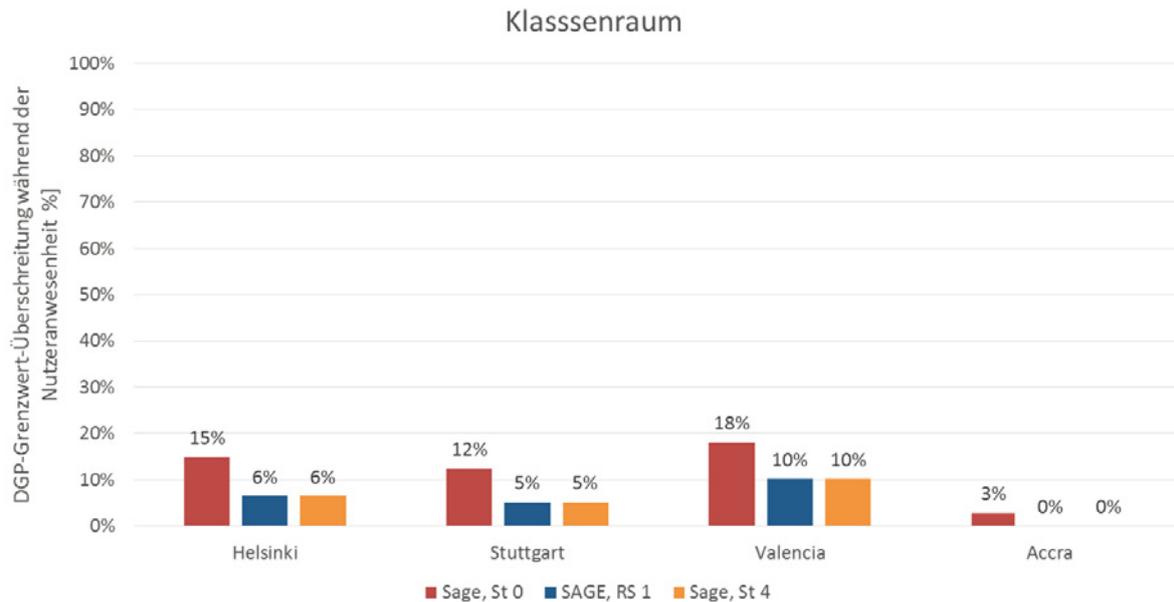


Abbildung 8-25: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts bei Anwesenheit des Nutzers (Strategie I (RS I), in Bezug auf die Grenzzustände der Verglasung (St 0 und St 4))

Experimentell wurden die Blendungseffekte beim Einsatz von SageGlass® mithilfe der Leuchtdichtekamera evaluiert. Zwei gleich große elektrochrome Verglasungen mit der Möglichkeit einer Dreiteilung in der vertikalen Richtung wurden in die Fensteröffnung des Testraums 1.1. des Fassadenprüfstands eingebaut, wie in Abbildung 8-26 (links) abgebildet. Als Vergleich zum Testraum 1.1. diente ein Referenzraum mit der Referenzverglasung 2.



Abbildung 8-26: Testaufbau im Fassadenprüfstand. Links: Testraum 1.1. mit SageGlass® während des Abdunklungsvorgangs, rechts: Referenzraum mit Referenzverglasung 2 an einem sonnigen Herbsttag 29.09.2016

Die erfassten Leuchtdichteverteilungen beim Einsatz der Sage-Verglasung und der Referenzverglasung 2 sind in Abbildung 8-27 dargestellt. Die rechts eingebaute Sage-Verglasung wurde zur besseren Veranschaulichung der Auswirkungen im Zustand maximaler Transmission belassen, die links eingebaute Sage-Verglasung wurde manuell maximal dunkel geschaltet.

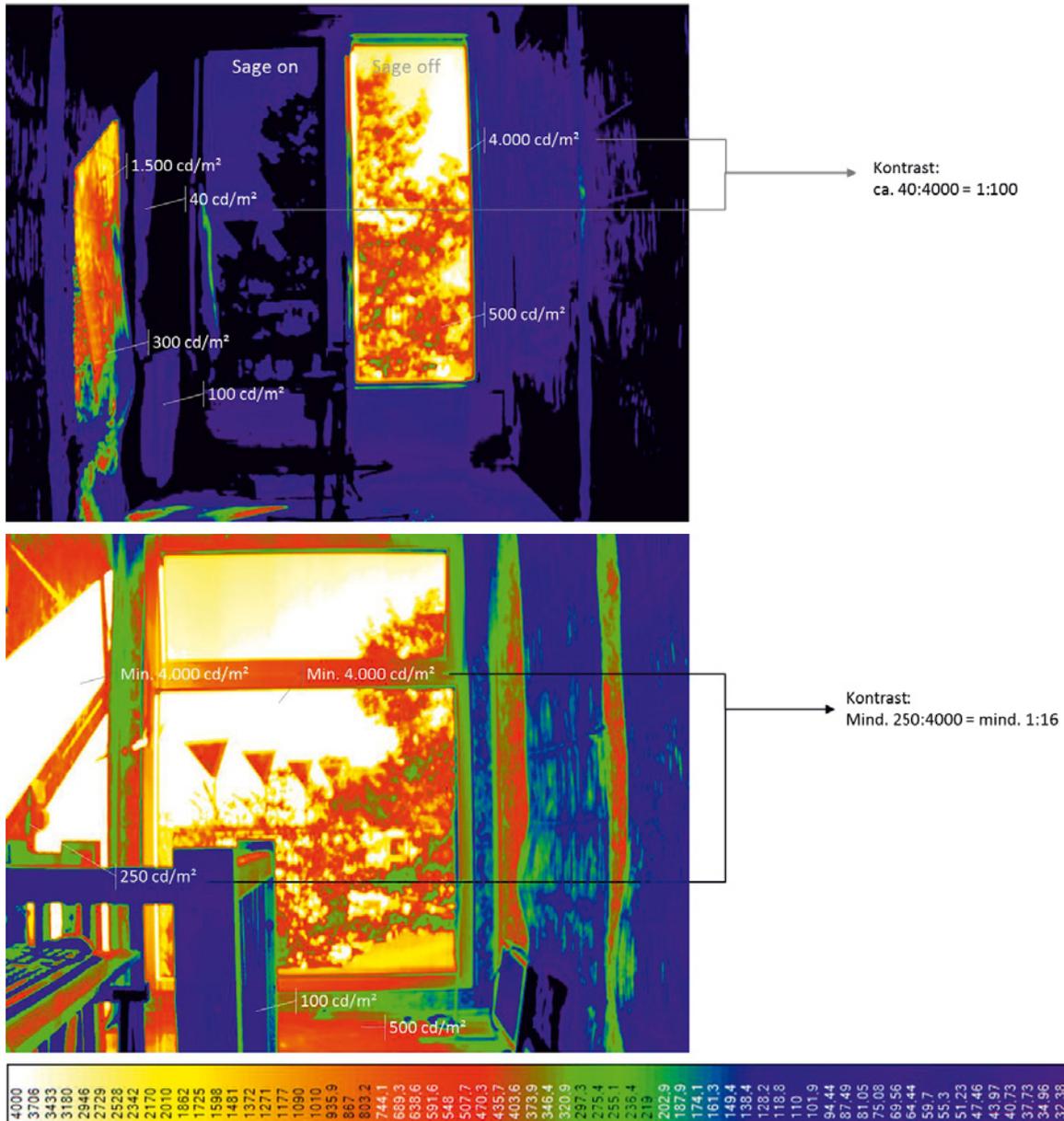


Abbildung 8-27: Messungen der Leuchtdichteverteilung (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Herbsttag (29.09.2016)). Oben: Testraum 1.1. ausgestattet mit SageGlass® (rechte Scheibe im Zustand maximaler Transmission, linke Scheibe im Zustand minimaler Transmission), unten: Referenzraum.

Die im Referenzraum gemessenen Leuchtdichten lagen zum großen Teil oberhalb des komfortablen Bereichs (s. Überbelichtungseffekte oberhalb von 4.000 cd/m² in Abbildung 8-27). Im Referenzraum konnten sowohl Blendeffekte aufgrund von zu hohen Leuchtdichten als auch von hohen Leuchtdichteunterschieden festgestellt werden. Aufgrund der Abdunklung der Sage-Verglasung kann eine bedeutende Leuchtdichtenreduktion erreicht werden. Bei einem direkten Strahlungseinfall können die Leuchtdichten der Raumumschließungsflächen durch den Schaltvorgang vom Zustand maximaler Transmission in den Zustand minimaler Transmission um den Faktor 3 bis 38 reduziert werden. Wird nur ein Teil der transparenten Flächen dunkel geschaltet, so ergeben sich jedoch starke Leuchtdichtekontraste innerhalb des angenommenen Sichtfelds (bis zu 1:100), welche auf die notwendige sorgfältige Auswahl der schaltbaren Verglasungsbereiche hinweisen. Insgesamt haben die durchgeführten Leuchtdichtemessungen eine effektive Blendschutzfunktionalität der Sage-Verglasung aufgezeigt.



8.3.2.2 Tageslichtnutzung

Im Jahresverlauf gestalten sich die Abdunklungshäufigkeiten des nach Strategie RS I angesteuerten SageGlass® classic wie in den folgenden Diagrammen dargestellt. Der Wert oberhalb der einzelnen Säulen stellt die Summe der visuellen Transmission der einzelnen Abdunklungsstufen gewichtet nach ihrer Häufigkeit dar. Dabei wurde die Verglasung als ganzflächig gleich geschaltet simuliert.

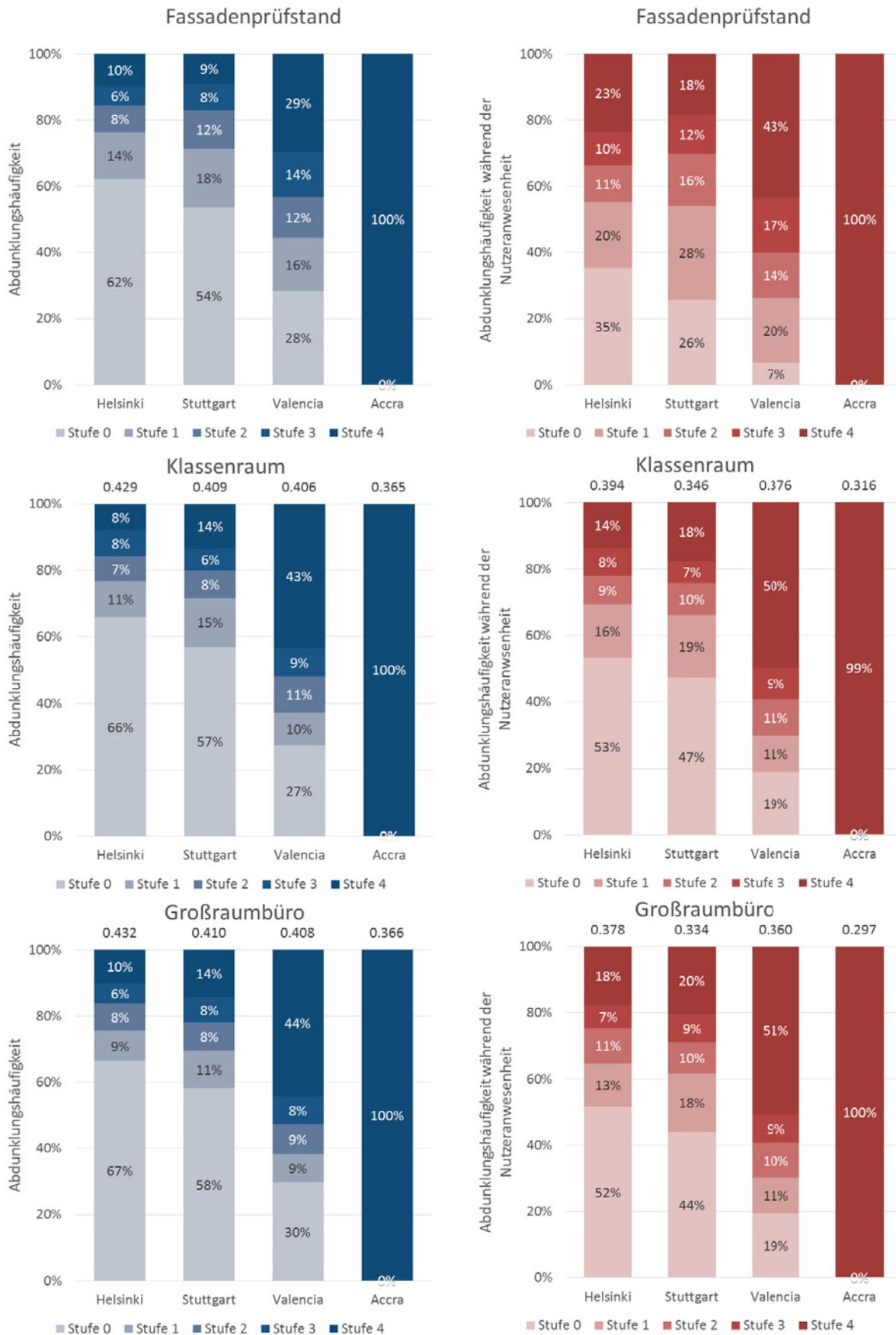


Abbildung 8-28: Abdunklungshäufigkeiten der nach Strategie RS I angesteuerten SageGlass® classic-Verglasung während eines Jahres. Links: gesamtes Jahr, rechts: während der Nutzungszeiten.



Die Häufigkeit der Abdunklungsstufe 0 steigt an nördlichen Standorten an, die Häufigkeit der Abdunklungsstufe 4 steigt dagegen an den südlichen Standorten an. Am Standort Accra befindet sich die Verglasung stets im komplett abgedunkelten Zustand. Auch in Valencia ist dies für ca. 50 % der Nutzungsstunden der Fall.

Ausgehend von den auftretenden Häufigkeiten der einzelnen Abdunklungsstufen wurden für die Sage-Verglasung (S) die Tageslichtautonomieprofile an allen Standorten, beispielhaft für das Nutzungsszenario Klassenraum berechnet. In Abbildung 8-29 wurden diese im Vergleich mit der Referenzverglasung 1 (Ref) und der Referenzverglasung 3 (Jal) aufgetragen.

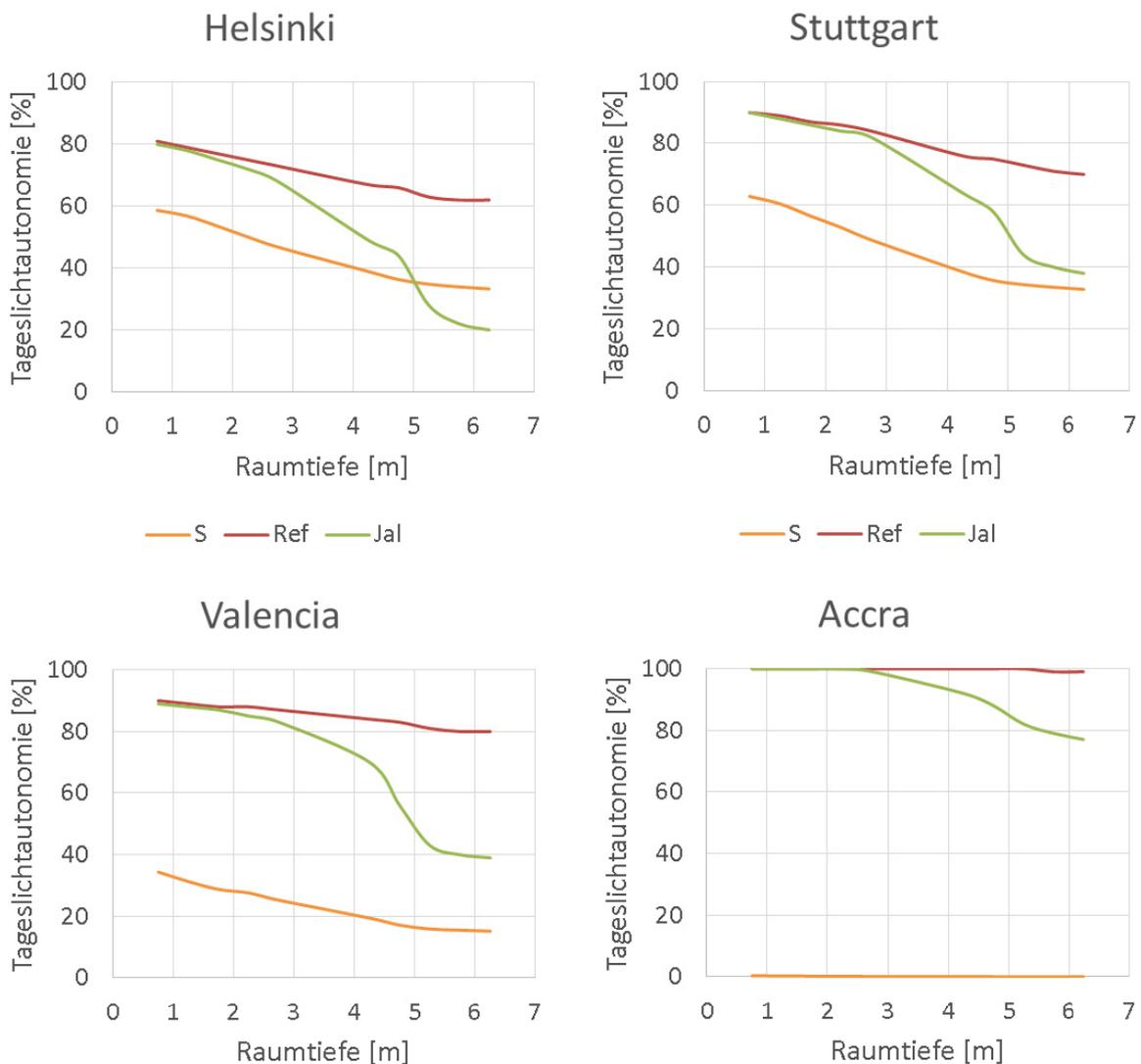


Abbildung 8-29: Tageslichtautonomie, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum, für SageGlass®-Verglasung angesteuert nach Strategie RS I bei ganzflächig gleicher Abdunklung (S), Referenzverglasung 1 (Ref) und Referenzverglasung 3 (Jal).

Bei der nach Strategie RS I angesteuerten SageGlass® classic-Verglasung zeigen sich relativ niedrige Tageslichtautonomie-Werte. In Helsinki und Stuttgart wird am angenommenen nördlichen Rand der Arbeitsfläche in 6 m Raumtiefe der empfohlene Minimalwert von 30 % gerade noch eingehalten. In Valencia wird dieser bereits bei 2,0 m Raumtiefe unterschritten. In Accra beträgt die Tageslichtautonomie über die gesamte Raumtiefe betrachtet stets weniger als 1 %. Die dargestellten Werte spiegeln den hohen Beleuchtungsenergiebedarf des Raums beim Einsatz der SageGlass®-Verglasung unter der Strategie RS I im Vergleich zur konventionellen Referenzverglasung und zur Referenzverglasung mit externem Sonnenschutz wieder. Es bleibt festzuhalten, dass die nach



der im Projekt definierten Regelungsstrategie angesteuerte SageGlass®-Verglasung im Bezug auf Blendungsfreiheit zwar sehr gute Ergebnisse erzielt, unter dem Aspekt der Tageslichtnutzung jedoch Optimierungspotential aufweist. Hier bietet sich eine Zonierung in unabhängig voneinander ansteuerbare Segmente an. Dieser Ansatz wird mittlerweile vom Hersteller verfolgt.

8.3.2.3 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic – ergänzende Untersuchungen (Optimierungsansatz)

Wie im Kapitel 7.2.2.1 erläutert, wurde ein Ansatz zur Verbesserung der Tageslichtausnutzung durch die Linearisierung des Schaltprofils der Sage-Verglasung untersucht. Demnach ist die berechnete Transmission der Verglasung in den Stufen 1 bis 3 höher als bei der ursprünglichen Verglasung. Die Auswirkungen dieses Optimierungsansatzes auf die Tageslichtausnutzung in den simulierten Räumen werden nachfolgend dargestellt.

In Abbildung 8-30 wird das Schaltverhalten der modifizierten Verglasung (SAGE opt) im Vergleich zur ursprünglichen SageGlass® classic-Verglasung (SAGE) für die jeweiligen Nutzungsszenarien an allen Standorten analysiert.

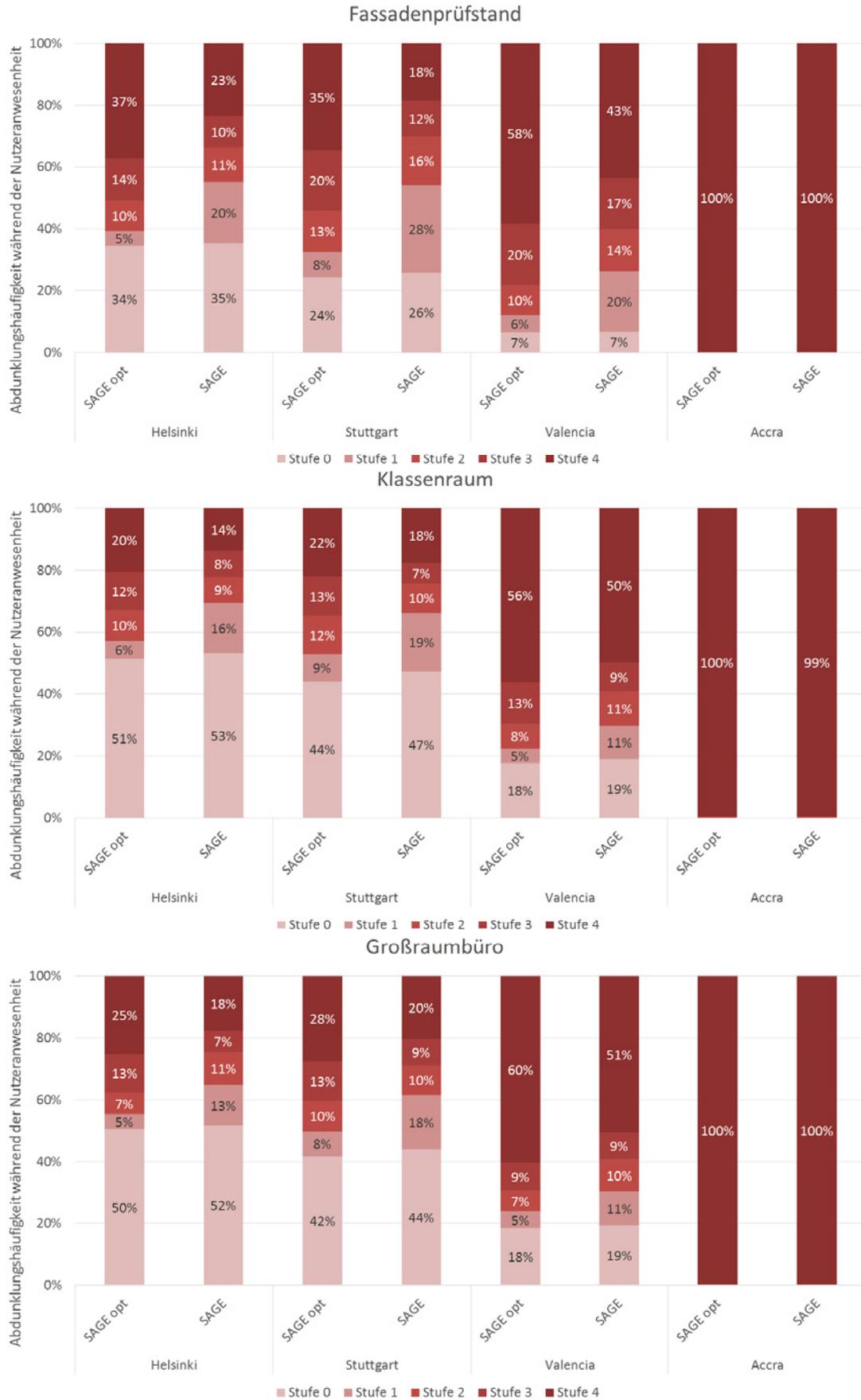


Abbildung 8-30: Abdunklungshäufigkeiten der SageGlass® classic-Verglasung (SAGE) und der modifizierten Sage-Verglasung (SAGE opt) während der Nutzungszeiten, Regelungsstrategie RS I



Die sich anhand der Abdunklungshäufigkeiten ergebende gewichtete durchschnittliche Lichttransmission wird, wie aus Abbildung 8-31 ersichtlich ist, an allen Standorten erhöht, mit Ausnahme von Accra, wo sich die Verglasung während der ganzen Nutzungszeit im Zustand der minimalen Transmission befindet.

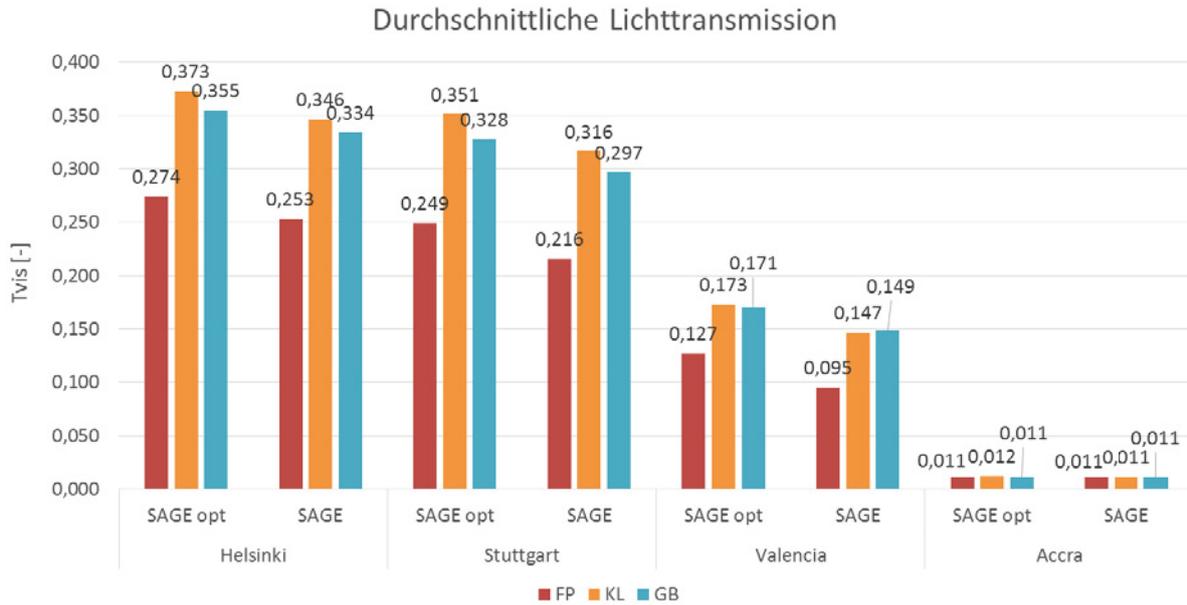


Abbildung 8-31: Durchschnittliche Lichttransmissionswerte der SageGlass® classic-Verglasung (SAGE) und der modifizierten Sage-Verglasung (SAGE opt), gewichtet nach Abdunklungshäufigkeiten infolge der Regelungsstrategie I, im Fassadenprüfstand (FP), im Klassenraum (KL) und im Großraumbüro (GB)

In Abbildung 8-32 sind die Tageslichtautonomieprofile für das ursprüngliche nach RS I angesteuerte SageGlass® classic (S), die Referenzverglasungen 1 und 3 (Ref, Jal) und die modifizierte Sage-Verglasung (S, opt.) für alle Standorte aufgetragen.

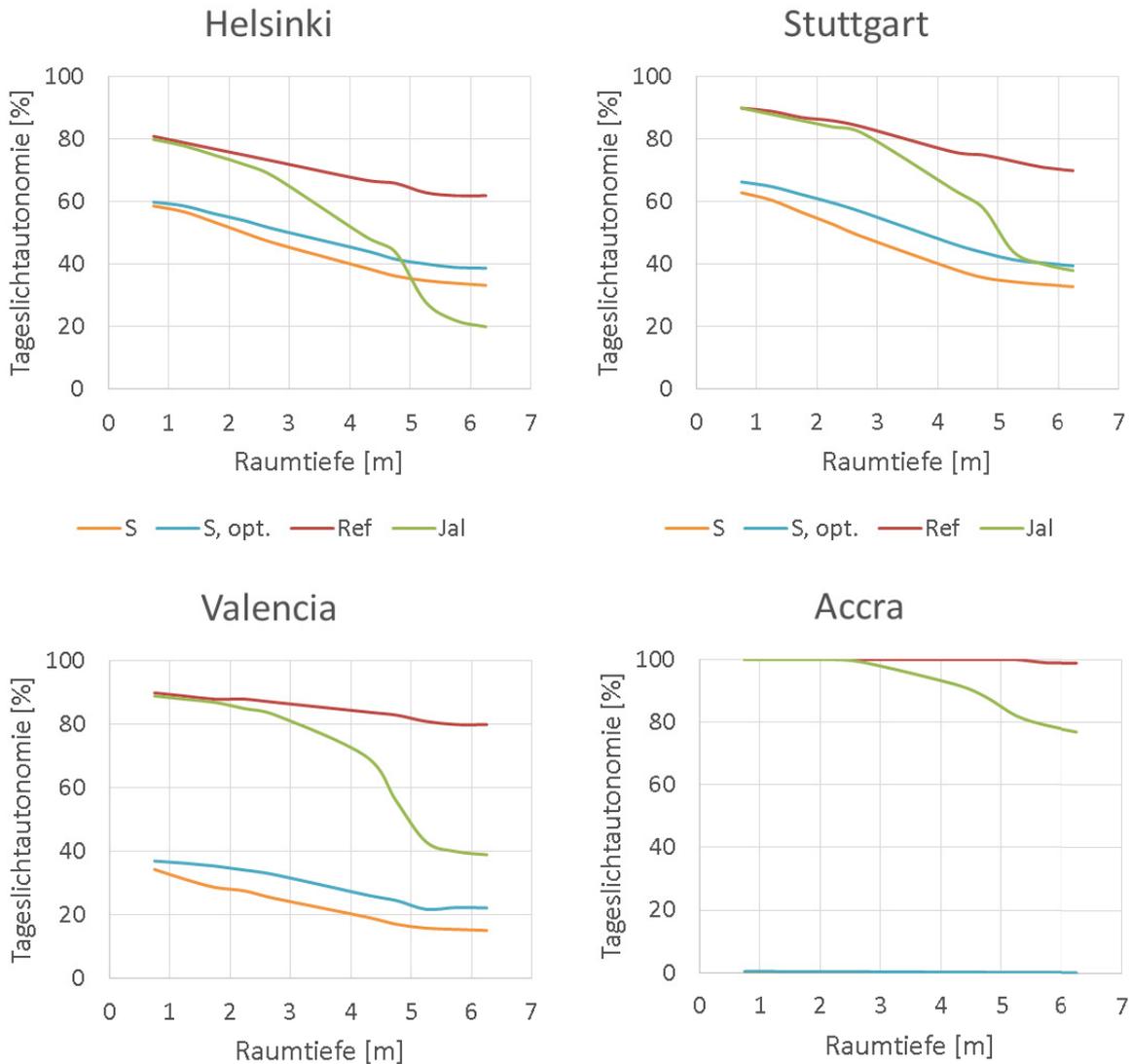


Abbildung 8-32: Tageslichtautonomie, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum, für die SageGlass®-Verglasung angesteuert nach Strategie RS I (S), die Referenzverglasung 1 (Ref), die Referenzverglasung 3 (Jal) sowie die modifizierte Sage-Verglasung (S, opt.). Die Werte für die modifizierte Verglasung (S, opt.) wurden in Blau dargestellt.

An den Standorten Helsinki, Stuttgart und Valencia ist eine Verbesserung der Tageslichtautonomie zu erkennen. Der Einsatz der modifizierten SageGlass®-Verglasung wirkt sich insbesondere auf die tiefen Raumbereiche aus, hier wird eine Steigerung der Tageslichtautonomie um etwa 5 % erreicht. In Stuttgart liegt die Tageslichtautonomie nun über das gesamte Jahr betrachtet vollständig über dem Wert von 40 %, was zuvor nur bis zu einer Raumtiefe von 4,0 m erreicht wurde. In Accra ändert sich die Tageslichtautonomie nicht, aufgrund der ständigen Nutzung der Abdunklungsstufe 4. Dennoch kann für alle Standorte, an denen die Adaptivität genutzt wird, durch die erhöhten Lichttransmissionsgrade der Zwischenschaltstufen eine verbesserte Tageslichtnutzung erreicht werden.

Wird SageGlass® mit modifiziertem Schaltprofil nach der Strategie RS III angesteuert, so kann eine weitere Verbesserung der Tageslichtnutzung erzielt werden. Ein Vergleich der entsprechenden Abdunklungshäufigkeiten der modifizierten elektrochromen Verglasung für die Strategien I und III ist in Abbildung 8-33 und ein Vergleich der Tageslichtautonomieprofile in Abbildung 8-34 dargestellt.

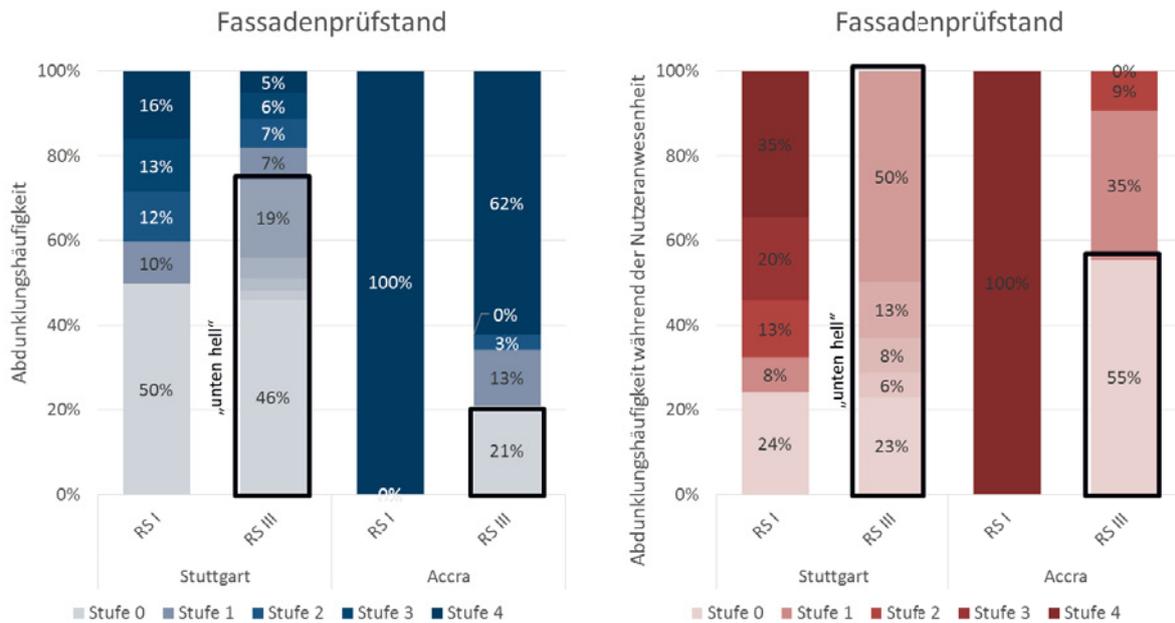


Abbildung 8-33: Abdunklungshäufigkeiten der modifizierten Sage-Verglasung, Vergleich der Strategien RS I und RS III. Bei der Strategie RS III werden die Helligkeitskombinationen der beiden Felder (s. Kapitel 6.3) nach der Helligkeit des unteren Felds zusammengefasst. Die Helligkeitskombinationen für das untere Feld in der Schaltstufe 0 („unten hell“) wurden in Stuttgart zusätzlich nach Schaltstufe des oberen Felds differenziert¹⁷.

Am Standort Accra führte die zuvor betrachtete Regelstrategie RS I zu einer permanenten Nutzung des Zustands minimaler Transmission. Die Erweiterung der Regelstrategie (RS III) schafft hier Abhilfe, sodass nun alle Abdunklungsstufen eingesetzt werden. Da am Standort Accra keine direkte Blendung entsteht, entfällt die Teilung des Fensters. Die dargestellten Häufigkeiten beziehen sich demnach auf den Zustand der gesamten Verglasung.

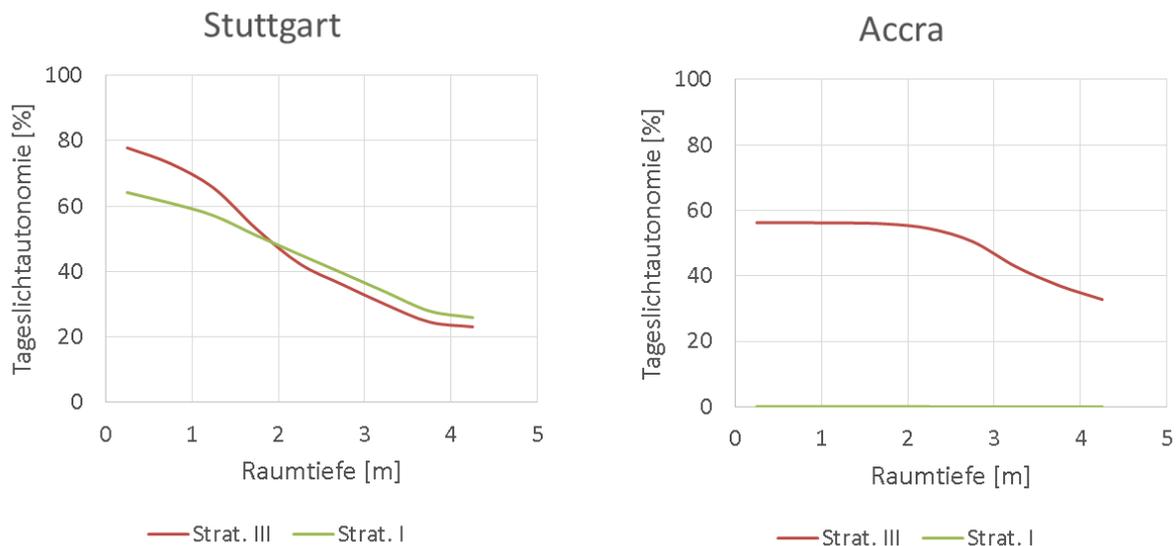


Abbildung 8-34: Tageslichtautonomie der modifizierten elektrochromen Verglasung in Stuttgart und in Accra. Vergleich der Strategien RS I und RS III.

¹⁷ Beginnend bei dem Wert der Ordinate von 0 % sind folgende Helligkeitskombinationen abgetragen: 00 („komplett hell“), 10 („oben Stufe 1, unten Stufe 0“), 20 („oben Stufe 2, unten Stufe 0“), 30 („oben Stufe 3, unten Stufe 0“), 40 („oben Stufe 4, unten Stufe 0“).



Insbesondere in Accra verbessert sich die Tageslichtautonomie bei der Anwendung der Regelungsstrategie III merklich, da im Gegensatz zur Strategie I alle Abdunklungsstufen der Verglasung zum Einsatz kommen. Andererseits führt diese Strategie zur erheblichen Erhöhung des Energiebedarfs, wie im Kapitel 7.2.2.1 dargelegt.

8.3.3 Heizglas: Ipatherm-Heizglas

8.3.3.1 Blendung

Für das Ipatherm-Heizglas wurden Messungen der Leuchtdichteverteilung im Fassadenprüfstand durchgeführt. Die Ergebnisse für einen wechselhaften Frühlingstag sind in Abbildung 8-35 dargestellt.

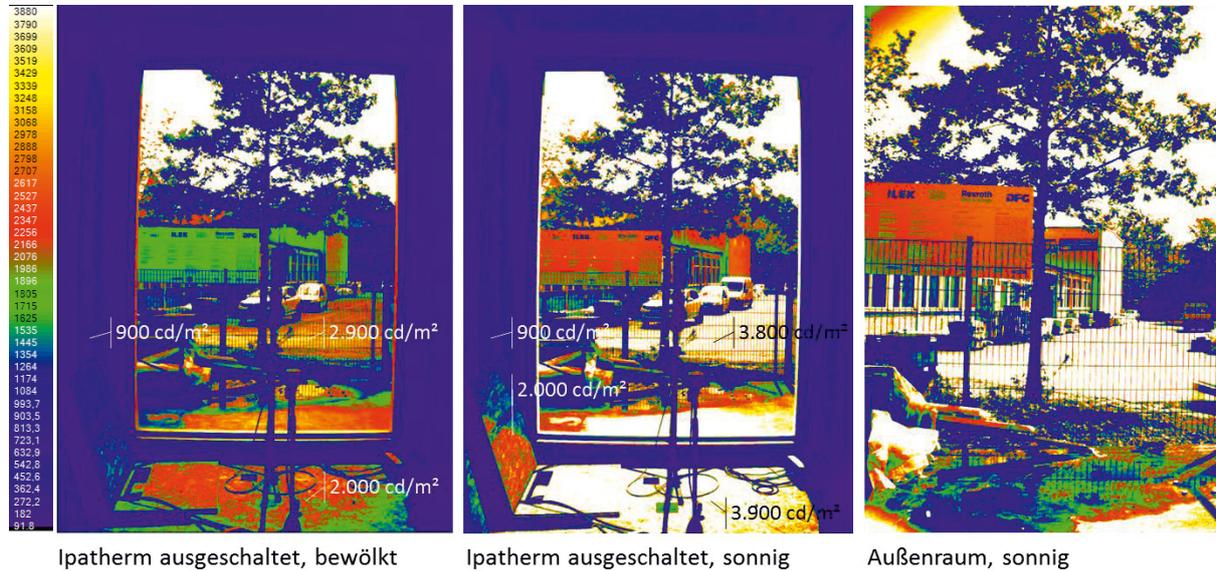


Abbildung 8-35: Messungen der Leuchtdichteverteilung (Fassadenprüfstand, Stuttgart, wechselhafter Frühlingstag (25.05.2016))

Da die Lichttransmissionswerte des Ipatherm-Heizglases denen einer herkömmlichen Zweifachverglasung ähneln, sind an sonnigen Tagen hohe Leuchtdichten und Leuchtdichtekontraste im Raum zu erwarten, was auch die Messergebnisse belegen. Die Funktionalität dieser Verglasung dient jedoch nicht dem Sonnen- und Blendenschutz, sondern der Raumbeheizung.

8.3.3.2 Tageslichtnutzung

In Abbildung 8-36 und Abbildung 8-37 sind Messergebnisse der Beleuchtungsstärkerfassung im Fassadenprüfstand im Tagesverlauf für einen bewölkten und einen sonnigen Sommertag dargestellt. Es wurden jeweils folgende Beleuchtungsstärkewerte auf die Horizontale erfasst:

- Innenbeleuchtungsstärken im Testraum auf der Höhe von 75 cm über dem Fußboden, in der Mitte zwischen beiden Seitenwänden, in der Raumtiefe von 1 m (S1), 2 m (S2) und 3 m (S3), gemessen von der verglasten Fassade,
- Außenbeleuchtungsstärke vor der Fassade neben der Verglasung, auf gleicher Höhe wie Innensensoren S1, S2 und S3,
- Außenbeleuchtungsstärke auf dem Gebäudedach.

Für den bewölkten Tag am 08.06.2016 wurde zusätzlich der Tageslichtquotientenverlauf im Testraum dargestellt.

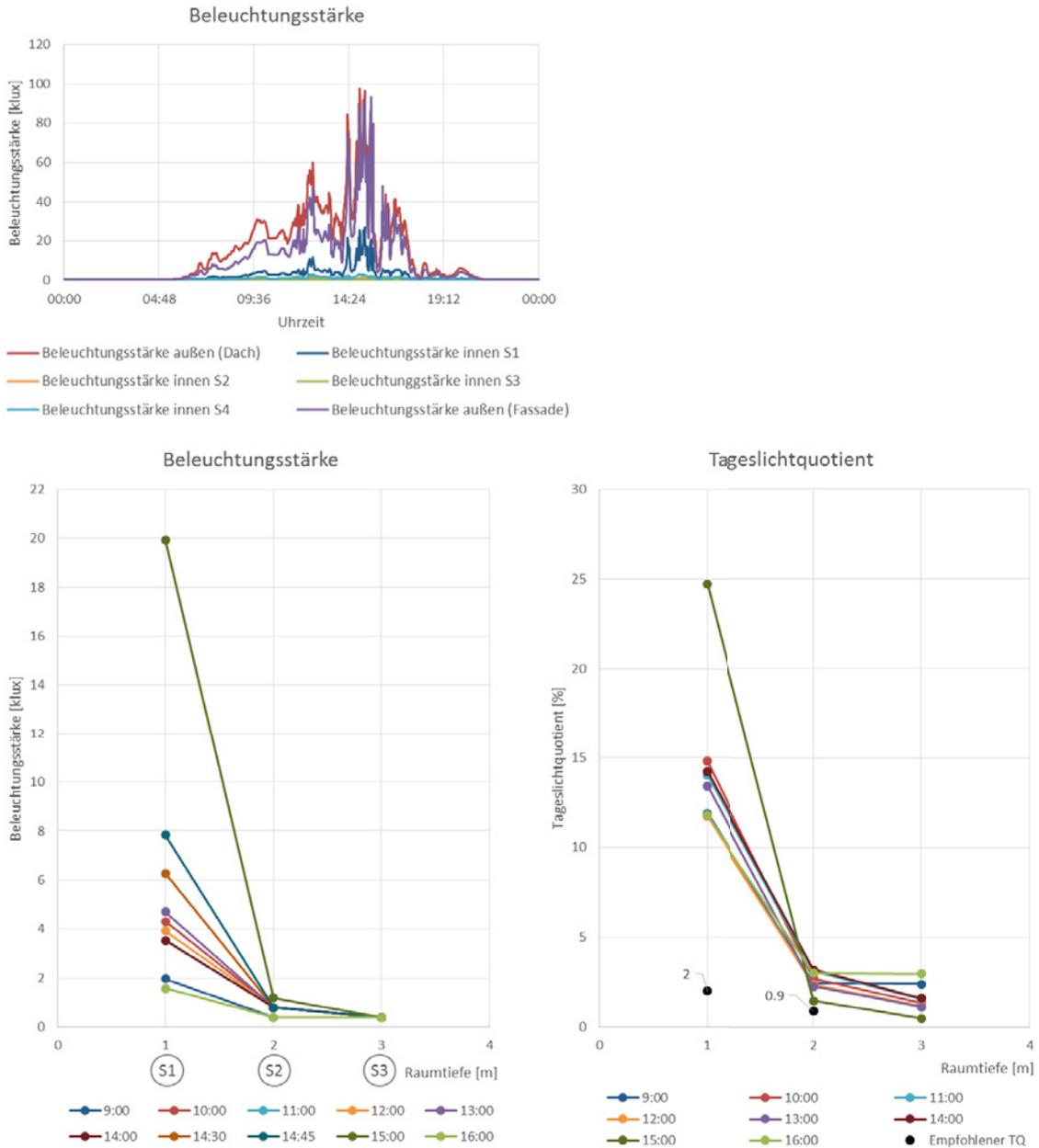


Abbildung 8-36: Beleuchtungsstärken und Tageslichtquotienten im Fassadenprüfstand im Tagesverlauf an einem bewölkten Sommertag (08.06.2016)

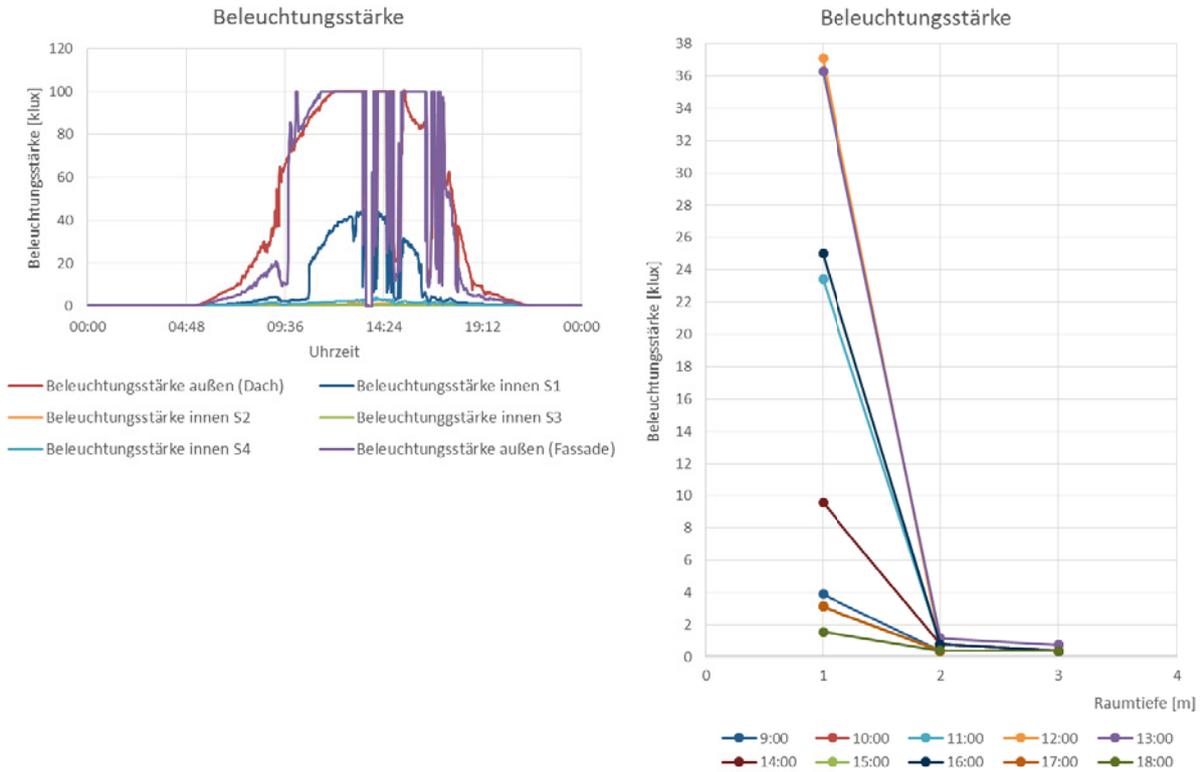


Abbildung 8-37: Beleuchtungsstärken im Fassadenprüfstand im Tagesverlauf an einem sonnigen Sommertag (06.06.2016)

Die Analysen zeigten, dass mit der Ipatherm-Verglasung die für Arbeitsplätze geforderten Werte des Tageslichtquotienten am Arbeitsplatz hinter der Fassade (2 %) und in Raummitte (0,75 %) erreicht werden (s. Abbildung 8-36). Die Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten im fassadennahen Bereich sind an sonnigen Tagen aufgrund der hohen Lichtdurchlässigkeit der Verglasung sehr hoch. Da in den meisten Literaturquellen Beleuchtungsstärken von bis zu 2,5 klx bzw. 3,5 klx als komfortabel definiert werden, wäre beim Einsatz der Verglasung in der Südfassade in Arbeitsplätzen und Bildungseinrichtungen ein zusätzlicher Blend- und Sonnenschutz notwendig.



8.3.4 Verglasung mit Jalousien im Scheibenzwischenraum: OKAFLEX Typ E

8.3.4.1 Blendung

In der nachfolgenden Abbildung sind zusammenfassend die prozentualen Häufigkeiten der Zeiten aufgelistet, während deren die DGP-Werte beim Einsatz der OKAFLEX-Verglasung den Grenzwert von 0,4 überschreiten. Die Verglasung wurde dabei nach der Strategie RS I angesteuert. Für die Referenzverglasungen 1 (REF) und 2 (Okatherm) sind die Überschreitungshäufigkeiten ebenfalls angegeben. In die Auswertung wurden nur die Zeiten der Nutzeranwesenheit einbezogen.

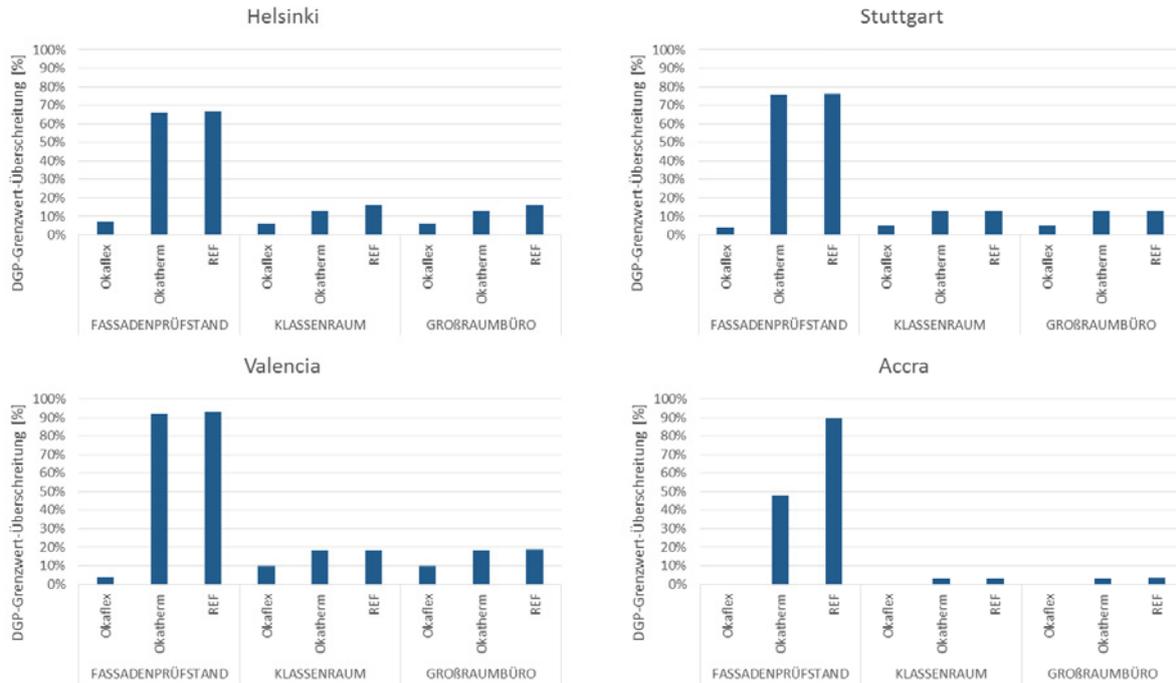


Abbildung 8-38: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts während der Nutzeranwesenheit

Die Berechnungen des Blendungsrisikos haben die sehr gute Blendschutzfunktionalität des OKAFLEX-Systems aufgezeigt.

8.3.4.2 Tageslichtnutzung

In den folgenden Diagrammen sind die berechneten Häufigkeiten der einzelnen Abdunklungsstufen dargestellt, die beim Einsatz der Regelungsstrategie I in drei Nutzungsszenarien an vier untersuchten Standorten auftreten. Die aufeinander folgenden Abdunklungsstufen des OKAFLEX-Systems wurden dabei wie folgt definiert: Stufe 0: Jalousie offen, Stufe 1: Lamellenneigung 45°, Stufe 2: Lamellenneigung zur Vertikalen 30°, Stufe 3: Lamellen geschlossen. Im geschlossenen Zustand hat die Lamellenposition dennoch eine Abweichung von der Vertikalen von ca. 5°, sodass der Lichttransmissionsgrad des Systems 1 % beträgt.

Anhand der Abdunklungshäufigkeiten wurden die Tageslichtautonomieverläufe für die OKAFLEX-Verglasung, für vier Standorte berechnet und in Abbildung 8-40 abgebildet.

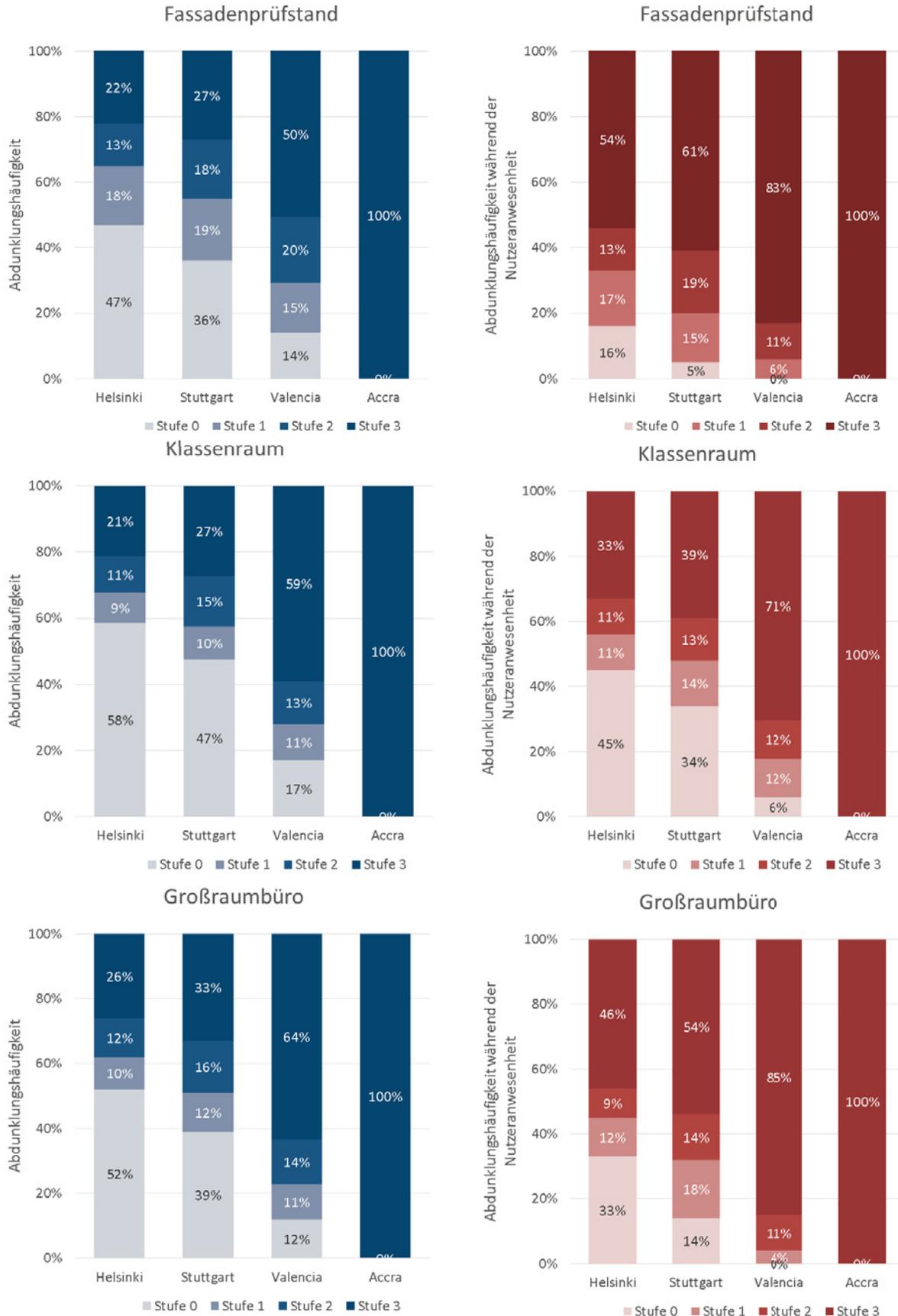


Abbildung 8-39: Abdunklungshäufigkeiten der nach RS I angesteuerten OKAFLEX-Verglasung während eines Jahres. Links: das gesamte Jahr, rechts: während der Nutzungszeiten. Stufe 0: Jalousie offen, Stufe 1: Lamellenneigung 45°, Stufe 2: Lamellenneigung zur Vertikalen 30°, Stufe 3: Lamellen geschlossen.

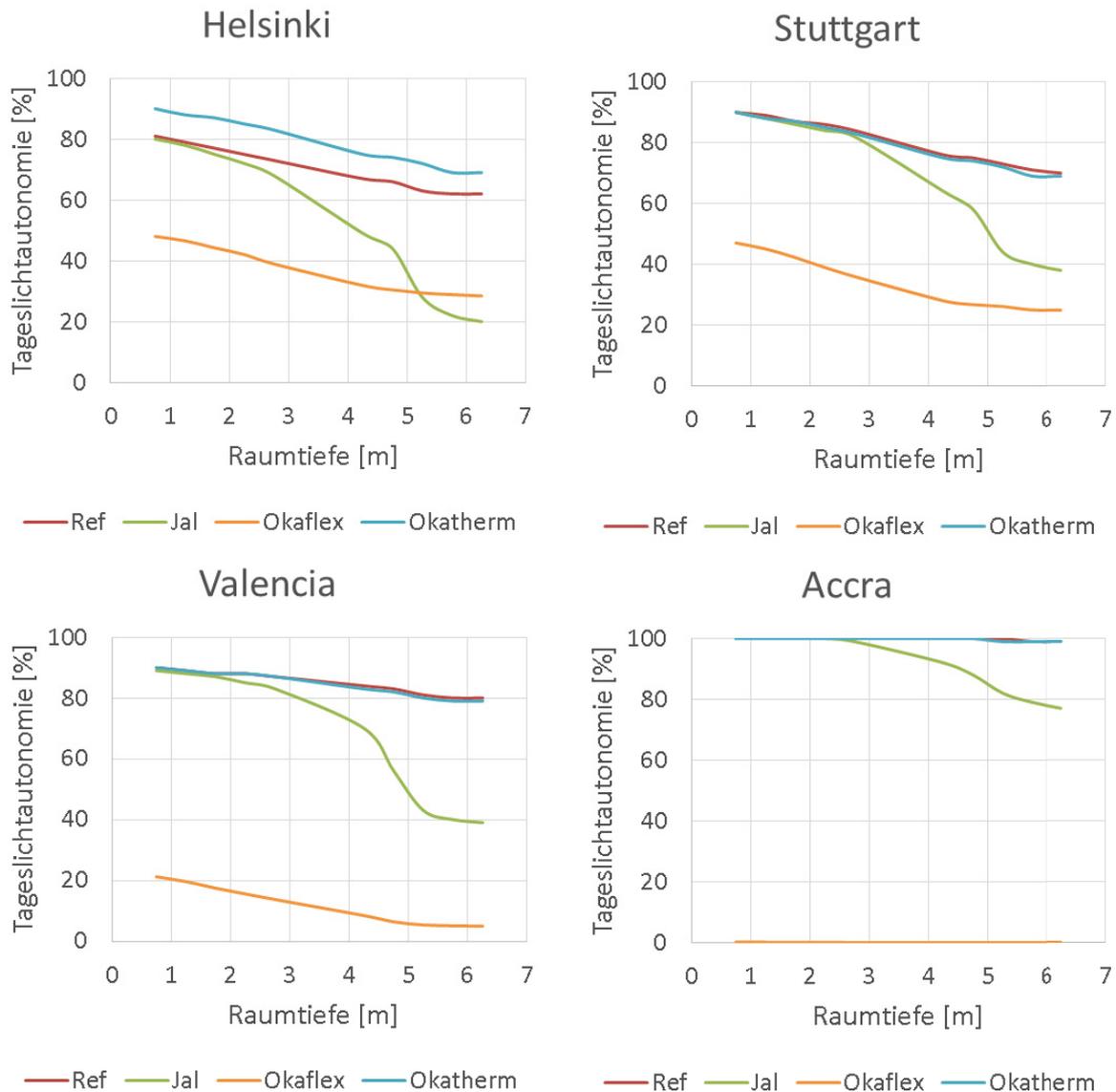


Abbildung 8-40: Tageslichtautonomie der nach RS I angesteuerten OKAFLEX-Verglasung (Okaflex) im Vergleich mit den Referenzverglasungen 1 (Ref), 2 (Okatherm) und 3 (Jal) an vier Standorten, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum

An südlichen Standorten, an denen sich die OKAFLEX-Lamellen sehr häufig in geschlossener Stellung befinden, sind sehr geringe Werte der Tageslichtautonomie zu erkennen (20 % bis 5 % in der Raumtiefe in Valencia, bis zu 0 % in Accra). An nördlichen Standorten Stuttgart und Helsinki ist die empfohlene minimale Tageslichtautonomie von 30 % eingehalten. Mit der Referenzverglasung mit außenliegender Jalousie (Jal) dagegen, die nach der Strahlungsintensität angesteuert wird und auch im geschlossenen Zustand 20 % der Diffusstrahlung durchlässt, werden größtenteils höhere Tageslichtautonomiewerte erreicht. Die Tageslichtpotentiale der OKAFLEX-Verglasung können durch die Verwendung einer ausgewogenen beleuchtungsstärke- oder strahlungsbasierteren Regelungsstrategie, wenn möglich, mit sonnenstandbasierter Lamellennachführung, ausgeschöpft werden.



8.4 Systeminvariante Verglasungen

8.4.1 System mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum: MicroShade® MS-A Vertical

8.4.1.1 Blendung

Die Analyse der Häufigkeiten der DGP-Grenzwertüberschreitung für MicroShade® MS-A Vertical (MS) ist in Abbildung 8-41 dargestellt. Zum Vergleich wurden die entsprechenden Werte für die Referenzverglasung 1 (REF) angegeben.

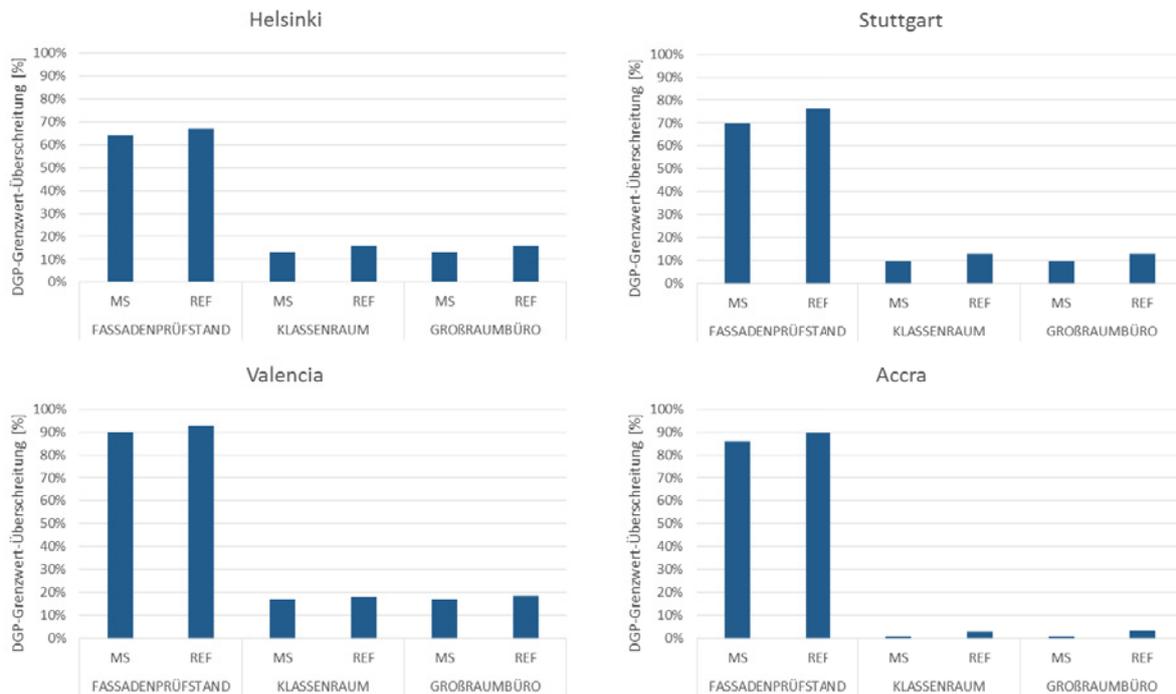


Abbildung 8-41: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts während der Nutzeranwesenheit

Verglichen mit der Referenzverglasung sind die Blendungswahrscheinlichkeiten beim Einsatz einer MicroShade®-Verglasung geringfügig kleiner, aber zur vollständigen Blendungsverhinderung nicht ausreichend. Daher erscheinen in Nutzungsszenarien mit einem hohen Blendungsrisiko zusätzliche Blendschutzvorrichtungen notwendig.

8.4.1.2 Tageslichtnutzung

Die Analyse der Tageslichtnutzung für eine MicroShade®-Fassade an vier Standorten wird in der nachfolgenden Abbildung 8-42 visualisiert.

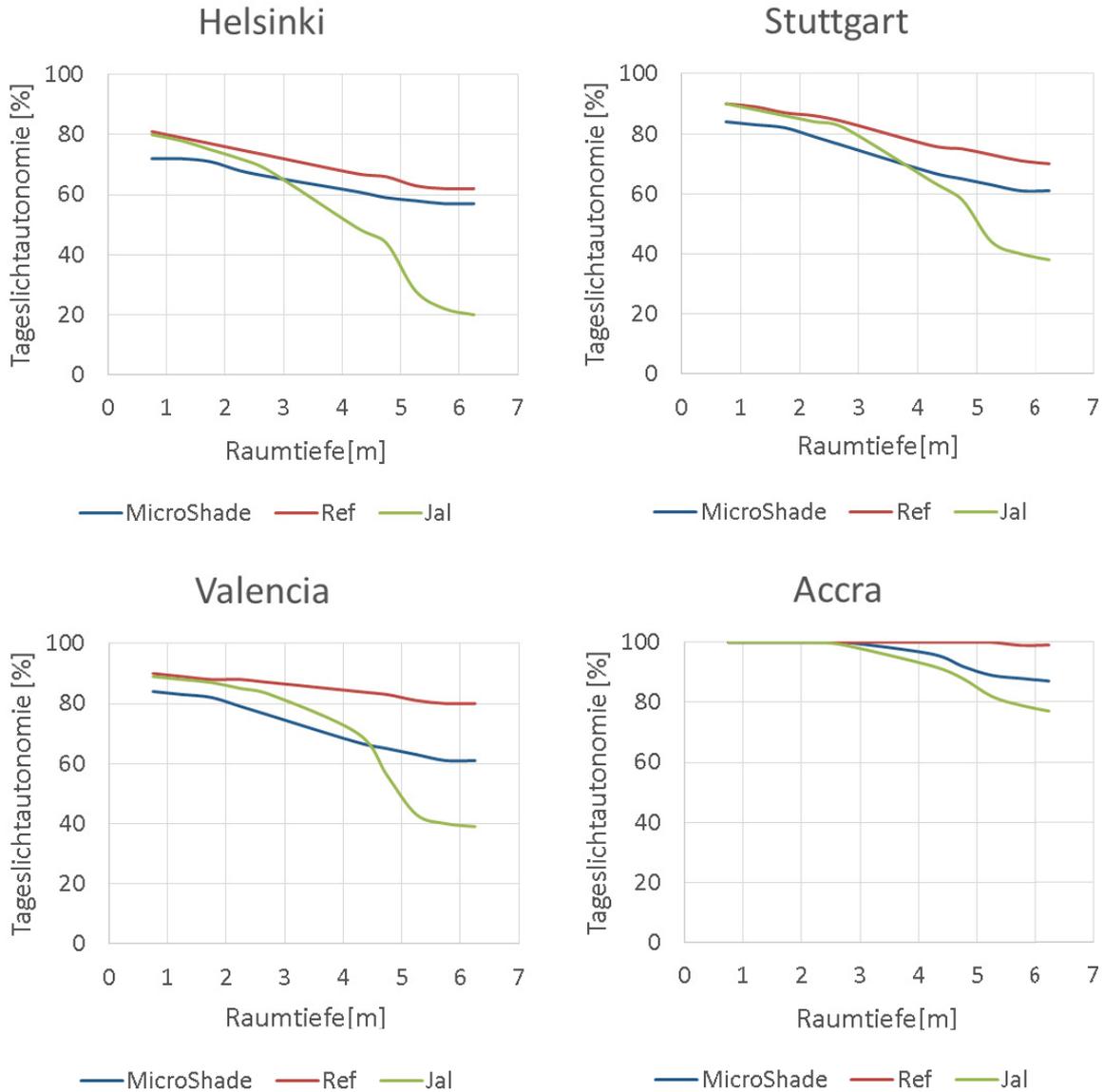


Abbildung 8-42: Tageslichtautonomie der MicroShade-Verglasung (MicroShade) im Vergleich mit den Referenzverglasungen 1 (Ref), 2 (Okatherm) und 3 (Jal) an vier Standorten, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum

Bei der MicroShade®-Verglasung sind besonders hohe Tageslichtautonomie-Werte an allen untersuchten Standorten auffällig, die nur geringfügig die Werte der Referenzverglasung 1 (Ref) unterschreiten. Sie weisen auf ein sehr gutes Tageslichtausnutzungspotential dieser Verglasung hin, insbesondere in tiefen Raumbereichen.

Diese Erkenntnis wurde durch die Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im ILEK-Fassadenprüfstand bestätigt. Die Messungen wurden an sonnigen und bewölkten Tagen im Januar und Februar 2016 durchgeführt. Ausgewählte Ergebnisse sind in Abbildung 8-43 bis Abbildung 8-46 dargestellt.

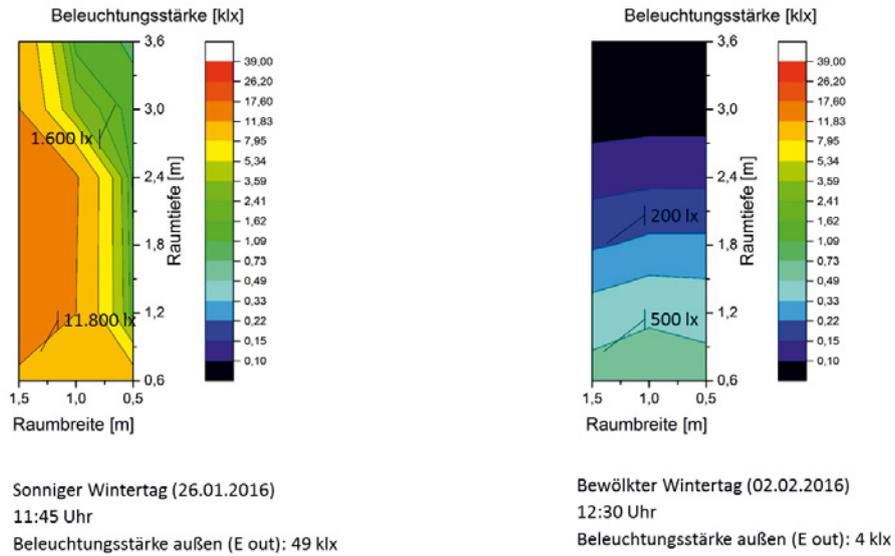


Abbildung 8-43: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Fassadenprüfstand beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Stuttgart, links: sonniger Wintertag, rechts: bewölkter Wintertag)

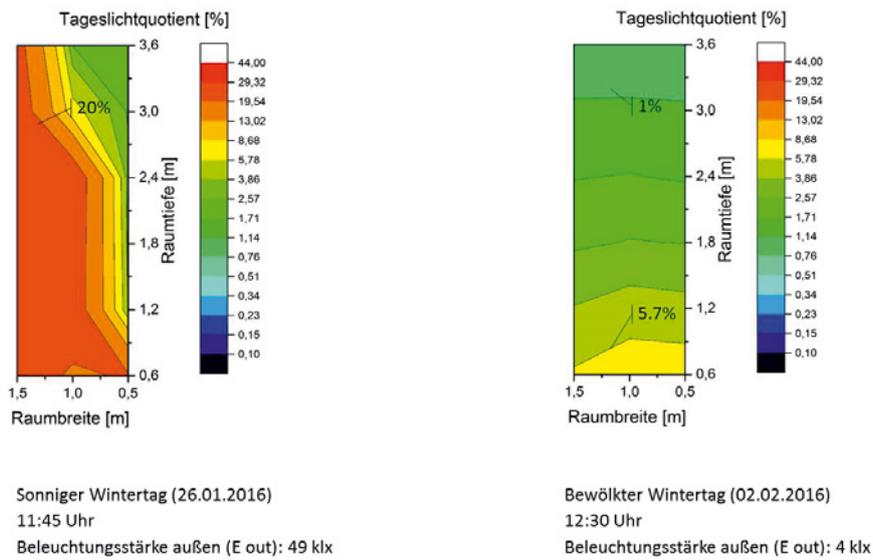


Abbildung 8-44: Tageslichtquotient im Fassadenprüfstand beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Stuttgart, links: sonniger Wintertag, rechts: bewölkter Wintertag)¹⁸

¹⁸ Der Tageslichtquotient ist definiert für bewölkten Himmel. Die entsprechende Quotientenbildung wurde von den Autoren auch für wolkenlose Tage angewandt.

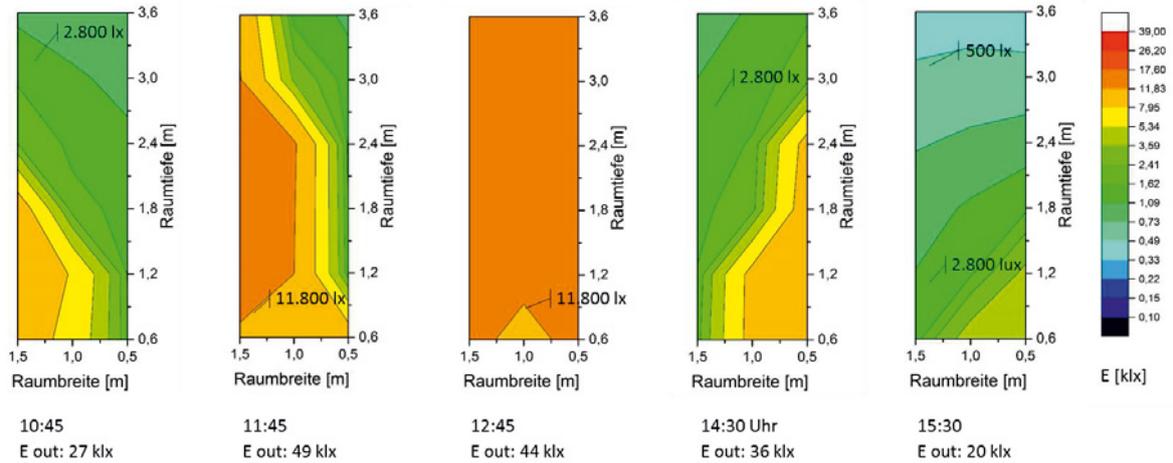


Abbildung 8-45: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Tagesverlauf beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Wintertag (26.01.2016))

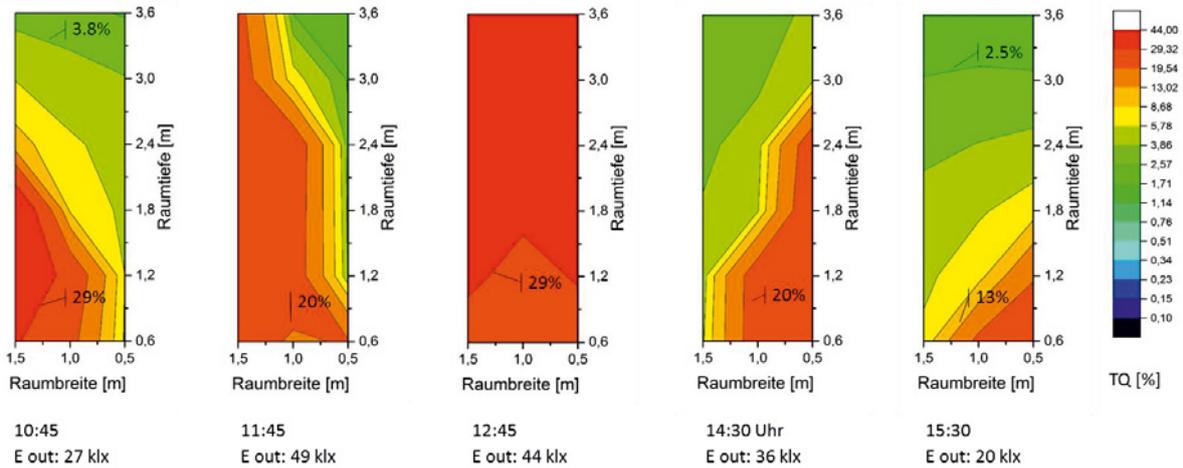


Abbildung 8-46: Tageslichtquotient im Tagesverlauf beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Wintertag (26.01.2016))

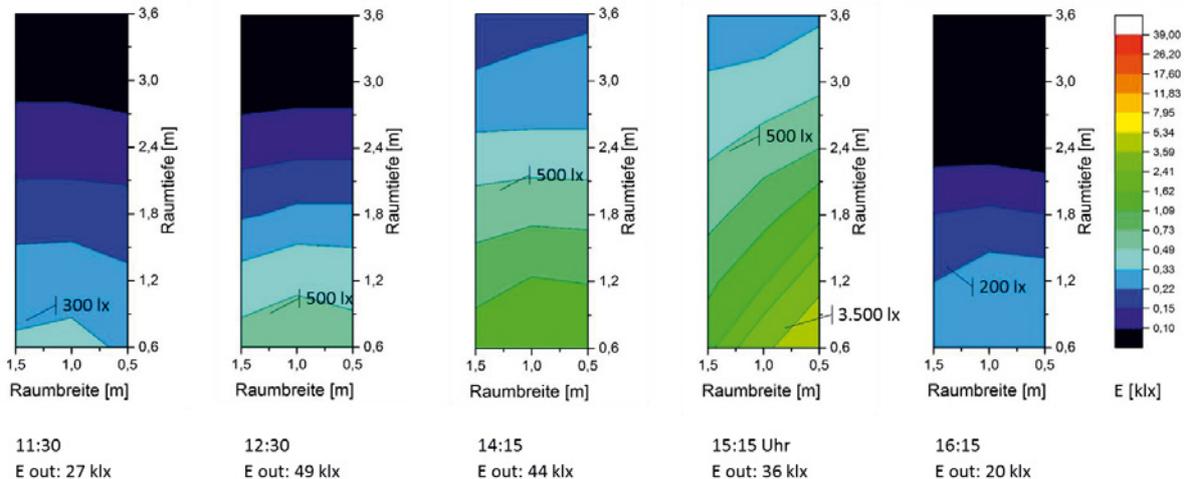


Abbildung 8-47: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Tagesverlauf beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Wintertag (02.02.2016))

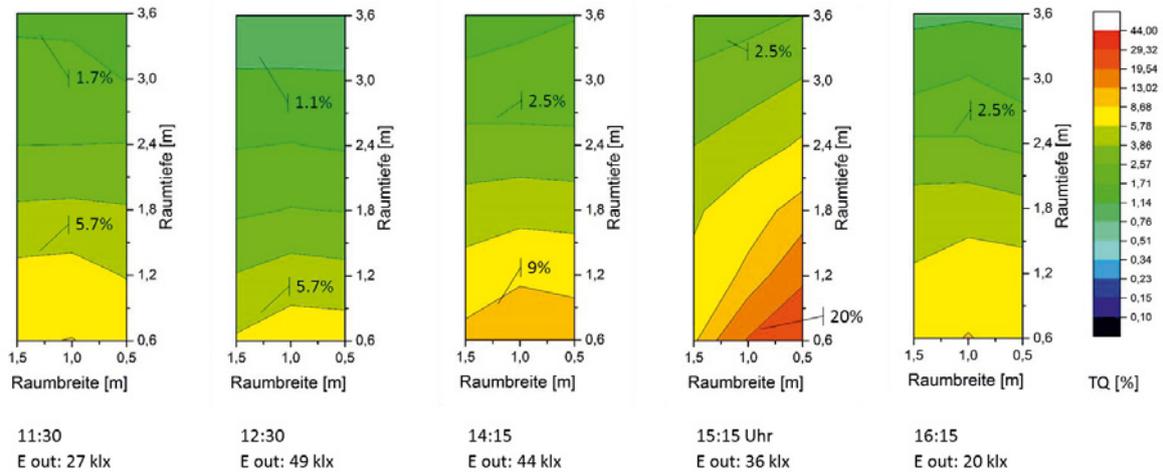


Abbildung 8-48: Tageslichtquotient im Tagesverlauf beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Wintertag (02.02.2016))

Sogar am bewölkten Wintertag 02.02.2016 wurde, trotz der niedrigen möglichen Beleuchtungsstärken, im ganzen Testraum ein Tageslichtquotient von mindestens 1,3 % erreicht. Bei einer Arbeitsplatzanordnung in tieferen Raumbereichen wäre eine künstliche Beleuchtung an diesem Tag notwendig, dies widerspricht jedoch der sehr guten Tageslichtnutzung durch die MicroShade®-Verglasung nicht.

8.4.2 Verglasung mit integrierten Reflektionsprofilen: OKASOLAR F O/U

Simulationen der OKASOLAR-Verglasung werden derzeit im Rahmen weiterer Arbeiten am ILEK durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu sind zur Veröffentlichung im Rahmen eines wissenschaftlichen Artikels vorgesehen.



9 Anwendungsvorschläge für adaptive Verglasungen • AP 6

Die nachfolgende Zusammenfassung der Ergebnisse beruht auf den Simulationen und Messungen der zugrunde liegenden Verglasungseigenschaften und der jeweiligen räumlichen Umgebungen. Eine generelle Übertragbarkeit auf beliebige andere Konstellationen ist nicht gegeben.

9.1 Selbstregelnde Systeme

9.1.1 Thermochrome Verglasung: Suntuitive® Dynamic Glass

Suntuitive® Dynamic Glass (Typ Suntuitive® Azuria) trägt zur merklichen Verbesserung der Energieeffizienz und des Innenraumkomforts in allen analysierten Räumen im Vergleich zu Referenzverglasungen bei. Das Potential zur Kühlenergieeinsparung ist dabei besonders ausgeprägt und zeigt sich äußerst deutlich in kleinen Räumen (z.B. Zellenbüro) mit großflächig verglasten Fassaden. Die Energiebedarfe in größeren Räumen, wie dem Klassenraum oder dem Großraumbüro sind vergleichbar mit den entsprechenden Bedarfen beim Einsatz konventioneller außen liegender Verschattungssysteme, dennoch verzeichnet auch bei diesen Nutzungsszenarien die Suntuitive®-Verglasung Vorteile gegenüber den konventionellen Systemen. Die höchsten Abdunklungsstufen kommen zu Zeiten der höchsten solaren Einstrahlung vor und verhindern die solaren Einträge wirksam, wodurch die Verglasung einen effizienten Überhitzungsschutz bietet. Dabei bleibt die Durchsicht und somit der visuelle Kontakt der Nutzer mit dem Außenraum, im Gegensatz zu herkömmlichen Jalousien, durchgehend erhalten.

Bezüglich der Gesamtenergiebedarfe führt der Einsatz der Suntuitive®-Verglasung in milden Klimazonen zu den höchsten Energieeinsparungen im Vergleich mit Referenzverglasungen. In kalten Klimazonen sind diese Energieeinsparpotentiale ebenfalls gegeben, wenn auch nicht so gravierend ausgeprägt.

Im Vergleich mit konventionellen Zweifachverglasungen wird durch die Suntuitive®-Verglasung eine Blendungsreduktion eingeleitet, die Blendung kann allerdings nicht vollständig verhindert werden. Zusätzliche Blendschutzvorrichtungen an Arbeitsplätzen in Fensternähe erscheinen daher notwendig. In großen Räumen mit Arbeitsplatzanordnung senkrecht zur Fassade ist die blendungshemmende Funktion der Suntuitive®-Verglasung besser ausgeprägt.

Darüber hinaus ist die adaptive Sonnenschutzschicht durch die Integration in die Isolierverglasung witterungsbeständig und erscheint daher insbesondere für Regionen mit hohen Windgeschwindigkeiten und für den Einsatz in Hochhäusern als geeignet.

9.1.2 Thermotropes System: GLASSX® crystal

Da beim thermotropen System GLASSX® crystal die klare Durchsicht nur im flüssigen Zustand des PCM vorhanden ist, kann durch die Kombination mit transparenten, verglasten Fassadenelementen der Außenbezug wieder hergestellt werden. Die Transmissionseigenschaften des GLASSX®-Systems ermöglichen es jedoch, massive Außenwände durch lichtdurchlässige Glaselemente zu ersetzen und somit die Tageslichtausnutzung in Gebäuden zu verbessern. Zusätzlich wird durch die Speicherfähigkeit des im Scheibenzwischenraum eingeschlossenen PCM-Materials eine Überhitzungsvermeidung und Verbesserung der thermischen Behaglichkeit im Raum erwartet. Im Laufe des Projekts konnte nachgewiesen werden, dass die GLASSX®-Verglasung zur Reduktion von Temperaturspitzen und zur Erhöhung der Speichermasse von leichten Konstruktionen wie dem ILEK-Fassadenprüfstand beiträgt. Während der Heizsaison führen relativ hohe Oberflächentemperaturen auf der Scheibeninnenseite ebenfalls zur Erhöhung des thermischen Innenraumkomforts. Daher kann die Verglasung für den Einsatz sowohl in warmen als auch kalten Regionen, in allen untersuchten Nutzungsszenarien sinnvoll sein.



9.2 Steuerbare Systeme

9.2.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10

Die ECONTROL®-Verglasung des Typs smart 55/10 ermöglicht durch die Variabilität der Licht- und Energietransmissionseigenschaften eine gute Tageslichtversorgung. Die im Rahmen des Projekts untersuchte temperatur- und blendungsbasierte Regelung der Verglasung ermöglicht eine gute Ausnutzung dieser Potentiale in allen untersuchten Nutzungsszenarien.

Ein besonders großes Energieeinsparpotential zeigt sich in der Kühlsaison und in kühlungsdominierten Klimazonen. In warmen Regionen muss jedoch der Zustand minimaler Transmission häufig eingesetzt werden, wenn hohe Energieeinsparungen erwünscht sind. In extrem warmen Klimazonen (Accra) wird die Adaptivität der Verglasung nicht mehr ausgenutzt. In kühleren Regionen zeigt die ECONTROL®-Verglasung höhere mittlere Transmissionswerte bei Anwendung der untersuchten Regelungsstrategien und bedeutsame energetische Vorteile gegenüber der Referenzverglasung. Die Vorteile gegenüber herkömmlichen Verschattungssystemen sind in diesen Einsatzgebieten vor allem im visuellen Komfort zu erwarten.

Das System zeigte sich besonders geeignet für Großraumnutzungen, mit Blickrichtung der Nutzer parallel zur Fassade. Bei einer Anordnung der Arbeitsplätze parallel zur Fassade und der Blickrichtung senkrecht zur Fassade kann Blendungsgefahr nicht ausgeschlossen werden. Als Grund hierfür wird der zur vollständigen Blendungsvermeidung nicht ausreichend geringe Wert der Minimaltransmission der Verglasung gesehen.

Die Anwendung der Regelstrategie RS III mit der Unterteilung der Fensterfläche in zwei Bereiche führt hinsichtlich der Tageslichtnutzung zu keinem optimierten Ergebnis. Die Werte der DGP-Überschreitungen steigen gegenüber der ursprünglichen Regelstrategie sogar an, wofür der Hauptgrund in hohen absoluten Leuchtdichtewerten des unteren Fensterbereichs zu sehen wäre, und eine verbesserte Tageslichtautonomie wird nur bedingt erreicht. Die festgelegte Teilung erscheint nicht förderlich, um die Tageslichtnutzung über die gesamte Raumtiefe zu verbessern. Zur Erhöhung der Tageslichtautonomie wird eine Teilung der Fensterfläche in mindestens drei Abschnitte vorgeschlagen. Gerade im Frühjahr, im Sommer und im Herbst erscheint es aufgrund des Sonnenstandes ausreichend, das obere Drittel des Fensters als Feld zur Vermeidung von Blendung zu wählen. Die beiden unteren Drittel können zur Bereitstellung von natürlichem Licht im Raum beitragen. Im Winter reduziert das mittlere Fensterdrittel die Blendgefahr für den Nutzer, sodass das obere Drittel für die Tageslichtnutzung zur Verfügung steht.

Darüber hinaus ist die adaptive Sonnenschutzschicht durch die Integration in die Isolierverglasung witterungsbeständig und ist daher insbesondere für Regionen mit hohen Windgeschwindigkeiten und für den Einsatz in Hochhäusern eine attraktive Alternative zu herkömmlichen Sonnenschutzlösungen.

9.2.2 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic

Der große Schaltheub der Verglasung SageGlass® classic und die erreichbare minimale Lichttransmission ermöglichen ein hohes Sonnen- und Blendschutzpotential dieser Verglasung. Die Möglichkeit, das Blendungsrisiko der Nutzer merklich zu reduzieren, prädestiniert dieses System für Anwendungen bei Arbeits- und Klassenräumen. Dennoch müssen durch die markante Absenkung der Lichttransmission bereits in der ersten Schaltstufe die relativ niedrigen durchschnittlichen Transmissionswerte in Kauf genommen werden. Diese führen zu einer relativ niedrigen Tageslichtautonomie, die sich insbesondere bei tiefen Räumen negativ auf den visuellen Nutzerkomfort auswirkt und zum häufigeren Einsatz künstlicher Beleuchtung führt. Eine Anpassung der Abdunklungsstufen der SageGlass®-Verglasung hin zum linearen Verlauf innerhalb des Gesamtschaltheubs würde zu einer verbesserten Tageslichtausnutzung vor allem in großen Raumtiefen führen.



Die nach der Strategie RS I geregelte SageGlass®-Verglasung wirkt sich positiv auf den Kühlenergiebedarf der analysierten Räume aus, wodurch sie sich für den Einsatz in warmen Klimazonen wie in Valencia besonders eignet. In extrem heißen Gegenden wie in Accra wird jedoch die Adaptivität nicht mehr ausgenutzt, wenn eine hohe Energieeffizienz erreicht werden soll. Die Verglasung würde sich beinahe durchgehend im Zustand minimaler Transparenz befinden.

In heizungsdominierten Klimazonen liegen die Vorteile gegenüber konventionellen Sonnenschutzsystemen hauptsächlich im Erhalt der Sichtverbindung nach außen auch im vollständig abgedunkelten Zustand.

Zum energetisch und lichttechnisch optimierten Einsatz eignet sich eine horizontale Unterteilung der Verglasung in mindestens drei getrennt ansteuerbare Bereiche. Dieser Ansatz wird vom Hersteller bereits bei den zum Verkauf angebotenen Produkten verfolgt.

Darüber hinaus ist die adaptive Sonnenschutzschicht durch die Integration in die Isolierverglasung witterungsbeständig und erscheint daher insbesondere für Regionen mit hohen Windgeschwindigkeiten und für den Einsatz in Hochhäusern sinnvoll.

9.2.3 Heizglas: Ipatherm-Heizglas

Ipatherm-Heizglas ist zur Gewährleistung eines konstanten Innenraumklimas während der Heizperiode im verwendeten Testraum des Fassadenprüfstands sehr gut geeignet. Ein geringfügig höherer Energiebedarf als bei einem herkömmlichen Radiator wird durch eine konstante Raumaufheizung kompensiert. Gleichmäßige Strahlungswärme und eine Reduktion des Kaltluftabfalls an der Fassadenverglasung tragen zur Erhöhung des thermischen Innenraumkomforts bei. Kondensatbildung oder Vereisungen konnten unter den gegebenen Testbedingungen nicht beobachtet werden.

Die Einbindung der Heizfunktionalität in die Isolierverglasung ist optisch unauffällig und beeinträchtigt die Tageslichtversorgung des Raums nicht.

Das System zeichnet sich durch eine einfache Anschlussinfrastruktur aus und ist daher sowohl für den Einbau in Neubauten als auch für Sanierungsmaßnahmen geeignet. Insbesondere Klimazonen mit ausgeprägter Heizperiode, Bereiche mit hoher Luftfeuchtigkeit oder mit der Notwendigkeit einer Heizungsnachrüstung bzw. eines Umbaus erweisen sich als probate Einsatzbereiche für das Ipatherm-Heizglas.

Eine Reduzierung von Wärmeverlusten kann durch die Anwendung als Innenscheibe eines Dreischeibenisoliertes erreicht werden.

9.2.4 Verglasung mit Jalousien im Scheibenzwischenraum: OKAFLEX Typ E

Die Energieverbräuche von Räumen mit der OKAFLEX-Verglasung vom Typ E zeigten an allen Standorten vergleichbare Werte zu Referenzverglasungen mit außenliegenden Jalousien auf. Die verwendete Regelungsstrategie RS I führte jedoch zum erhöhten Einsatz der künstlichen Beleuchtung und häufiger Abdunklung der Verglasung, sodass in warmen Gebieten (insbesondere in Accra) mit einer durchgängigen Schließung der Lamellen während der Nutzungszeiten gerechnet werden müsste. Die Verglasung eignet sich daher für den Einsatz in allen untersuchten Szenarien, jedoch mit einer Modifizierung der Regelungsstrategie in warmen Klimazonen, sodass offene Jalousiestellungen zu Kosten der Energieeffizienz häufiger umgesetzt werden. Dadurch können der visuelle Nutzerkomfort und die Tageslichtausnutzung verbessert werden.



Durch die Integration der Jalousie in den Scheibenzwischenraum wird eine Witterungsbeständigkeit des Systems erreicht, die den Einsatz in Regionen mit hohen Windgeschwindigkeiten wie beispielsweise bei Hochhäusern möglich macht.

9.3 Systeminvariante Verglasungen

9.3.1 System mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum: MicroShade® MS-A Vertical

MicroShade®-Verglasung des Typs MS-A Vertical trägt bei allen untersuchten Anwendungsszenarien zur Erhöhung der Energieeffizienz und der Verbesserung der Tageslichtbedingungen im Raum im Vergleich zu Referenzverglasungen bei. Insbesondere die Auswirkung auf den Kühlenergiebedarf der Räume zeichnet sich positiv ab. Dies lässt sich am Beispiel kleiner Räume mit großflächig verglasten Fassaden am besten beobachten. In großen Räumen, wie Klassenräumen und Großraumbüros, ist die Energieeffizienz beim Einsatz der MicroShade®-Verglasung vergleichbar mit der Effizienz beim Einsatz konventioneller außenliegender Jalousien.

Auch in kalten Regionen (Helsinki) im Sommer kann eine Kühlenergieeinsparung im Vergleich zur Referenzverglasung 1 mithilfe der MicroShade®-Verglasung verzeichnet werden. Im Winter fällt dort der Kühlenergiebedarf ähnlich aus wie beim Referenzsystem. Das MicroShade®-System erreicht dann jedoch bedeutsame Vorteile hinsichtlich der Blendungsreduzierung.

Insbesondere in milden Klimazonen während der Winterzeit zeigt die analysierte Verglasung eine sehr gute Tageslichtfunktion bei einem minimalen Blendungsrisiko. Die Tageslichtausnutzung ist mit diesem System in allen Szenarien wesentlich besser als mit der konventionellen außenliegenden Jalousie. Darüber hinaus ist der Sichtkontakt nach außen ein bedeutsamer Vorteil der Micro-Shade®-Verglasung.

Das System zeigte sich besonders geeignet für Großraumnutzungen, mit Blickrichtung parallel zur Fassade. Bei einer Blickrichtung der Nutzer senkrecht zur Fassade kann Blendungsgefahr nicht ausgeschlossen werden.

Darüber hinaus ist die adaptive Sonnenschutzschicht durch die Integration in die Isolierverglasung witterungsbeständig und ist daher insbesondere für Regionen mit hohen Windgeschwindigkeiten und für den Einsatz in Hochhäusern geeignet.

9.3.2 Verglasung mit integrierten Reflektionsprofilen: OKASOLAR F O/U

Die energetischen Simulationen der OKASOLAR-Verglasung werden derzeit im Rahmen weiterer Forschungsmaßnahmen am ILEK geführt. Eine abschließende Bewertung ist derzeit noch nicht möglich.

9.4 Übersicht der untersuchten Verglasungssysteme

In der nachfolgenden Tabelle 9-1 ist eine tabellarische Zusammenfassung der wesentlichen Qualitäten der untersuchten Verglasungen gegeben.



	Selbstregelnde Verglasungen				Steuerbare Verglasungen				Systemvariante Verglasungen				Referenzverglasungen								
	Thermochrom	Thermotrop	Elektrochrom	Heizglas	Jalousie im SZR	Mikro-lamellen	Reflektions-profile	Referenz-verglasung 1	Referenz-verglasung 2 (OKATHERM)	Referenz-verglasung 3 (Jalousie)	Thermochrom	Thermotrop	Elektrochrom	Heizglas	Jalousie im SZR	Mikro-lamellen	Reflektions-profile	Referenz-verglasung 1	Referenz-verglasung 2 (OKATHERM)	Referenz-verglasung 3 (Jalousie)	
Durchsicht	Suntuitive® Dynamic Glass I	GLASSX®crystal I	ECONITROL® smart 55/10	SageGlass® classic	ipatherm-Heizglas	OKAFLEX Typ E	MicroShade® MS-A Vertical	OKASOLAR F O/U													
Farbigkeit	hell / aus dunkel / an	hell / aus dunkel / an	gering (blau) ja	gering (blau) ja	nein nein	nein nein (1)	nein (1) nein (1)	nein (1) nein (1)	nein nein	nein nein (1)	nein nein (1)	nein nein (1)	nein nein (1)	nein nein (1)	nein nein (1)	nein nein (1)	nein nein (1)	nein nein (1)	nein nein (1)	nein nein (1)	nein nein (1)
Schalthub	visuell solar																				
Legende:	<p>ja: Durchsicht gegeben nein: keine / minimale Durchsicht</p> <p>sehr hoch: Schalthub $\geq 0,4$ hoch: $0,4 > \text{Schalthub} \geq 0,2$ niedrig: $0,2 > \text{Schalthub} \geq 0,01$ nicht relevant: kein Schalthub</p> <p>wartungsfrei grundsätzlich wartungsfrei, elektrische Komponenten vorhanden grundsätzl. wartungsfrei, elektr. und innenliegende mechanische Komp. vorh. nicht wartungsfrei, elektr. und außenliegende mechanische Komp. vorhanden ja: Funktionsschicht witterungsgeschützt nur bei geringen Windgeschwindigkeiten funktionsfähig</p>																				
Wartungsfreiheit																					
Witterungsbeständigkeit																					
Tageslichtversorgung des Raums	in 1 m Raumtiefe in 6 m Raumtiefe																				
Blendschutz	Einzelbüro (2)																				
Energieeinsparung (4)	Großraumbüro (3)																				
Ausnutzung der Schaltpotentiale	Einzelbüro Klassenraum Großraumbüro																				

- (1) beziehungsweise je nach Lamellenfarbe
- (2) Nutzer in Fassadenhöhe, Blickrichtung senkrecht zur Verglasung
- (3) Nutzer im Raum verteilt, Blickrichtung parallel zur Verglasung
- (4) im Vergleich mit Referenzverglasung 1, Jahresenergiebedarf pro m² Nutzfläche für Heizung, Kühlung und Beleuchtung, interne Wärmegewinne nicht miteinbezogen
- (5) durch die Speicherfähigkeit des PCM: Überhitzungsvermeidung und Verbesserung der thermischen Behaglichkeit, Reduktion von Temperaturspitzen, Erhöhung der Speichermasse
- (6) vergleichbar mit herkömmlichem Radiator, jedoch Erhöhung des thermischen Innenraumkomforts
- (7) Kombination mit zusätzlichem Sonnen- und Blendschutz sinnvoll

Tabelle 9-1: Tabellarische Zusammenstellung der wesentlichen Produktcharakteristiken



10 Anhang 1: Vergleich der Berechnungsmethoden für Verglasungskennwerte nach amerikanischen und europäischen Standards

Nachfolgend wird ein Vergleich der Randbedingungen zur Berechnung von Verglasungskennwerten nach dem amerikanischen Standard NFRC (National Fenestration Rating Council) 100 [65] und NFRC 200 [66] und dem europäischen Standard CEN (European Committee for Standardization) durchgeführt. Der nordamerikanische Standard NFRC führt Berechnungsmethoden auf der Basis der ISO-Norm 15099 [67], mit einigen Änderungen, beispielsweise der Umweltbedingungen wie Innen- und Außentemperaturen, auf. Der europäische Standard CEN dagegen basiert auf den normativen Vorlagen ISO 1077 [68] und EN 673 [69]. Folgender tabellarischer Vergleich basiert auf den Zusammenstellungen von Hanam et al. [70], RDH Building Engineering [71] und Ebanks [72].

	U-value		Solar Heat Gain		
	Exterior Temp.	Interior Temp.	Exterior Temp.	Interior Temp.	Solar Radiation
NFRC 100 & 200 [North America]	-18 °C	21 °C	32 °C	24 °C	783 W/m ²
[CEN (Europe)]	0 °C	20 °C	30 °C	25 °C	500 W/m ²

Tabelle 10-1: Tabellarischer Vergleich der Randbedingungen zur Berechnung der Verglasungskennwerte nach NFRC und CEN, zit. nach Hanam et al. [70]

	Standard surface film coefficients for U-value calculations, vertical glazing [incl. frame]		
	Exterior	Interior	Note
NFRC 100 [North America]	26 W/m ² K	2.44 W/²K (Wood/Vinyl frame)	Radiation model – automatic enclosure model for interior frame surfaces, black-body for exterior surfaces. (Interior coefficients are convection only) Glazing system boundary conditions depend on the WINDOW calculations for the imported glazing system.
[CEN (Europe)]	25 W/m ² K [entspr. R _{se} = 0.04 m ² K/W]	7.7 W/m ² K [entspr. R _{si} = 0.13 m ² K/W]	“For typical normal emissivities (≥0.8) for the inside and outside surfaces of the glazing, the following values for the surface resistances shall be used.” [EN ISO 10077-1] Combined convection and radiation coefficient. Interior convective coefficient is h _c = 3.6 W/m ² K [für freie Konvektion]. [EN 673]

Tabelle 10-2: Tabellarischer Vergleich der Wärmeübergangskoeffizienten zur Berechnung der U-Werte von Verglasungen nach NFRC und CEN, zit. nach RDH Building Engineering [71]



Centre of Glass Heat Transfer calculation		
NFRC [North America]	follows ISO 15099 algorithms ¹⁹	The ISO 15099 (NFRC) calculation is based on a comprehensive heat transfer model, including conductive, convective and radiative heat transfer. A system of energy balance equations is developed, and surface temperatures and heat flux at each layer is solved using numerical methods.
[CEN (Europe)]	follows ISO 10077 and EN 673 algorithms	The ISO 10077-1 / EN 673 algorithms are simplified compared to the ISO 15099 calculations. Properties are evaluated at the mean temperature difference across the gas space; for double glazed systems, this is fixed at a temperature difference of 15 K [EN 673].

Tabelle 10-3: Tabellarischer Vergleich der Wärmedurchgangsberechnungsmethoden nach NFRC und CEN, zit. nach RDH Building Engineering [71]

¹⁹ Mit angepassten Grenzwerten, s. Tabelle 10-1



11 Anhang 2: Normative Anforderungen verschiedener Gebäudenutzungen

11.1 Bürogebäude

Anforderungen an die Beleuchtungsstärke (E)

- "Die durch das Tageslicht allein gegebene Beleuchtung in Arbeitsräumen mit Fenstern, in denen die Sehaufgaben auf horizontalen Flächen ausgeübt wird: $\geq 0,6$ -fache des \bar{E}_m für Beleuchtung mit Kunstlicht in DIN EN 12464-1" (\bar{E}_m – Wartungswert der Beleuchtungsstärke) [73]
- $\bar{E}_m > 50$ lx (oder 75) mit $U_o \geq 0,10$ auf den Wänden (U_o - Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke)
- $\bar{E}_m > 30$ lx (oder 50) mit $U_o \geq 0,10$ auf der Decke
- $\bar{E}_m = 500$ lx für die Sehaufgabe (für Schreiben, Lesen, Bildschirmarbeit) (minimale Beleuchtungsstärke - "Wartungswerte") [74]
- 300 lx im Umgebungsbereich [60, 74]. Die minimale Beleuchtungsstärke im Umgebungsbereich darf das 0,5-fache der mittleren Beleuchtungsstärke des Umgebungsbereichs nicht unterschreiten. [75]
- "An keiner Stelle im Bereich des Arbeitsplatzes darf das 0,6-fache der mittleren Beleuchtungsstärke unterschritten werden. Der niedrigste Wert darf nicht im Bereich der Hauptsehaufgabe liegen." [75]
- vertikale Beleuchtungsstärke: $\bar{E}_v \geq 175$ lx [75]
- zylindrische Beleuchtungsstärke: $\bar{E}_z \geq 150$ lx [74]
- Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke: 0,60 (und 0,10 auf Wänden und Decken) [74]

Anforderungen an den Tageslichtquotienten (D)

- $D_{min} : D =$ mindestens 1 : 2 (siehe DIN 5034-6) [73]
- Tageslichtquotient D in halber Raumtiefe, in 0,85 m über dem Fußboden und in 1 m Abstand von den beiden Seitenwänden:
 - im Mittel der beiden Punkte mindestens 0,9 %, am ungünstigsten der beiden Punkte mindestens 0,75 %
 - bei Räumen mit Fenstern in zwei benachbarten Wänden 1 % [73]
 - Bei Arbeitsräumen mit Dachoberlichtern: mittlerer $D > 4$ % (ergibt sich bei einem Anteil der Gesamtfläche aller Oberlichtöffnungen an der Dachfläche von wenigstens 8 %), $D_{min} > 2$ %. Berechnung siehe DIN 5034-3, vereinfachte Berechnung siehe DIN 5034-6 [73]
- Die Anforderung nach ausreichendem Tageslicht wird erfüllt, wenn in Arbeitsräumen
 - am Arbeitsplatz ein Tageslichtquotient größer als 2 % erreicht wird oder
 - mindestens ein Verhältnis von lichtdurchlässiger Fenster-, Tür- oder Wandfläche bzw. Oberlichtfläche zur Raumgrundfläche von mindestens 1:10 (entspricht ca. 1:8 Rohbaumaße), eingehalten ist [75]
- Bei Arbeitsräumen mit Dachoberlichtern: Die Anforderung nach ausreichendem Tageslicht wird erfüllt, wenn in Arbeitsräumen
 - am Arbeitsplatz ein Tageslichtquotient größer als 4 % erreicht wird oder
 - mindestens ein Verhältnis von lichtdurchlässiger Fenster-, Tür- oder Wandfläche bzw. Oberlichtfläche zur Raumgrundfläche von mindestens 1:10 (entspricht ca. 1:8 Rohbaumaße), eingehalten ist [75]
- Anmerkung: "Die Norm DIN 5034 sagt, dass der Tageslichtquotient nur zur Beurteilung einer ausreichenden Helligkeit (psychologische Anforderung: ob ein Raum hell oder dunkel wirkt) von kleinen Arbeitsräumen (bis 50 m²) bei Seitenfenstern verwendet werden darf." [55]

Anforderungen an die mittlere Leuchtdichte (L)

- Grenzwerte der mittleren Leuchtdichte von Leuchten, die sich in Flachbildschirmen spiegeln können / Bildschirmarbeitsplatz:
 - übliche Anforderungen im Hinblick auf Farbe und Details der dargestellten Information: Bildschirm mit hoher Leuchtdichte ($L > 200$ cd·m⁻²) -> mittl. Leuchtdichte ≤ 3000 cd·m⁻²



- höhere Anforderungen im Hinblick auf Farbe und Details der dargestellten Information, wie sie z. B. bei CAD, Farbprüfung usw.: Bildschirm mit hoher Leuchtdichte -> mittl. Leuchtdichte $\leq 1500 \text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ [74]
- Bei Arbeitsräumen mit Dachoberlichtern: wie oben, beziehungsweise nach VDI 6011: Bei Bildschirmen hoher Güte liegt dieser Grenzwert bei mittl. $L = 1000 \text{ cd}/\text{m}^2$ (max. $L = 2000 \text{ cd}/\text{m}^2$) [55, 56]

Anforderungen an die Leuchtdichteverteilung

- Zwischen der Infeldleuchtdichte und dem näheren Umfeld ein Verhältnis in der Bandbreite von 1:3 und zwischen der Infeldleuchtdichte und dem ferneren Umfeld ein Verhältnis von 1:10
- Die Leuchtdichte von Fenstern bzw. Kunstlichtquellen und benachbarten Flächen soll ein Verhältnis von 1:40 nicht überschreiten [56]. (Diese Empfehlungen dienen eher der Vermeidung die Sehbedingungen negativ beeinträchtigender Leuchtdichteverhältnisse. Elemente eines als attraktiv empfundenen Innenraums sind eine als freundlich empfundene helle Atmosphäre sowie die durch eine erhöhte Leuchtdichte erreichte visuelle Hervorhebung von Objekten gegenüber dem Kontext) [56]
- Anmerkung: Tageslicht in Innenräumen entfaltet eine positive psychologische Wirkung und stellt einen Bezug zu der Außenwelt und der Dynamik der Außenbeleuchtungsstärke her. Folglich können im Allgemeinen höhere Leuchtdichte-Grenzwerte angesetzt werden, insbesondere im Hinblick auf die psychologische Blendung. Nach E-DIN 5035-7 wird an Bildschirmarbeitsplätzen eine durch Fenster gesehene Leuchtdichte bis $4000 \text{ cd}/\text{m}^2$ in hellen Räumen im Allgemeinen nicht als störend empfunden [55].
- mittlere Leuchtdichten von Sonnenschutzvorrichtungen im seitlichen Gesichtsfeld der Mitarbeiter von $2.000 \text{ cd}/\text{m}^2$ bis $4.000 \text{ cd}/\text{m}^2$ meist nicht störend, es sei denn Fensterflächen können sich im Bildschirm spiegeln - dann dürfen sie im Mittel nicht heller als $1.000 \text{ cd}/\text{m}^2$ (für gut entspiegelte Bildschirme) bzw. $200 \text{ cd}/\text{m}^2$ sein [76].

Anforderungen an den Blendschutz

- Schutz muss vorhanden sein [73].
- Blendungsindex UGR (Unified Glare Rating) nach CIE Unified Glare Rating-Verfahren (Berechnungsmethode siehe DIN EN 12464-1): max. UGR = 19 [74]

Anforderungen an die Farbwiedergabe (Ra)

- Farbwiedergabeindex: min. $R_a = 80$ [74]

Anforderungen an die Sichtverbindung nach Außen

- Erforderlich [73, 77] (nicht erforderlich, wenn Arbeitsraum mit Oberlichtern [77], bzw. wenn Grundfläche $> 2000 \text{ m}^2$, s.u. [56])
- für Besprechungs- und Konferenzräume nach Bedarf, bzw. für Aufenthaltsräume: "Die Fläche des durchsichtigen Teils aller Fenster in Räumen mit einer Grundfläche von bis zu 600 m^2 soll mindestens 10 % der Raumgrundfläche betragen. Bei Räumen mit einer Grundfläche größer 2000 m^2 , die mit Oberlichtern beleuchtet werden, entfällt die Forderung einer Sichtverbindung ins Freie. (Einige Länderbauordnungen fordern z.B. eine Fensterfläche von $1/8$ der Grundfläche; in diesen Ländern ist die höhere Forderung der Bauordnung maßgebend.)" [56]



Anforderungen an die Lufttemperatur

- für Gebäudekategorie II²⁰ nach DIN EN 15251 (PPD < 10 %): Mindestwert der Heizperiode = 20 °C [79]
- für Gebäudekategorie II nach DIN EN 15251 (PPD < 10 %): Höchstwert der Heizperiode = 26 °C [79]
- Bei darüber liegender Außentemperatur darf in Ausnahmefällen die Lufttemperatur höher sein. Sie sollte aber 6° niedriger als die Außentemperatur sein [76]
- Lufttemperaturen bis 22 °C werden empfohlen [76]

Anforderungen an den Sonnenschutz

- Schutz muss vorhanden sein [73]
- Sonnenschutzvorrichtungen und Verglasungen sollten die Lichtfarbe und die Farbwiedergabeeigenschaft des Tageslichts nicht beeinträchtigen [73]

11.2 Schulbau

Anforderungen an die Beleuchtungsstärke (E)

- $\bar{E}_m > 75 \text{ lx}$ mit $U_o \geq 0,10$ auf den Wänden (\bar{E}_m – Wertungswert der Beleuchtungsstärke, U_o - Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke)
- $\bar{E}_m > 50 \text{ lx}$ mit $U_o \geq 0,10$ auf der Decke
- $\bar{E}_m = 300 \text{ lx}$ für die Sehaufgabe (minimale Beleuchtungsstärke - "Wertungswerte") [74]
- Vertikale Beleuchtungsstärke: $\bar{E}_v \geq 100 \text{ lx}$ [75]
- Zylindrische Beleuchtungsstärke: $\bar{E}_z \geq 150 \text{ lx}$ [74]
- Gleichmäßigkeit der Beleuchtungsstärke: 0,60 (und 0,10 auf Wänden und Decken) [74]

Anforderungen an die Leuchtdichteverteilung

- Zwischen der Infeldleuchtdichte und dem näheren Umfeld ein Verhältnis in der Bandbreite von 1:3 bis 1:3 und zwischen der Infeldleuchtdichte und dem ferneren Umfeld ein Verhältnis von 1:10 bis 1:10
- Die Leuchtdichte von Fenstern bzw. Kunstlichtquellen und benachbarten Flächen soll ein Verhältnis von 1:40 nicht überschreiten [56]. (Diese Empfehlungen dienen eher der Vermeidung die Sehbedingungen negativ beeinträchtigender Leuchtdichteverhältnisse. Elemente eines als attraktiv empfundenen Innenraums sind eine als freundlich empfundene helle Atmosphäre sowie die durch eine erhöhte Leuchtdichte erreichte visuelle Hervorhebung von Objekten gegenüber dem Kontext.) [56]
- Anmerkung: Tageslicht in Innenräumen entfaltet eine positive psychologische Wirkung und stellt einen Bezug zu der Außenwelt und der Dynamik der Außenbeleuchtungsstärke her. Folglich können im Allgemeinen höhere Leuchtdichte-Grenzwerte angesetzt werden, insbesondere im Hinblick auf die psychologische Blendung [55].

Anforderungen an den Blendschutz

- max UGR = 19 [74]

²⁰ Das gewünschte Umgebungsklima für einen Raum kann mit unterschiedlichen Toleranzbereichen definiert werden. Die unterschiedlichen Toleranzbereiche werden in DIN EN 15251 in s.g. Kategorien I – IV erfasst. Die Kategorien I – III entsprechen dabei den Kategorien A – C nach DIN EN ISO 7730. Laut DIN EN ISO 7730 sind "einige Anforderungen [...] in der Praxis nur schwer umzusetzen, andere hingegen sind leicht zu erfüllen. Die unterschiedlichen Prozentsätze veranschaulichen einen Ausgleich zwischen dem Ziel, wenige Unzufriedene zu erhalten, und dem, was mit der vorhandenen Technik möglich ist." "Jede Kategorie schreibt einen maximalen Prozentsatz an Unzufriedenen für den gesamten Körper (PPD) und PD für jede der vier Arten der lokalen Unbehaglichkeit vor." [78] "Für den Neubau und sanierte Bestandsgebäude wird die Kategorie II als Basis für die Planung und Auslegung empfohlen." [79]



Anforderungen an die Farbwiedergabe (Ra)

- min Ra = 80 [74]

Anforderungen an die Besonnung (direkter Strahlungseinfall)

- In Schulen und Kindergärten ist neben einer Beleuchtung durch Tageslicht auch eine Besonnung erwünscht
- min 4 h zur Tag- und Nachtgleiche, min 1 h am 17. Januar [56]

Anforderungen an die Sichtverbindung nach Außen

- erforderlich [73]

Anforderungen an die Lufttemperatur

- für Gebäudekategorie II nach DIN EN 15251 (PPD < 10 %): Mindestwert der Heizperiode = 20 °C [79]
- für Gebäudekategorie II nach DIN EN 15251 (PPD < 10 %): Höchstwert der Heizperiode = 26 °C [79]
- "Die Lufttemperatur in Büroräumen muss mindestens 20 °C betragen. Lufttemperaturen bis 22 °C werden empfohlen. Die Lufttemperatur soll 26 °C nicht überschreiten. Bei darüber liegender Außentemperatur darf in Ausnahmefällen die Lufttemperatur höher sein. Höhere Temperaturen führen dazu, dass das Wohlbefinden der Mitarbeiter gestört und ihre Konzentrations- und Leistungsfähigkeit beeinträchtigt werden können. [...] An heißen Sommertagen kann nicht ausgeschlossen werden, dass auch Lufttemperaturen von über 26 °C im Büroraum auftreten. Bei darüber liegender Außentemperatur darf in Ausnahmefällen die Lufttemperatur höher sein. Sie sollte aber 6° niedriger als die Außentemperatur sein. Gebäude, Fenster und Sonnenschutzvorrichtungen sollen so beschaffen sein, dass diese Temperaturdifferenz an den meisten Tagen eingehalten werden kann." [76]



12 Anhang 3: Analyse der Adaptationsvorgänge an ausgewählten Tagen

Um die Auswirkungen unterschiedlicher klimatischer Bedingungen auf die Adaptationsvorgänge der untersuchten Verglasungen zu verstehen, erfolgte eine Betrachtung der gegensätzlichen Tage während eines Jahres. Hierzu zählen ein wechselhafter Frühlingstag, ein wolkenloser Sommertag, ein bewölkter Sommertag, ein wolkenloser Wintertag und ein bewölkter Wintertag. Die repräsentativen Tage für die vier Standorte sind in Tabelle 12-1 aufgelistet. Die Auswahl erfolgte anhand der Klimadaten des Testreferenzjahres (TMY-Wetterdatensätze).

	Helsinki	Stuttgart	Valencia	Accra
Frühling, wechselhaft	13. April	03. April	05. April	-
Sommer, wolkenlos	08. Juli	13. Juli	02. August	08. April
Sommer, bewölkt	07. August	01. August	10. August	28. Juli
Winter, wolkenlos	06. Dezember	10. Dezember	07. Dezember	-
Winter, bewölkt	31. Dezember	13. Dezember	29. Dezember	-

Tabelle 12-1: Auswahl repräsentativer Tage während des Jahres

Nachfolgend werden für ausgewählte repräsentative Tage Analysen der Wetterbedingungen, des Verhaltens der Verglasungssysteme und der resultierenden thermischen und visuellen Innenraumbedingungen für ausgewählte Nutzungsszenarien ohne Einbeziehung interner Wärmegewinne dargestellt.



12.1 Selbstregelnde Systeme

12.1.1 Thermochrome Verglasung: Suntuitive® Dynamic Glass (Typ Suntuitive® Azuria)

12.1.1.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen

12.1.1.1.1 Stuttgart | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag

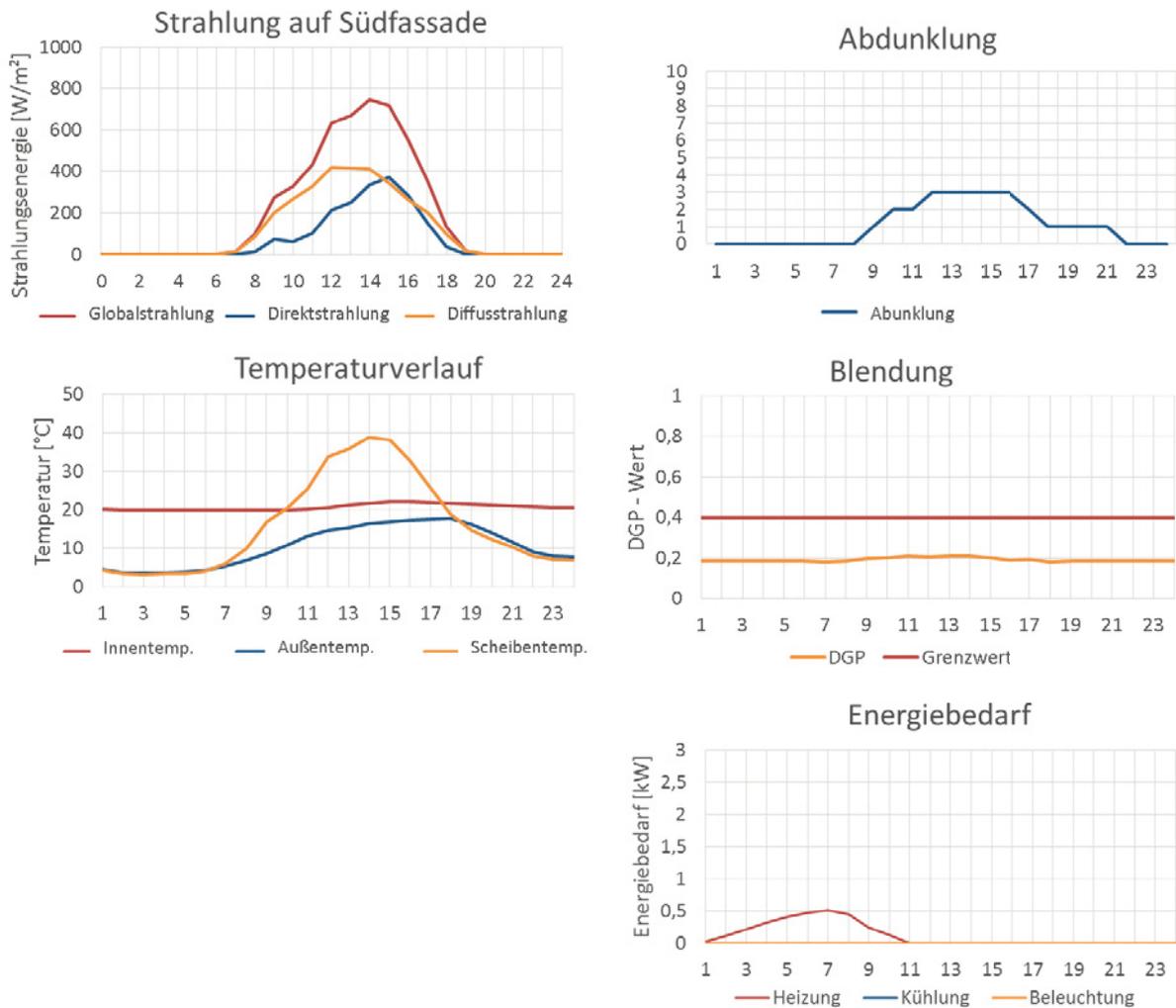


Abbildung 12-1: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums.



12.1.1.1.2 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

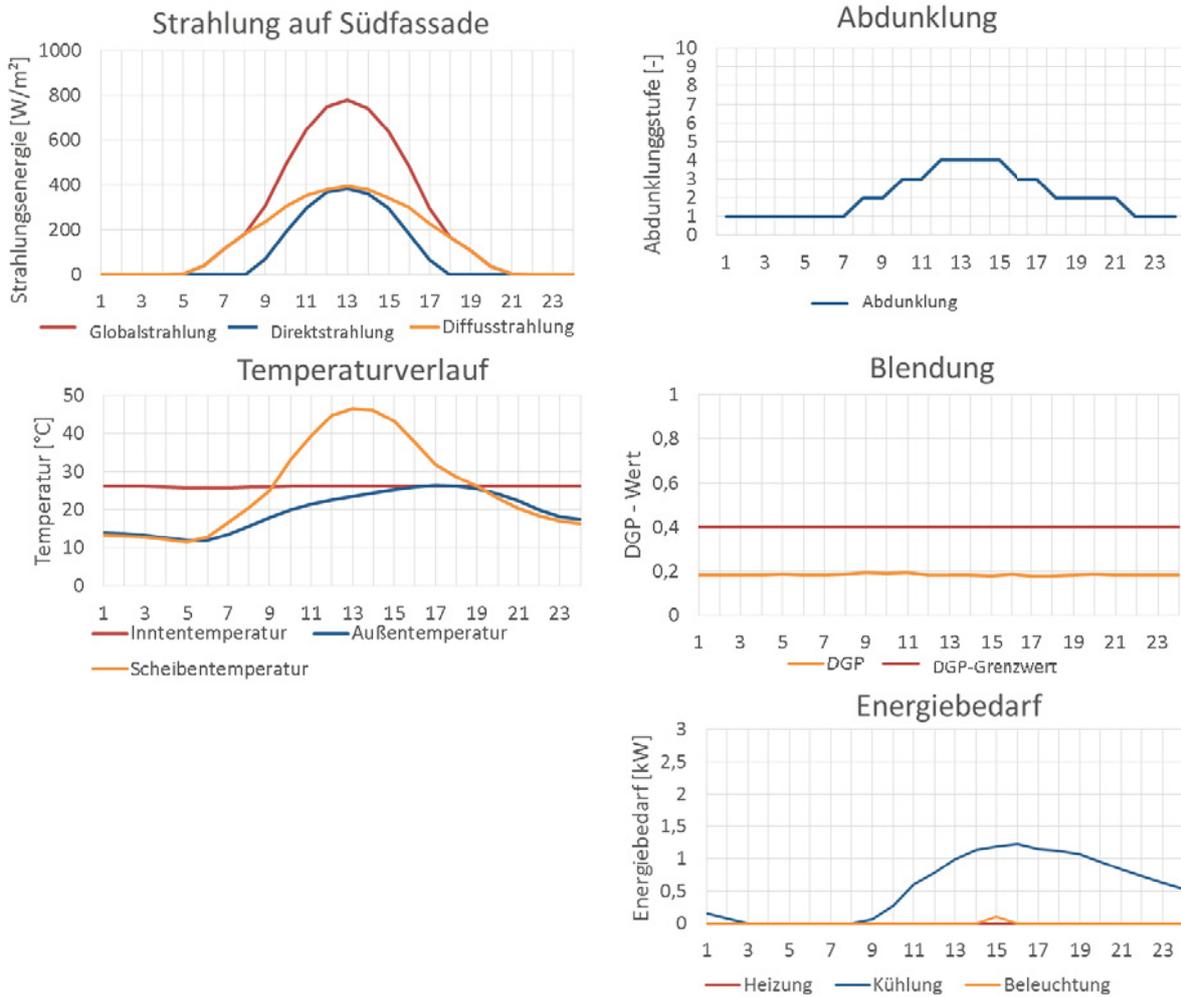


Abbildung 12-2: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem sonnigen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums.



12.1.1.1.3 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Sommertag

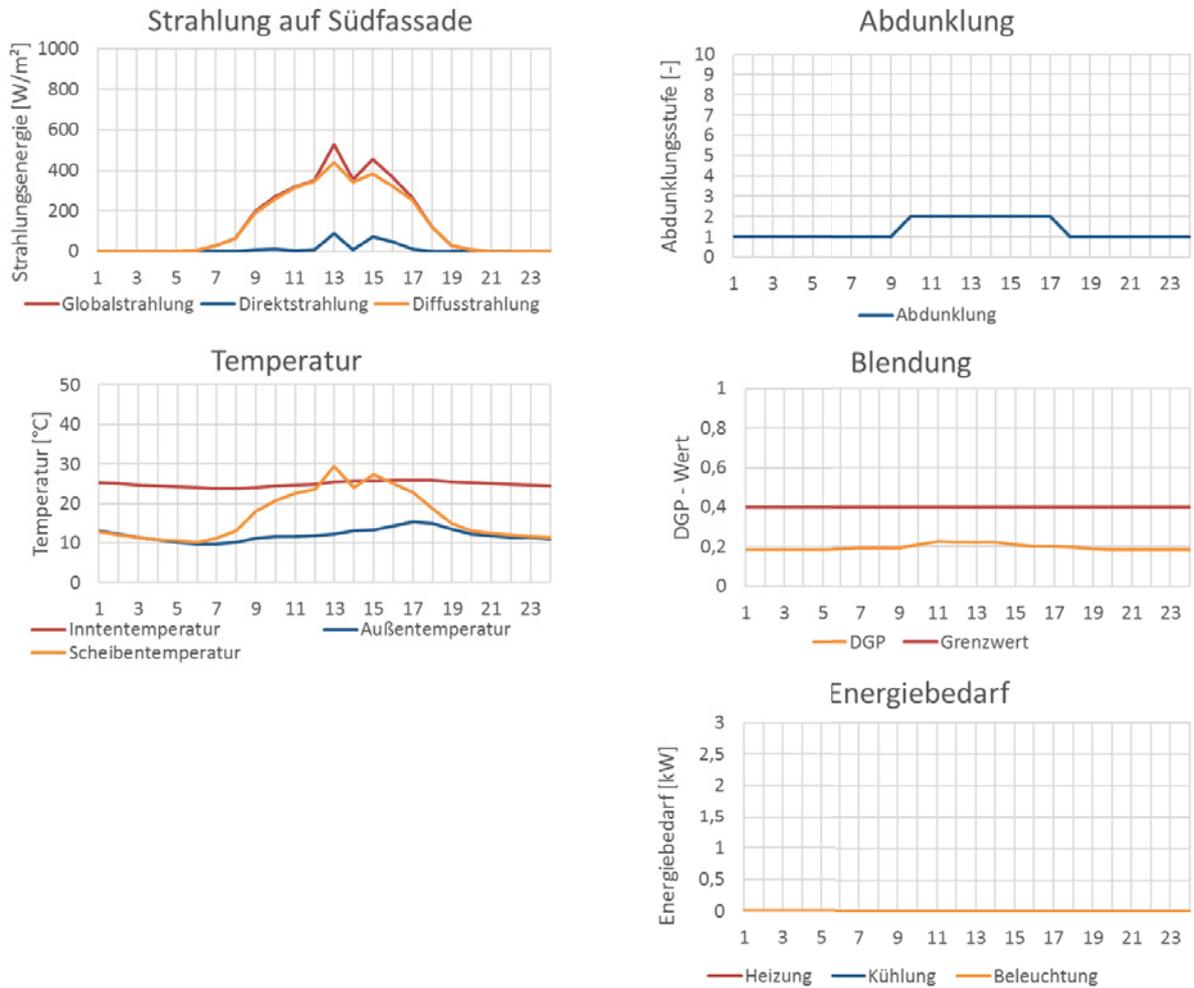


Abbildung 12-3: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums.



12.1.1.1.4 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Wintertag

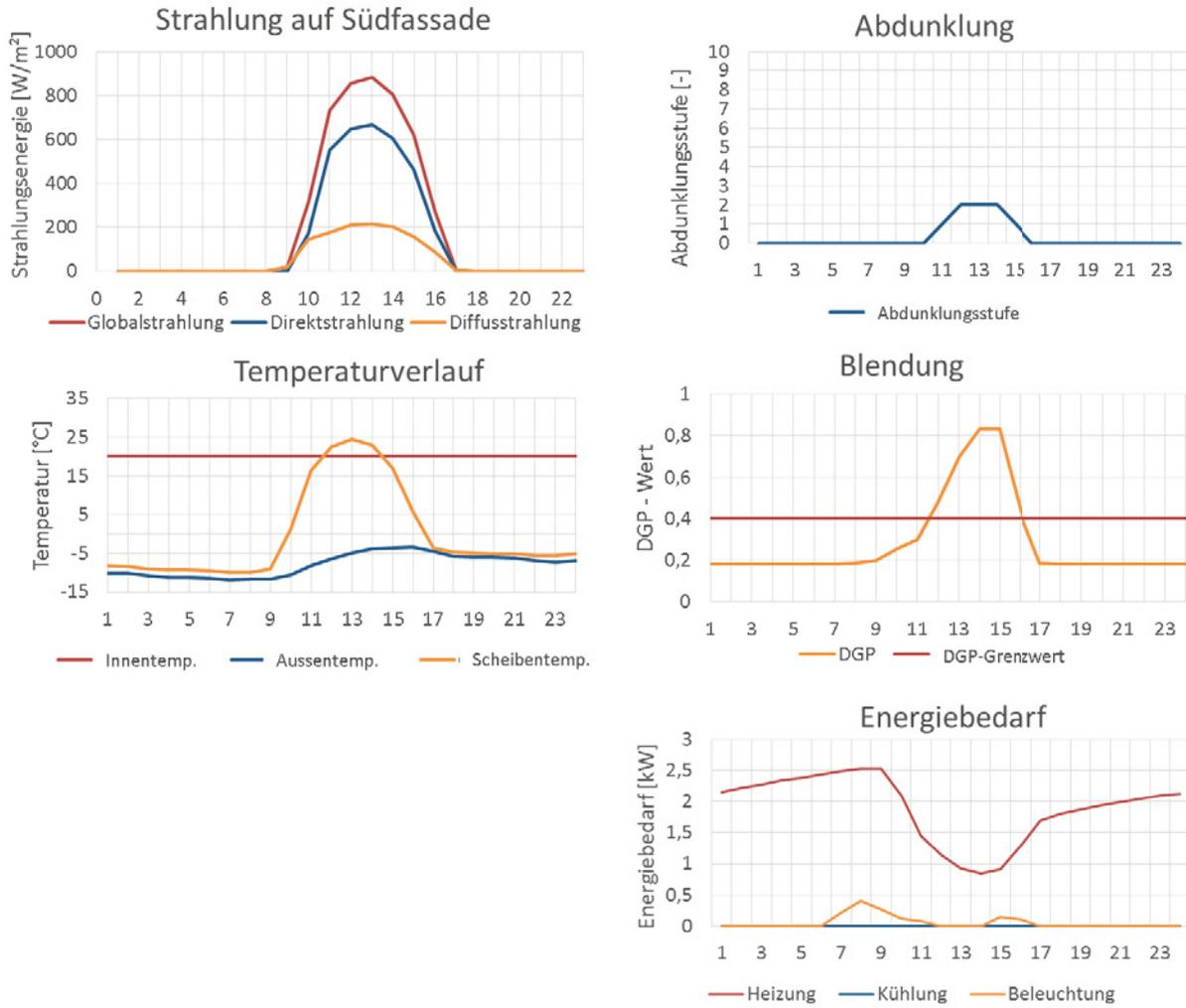


Abbildung 12-4: Tagesanalyse für Suntuive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem sonnigen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums.



12.1.1.1.5 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

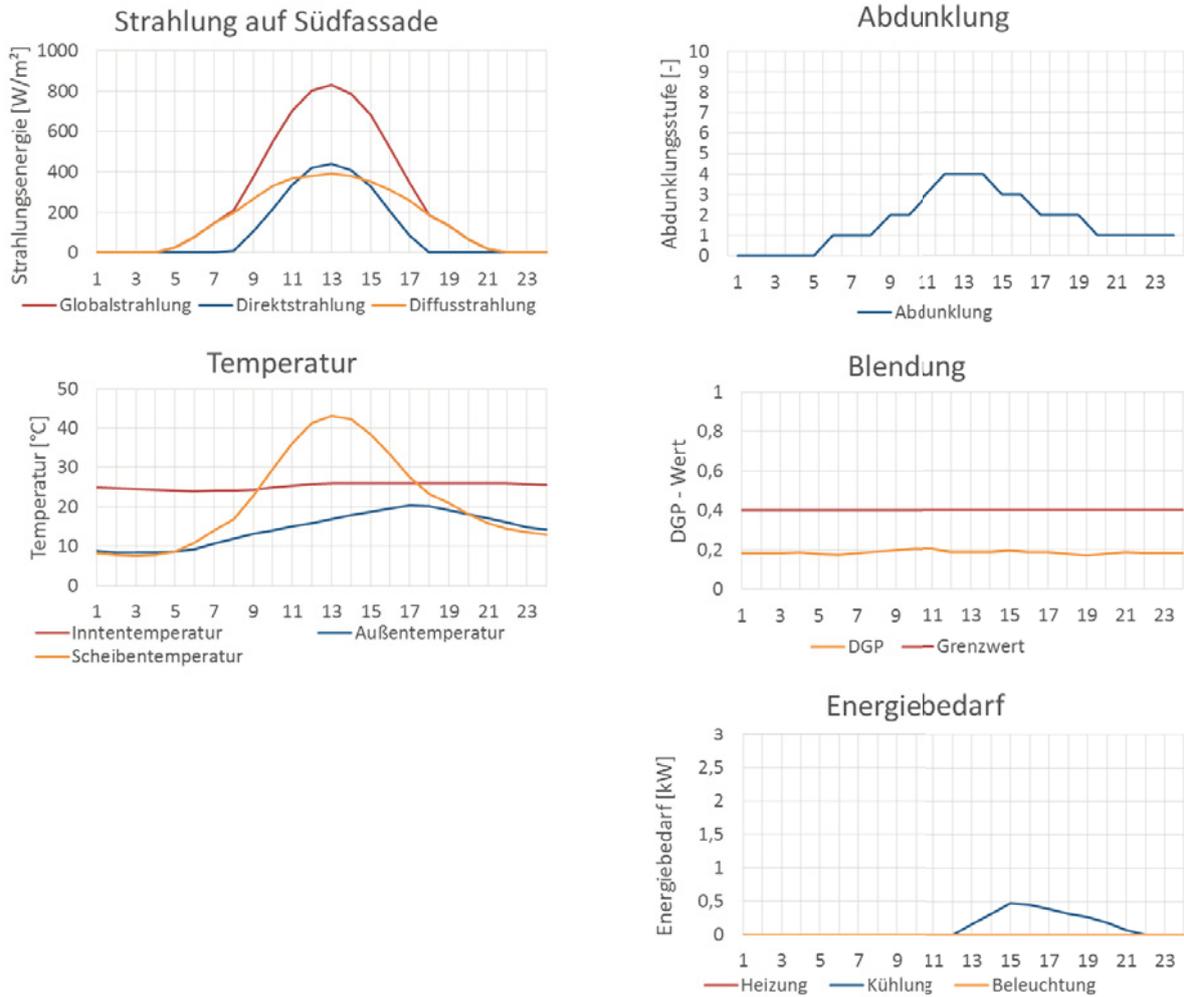


Abbildung 12-5: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem sonnigen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums.



12.1.1.1.6 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Wintertag

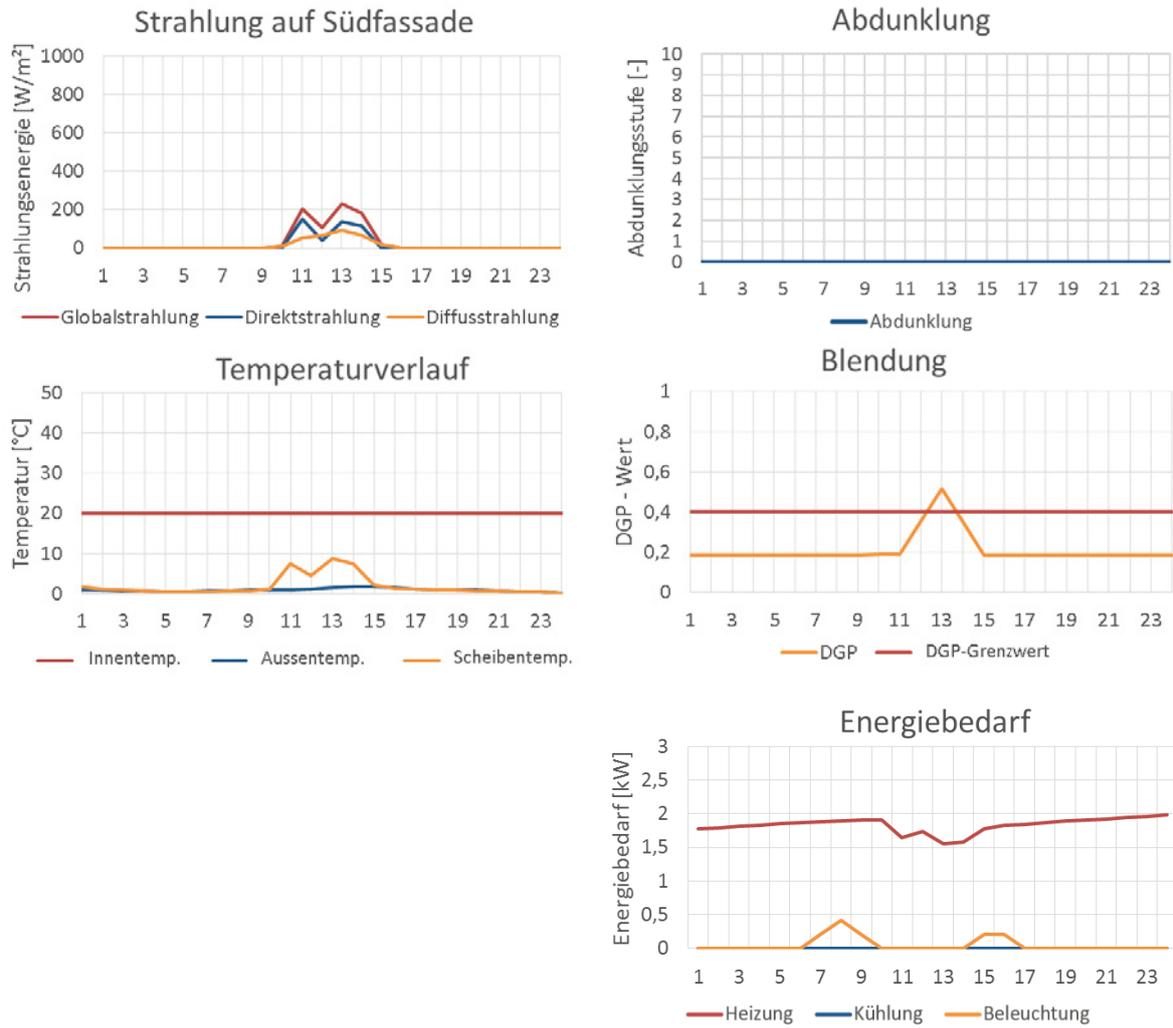


Abbildung 12-6: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem sonnigen Wintertag (06.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums.



12.1.1.1.7 Valencia | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

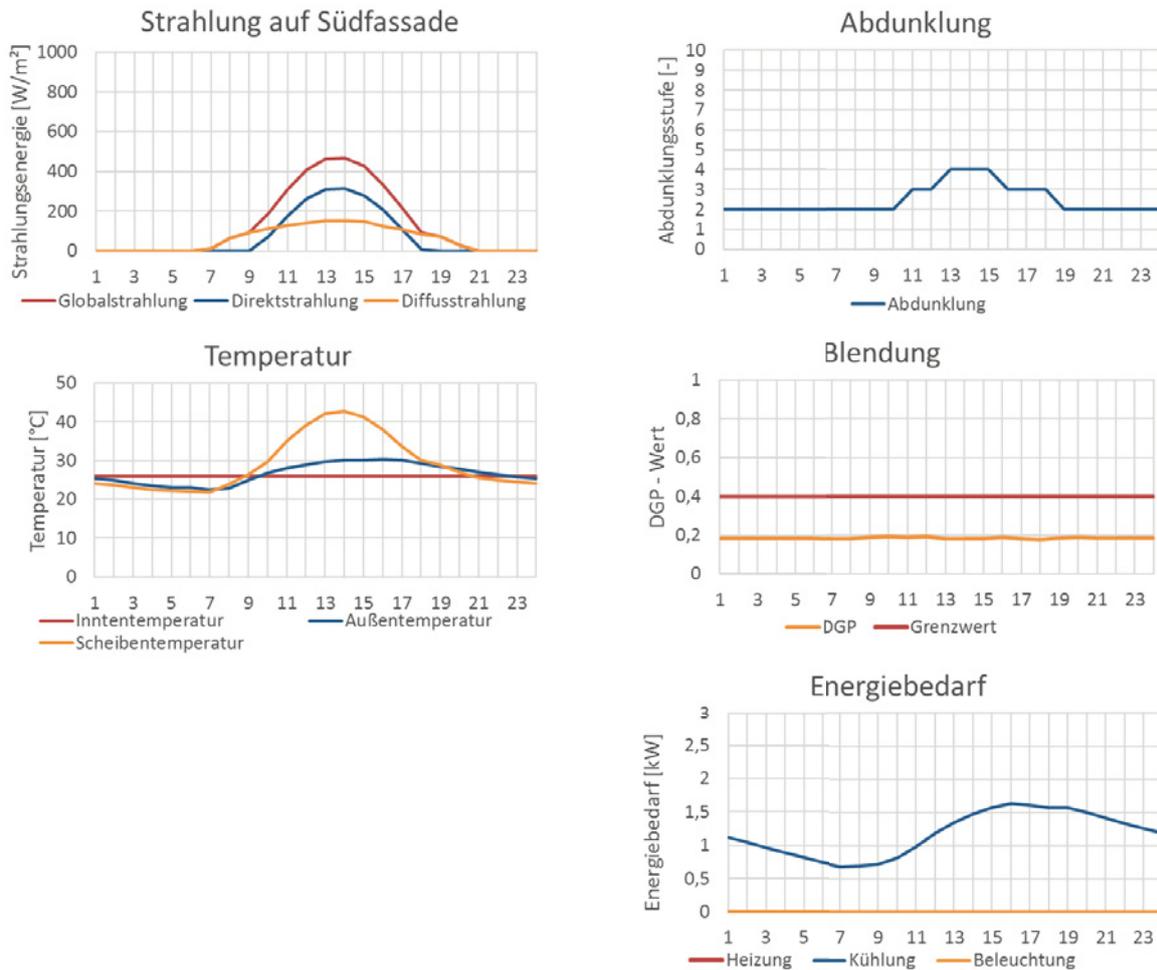


Abbildung 12-7: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Valencia an einem sonnigen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums.



12.1.1.1.8 Accra | Klassenraum | wolkenloser Tag

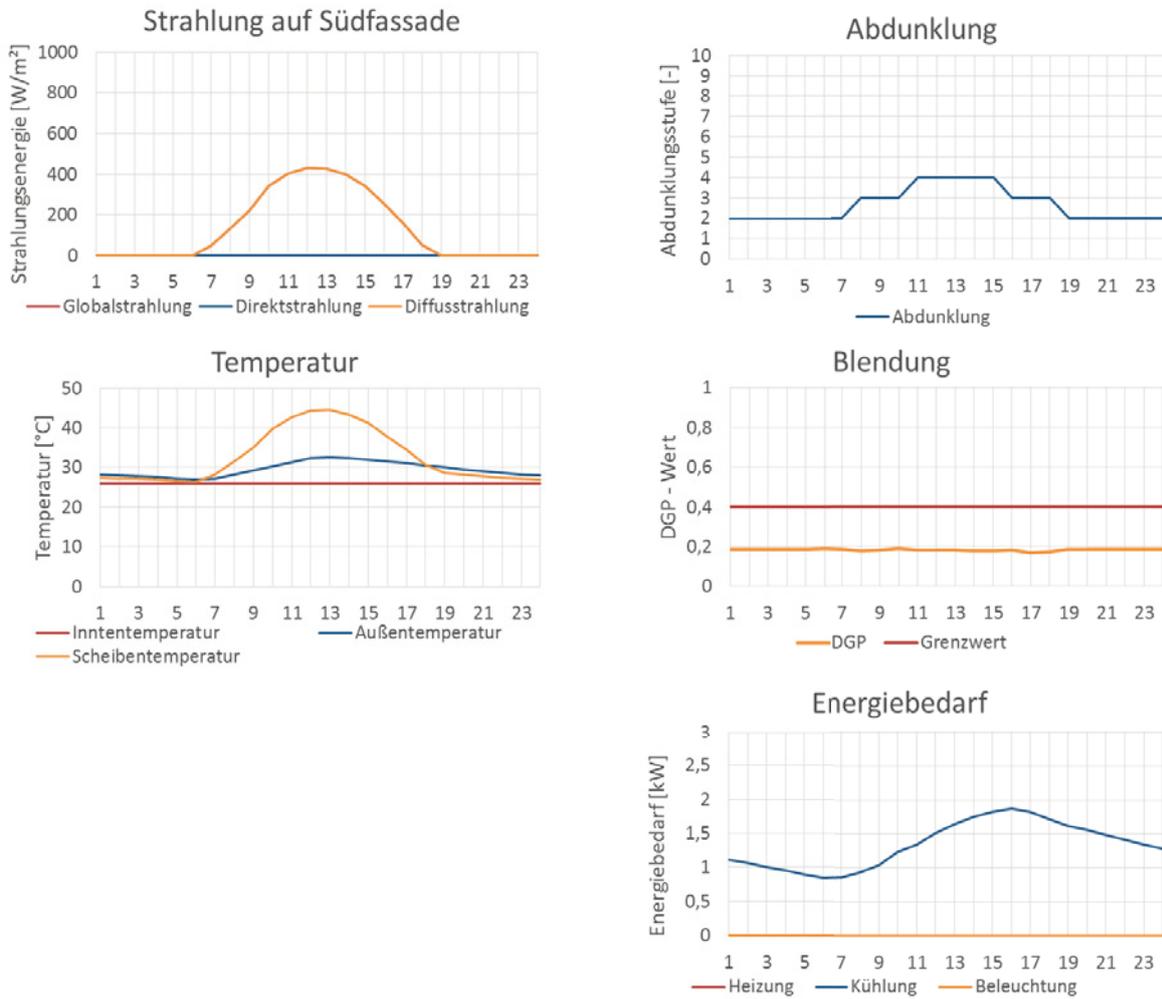


Abbildung 12-8: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums.



12.1.1.2 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand

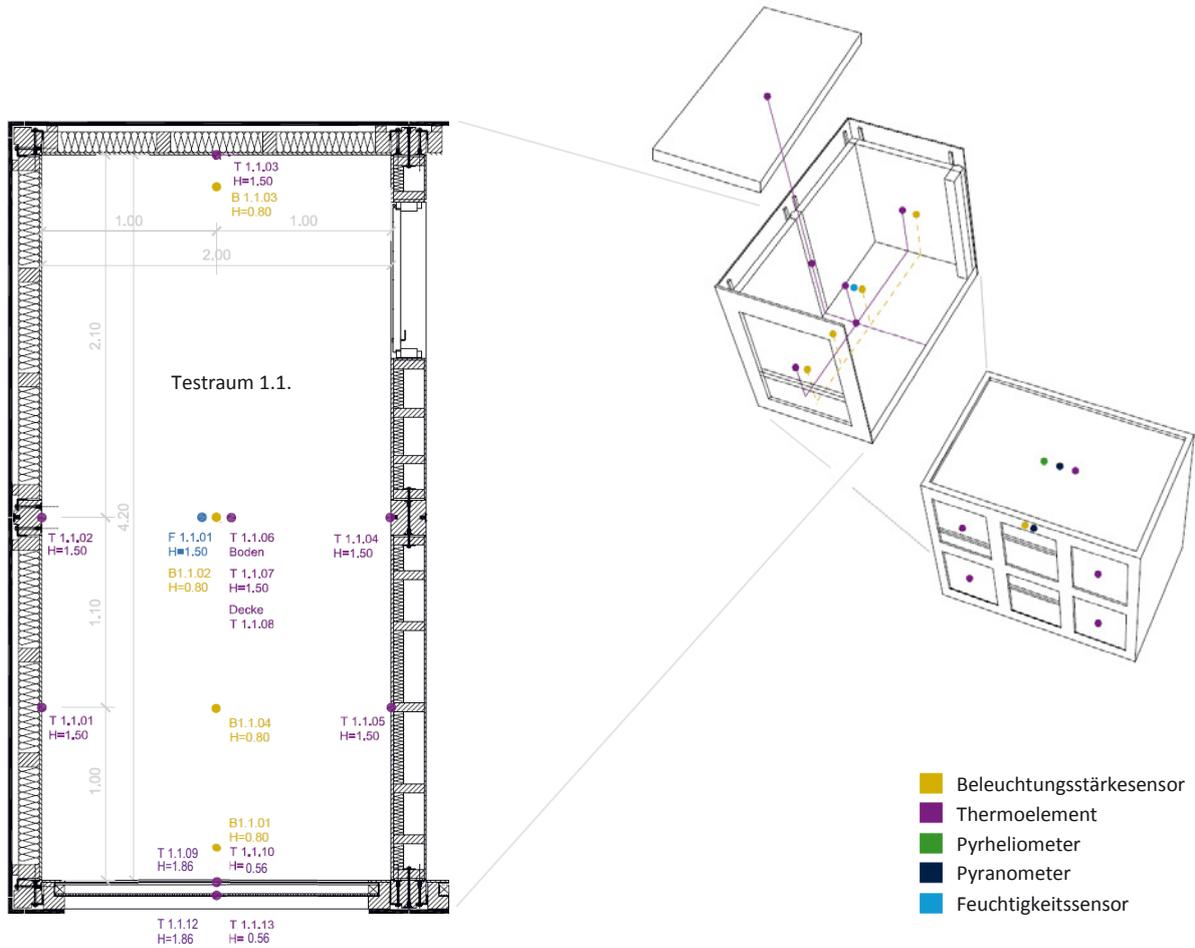


Abbildung 12-9: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 1.1. mit Suntuitive® Dynamic Glass in der Südfassade. Positionierung der Sensoren.



12.1.1.2.1 Stuttgart | Fassadenprüfstand | wolkenloser Frühlingstag

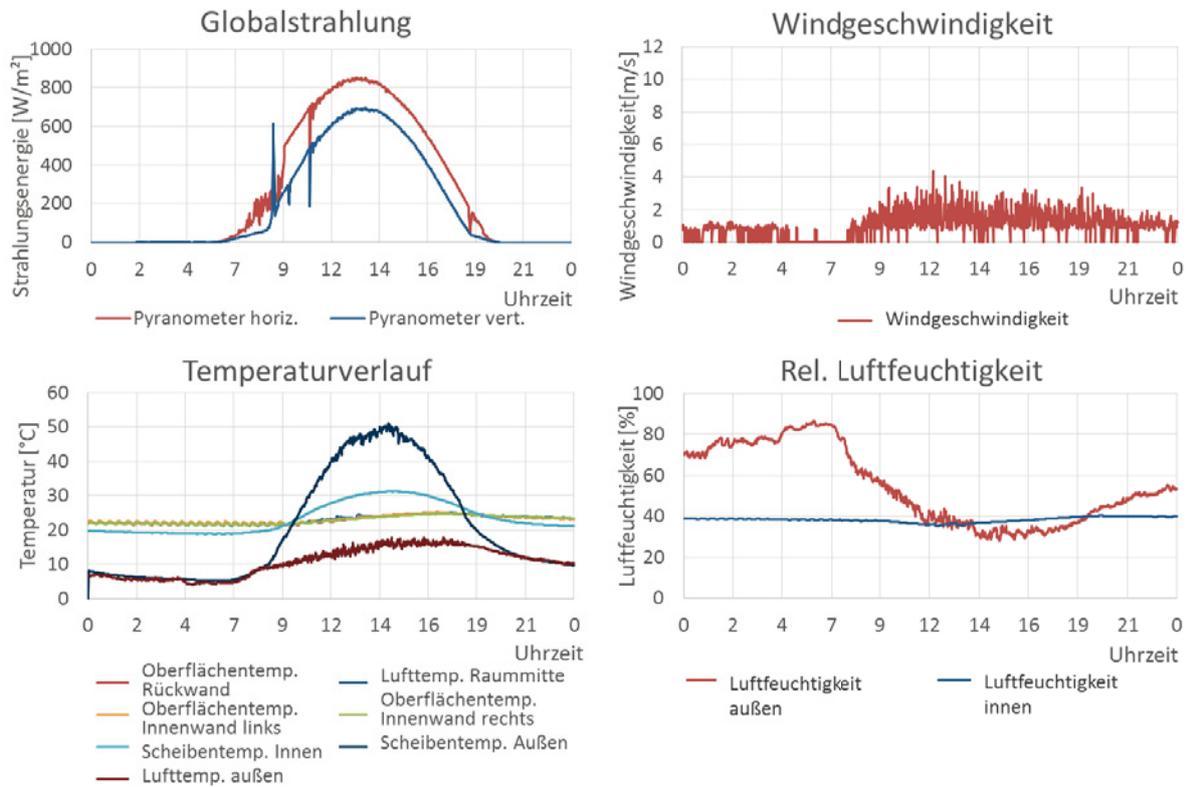


Abbildung 12-10: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem sonnigen Frühlingstag (20.04.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit.

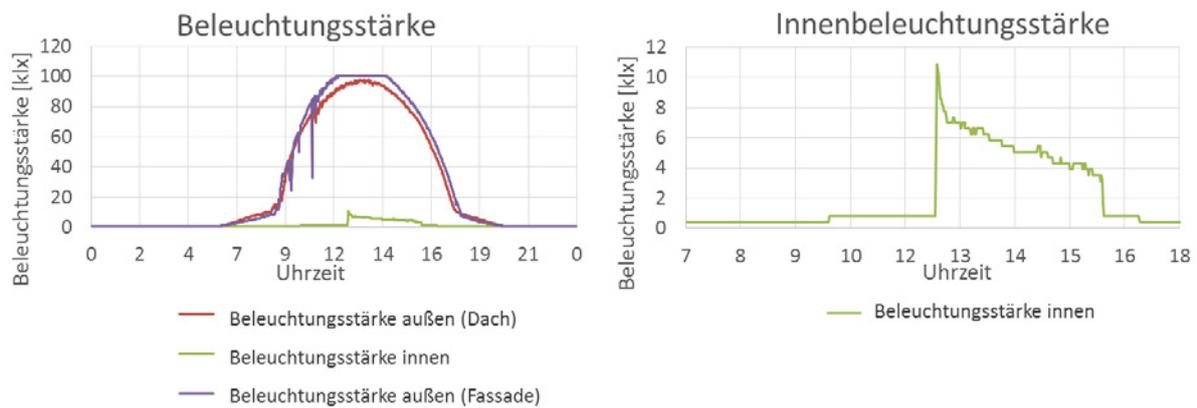


Abbildung 12-11: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem sonnigen Frühlingstag (20.04.2016). Links: Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke auf die Horizontale (Außenbeleuchtungsstärke vor der Verglasung (Südfassade) und auf dem Gebäudedach, Innenbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche 1,20 m hinter der Fassade (Sensor B1.1.04)). Rechts: Detailaufnahme der Innenbeleuchtungsstärke für den Zeitraum 7 – 18 Uhr.



12.1.1.2.2 Stuttgart | Fassadenprüfstand | wolkenloser Sommertag

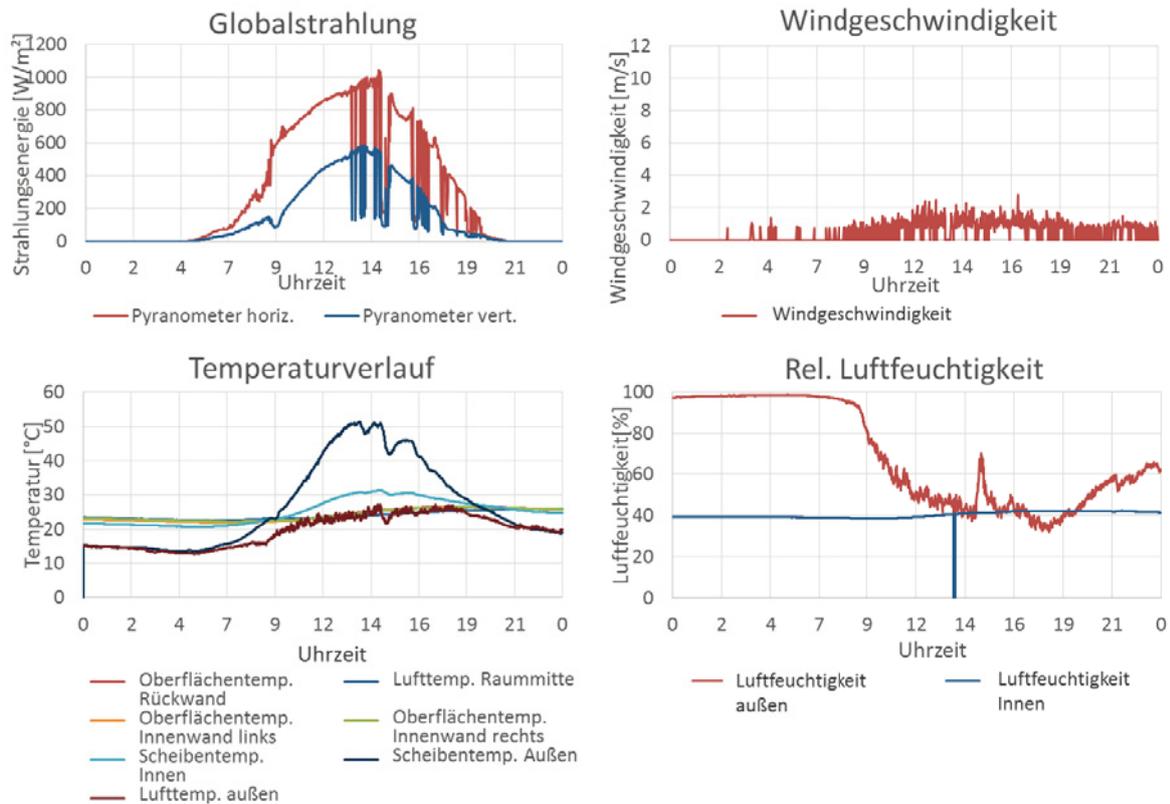


Abbildung 12-12: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem sonnigen Sommertag (06.06.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit.

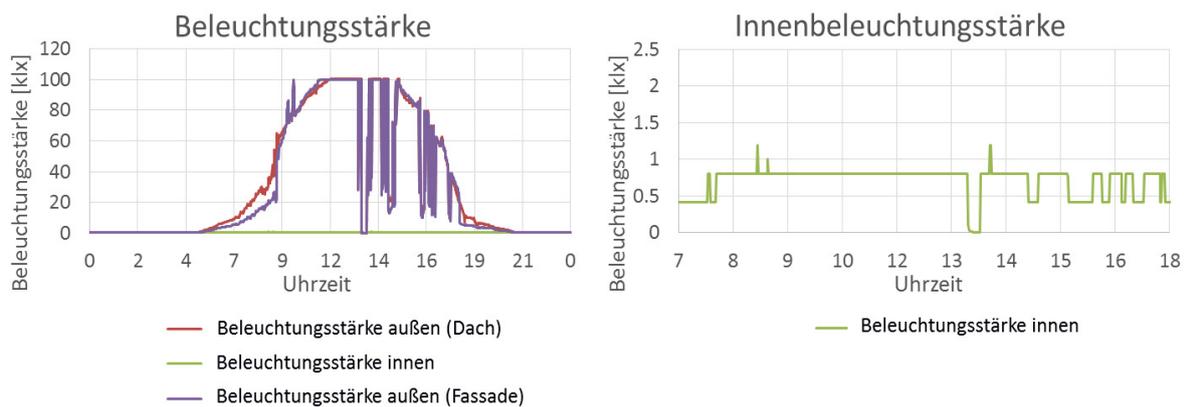


Abbildung 12-13: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem sonnigen Sommertag (06.06.2016). Links: Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke auf die Horizontale (Außenbeleuchtungsstärke vor der Verglasung (Südfassade) und auf dem Gebäudedach, Innenbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche 1,20 m hinter der Fassade (Sensor B1.1.04)). Rechts: Detailaufnahme der Innenbeleuchtungsstärke für den Zeitraum 7 – 18 Uhr.



12.1.1.2.3 Stuttgart | Fassadenprüfstand | bewölkter Sommertag

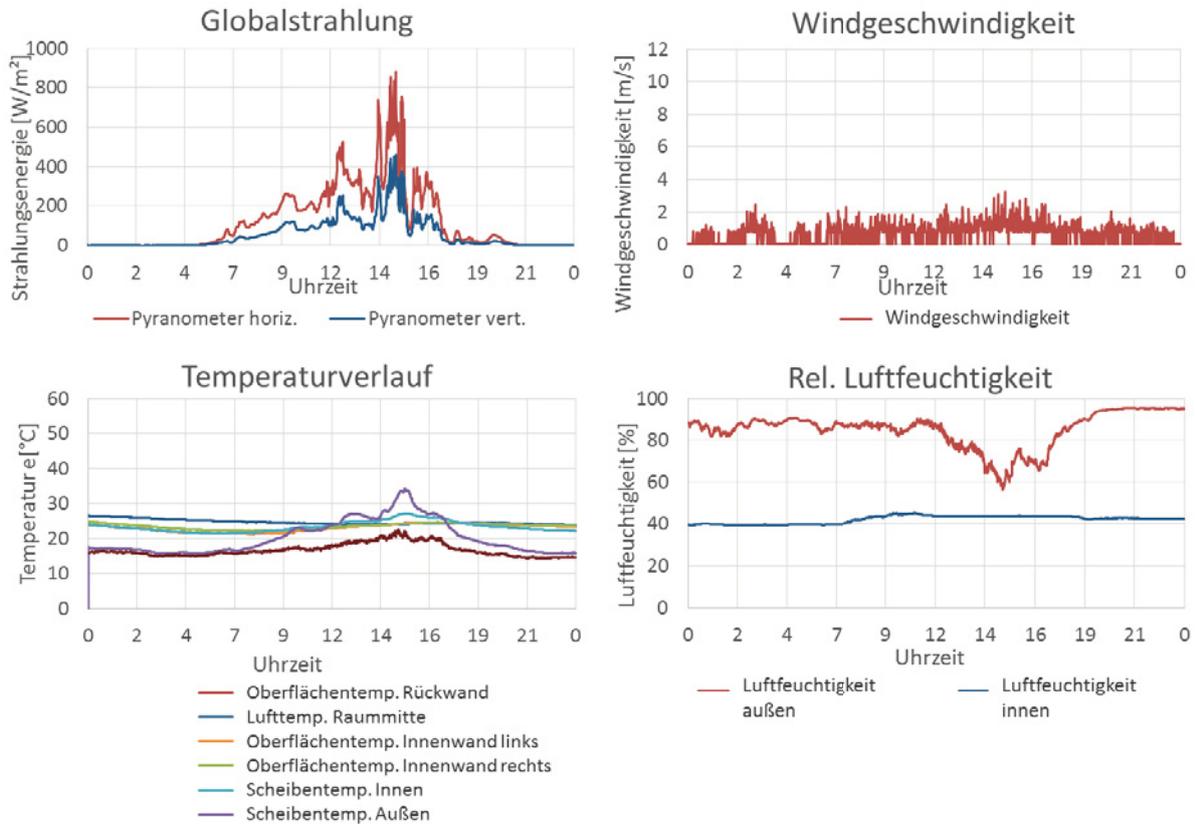


Abbildung 12-14: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (08.06.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit.

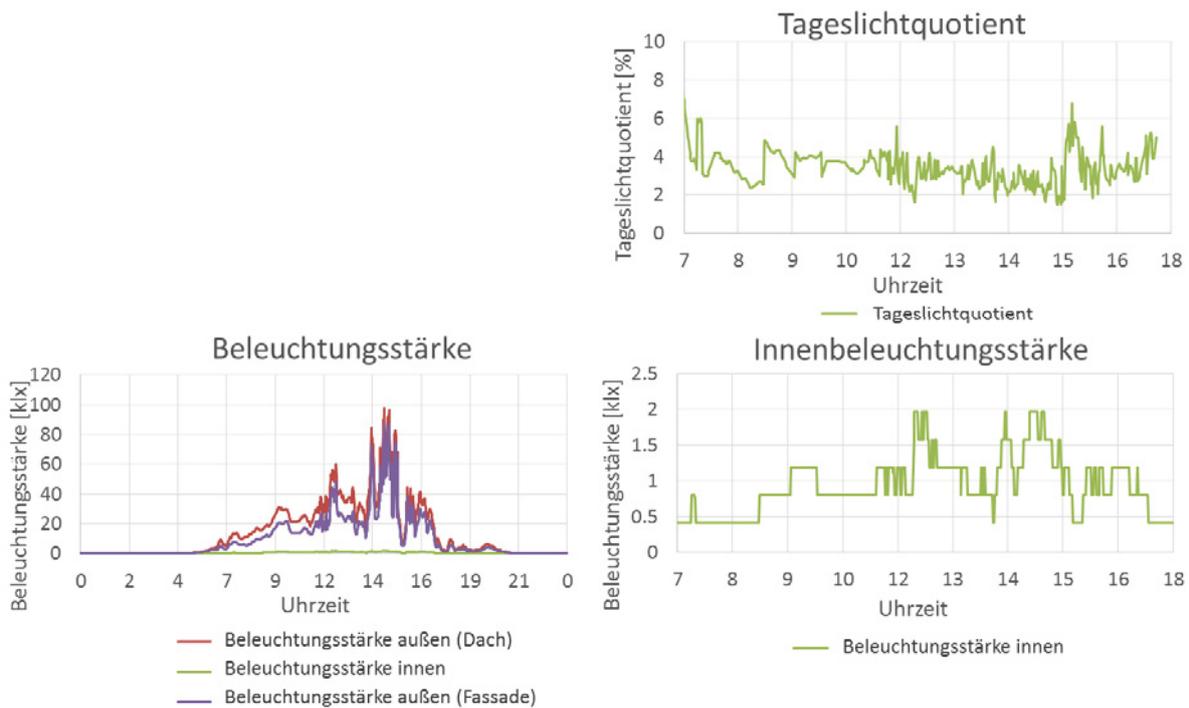


Abbildung 12-15: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem sonnigen Frühlingstag (20.04.2016). Links: Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke auf die Horizontale



(Außenbeleuchtungsstärke vor der Verglasung (Südfassade) und auf dem Gebäudedach, Innenbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche 1,20 m hinter der Fassade (Sensor B1.1.04)). Rechts: Detailaufnahmen der Innenbeleuchtungsstärke und des Tageslichtquotienten für den Zeitraum 7 – 18 Uhr.



12.1.2 Thermotropes System: GLASSX®crystal

12.1.2.1 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand

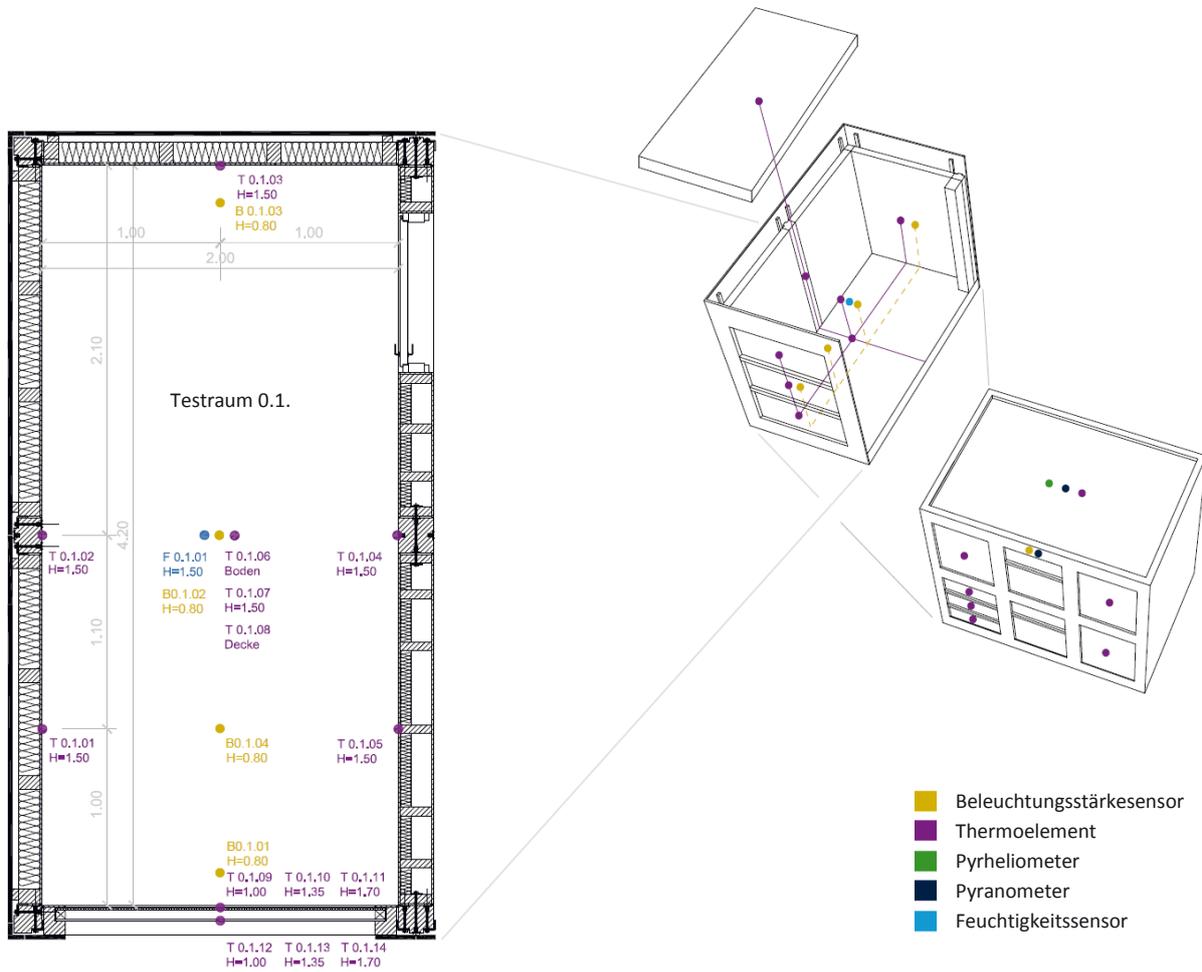


Abbildung 12-16: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Positionierung der Sensoren.



12.1.2.1.1 Stuttgart | Fassadenprüfstand | November 2015

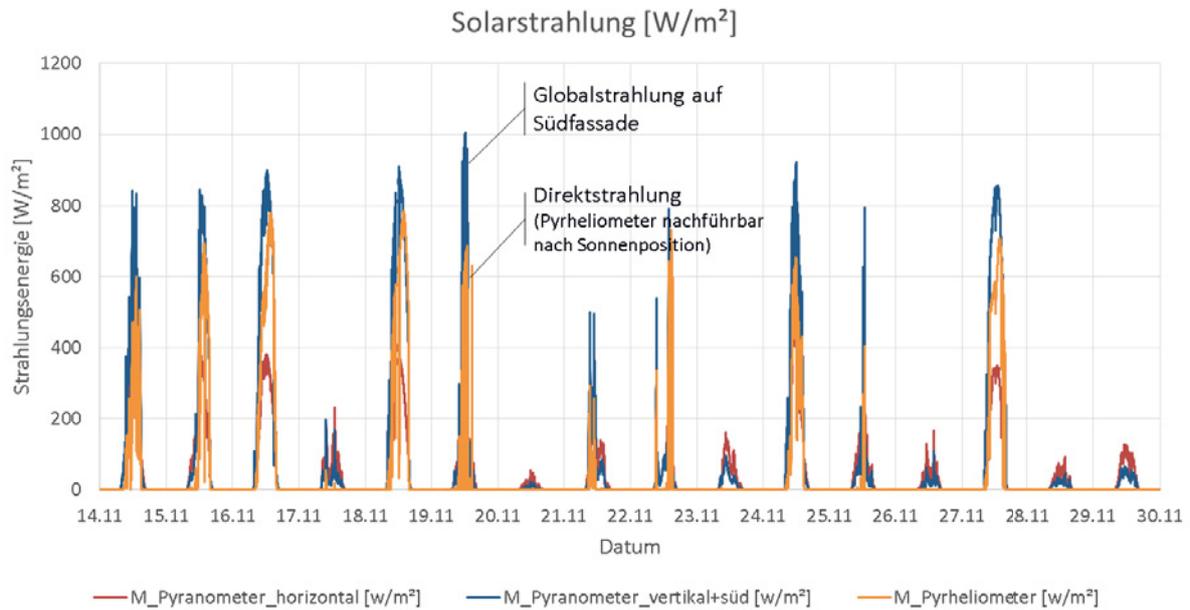


Abbildung 12-17: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Strahlungsverlauf im November 2015.

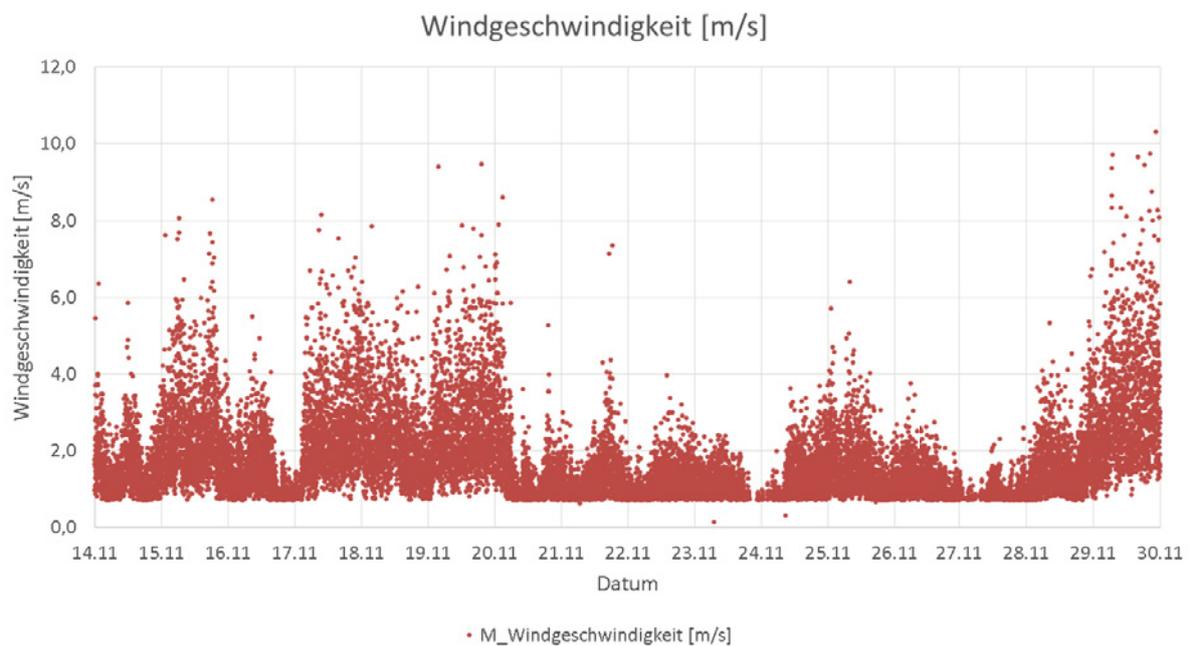


Abbildung 12-18: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Windgeschwindigkeiten im November 2015.

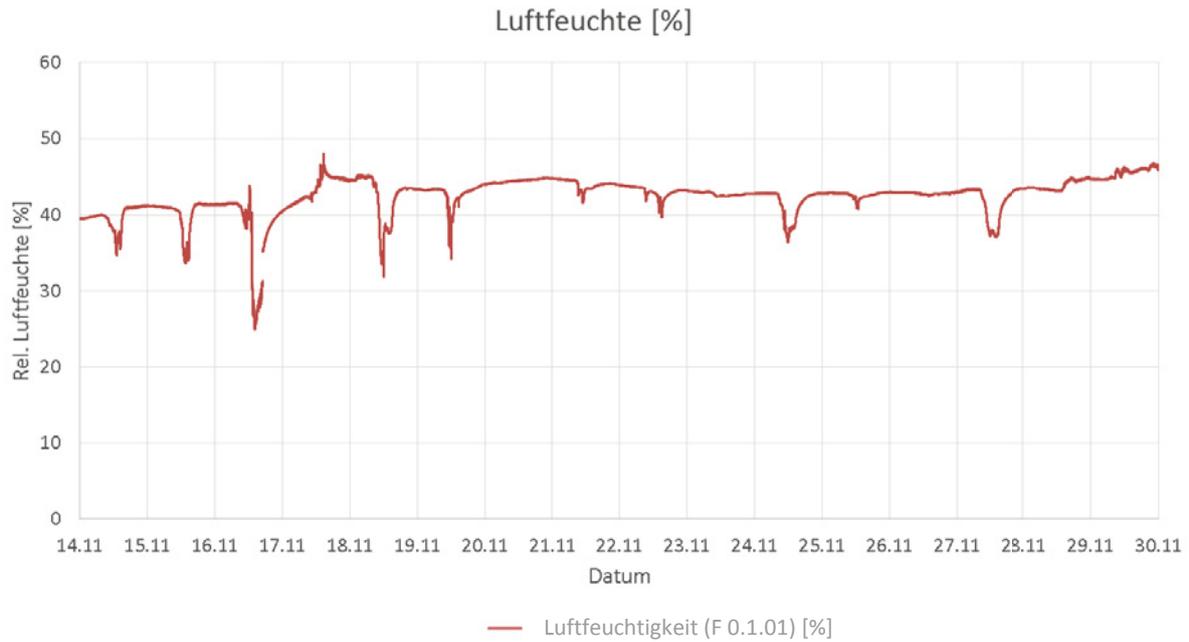


Abbildung 12-19: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Relative Luftfeuchte im November 2015.

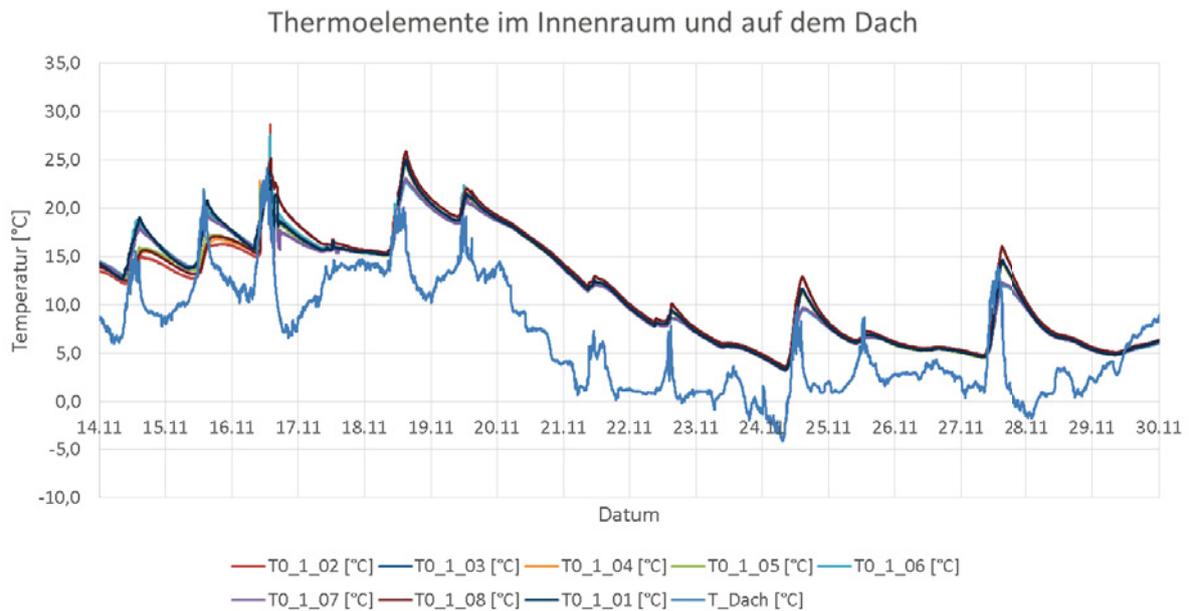


Abbildung 12-20: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Temperaturverlauf im November 2015, Innen- und Außenlufttemperaturen (Sensorenbezeichnung s. Abbildung 12-16).

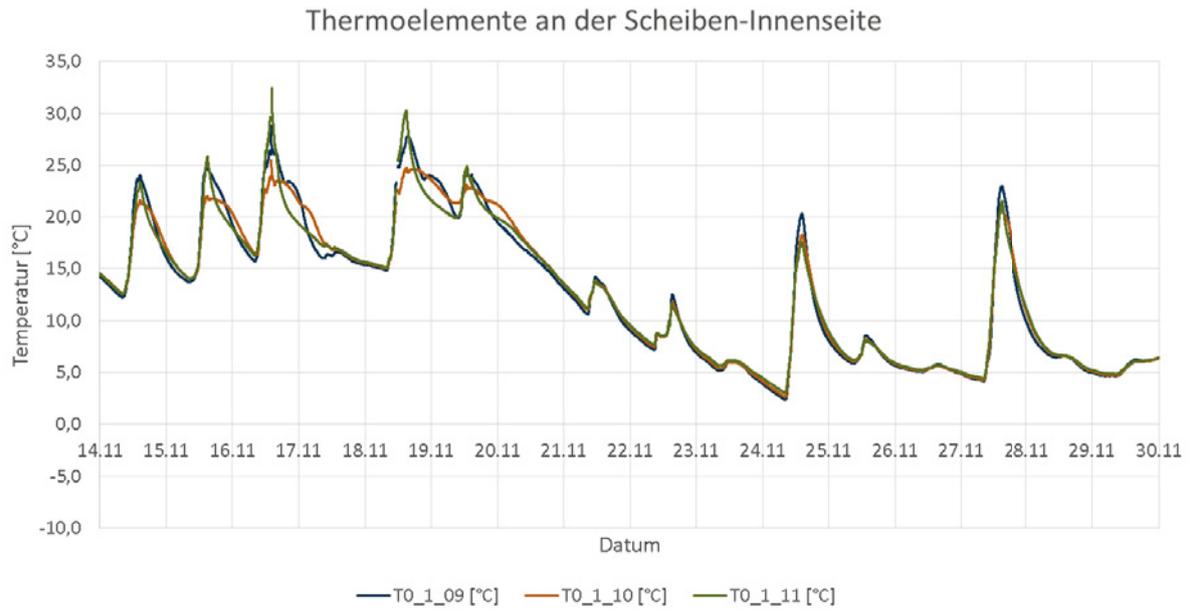


Abbildung 12-21: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Temperaturverlauf im November 2015, Oberflächentemperaturen auf Scheiben-Innenseite (Sensorenbezeichnung s. Abbildung 12-16).

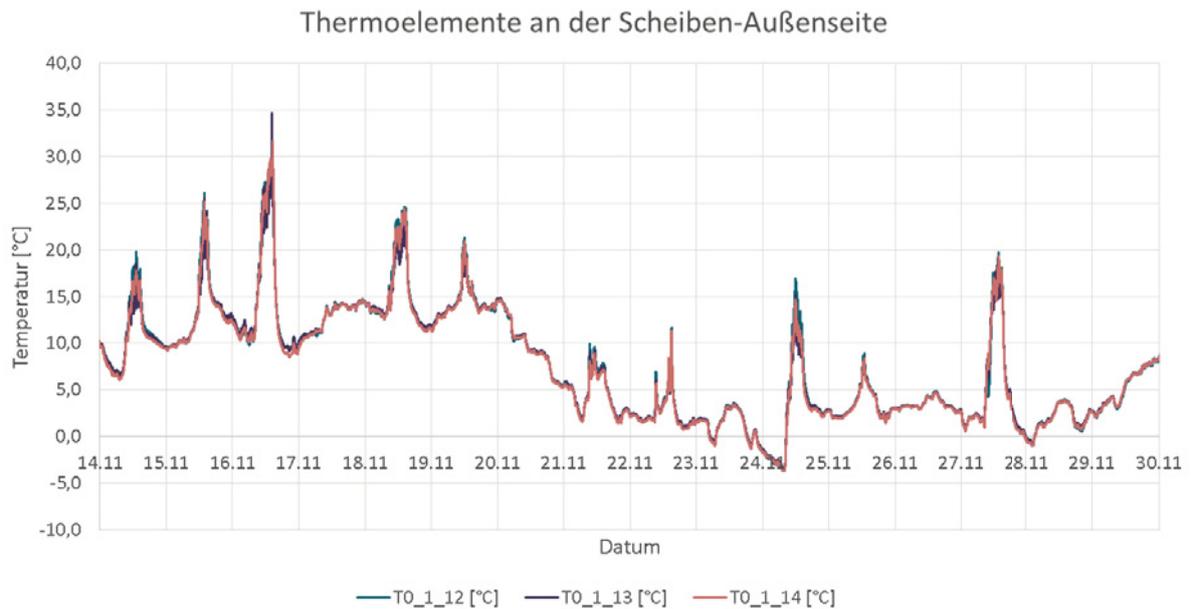


Abbildung 12-22: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Temperaturverlauf im November 2015, Oberflächentemperaturen auf Scheiben-Außenseite (Sensorenbezeichnung s. Abbildung 12-16).

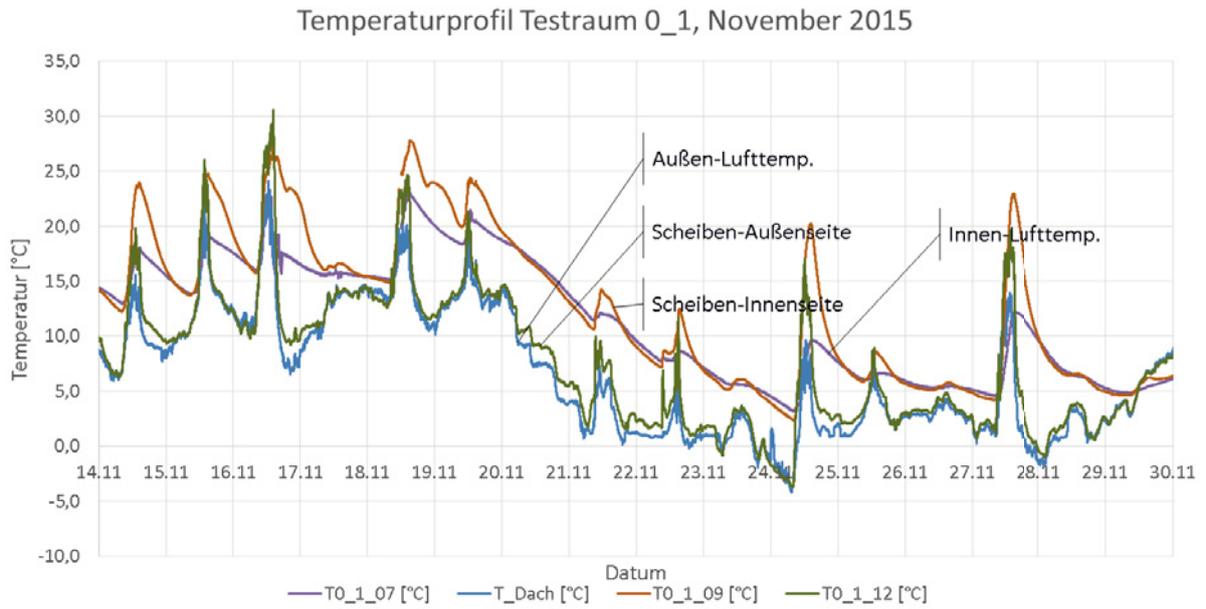


Abbildung 12-23: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Temperaturverlauf im November 2015, Vergleich ausgewählter Oberflächen- und Lufttemperaturen (Sensorenbezeichnung s. Abbildung 12-16).



12.2 Steuerbare Systeme

12.2.1 Elektrochrome Verglasung: ECONTROL® smart 55/10

12.2.1.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen

12.2.1.1.1 Stuttgart | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag | RS I

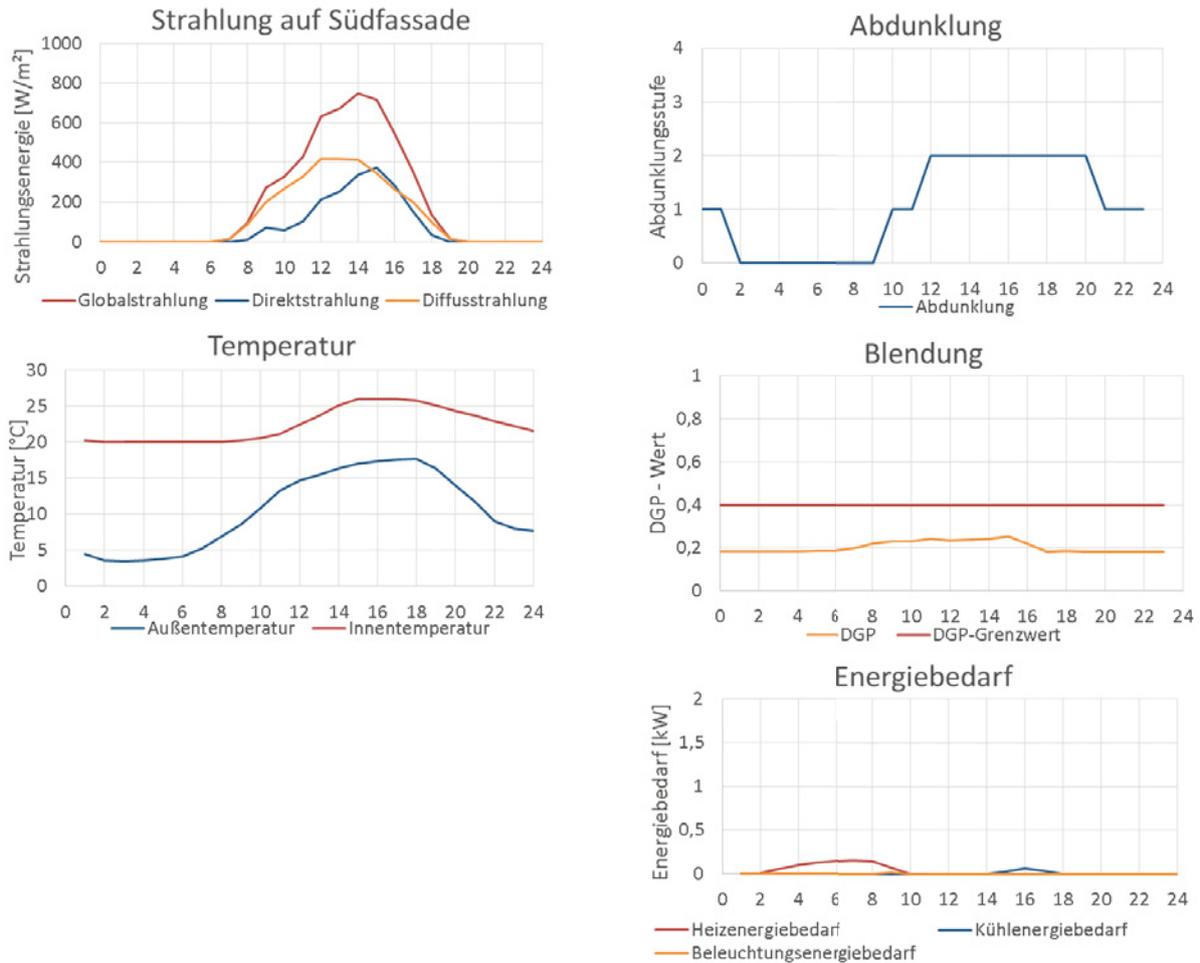


Abbildung 12-24: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.1.1.2 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Sommertag | RS I

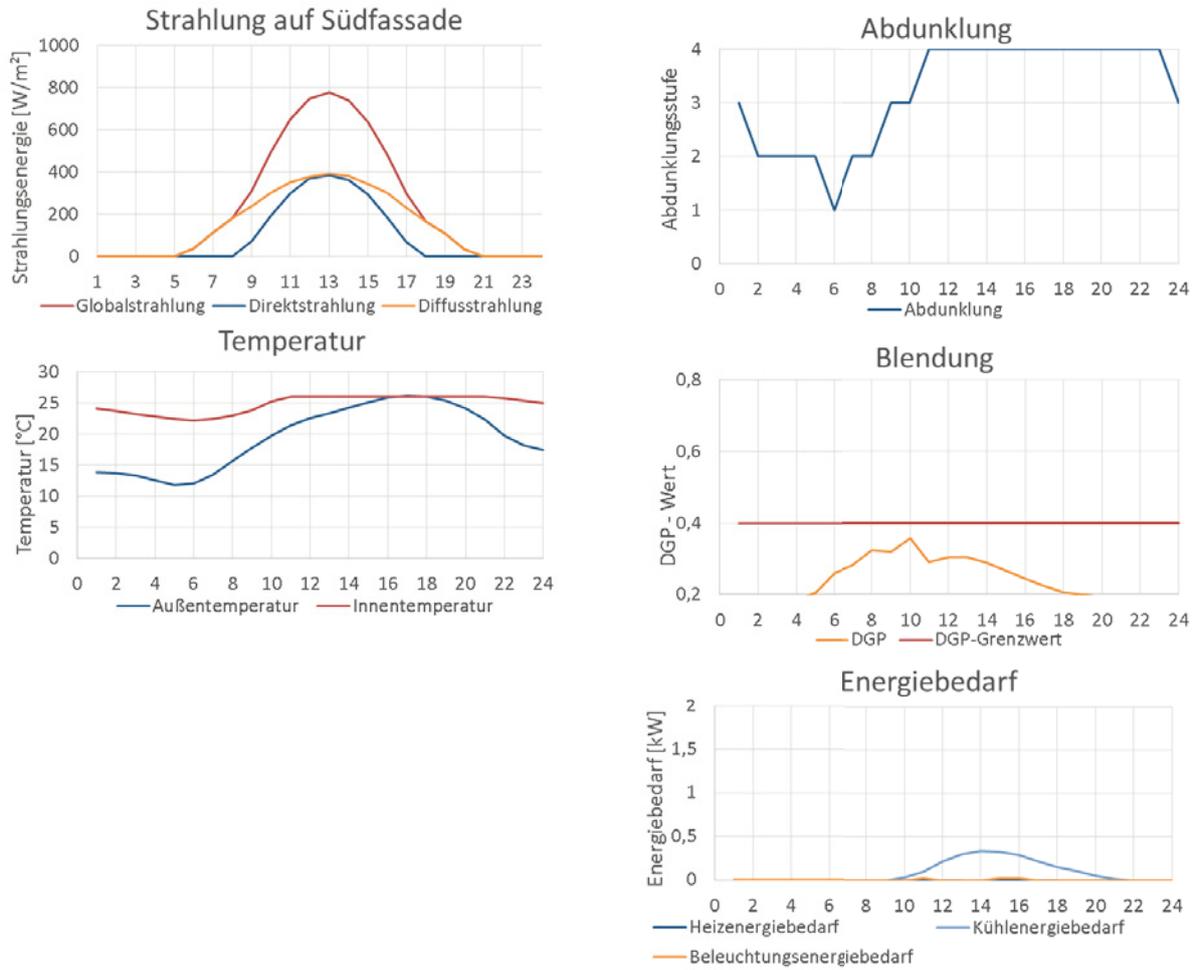


Abbildung 12-25: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.1.1.3 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Sommertag | RS I

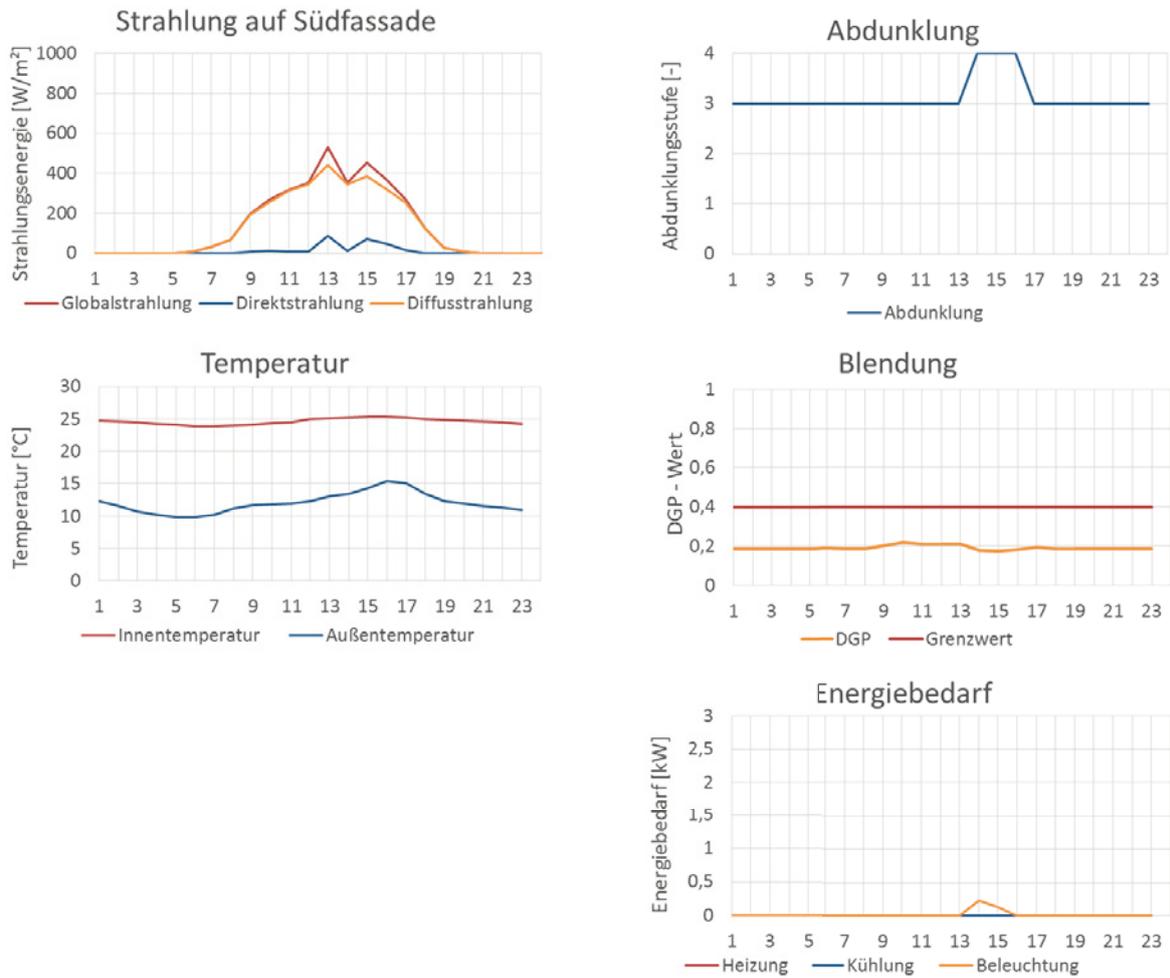


Abbildung 12-26: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.1.1.4 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Wintertag | RS I

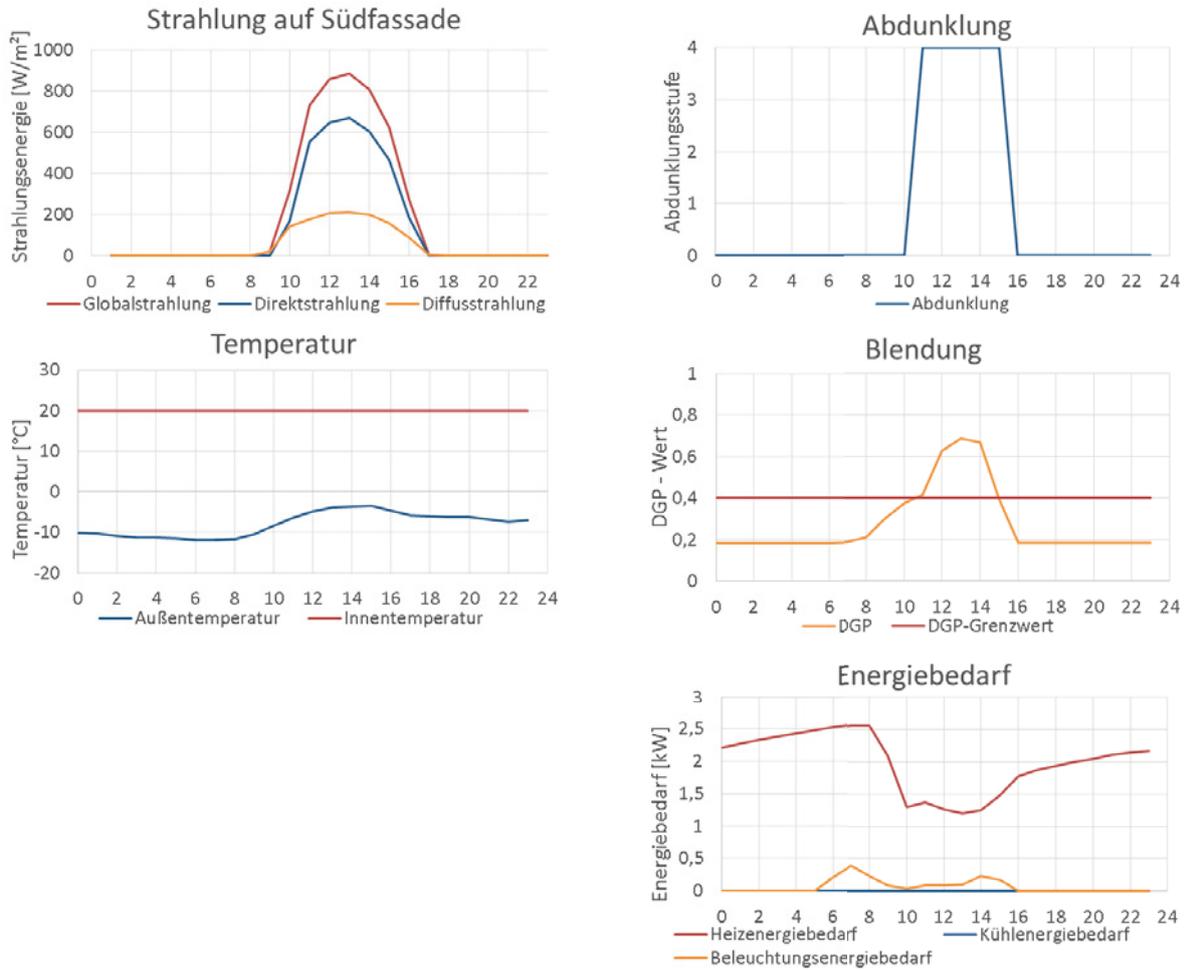


Abbildung 12-27: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.1.1.5 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Wintertag | RS I

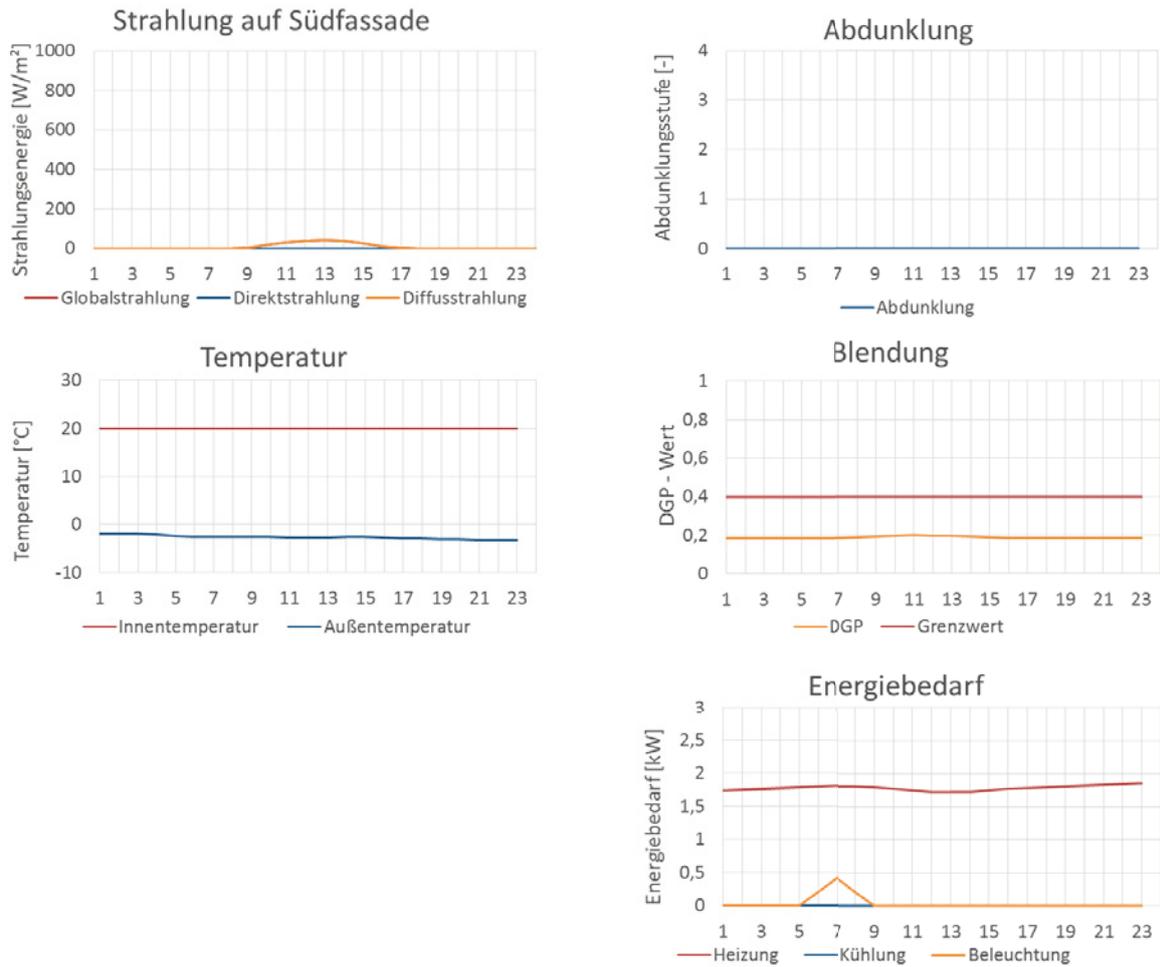


Abbildung 12-28: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.1.1.6 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Sommertag | RS I

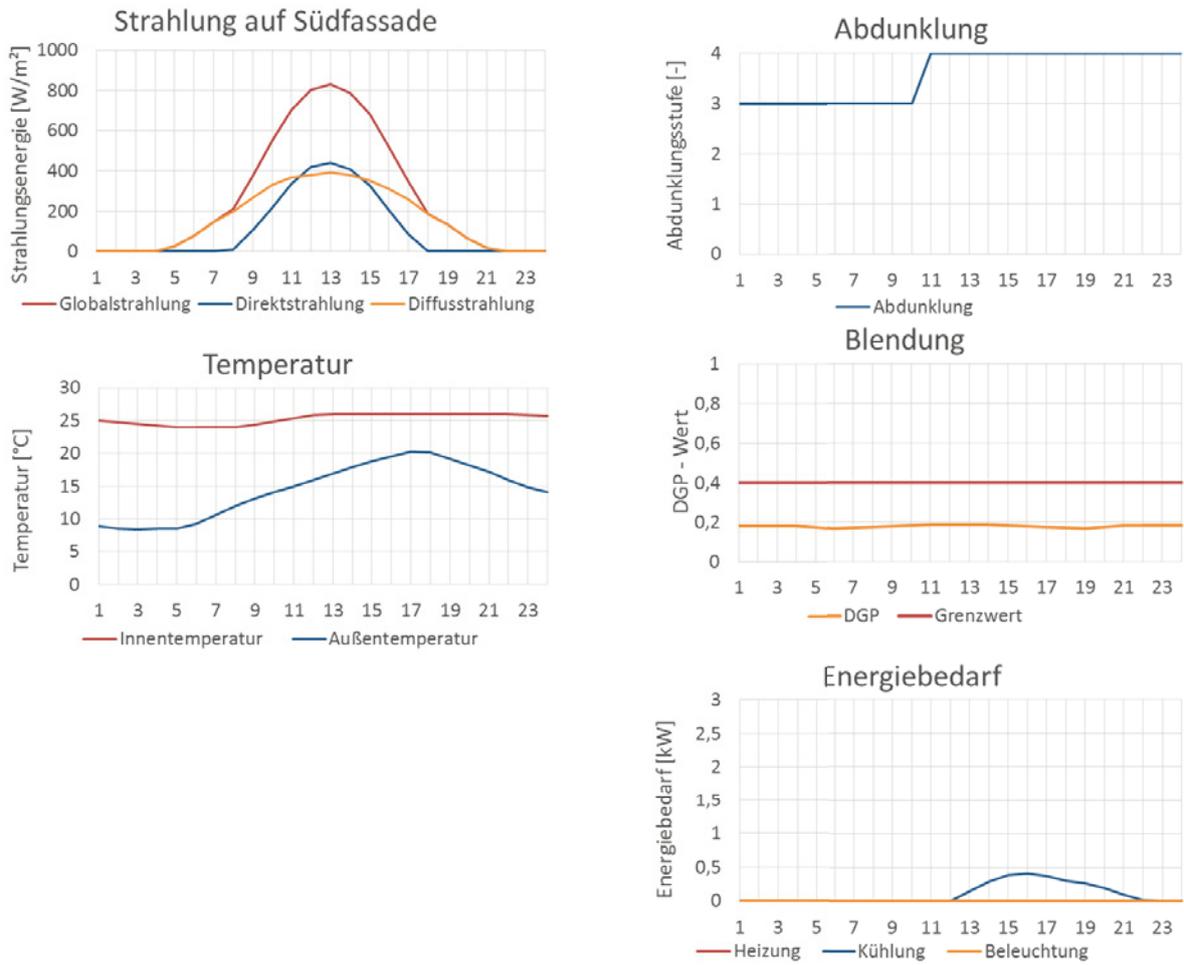


Abbildung 12-29: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.1.1.7 Valencia | Klassenraum | wolkenloser Sommertag | RS I

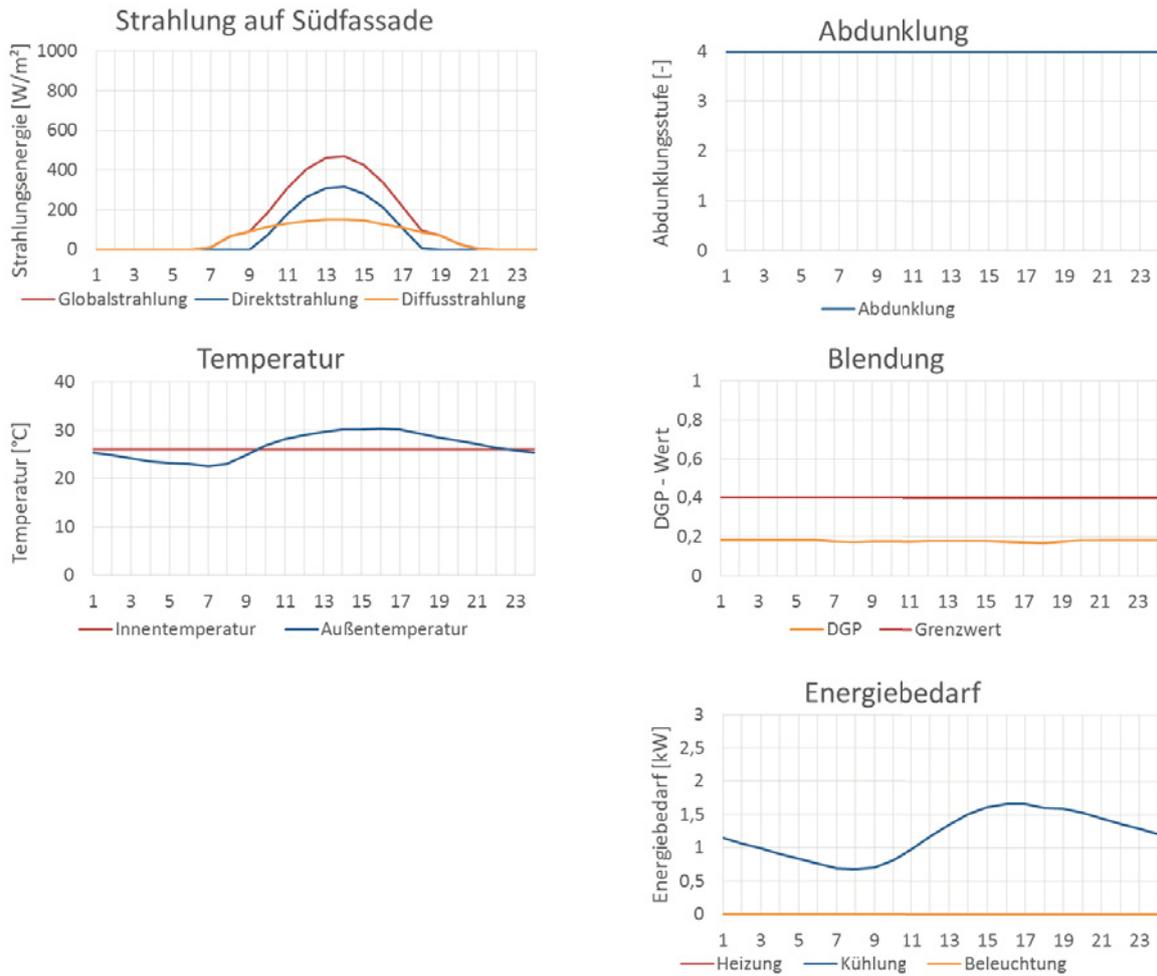


Abbildung 12-30: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.1.1.8 Accra | Klassenraum | wolkenloser Tag | RS I

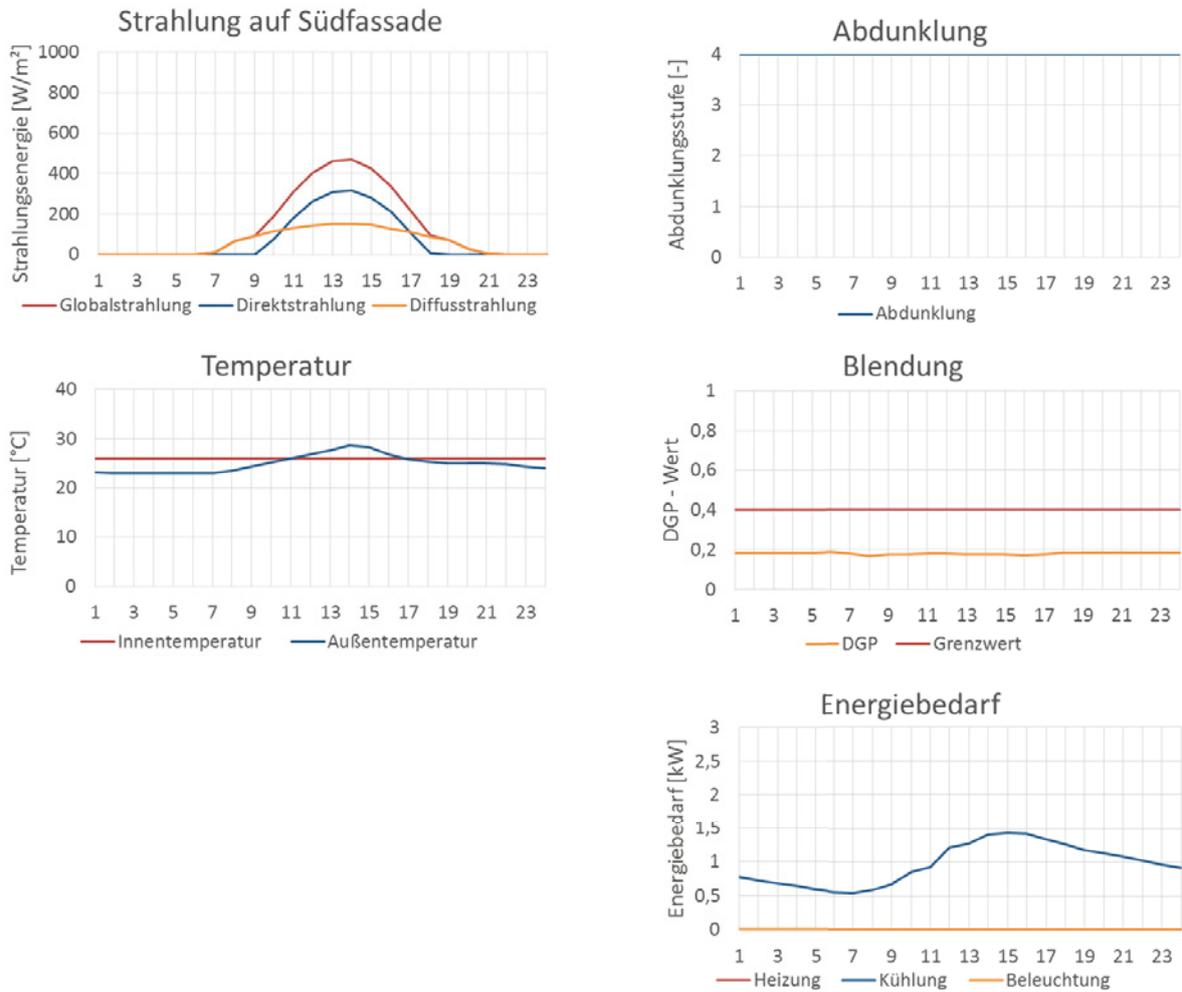


Abbildung 12-31: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.1.1.9 Stuttgart | Fassadenprüfstand | wechselhafter Frühlingstag | RS II

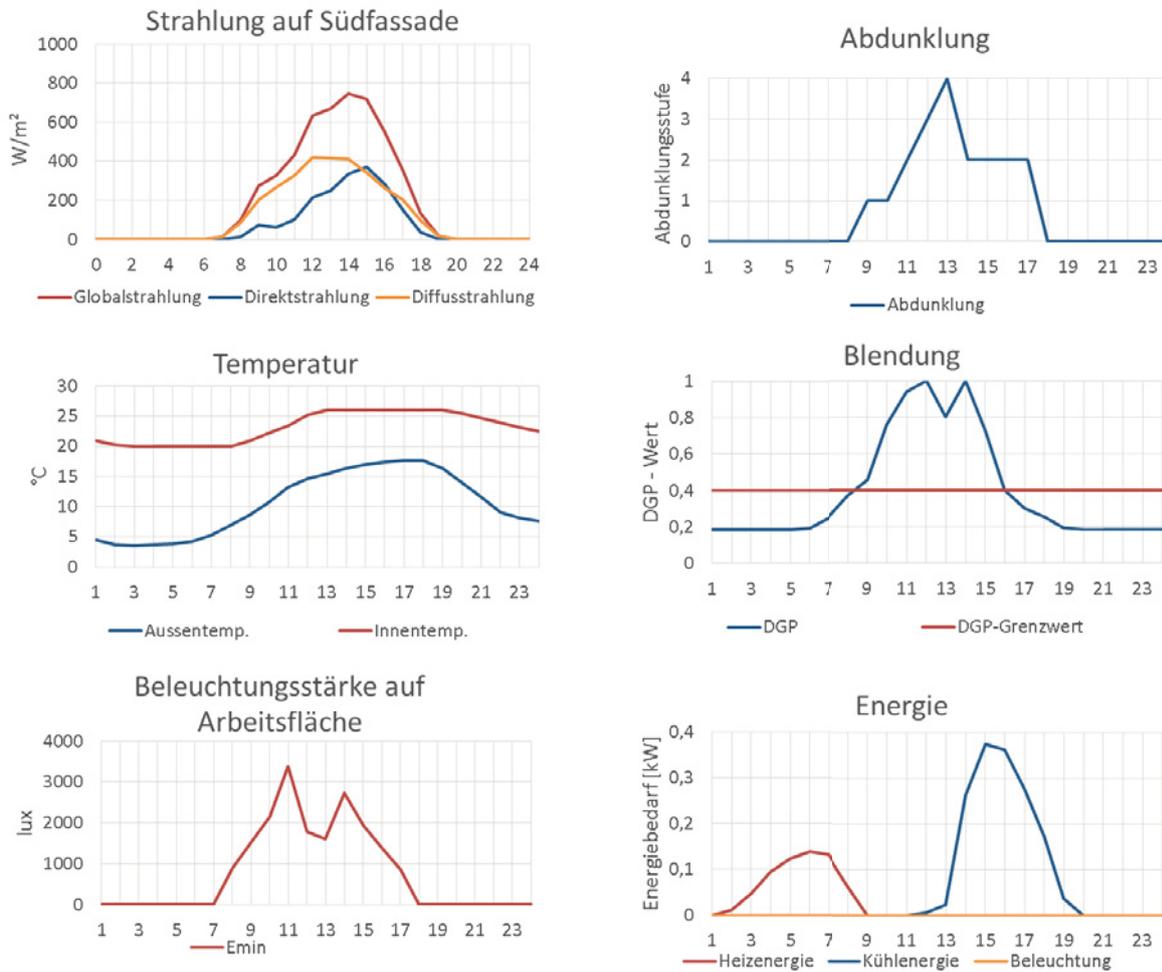


Abbildung 12-32: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS II. Simulation des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der minimalen Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.1.1.10 Accra | Fassadenprüfstand | wolkenloser Tag | RS II

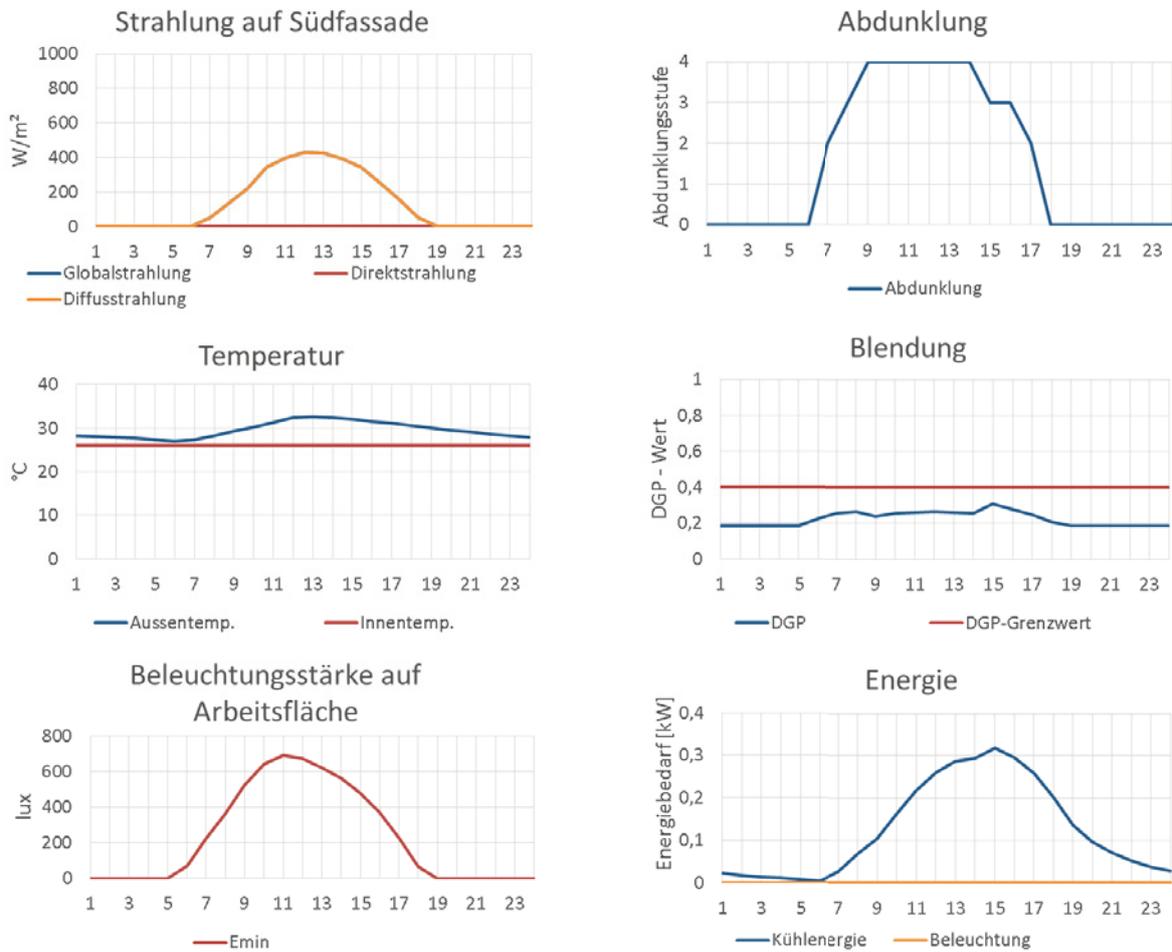


Abbildung 12-33: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS II. Simulation des Fassadenprüfstands in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der minimalen Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.1.1.11 Stuttgart | Fassadenprüfstand | wolkenloser Sommertag | RS IV (30-400)

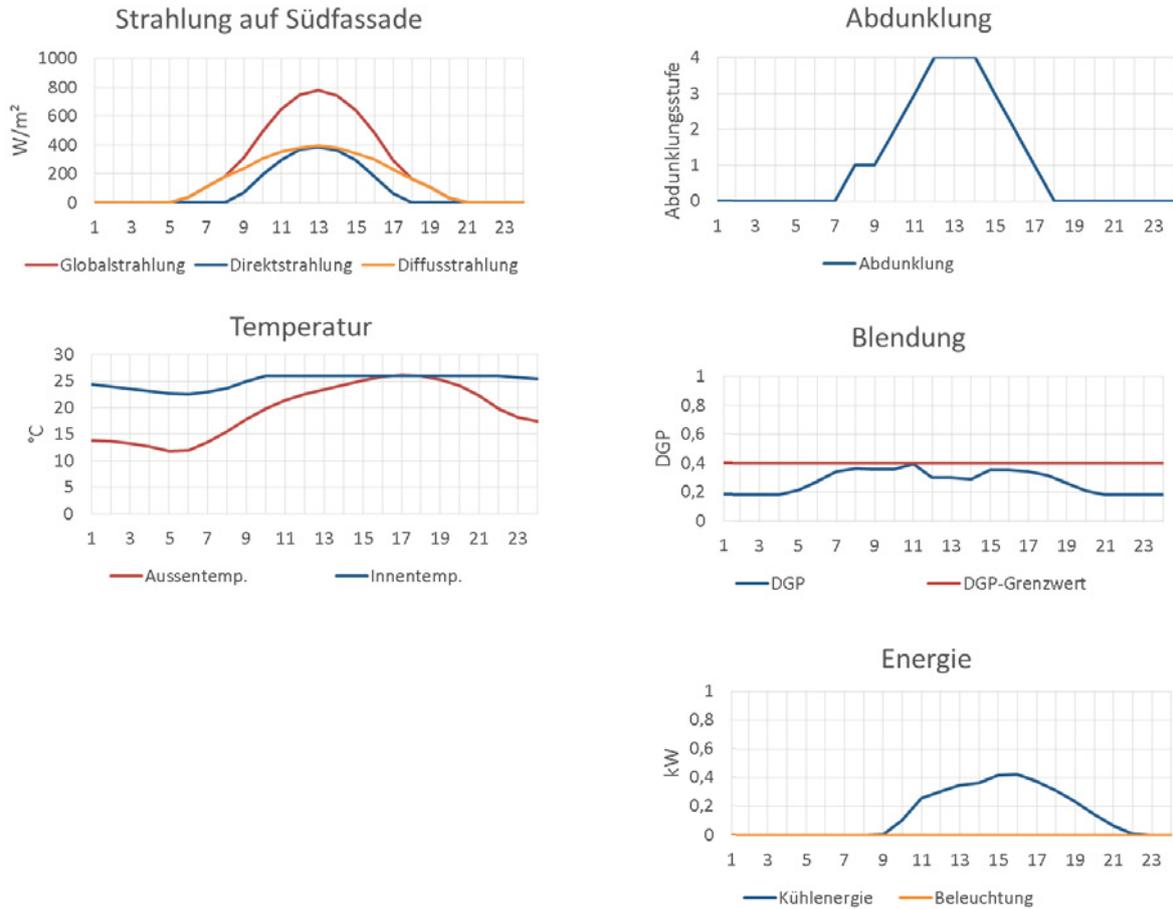


Abbildung 12-34: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS IV (I_{min} , I_{max})=(30 W/m², 400 W/m²). Simulation des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.

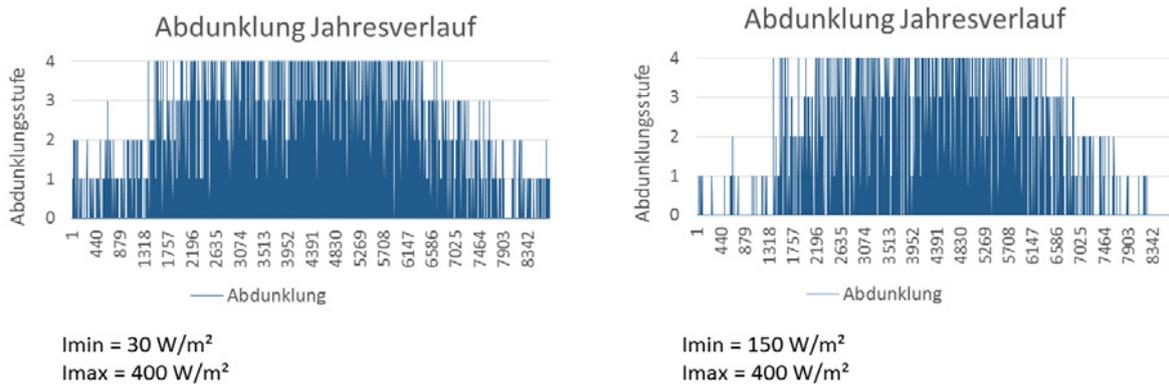


Abbildung 12-35: Analyse der Abdunklungsvorgänge im Jahresverlauf für ECONTROL® smart 55/10 im Fassadenprüfstand in Stuttgart, geregelt nach RS IV. Vergleich der Regelungsparameter der RS IV (I_{min} , I_{max})=(30 W/m², 400 W/m²) und (I_{min} , I_{max})=(150 W/m², 400 W/m²).



12.2.1.1.12 Accra | Fassadenprüfstand | wolkenloser Tag | RS IV (150-400)

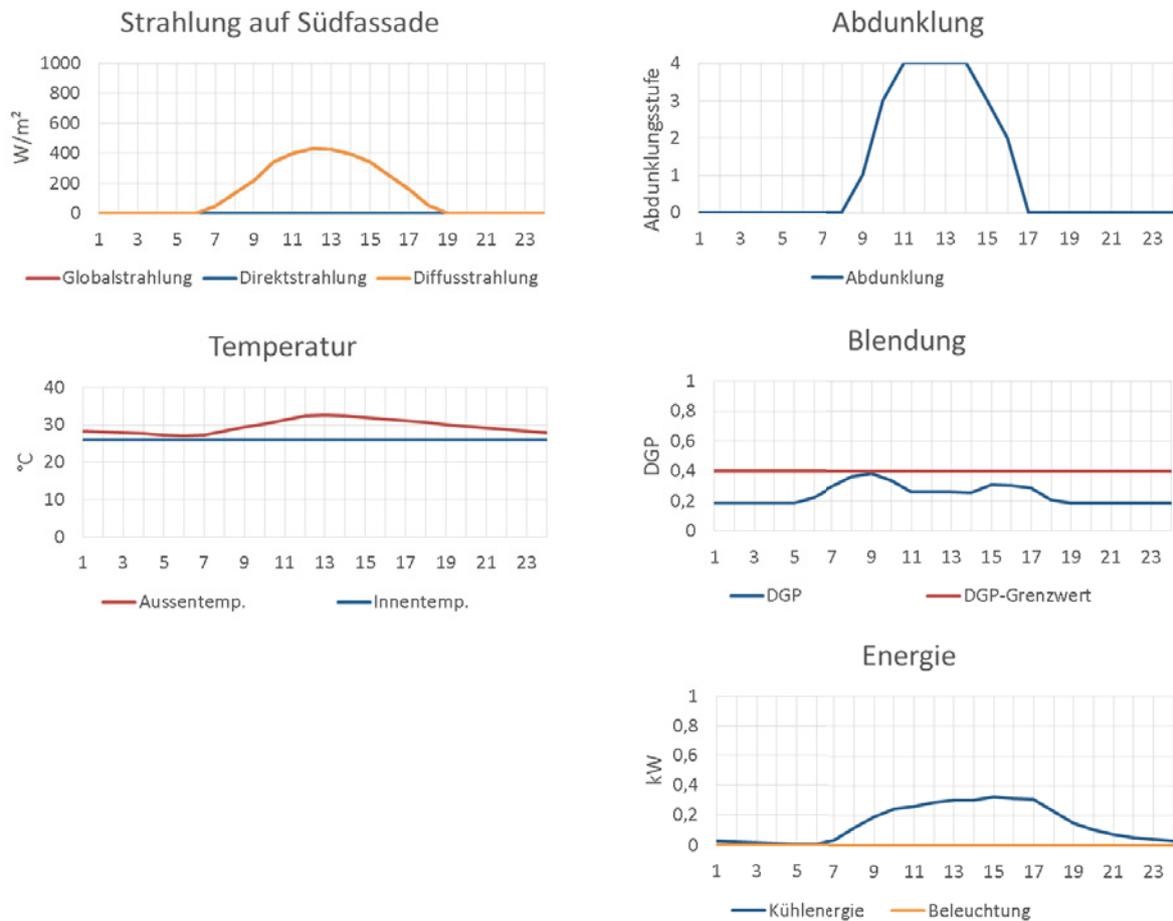


Abbildung 12-36: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS IV (150-400). Simulation des Fassadenprüfstands in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.

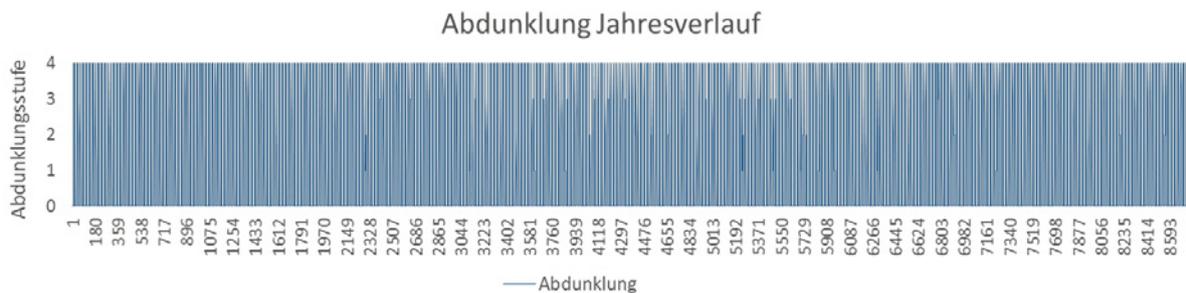


Abbildung 12-37: Analyse der Abdunklungsvorgänge im Jahresverlauf für ECONTROL® smart 55/10 im Fassadenprüfstand in Accra, geregelt nach RS IV (150-400).



12.2.1.1.13 Accra | Fassadenprüfstand | wolkenloser Tag | RS IV (400-800)

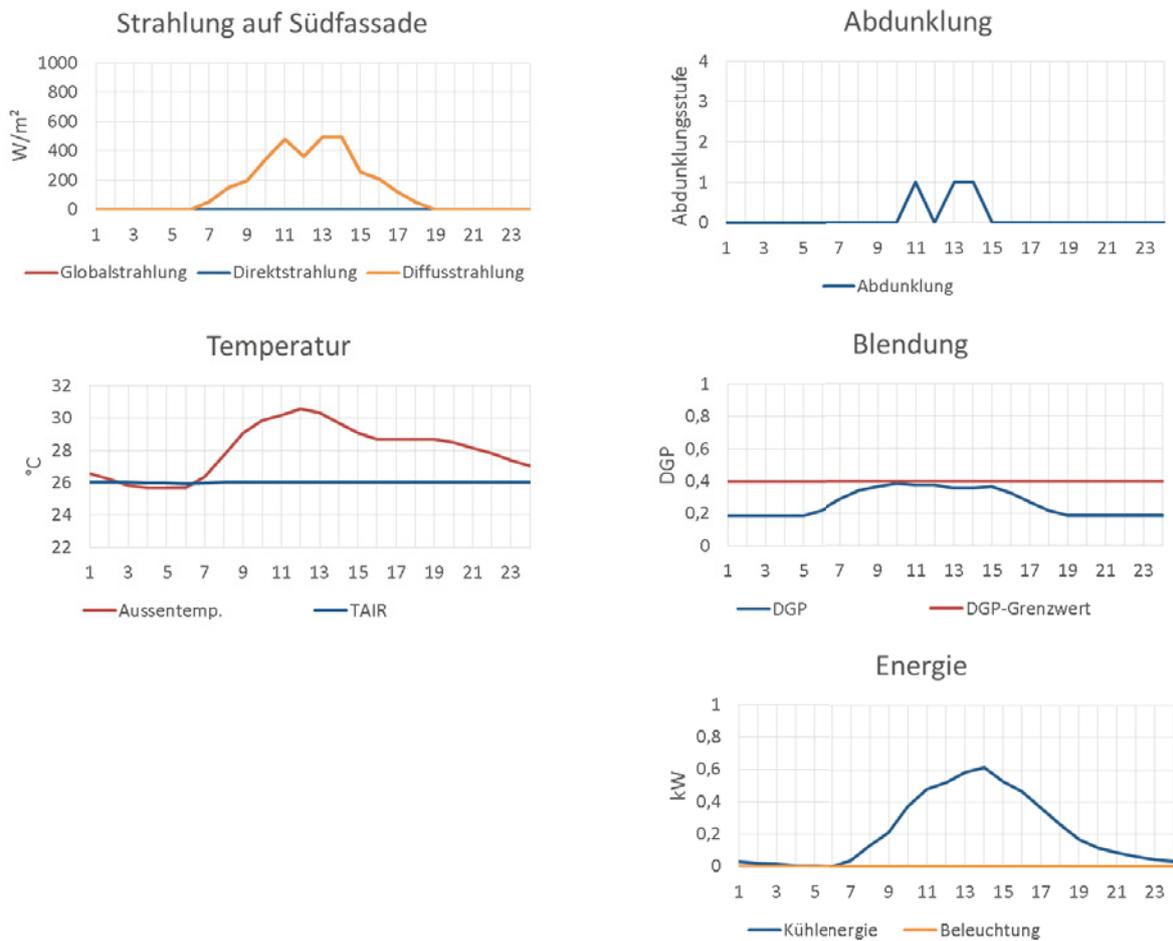


Abbildung 12-38: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS IV (400-800). Simulation des Fassadenprüfstands in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.

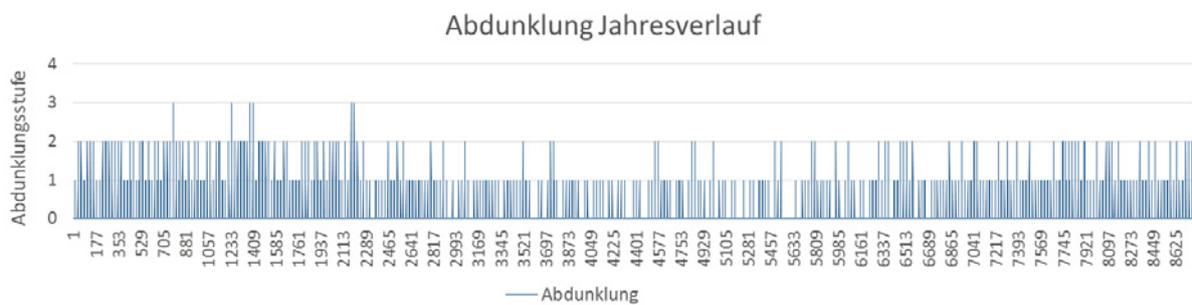


Abbildung 12-39: Analyse der Abdunklungsvorgänge im Jahresverlauf für ECONTROL® smart 55/10 im Fassadenprüfstand in Accra, geregelt nach RS IV (400-800).



12.2.1.2 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand

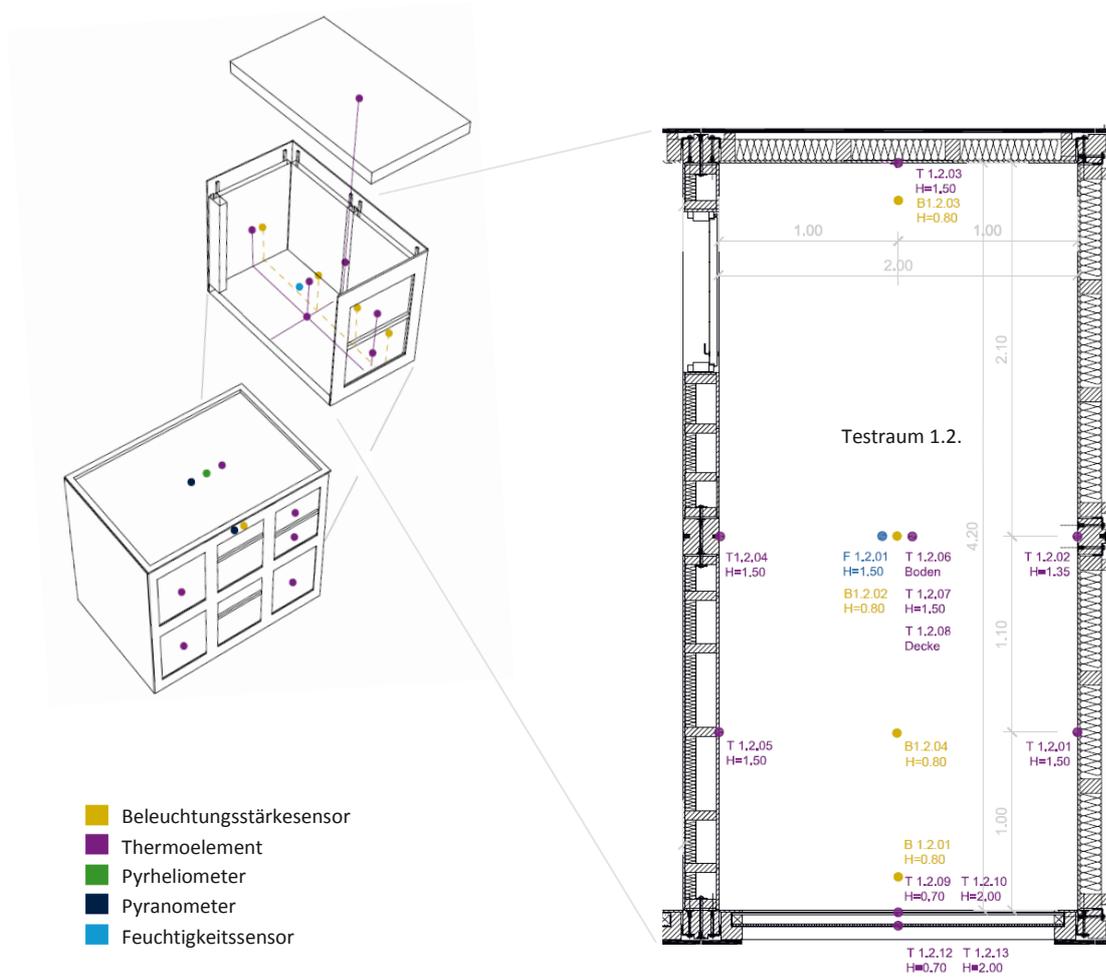


Abbildung 12-40: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 1.2. mit ECONTROL® smart 55/10 in der Südfassade. Positionierung der Sensoren.



12.2.1.2.1 Stuttgart | Fassadenprüfstand | wolkenloser Sommertag

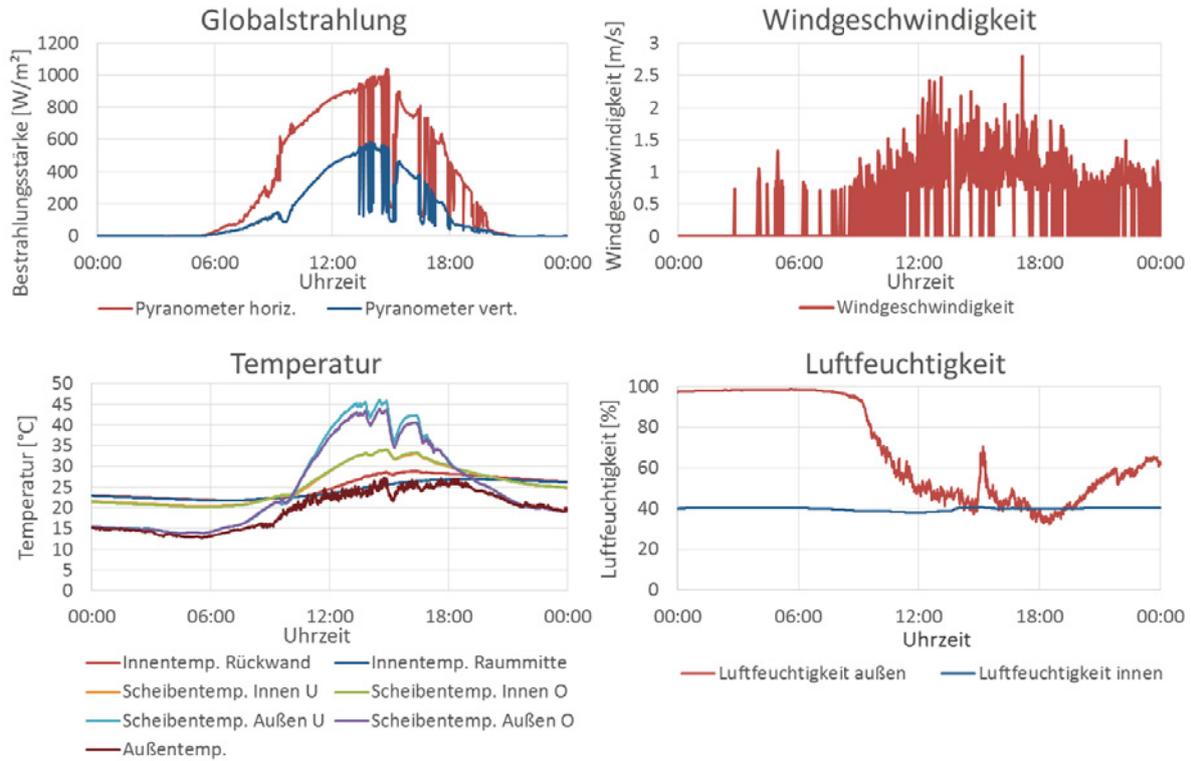


Abbildung 12-41: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10 im Zustand maximaler Transmission. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem größtenteils sonnigen Sommertag (06.06.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. O: im oberen Verglasungsbereich, U: im unteren Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit.

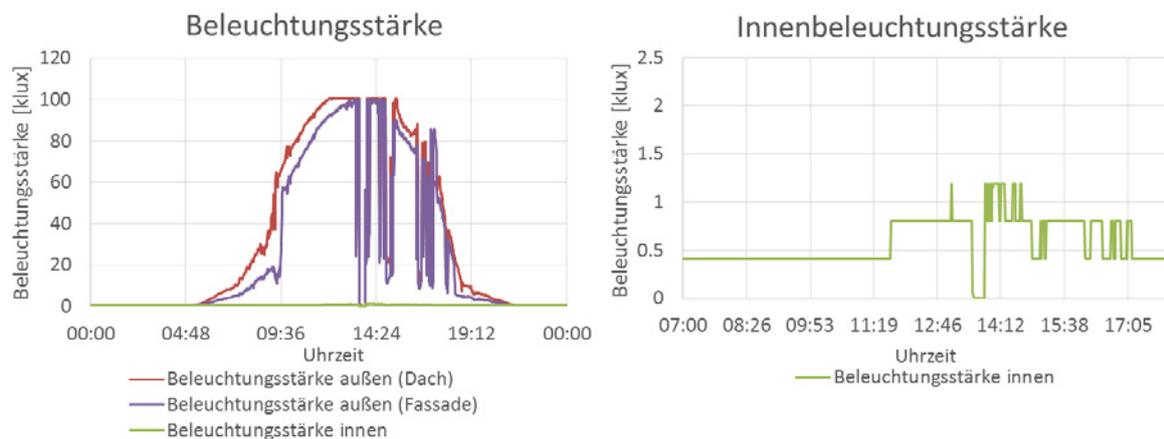


Abbildung 12-42: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10 im Zustand maximaler Transmission, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem größtenteils sonnigen Sommertag (06.06.2016). Links: Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke auf die Horizontale (Außenbeleuchtungsstärke vor der Verglasung (Südfassade) und auf dem Gebäudedach, Innenbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche 1,20 m hinter der Fassade (Sensor B1.2.04)). Rechts: Detailaufnahme der Innenbeleuchtungsstärke für den Zeitraum 7 – 18 Uhr.



12.2.2 Elektrochrome Verglasung: SageGlass® classic

12.2.2.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen

12.2.2.1.1 Stuttgart | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag | RS I

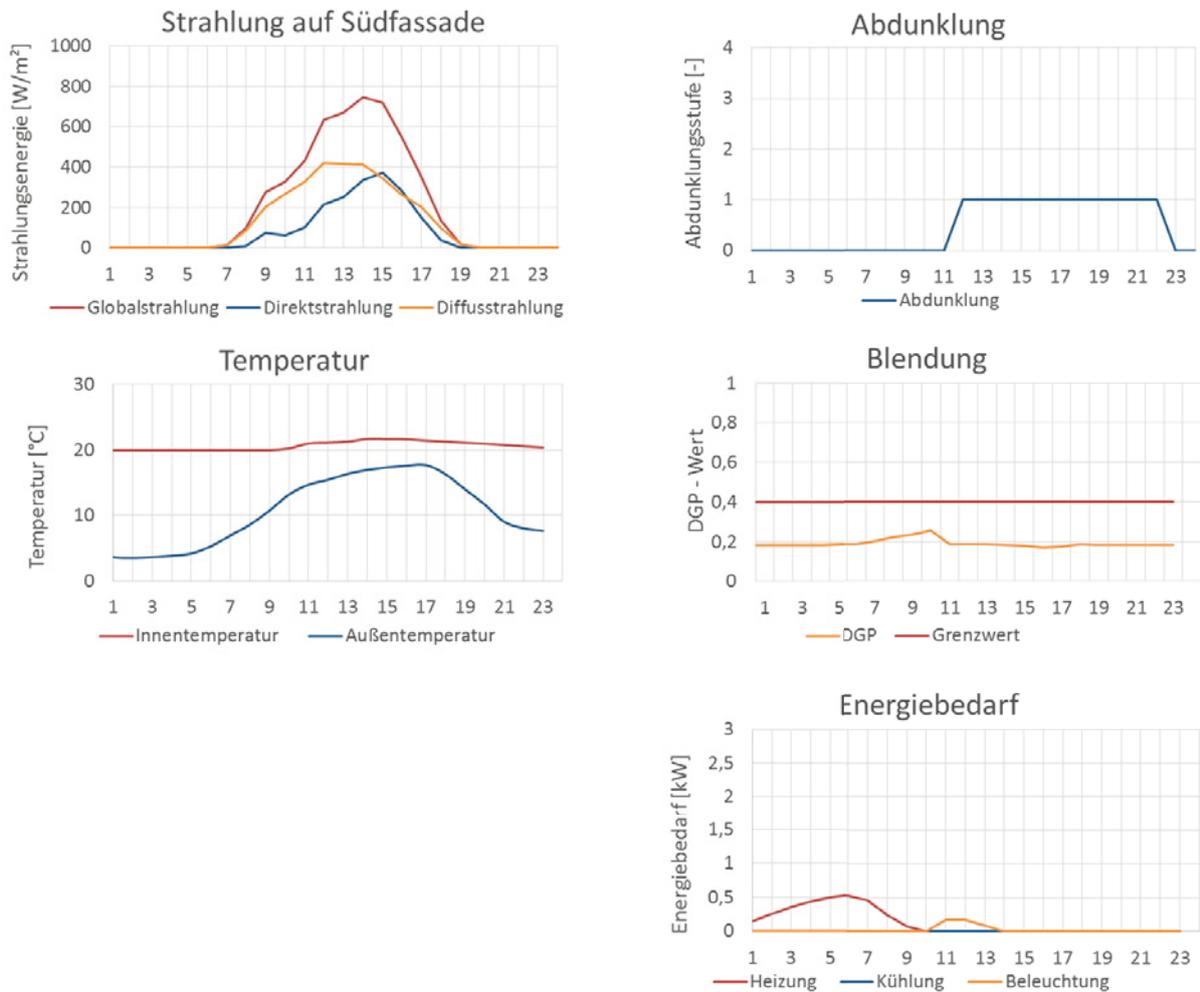


Abbildung 12-43: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.2.1.2 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Sommertag | RS I

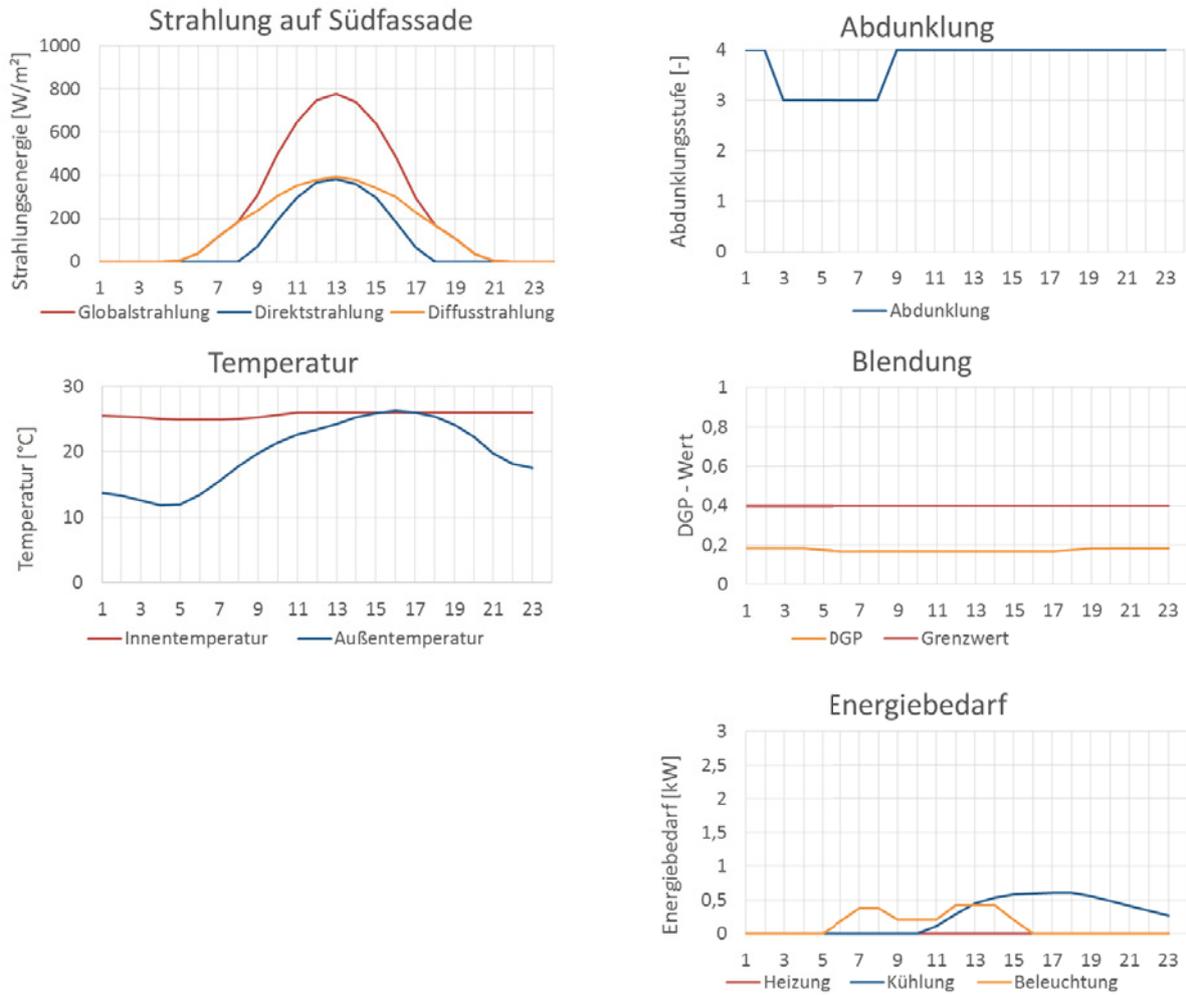


Abbildung 12-44: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.2.1.3 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Sommertag | RS I

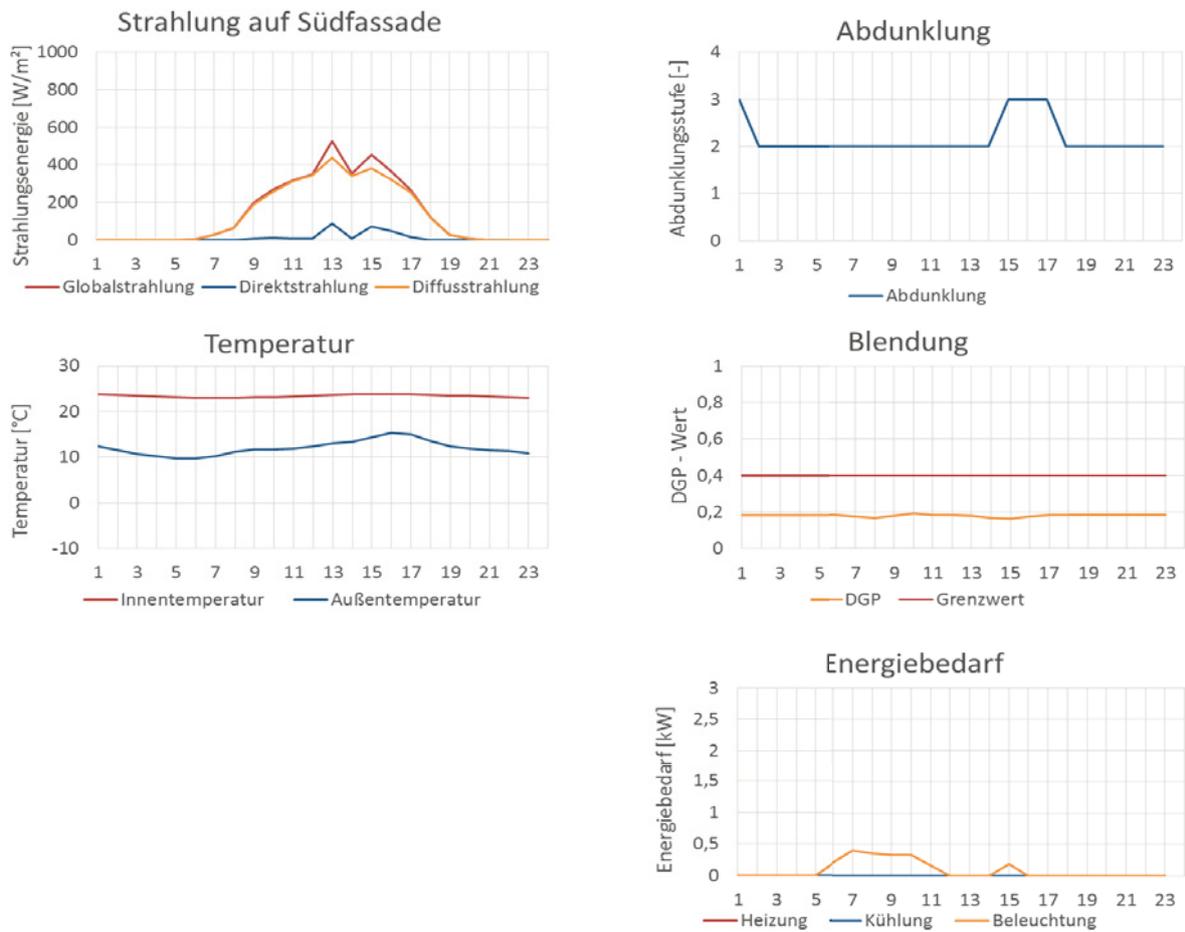


Abbildung 12-45: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.2.1.4 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Wintertag | RS I

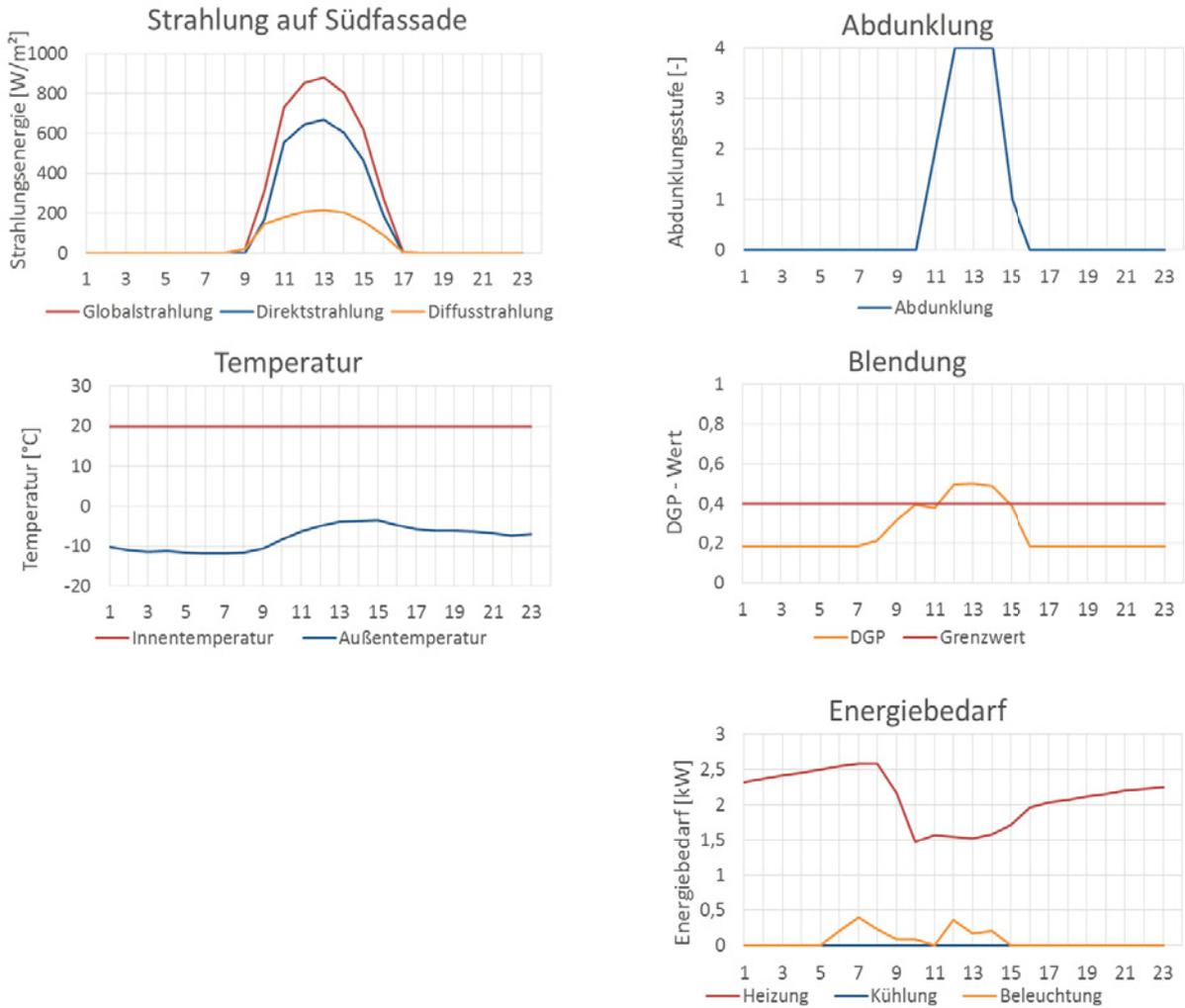


Abbildung 12-46: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.2.1.5 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Wintertag | RS I

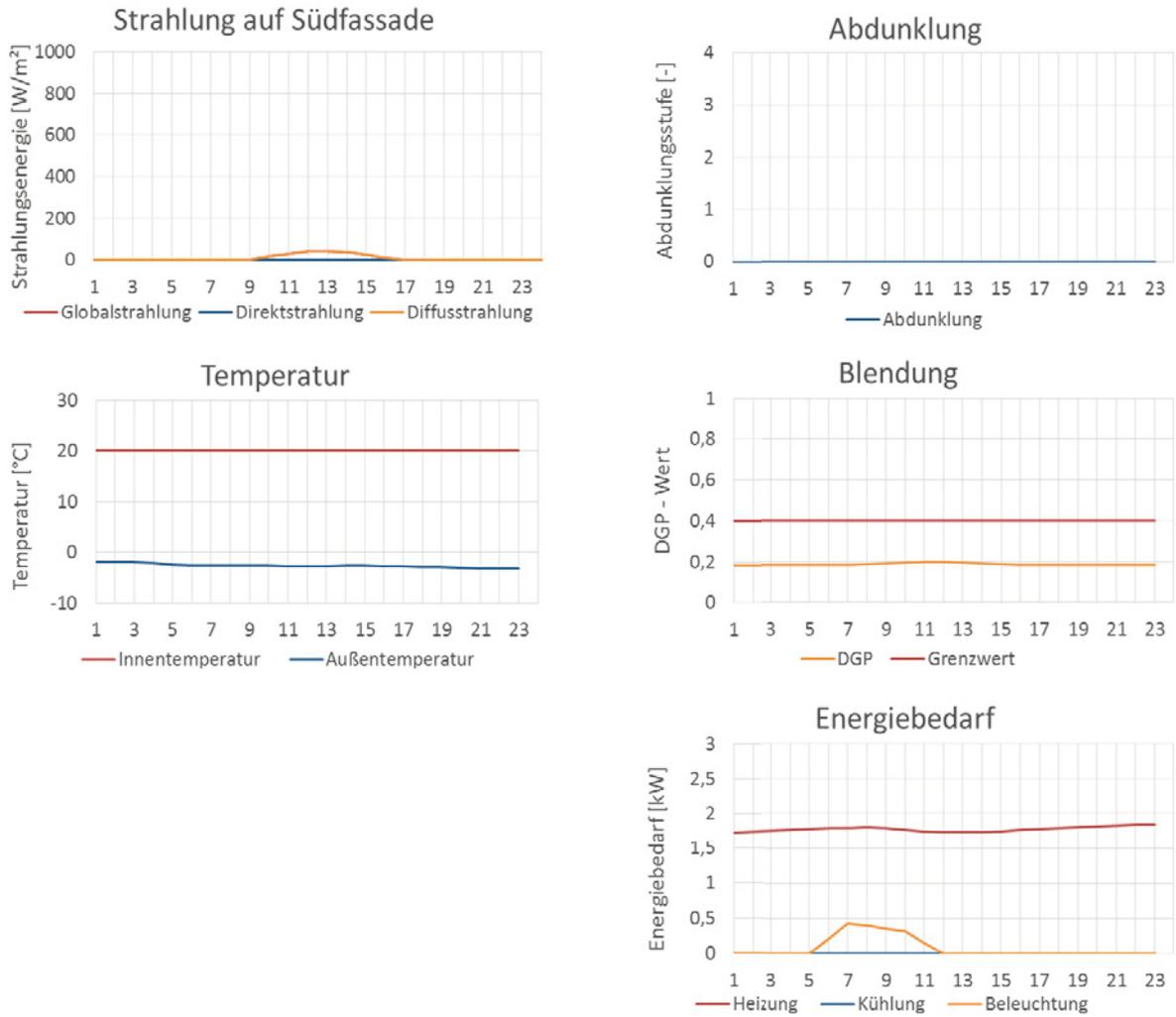


Abbildung 12-47: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.2.1.6 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Sommertag | RS I

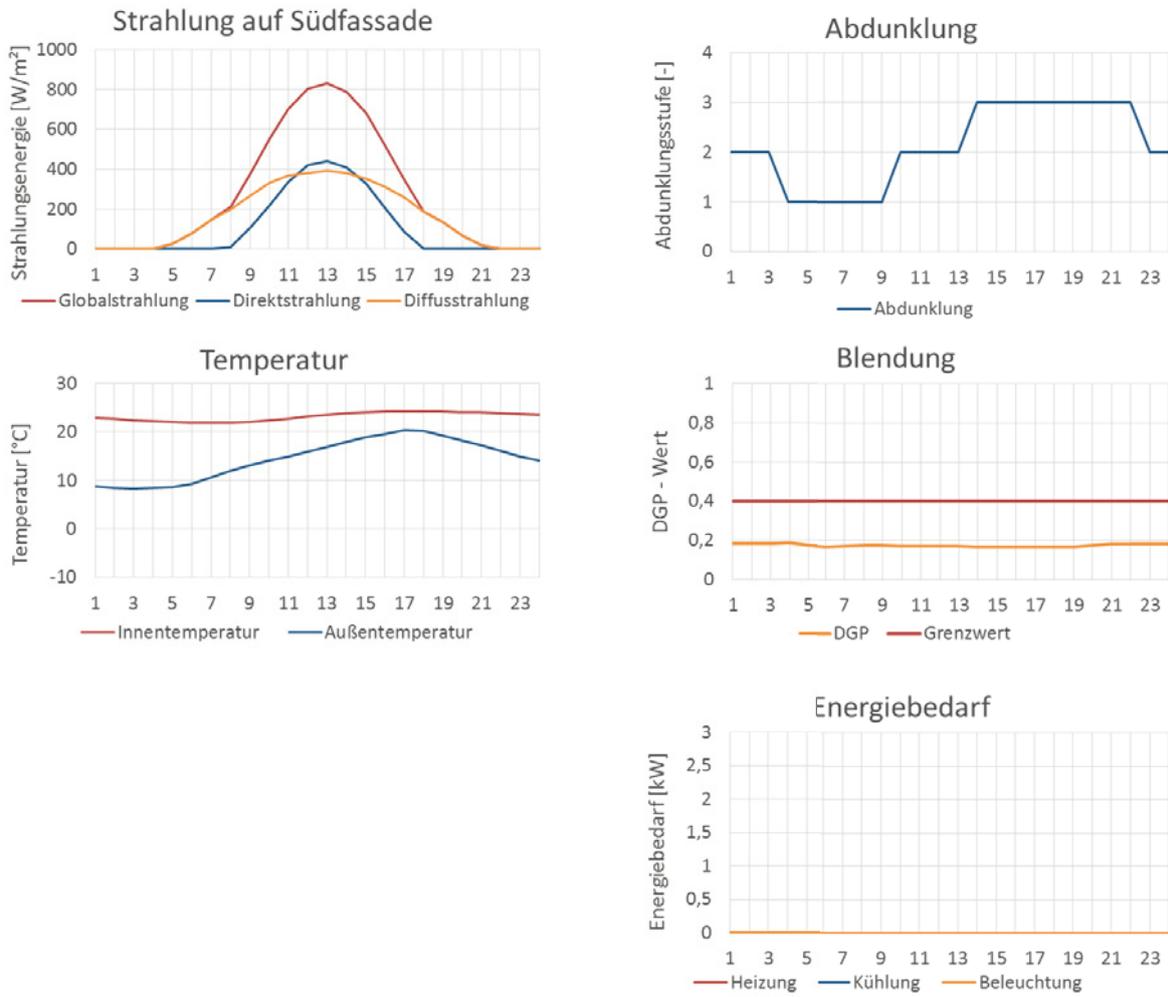


Abbildung 12-48: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.2.1.7 Valencia | Klassenraum | wolkenloser Sommertag | RS I

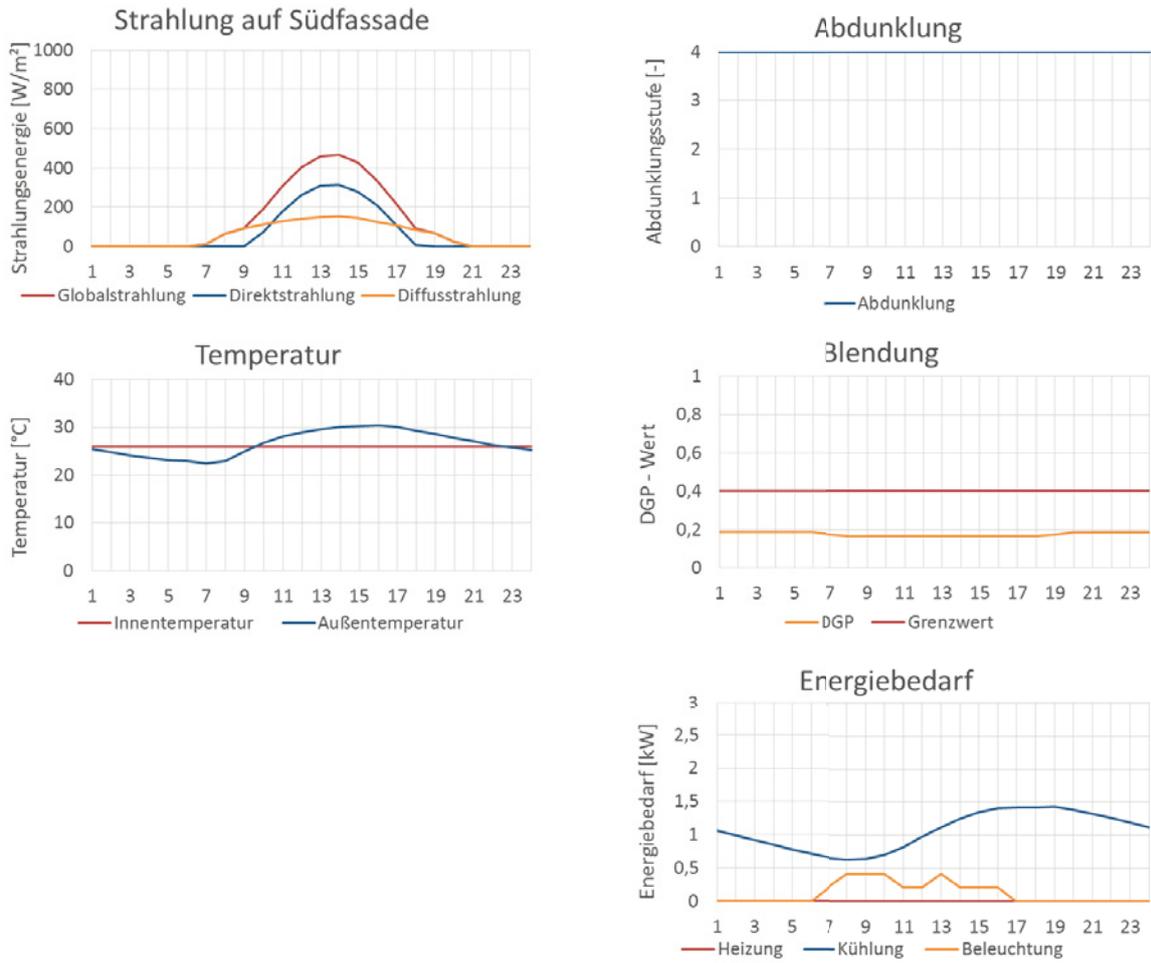


Abbildung 12-49: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.2.1.8 Accra | Klassenraum | wolkenloser Tag | RS I

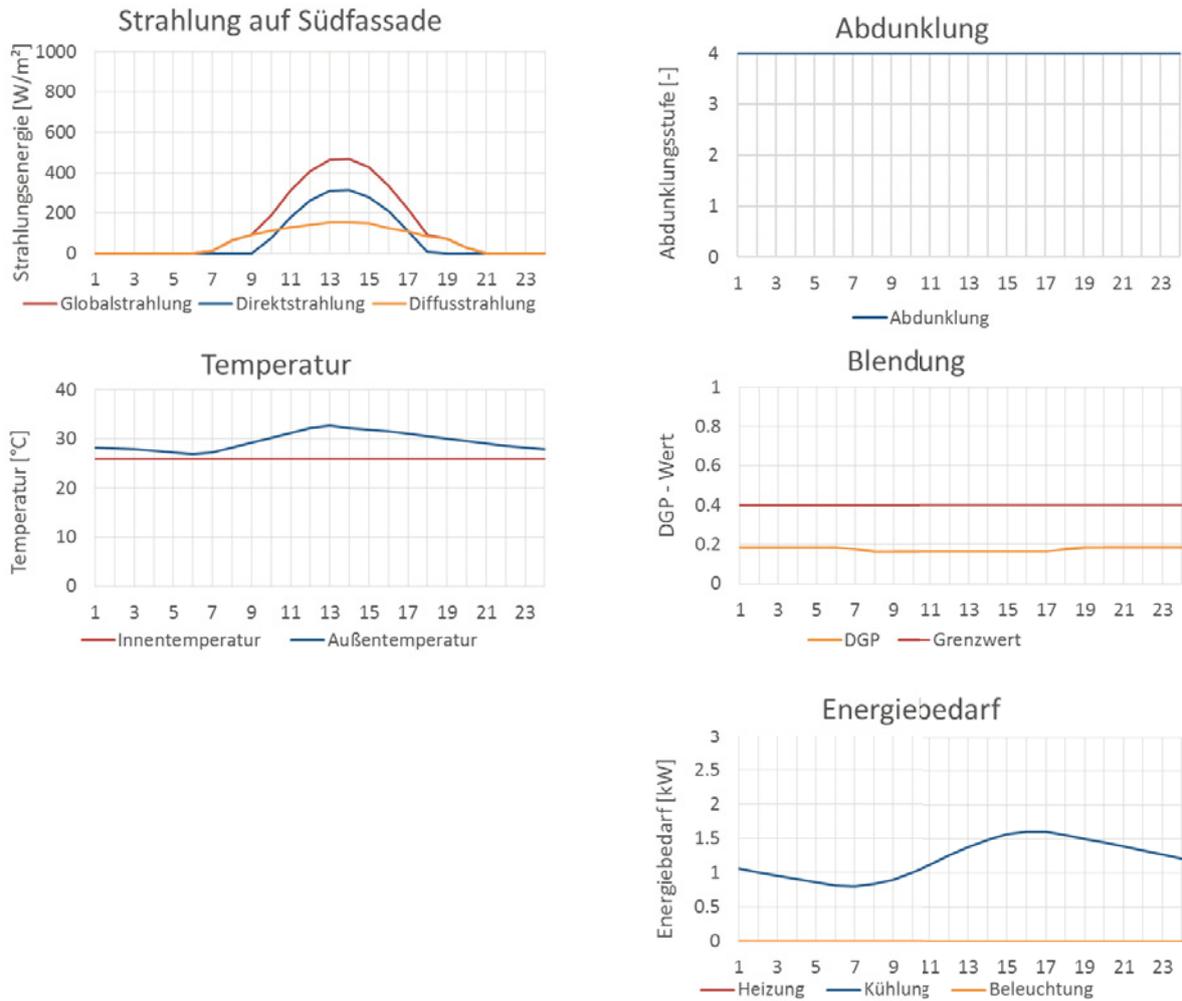


Abbildung 12-50: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.2.1.9 Stuttgart | Fassadenprüfstand | wolkenloser Sommertag | RS I

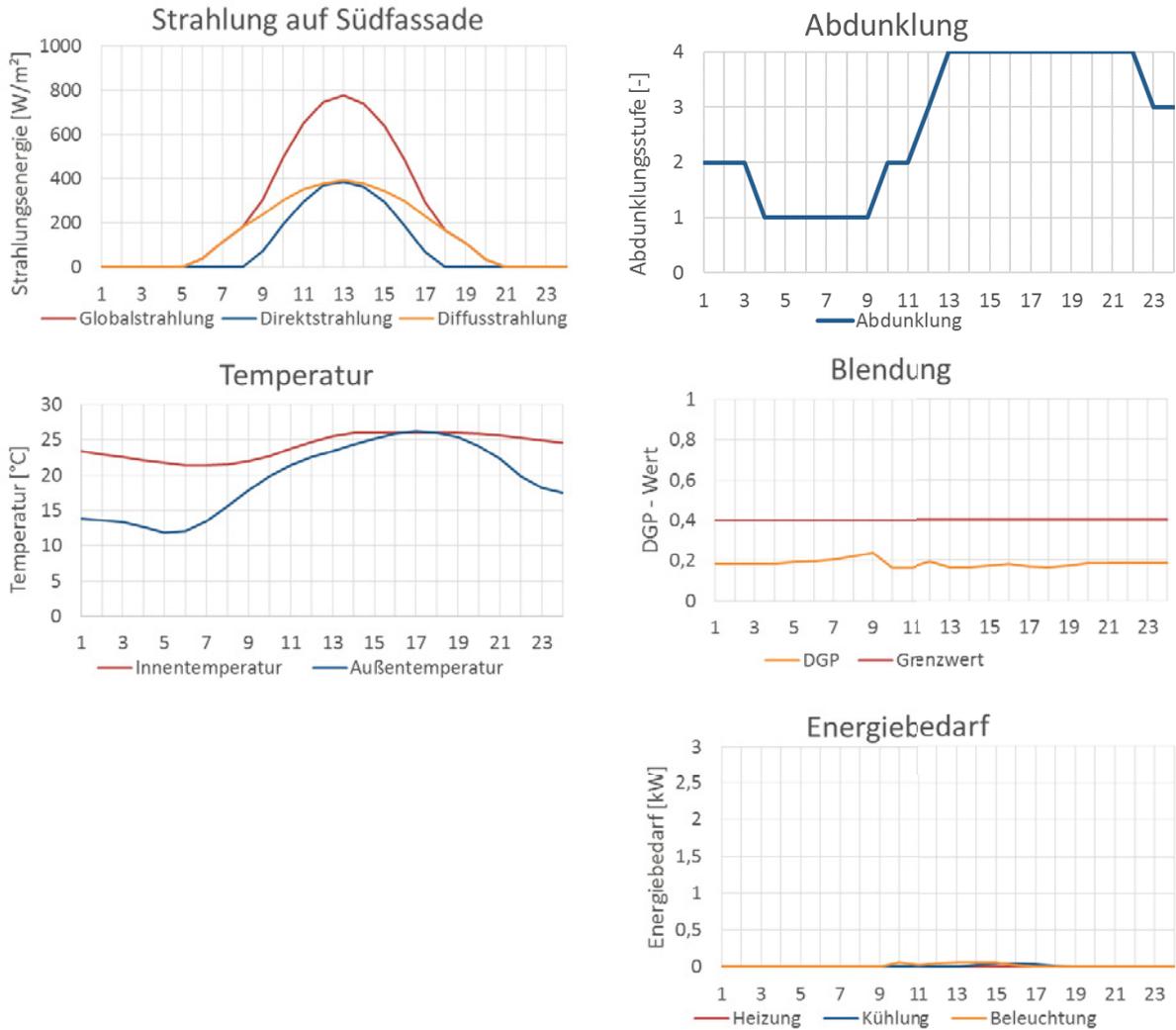


Abbildung 12-51: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.2.2 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand

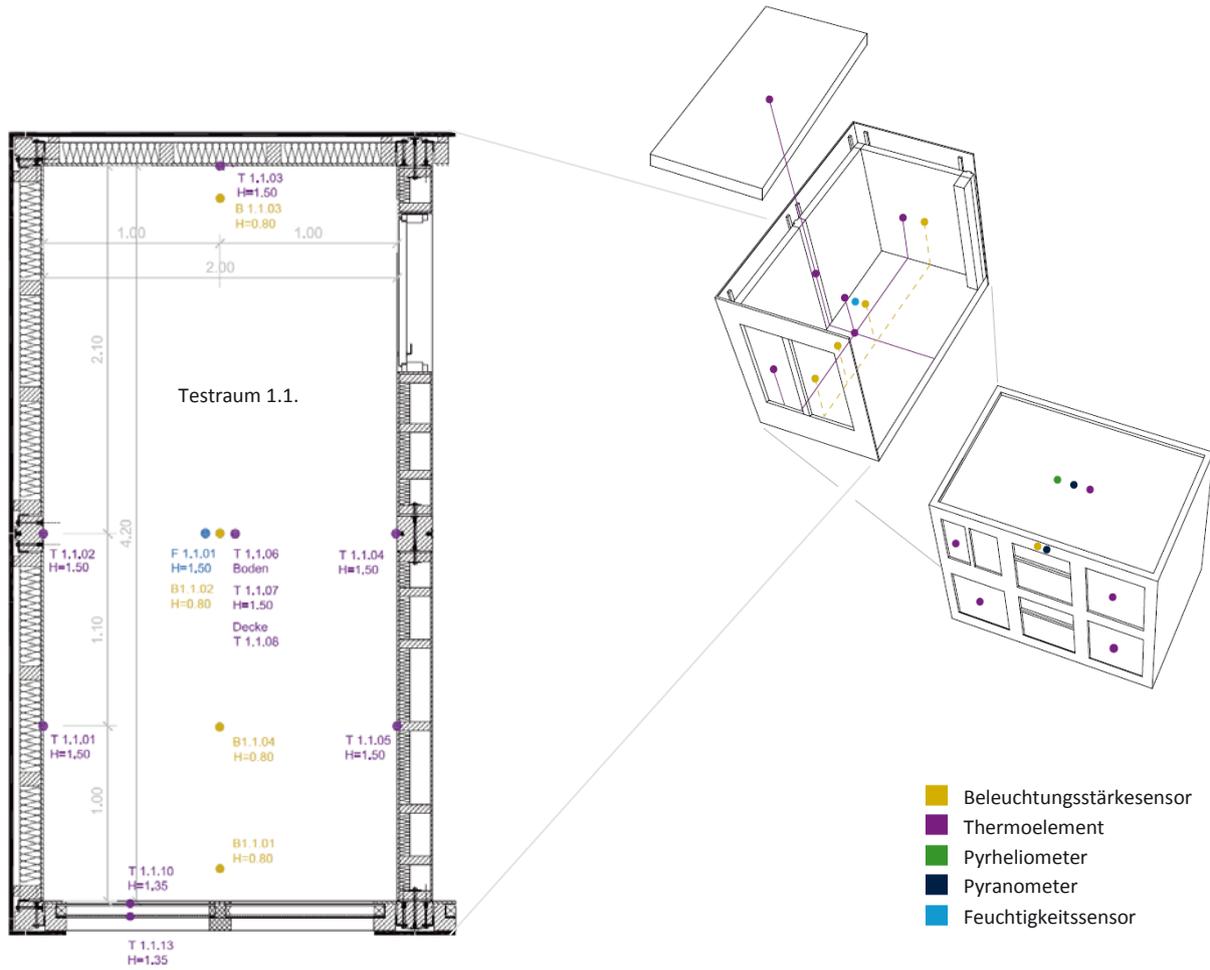


Abbildung 12-52: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 1.1. mit SageGlass® classic in der Südfassade. Positionierung der Sensoren.



12.2.2.2.1 Stuttgart | Fassadenprüfstand | wolkenloser Herbsttag

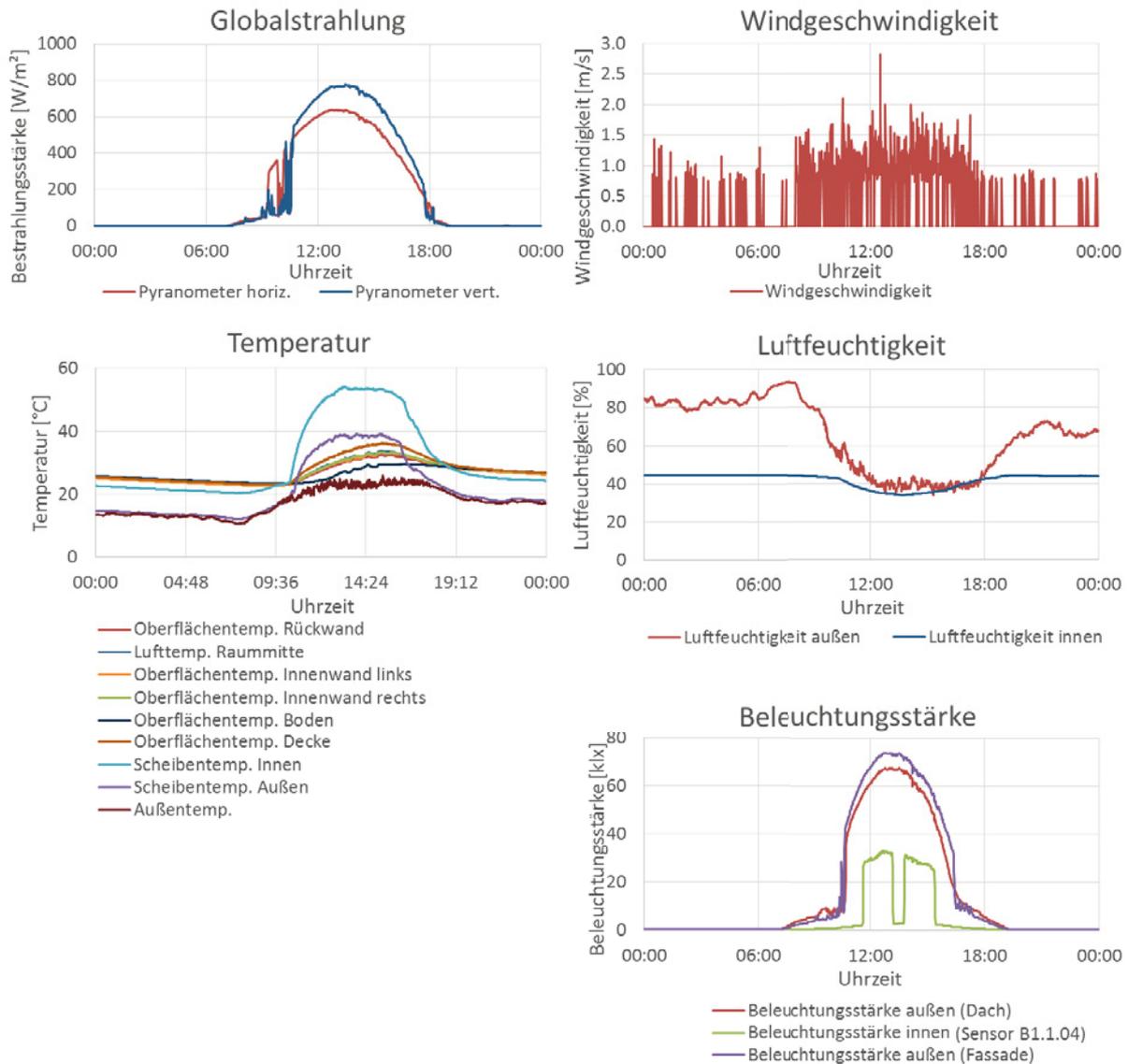


Abbildung 12-53: Tagesanalyse für SageGlass® classic im Zustand maximaler Transmission. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Herbsttag (25.09.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke.



12.2.2.2.2 Stuttgart | Fassadenprüfstand | bewölkter Herbsttag

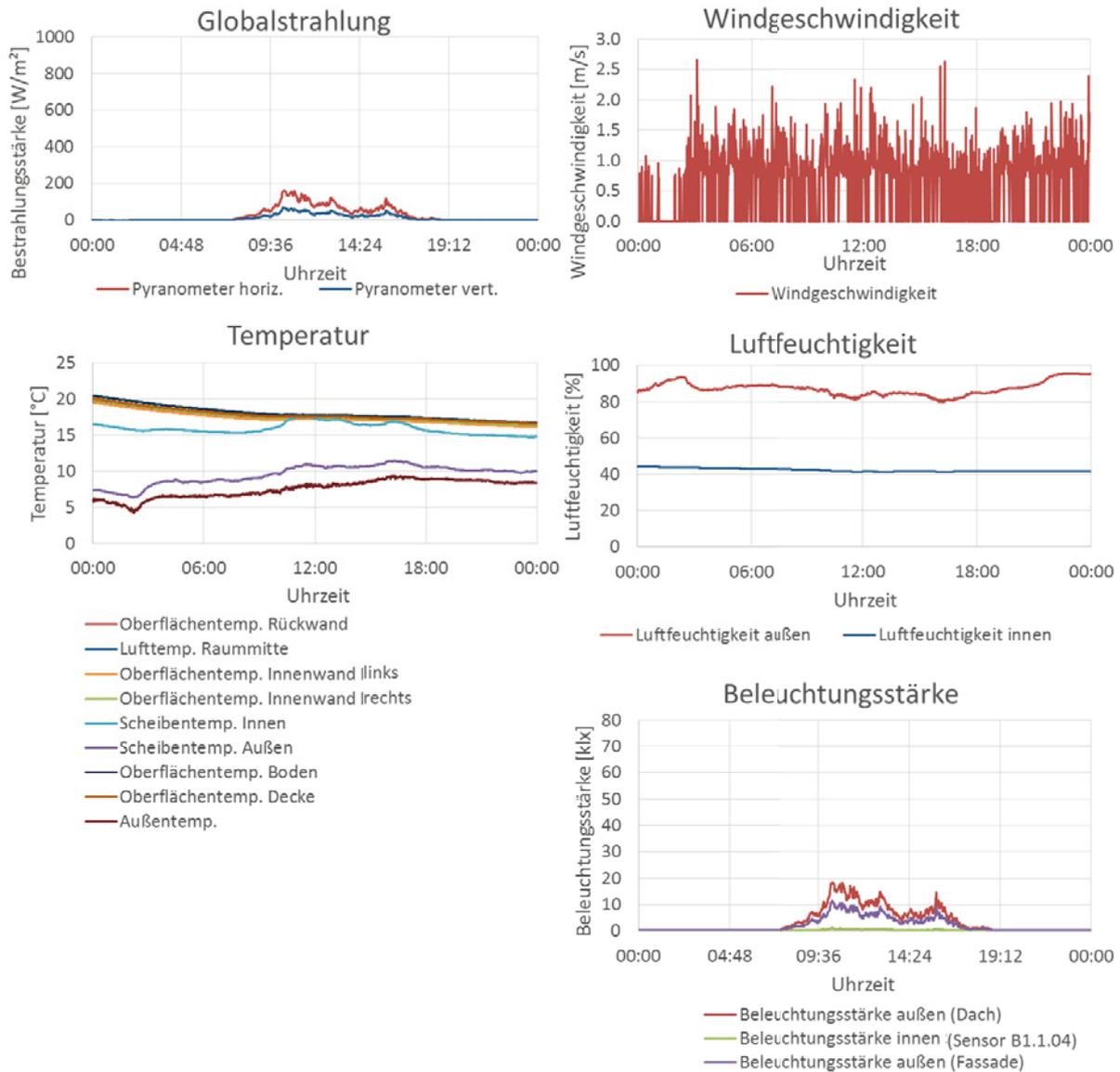


Abbildung 12-54: Tagesanalyse für SageGlass® classic im Zustand maximaler Transmission. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem bewölkten Herbsttag (06.10.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke.



12.2.3 Heizglas: Ipatherm-Heizglas

12.2.3.1 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand

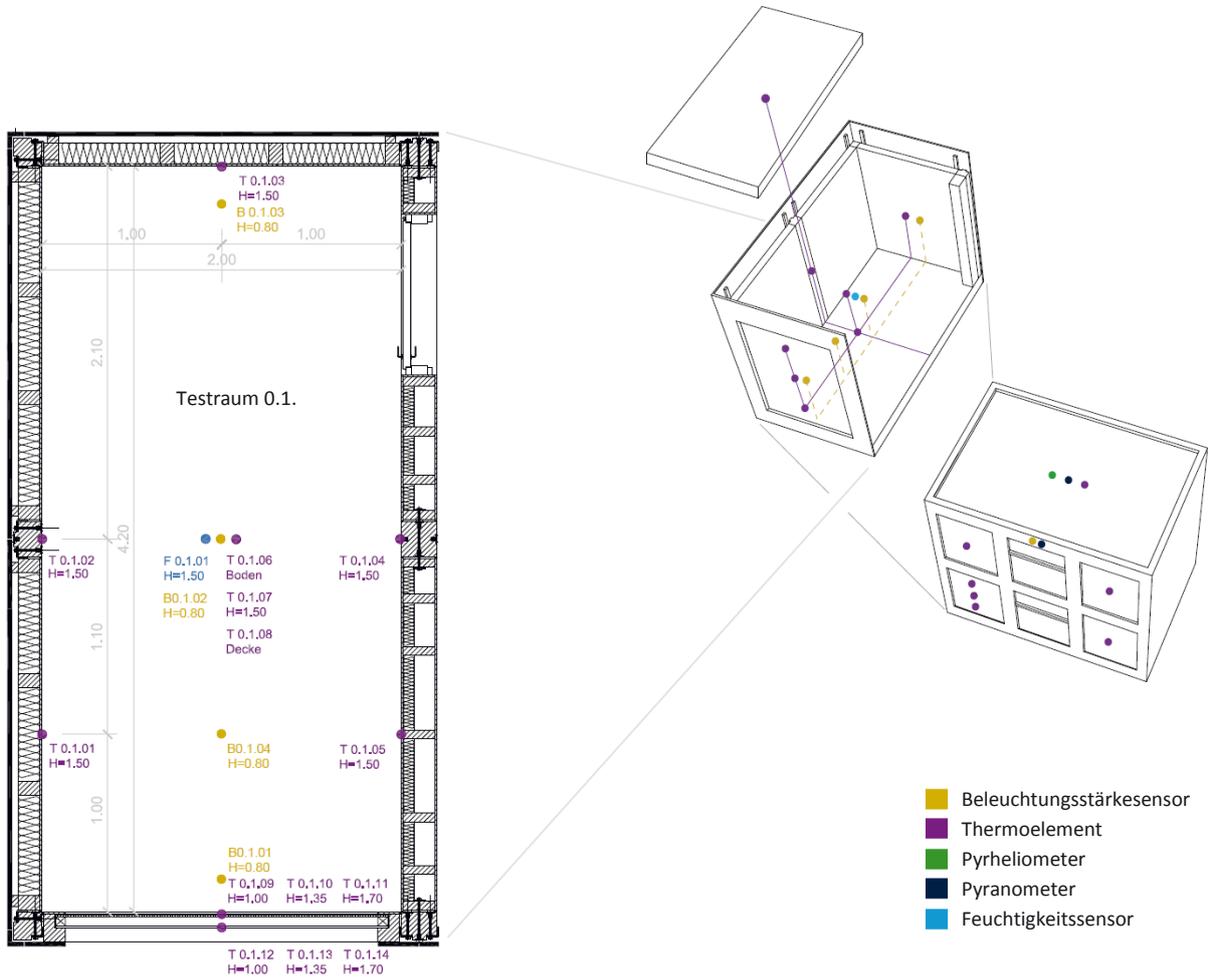


Abbildung 12-55: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit Ipatherm-Heizglas in der Südfassade. Positionierung der Sensoren.



12.2.3.1.1 Stuttgart | Fassadeprüfstand | wolkenloser Frühlingstag

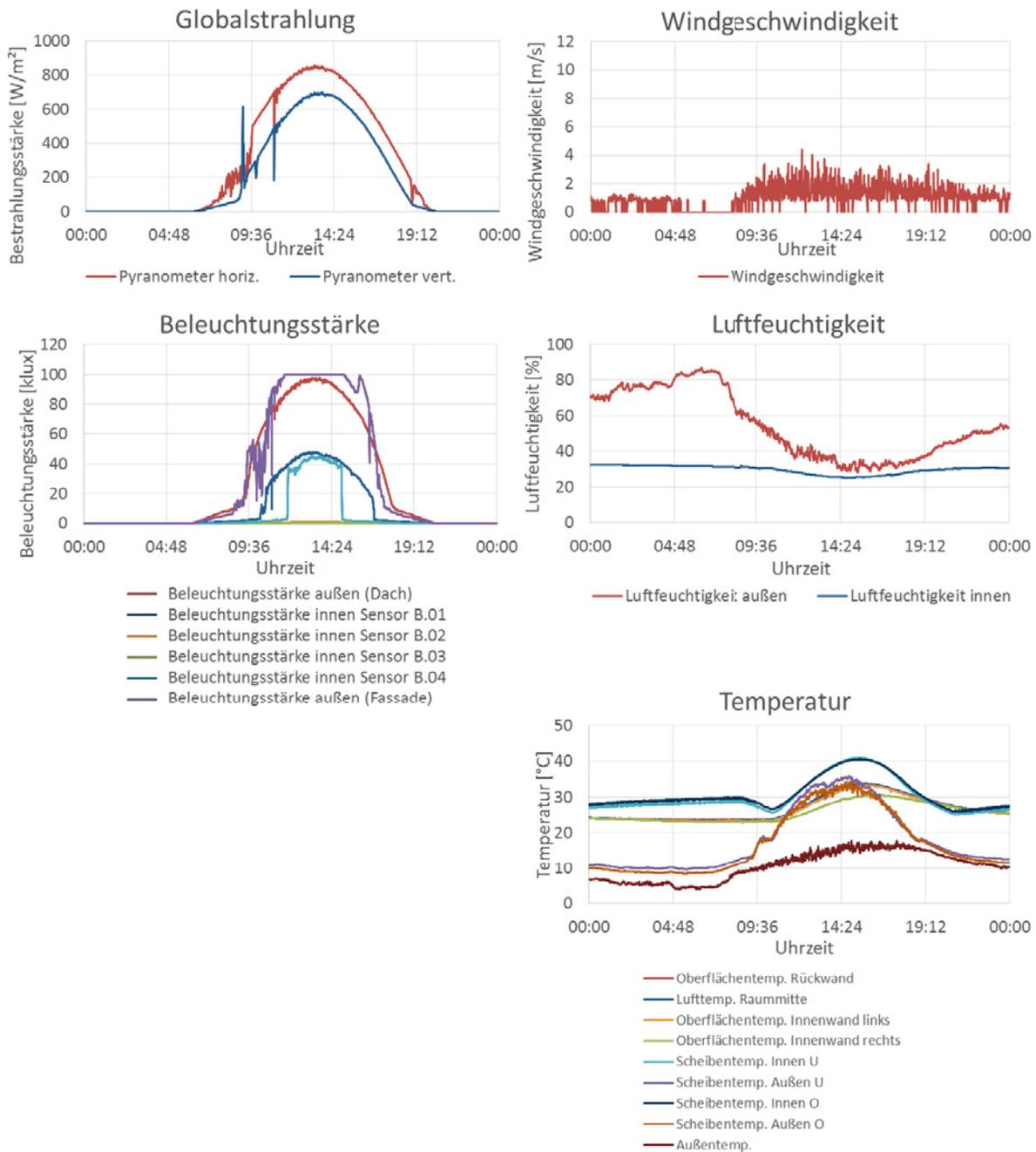


Abbildung 12-56: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Frühlingstag (20.04.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke.



12.2.3.1.2 Stuttgart | Fassadeprüfstand | bewölkter Frühlingstag

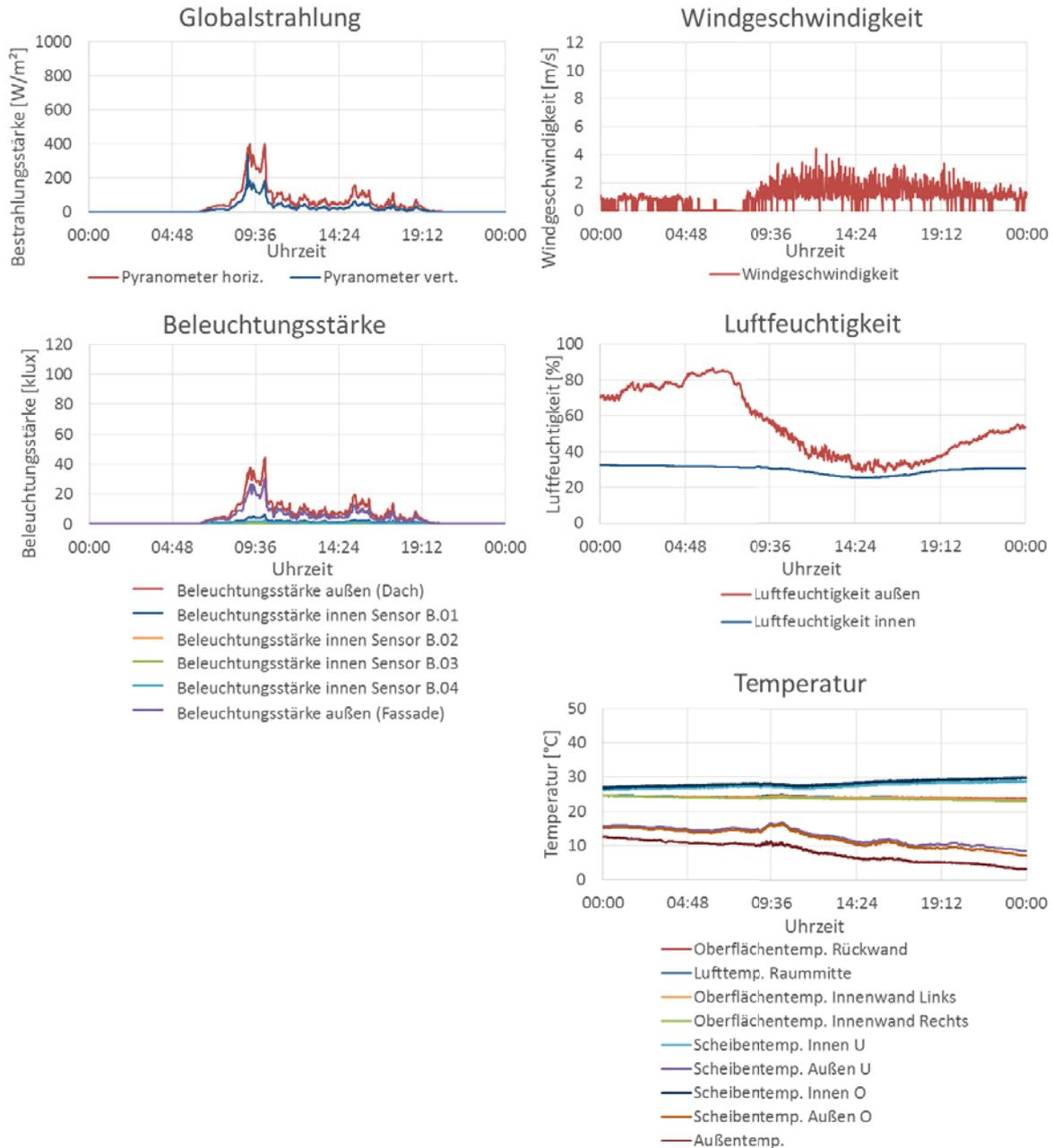


Abbildung 12-57: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem bewölkten Frühlingstag (23.04.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke.



12.2.3.1.3 Stuttgart | Fassadeprüfstand | wolkenloser Sommertag

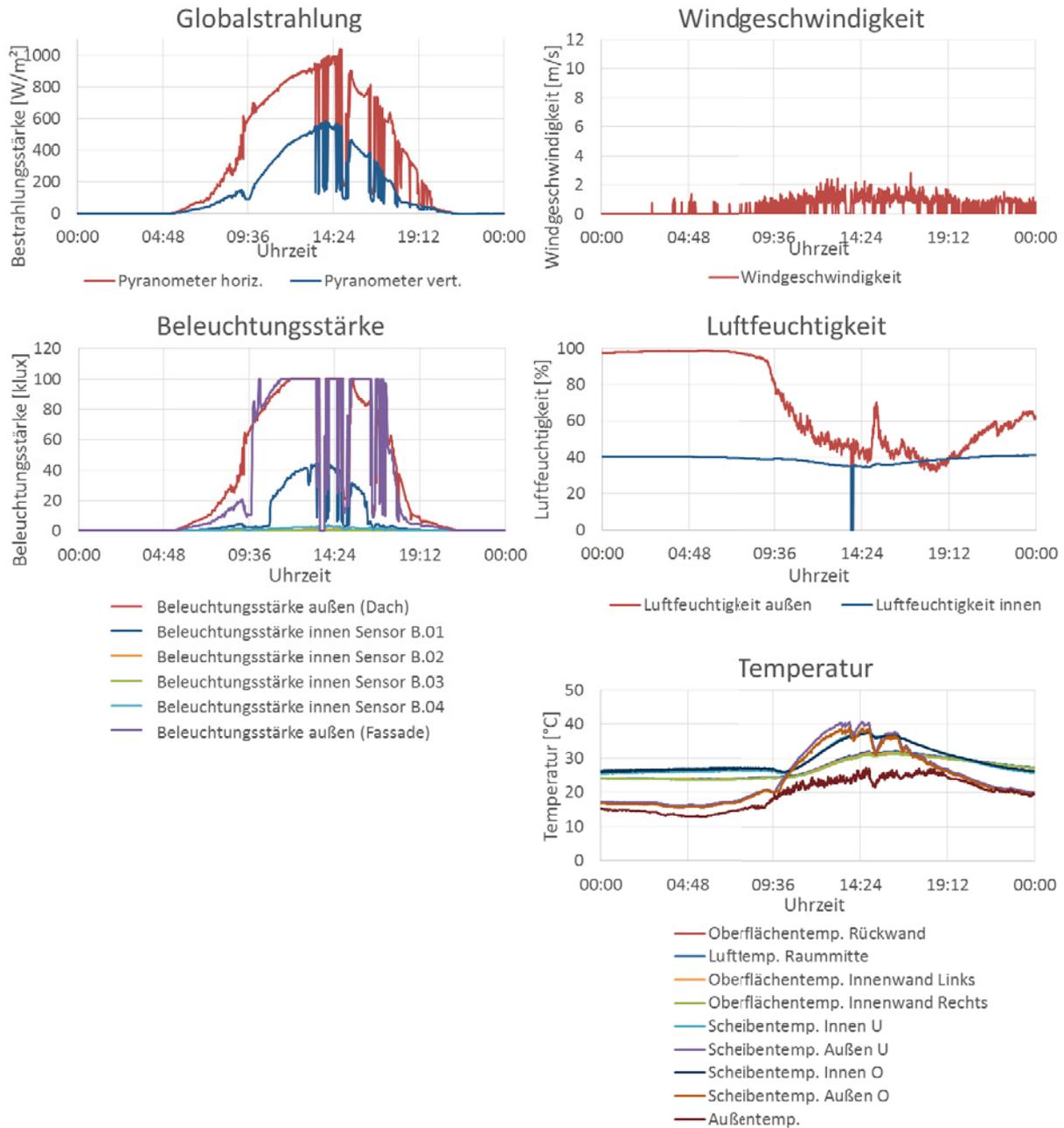


Abbildung 12-58: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem größtenteils sonnigen Sommertag (06.06.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke.



12.2.3.1.4 Stuttgart | Fassadeprüfstand | bewölkter Sommertag

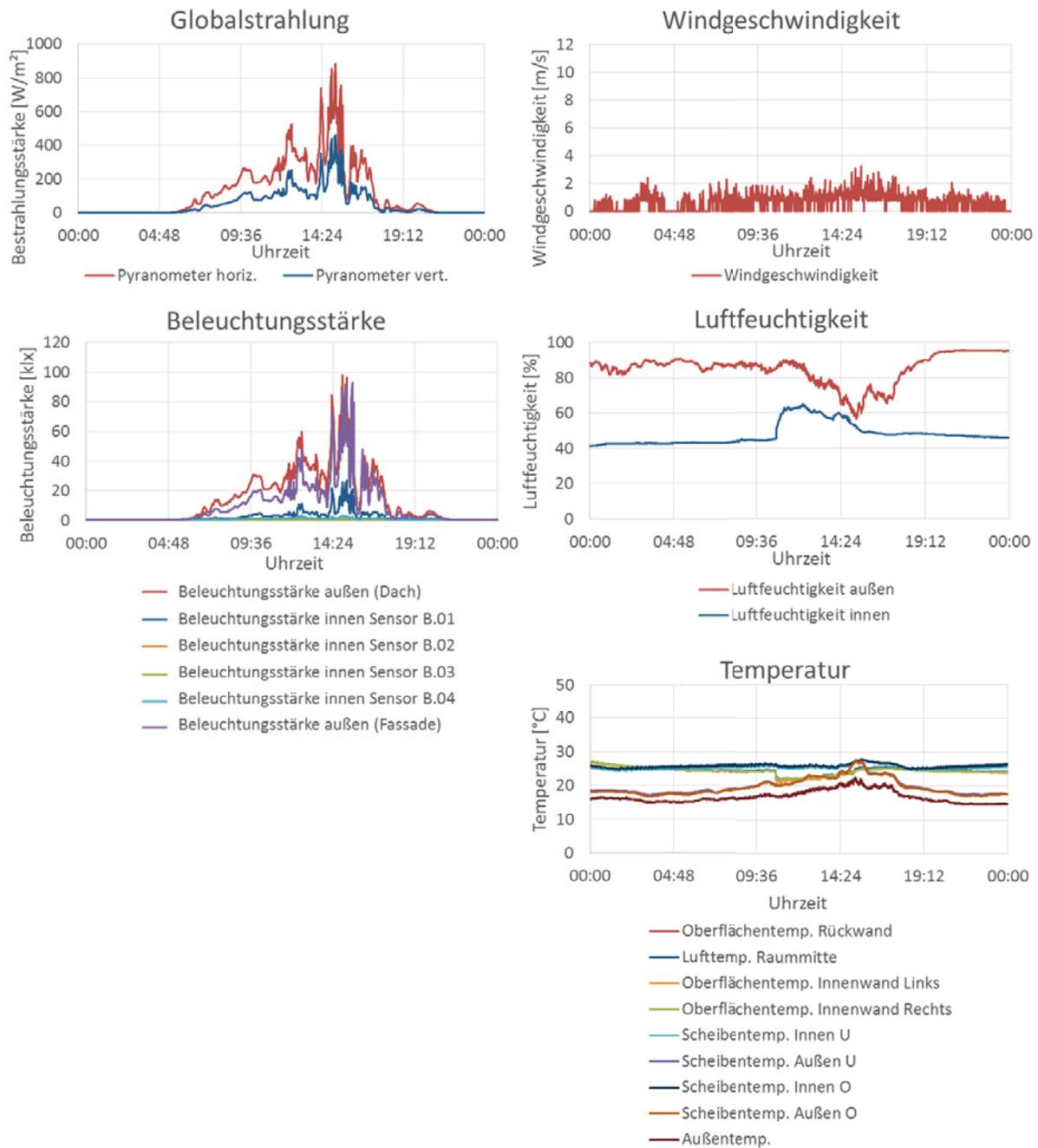


Abbildung 12-59: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (08.06.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke.



12.2.3.1.5 Stuttgart | Fassadeprüfstand | wolkenloser Wintertag

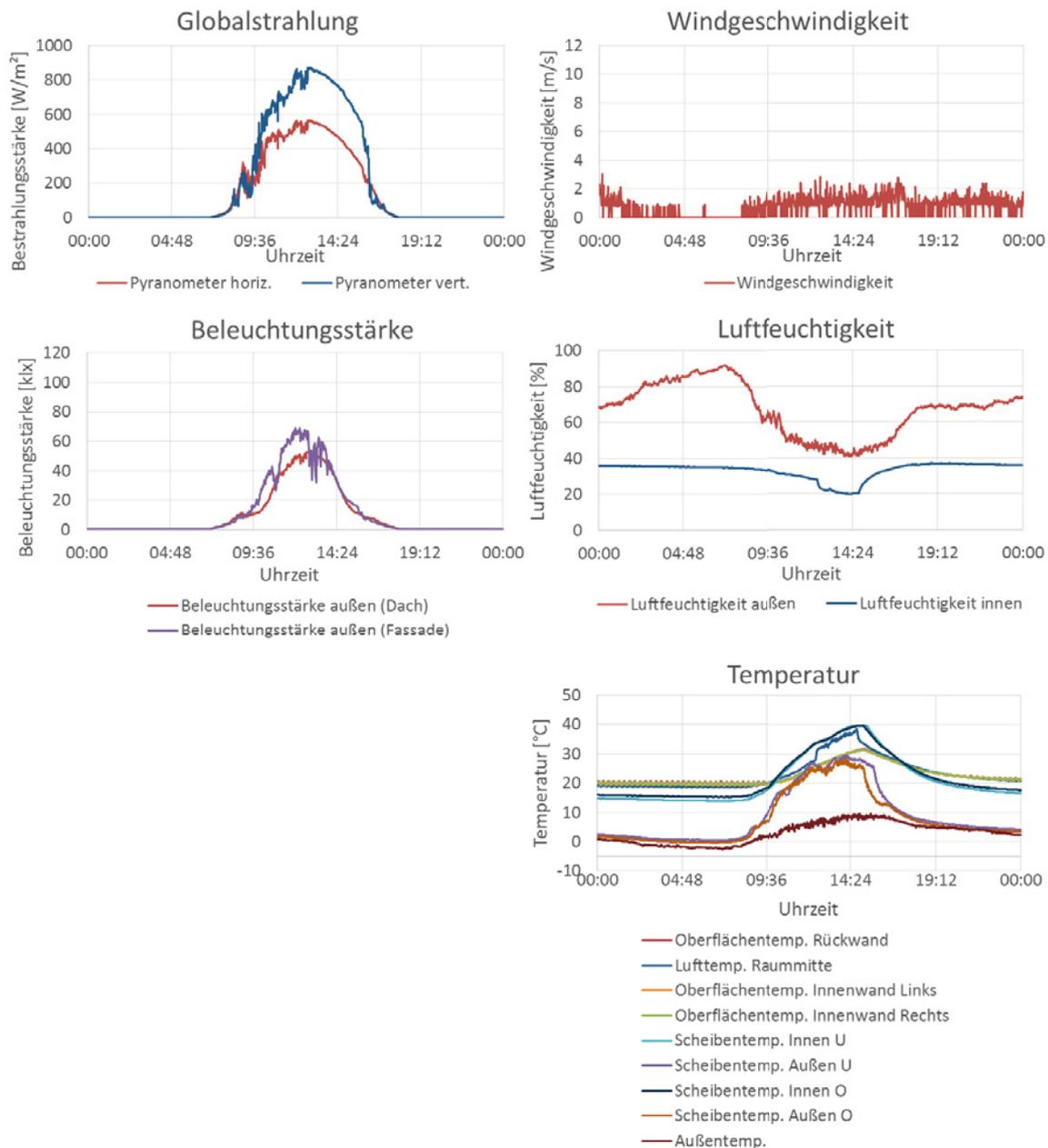


Abbildung 12-60: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (27.02.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke.



12.2.3.1.6 Stuttgart | Fassadeprüfstand | bewölkter Wintertag

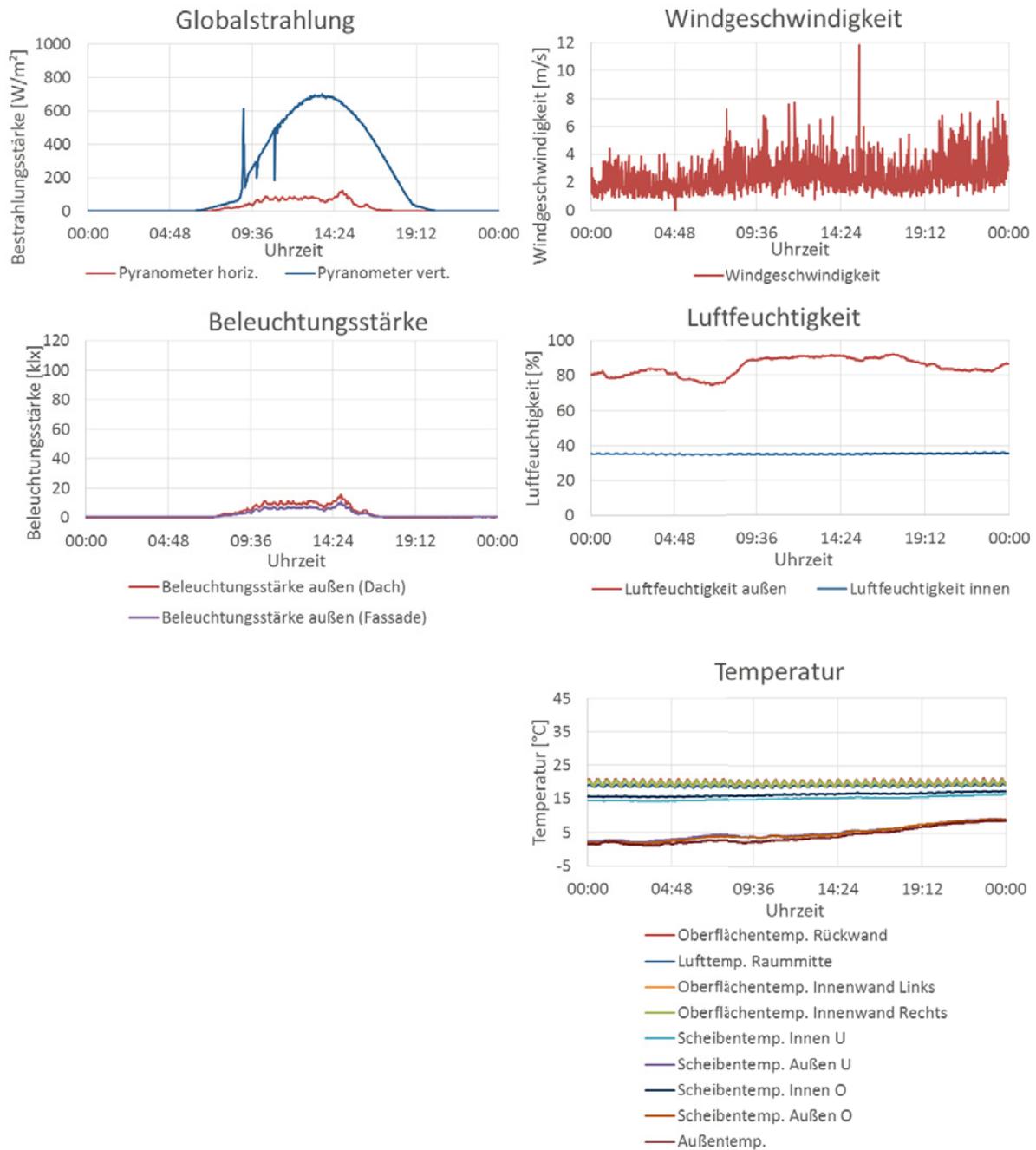


Abbildung 12-61: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (20.02.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke.



12.2.4 Verglasung mit Jalousien im Scheibenzwischenraum: OKAFLEX Typ E

12.2.4.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen

12.2.4.1.1 Stuttgart | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag | RS I

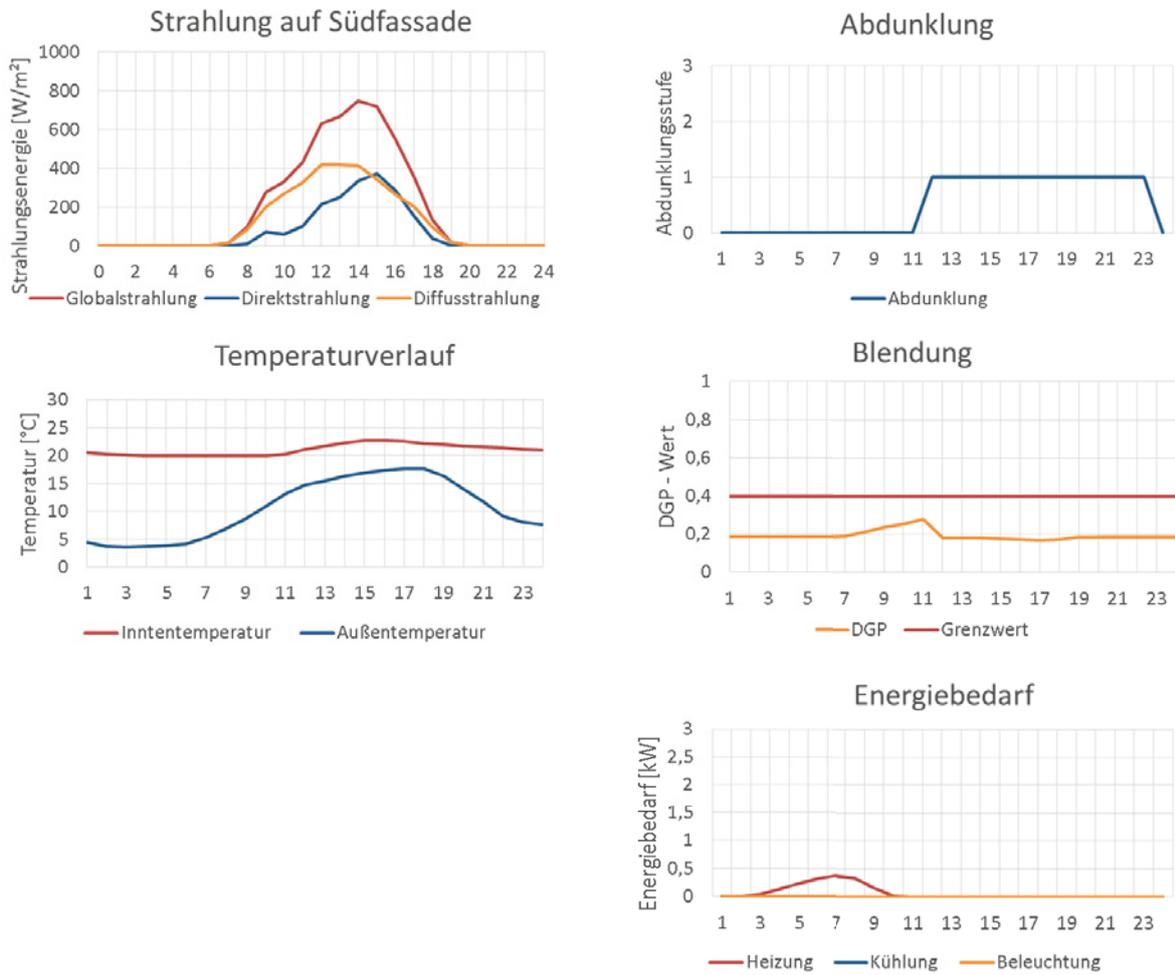


Abbildung 12-62: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.4.1.2 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Sommertag | RS I

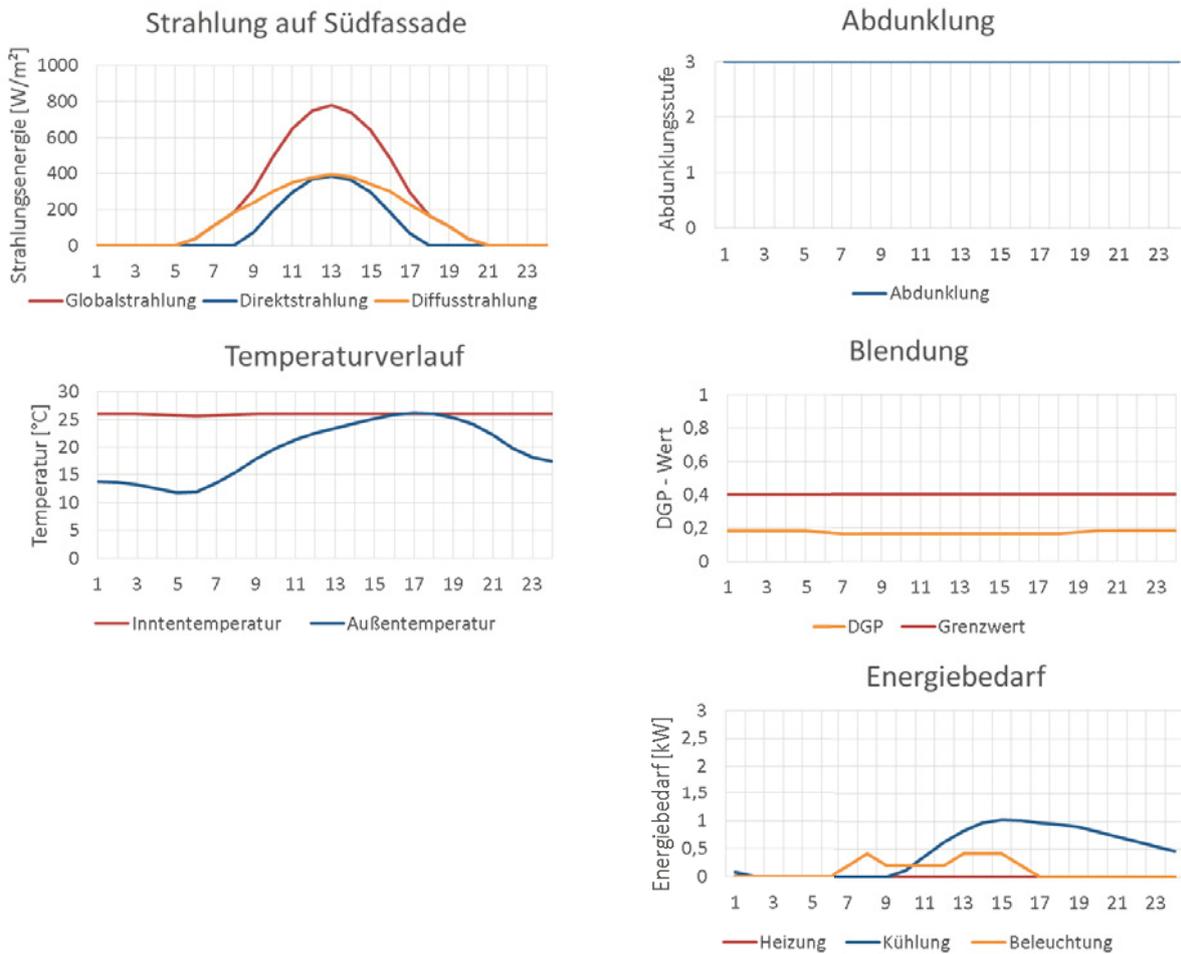


Abbildung 12-63: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.4.1.3 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Sommertag | RS I

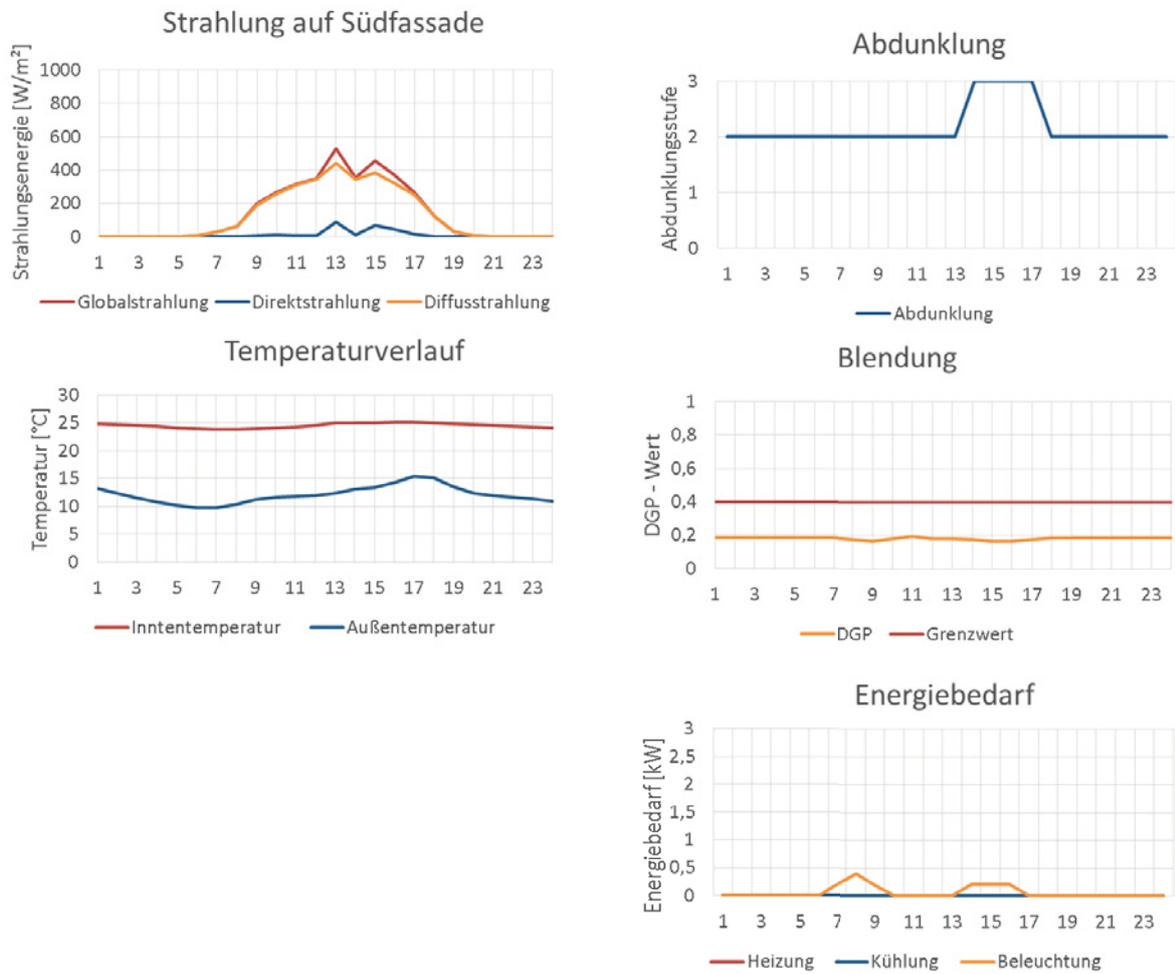


Abbildung 12-64: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.4.1.4 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Wintertag | RS I

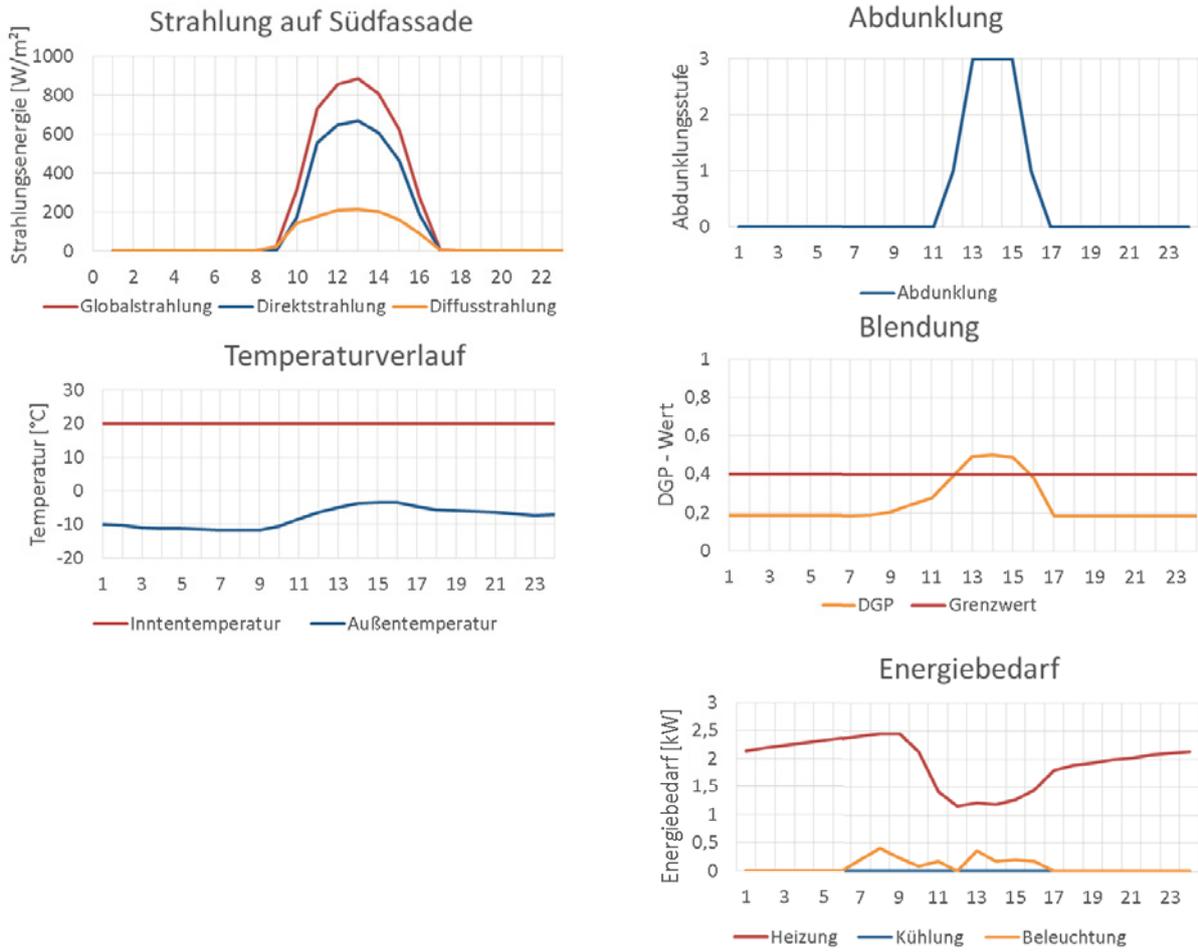


Abbildung 12-65: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.4.1.5 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Wintertag | RS I

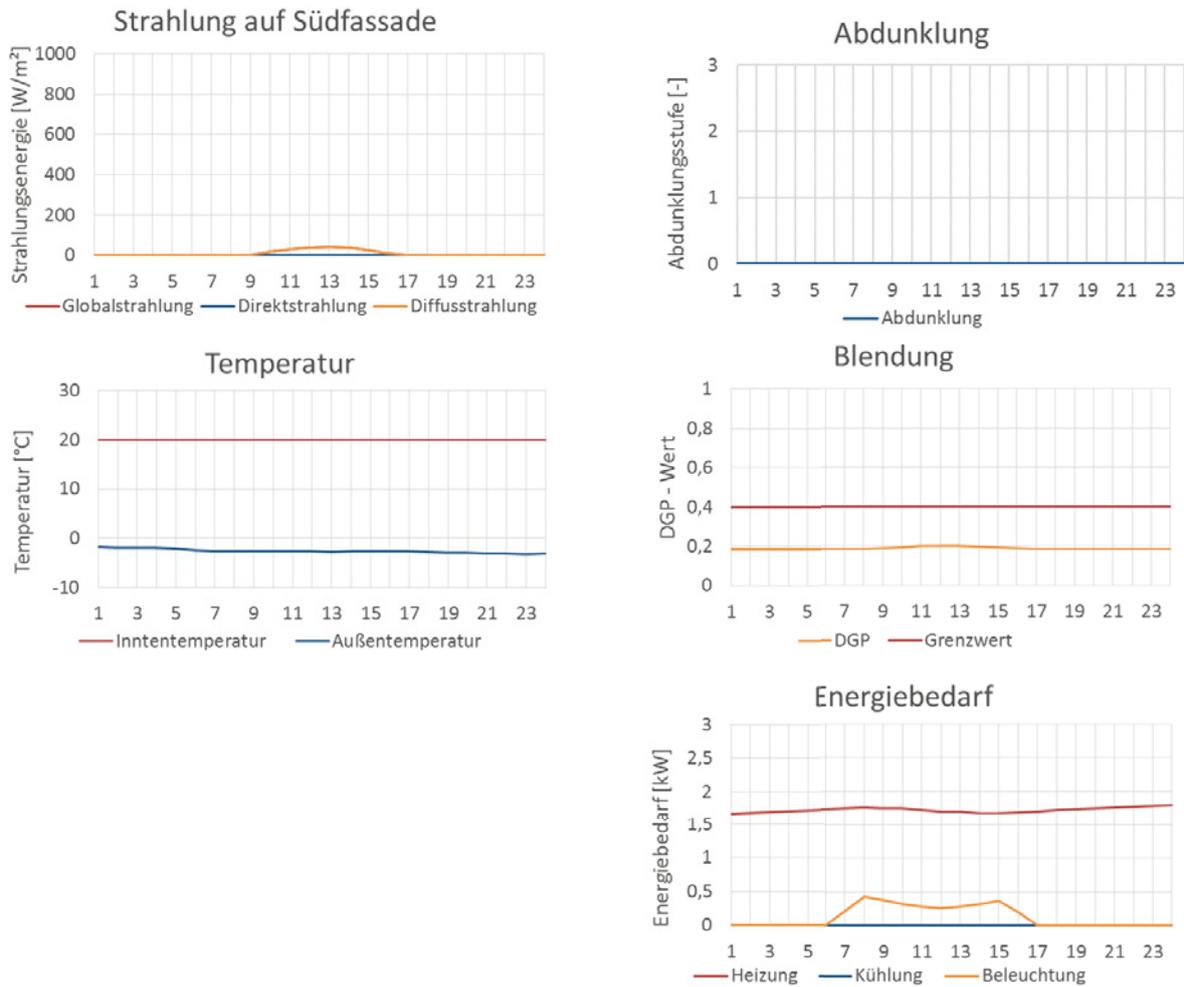


Abbildung 12-66: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.2.4.1.6 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Sommertag | RS I

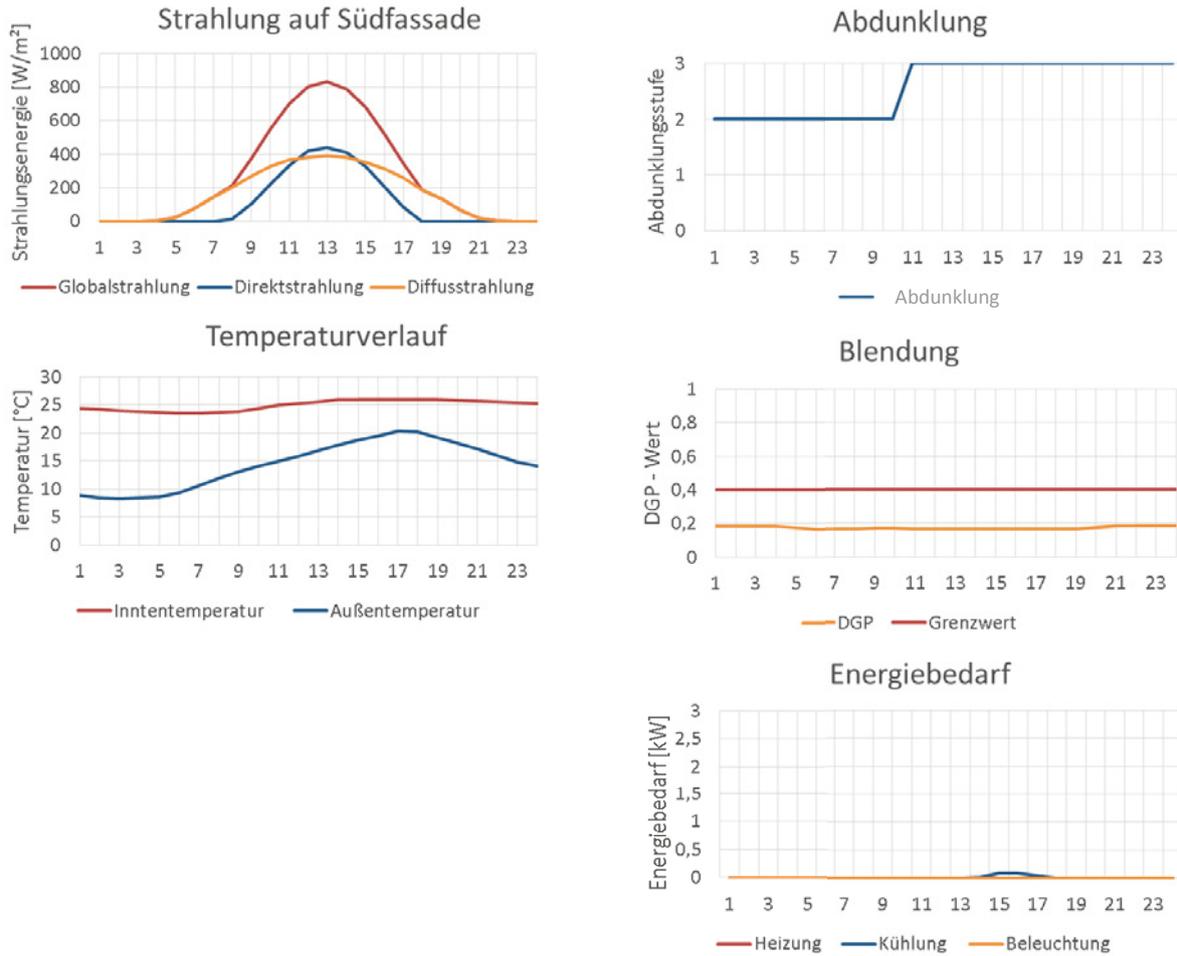


Abbildung 12-67: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.4.1.7 Valencia | Klassenraum | wolkenloser Sommertag | RS I

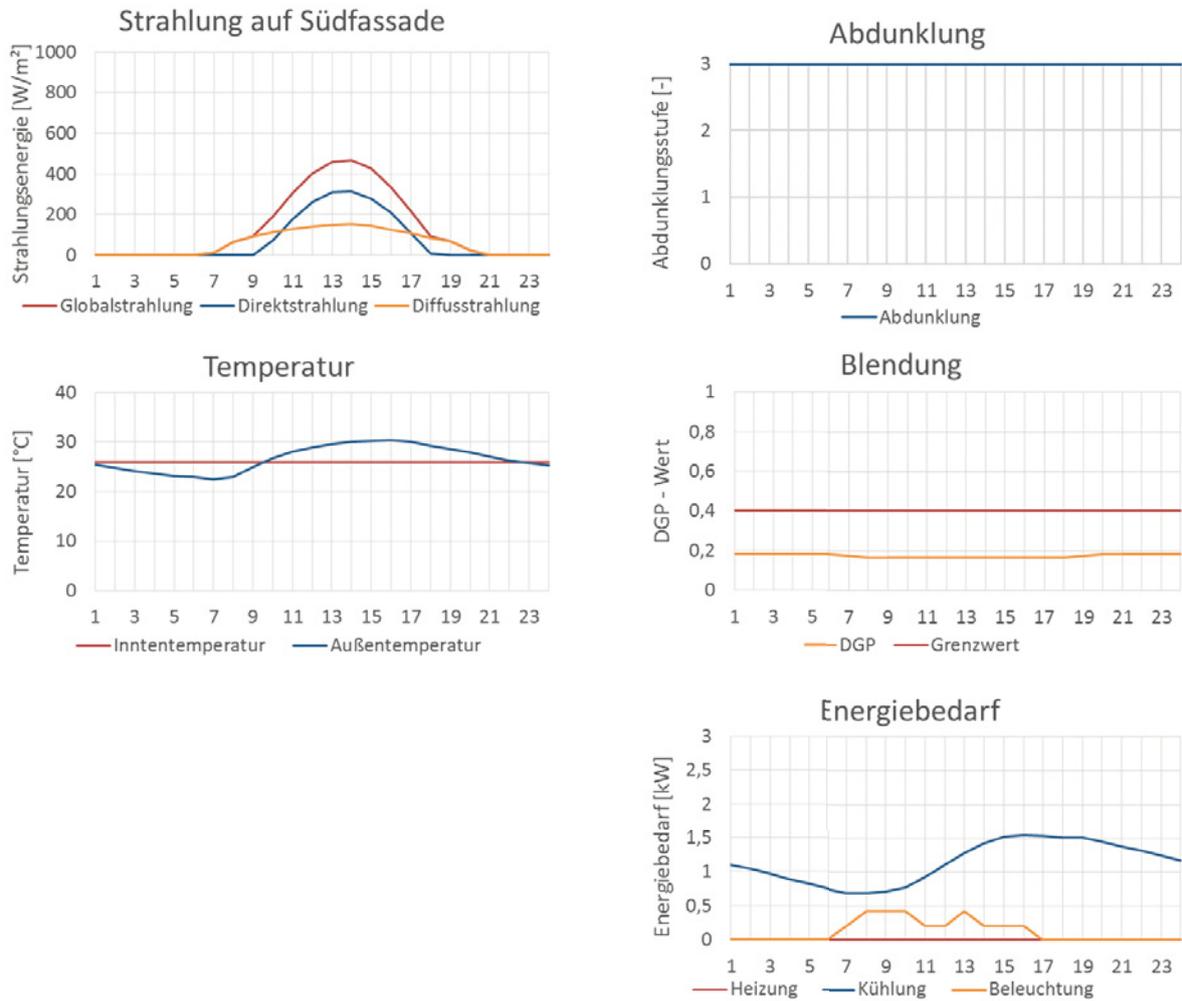


Abbildung 12-68: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.4.1.8 Accra | Klassenraum | wolkenloser Tag | RS I

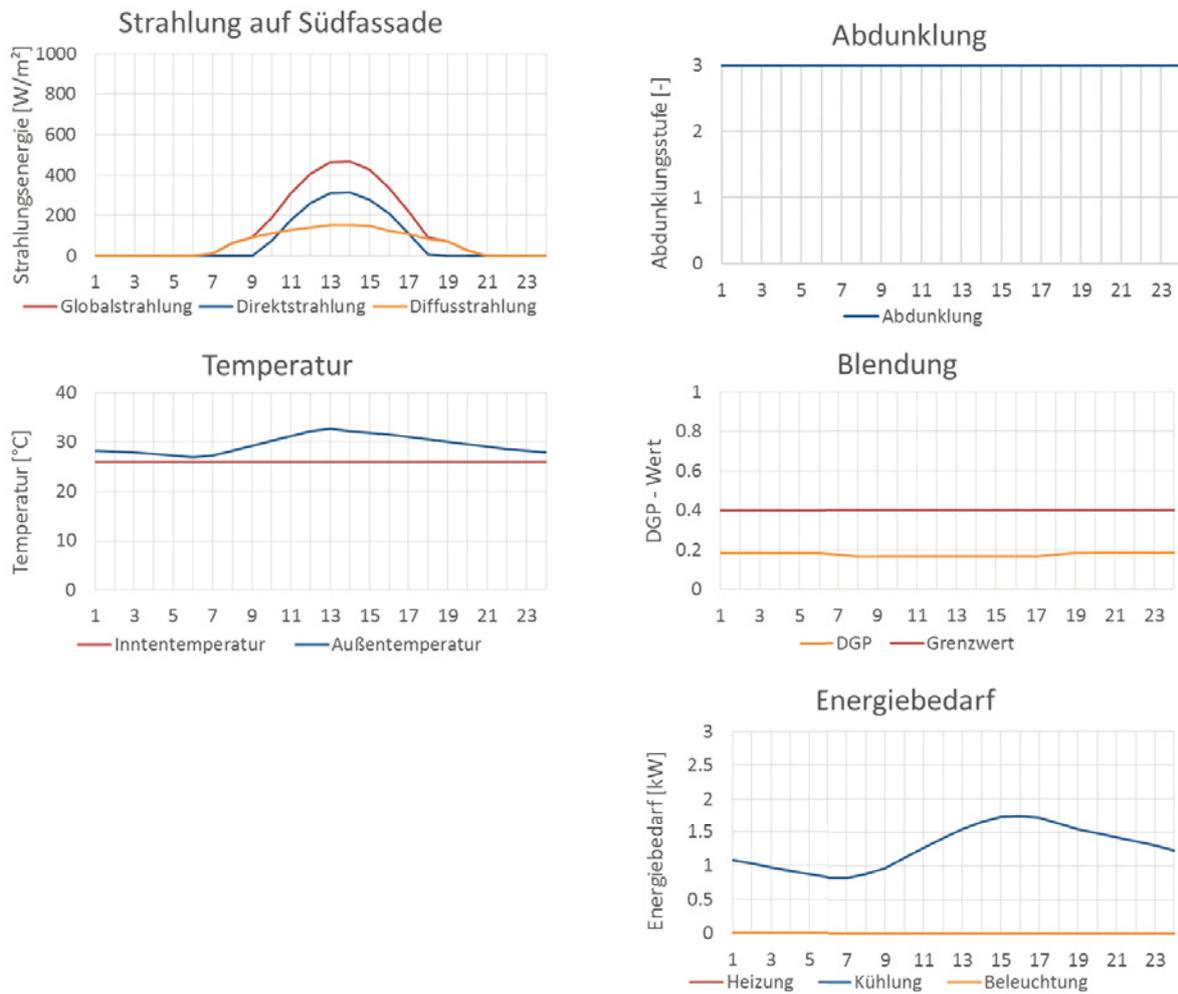


Abbildung 12-69: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.2.4.1.9 Accra | Klassenraum | bewölkter Tag | RS I

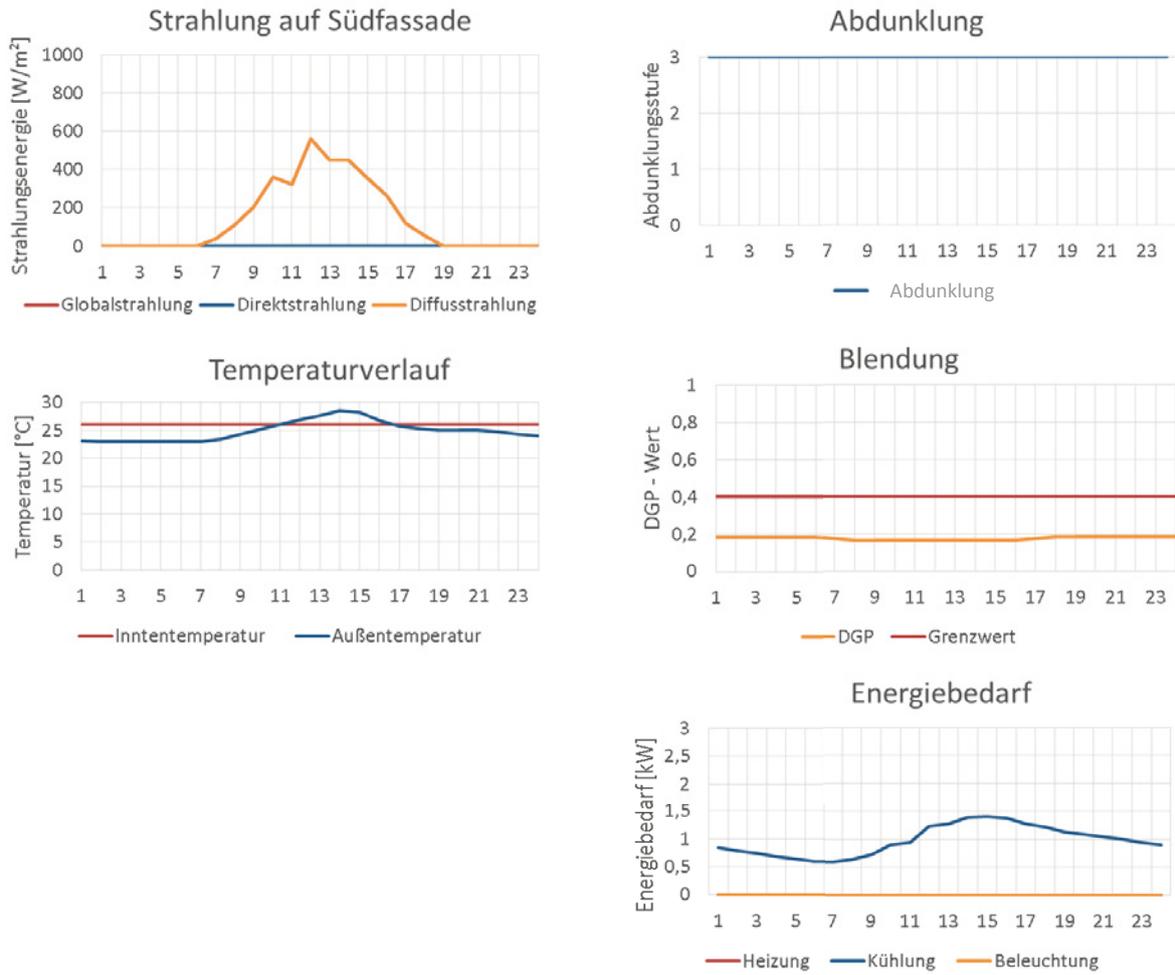


Abbildung 12-70: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Accra an einem bewölkten Tag (28.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.3 Systeminvariante Verglasungen

12.3.1 System mit Mikrolamellen im Scheibenzwischenraum: MicroShade® MS-A Vertical

12.3.1.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen

12.3.1.1.1 Stuttgart | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag

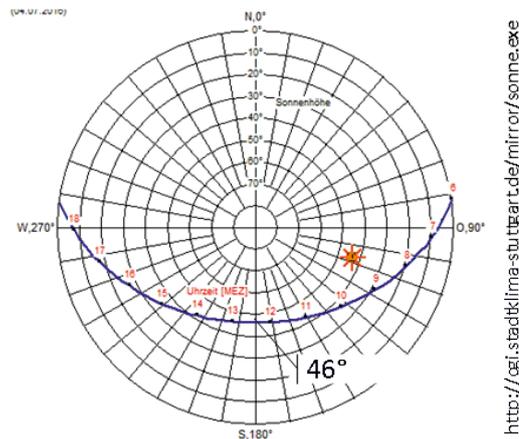


Abbildung 12-71: Sonnenstandsdiagramm für den wechselhaften Frühlingstag 03.04. am Standort Stuttgart

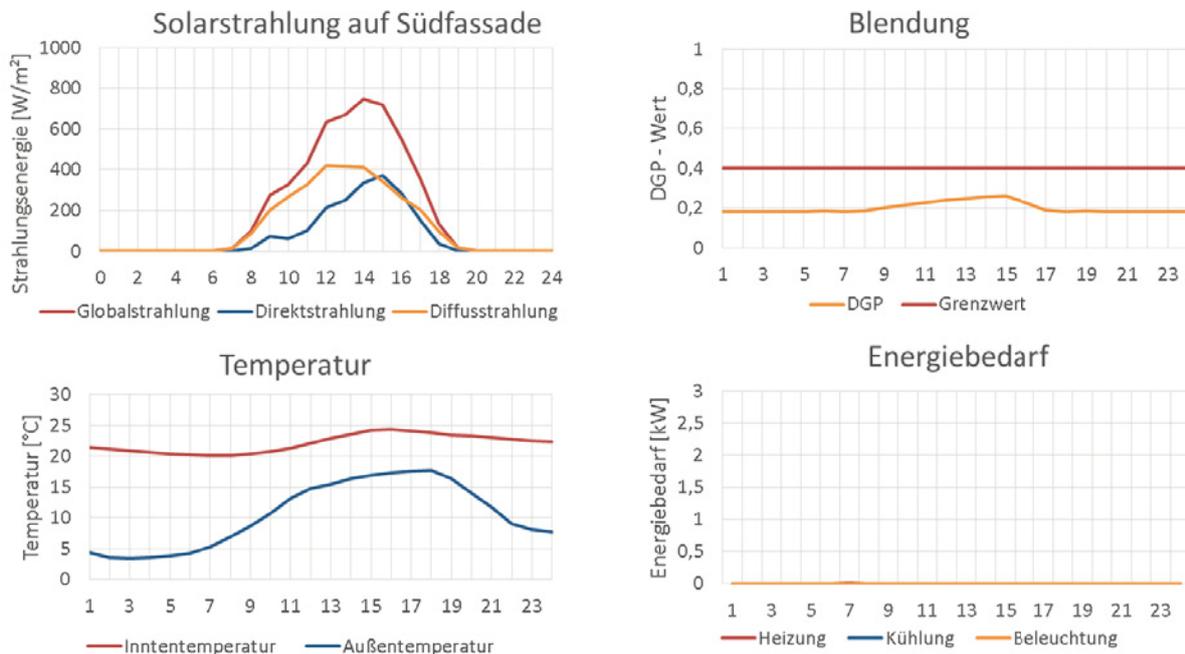


Abbildung 12-72: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

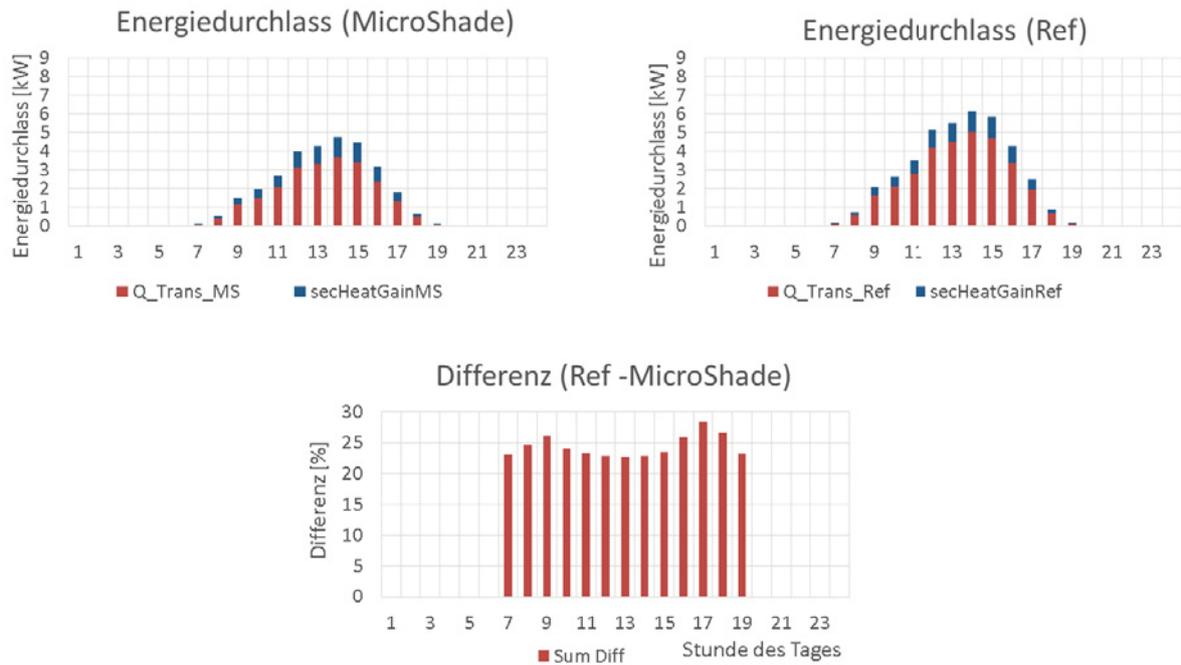


Abbildung 12-73: Direkte Transmission kurzwelliger Strahlung (Q_{Trans}) und sekundäre Wärmeabgabe in den Raum ($secHeatGain$) beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (MS) im Vergleich mit Referenzverglasung 1 (Ref). Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.) ohne interne Wärmegewinne.



12.3.1.1.2 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

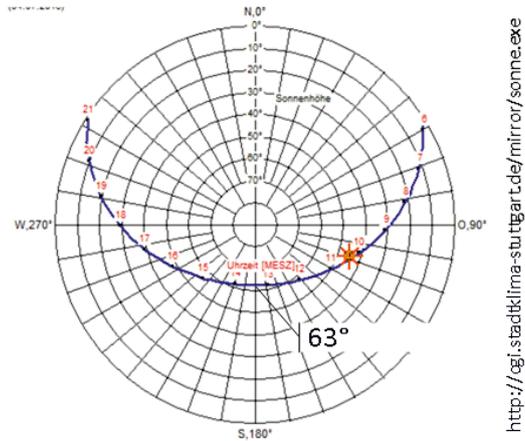


Abbildung 12-74: Sonnenstandsdiagramm für den sonnigen Sommertag 13.07. am Standort Stuttgart

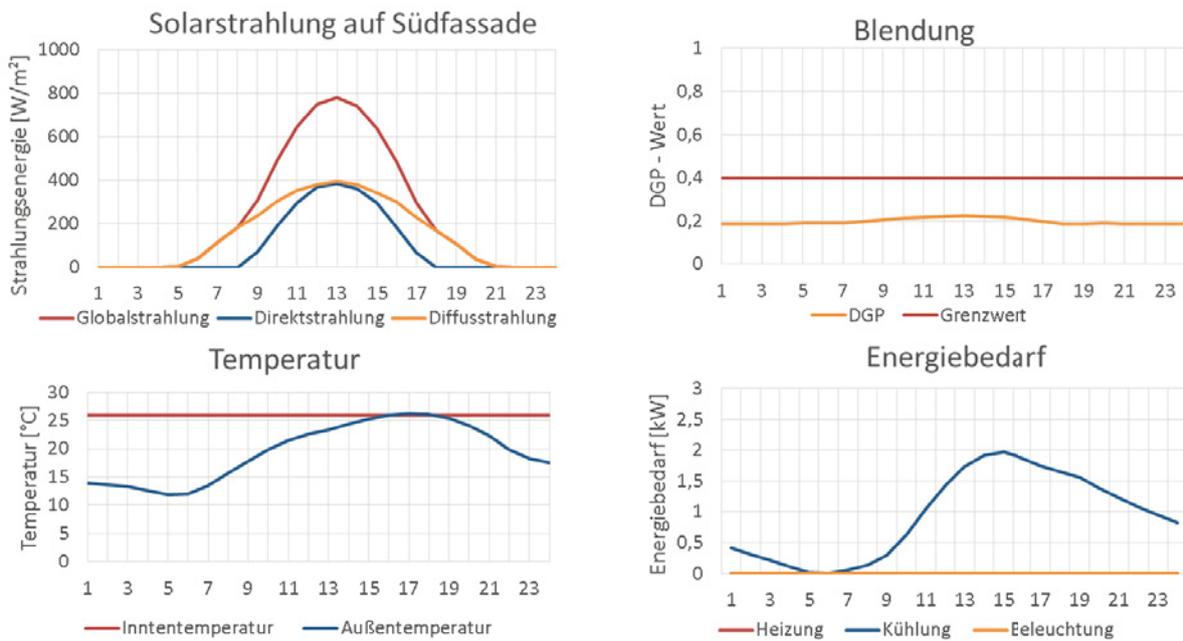


Abbildung 12-75: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem sonnigen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

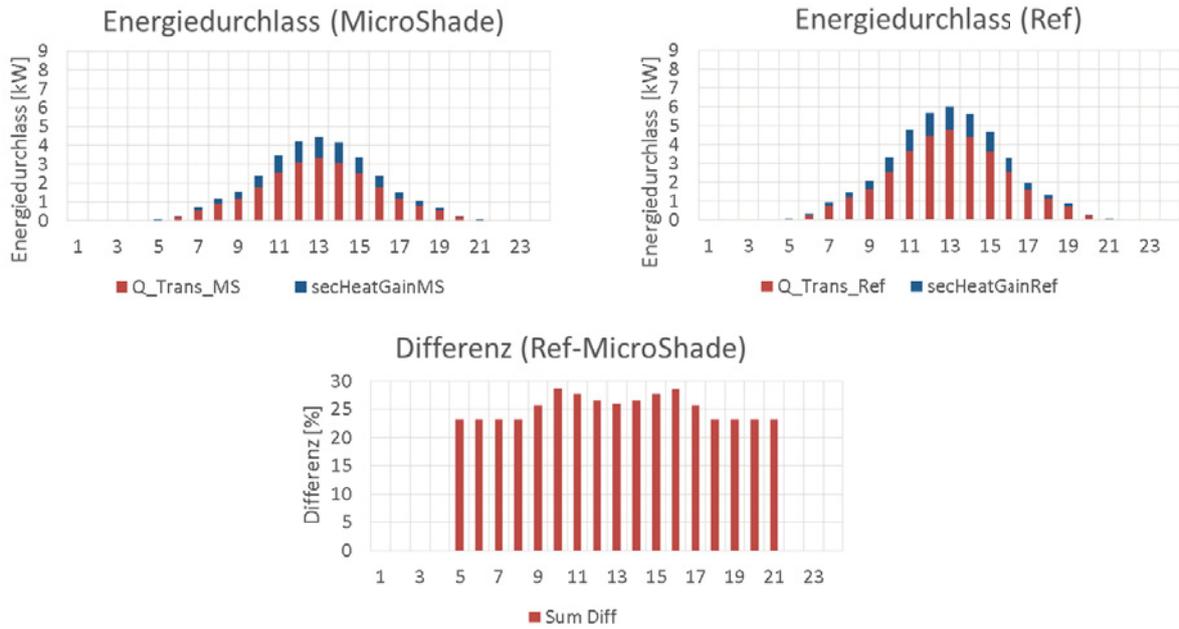


Abbildung 12-76: Direkte Transmission kurzwelliger Strahlung (Q_{Trans}) und sekundäre Wärmeabgabe in den Raum ($secHeatGain$) beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (MS) im Vergleich mit Referenzverglasung 1 (Ref). Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem sonnigen Sommertag (13.07.) ohne interne Wärmege-
winne.



12.3.1.1.3 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Sommertag

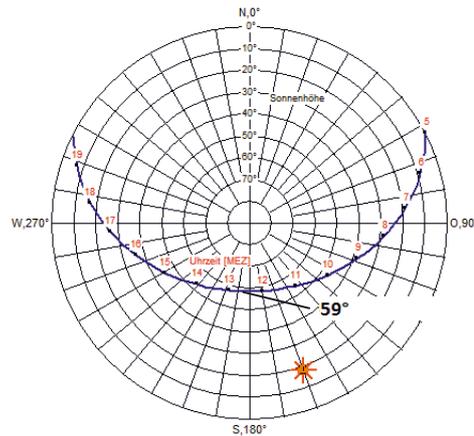


Abbildung 12-77: Sonnenstandsdiagramm für den bewölkten Sommertag 01.08. am Standort Stuttgart

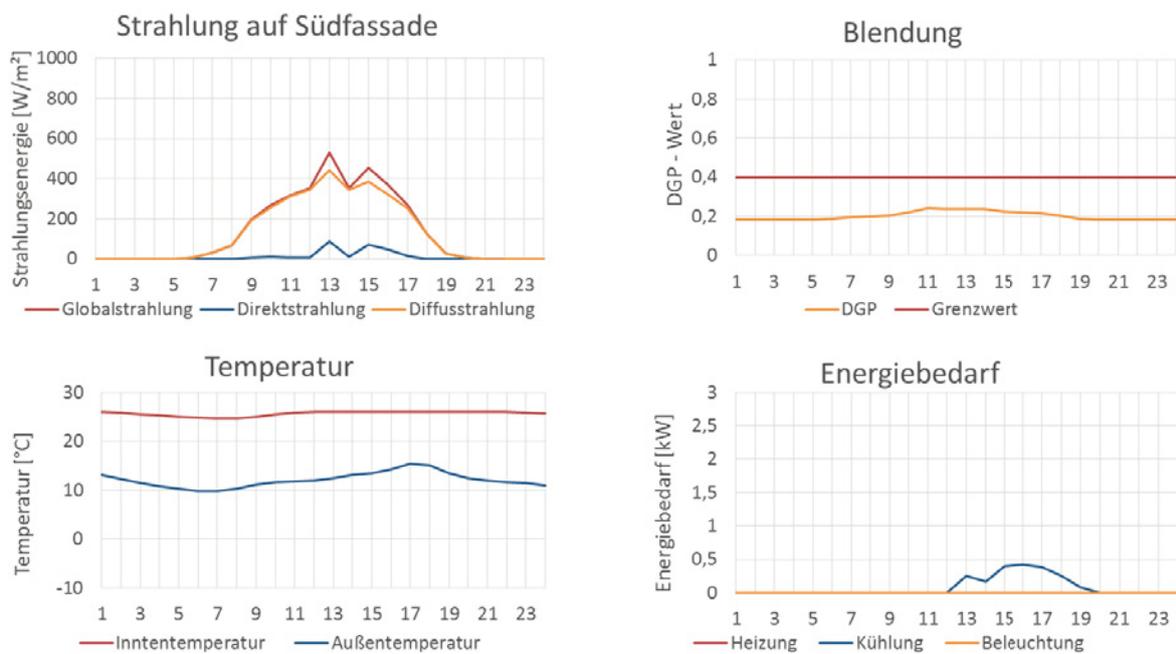


Abbildung 12-78: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.3.1.1.4 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Wintertag

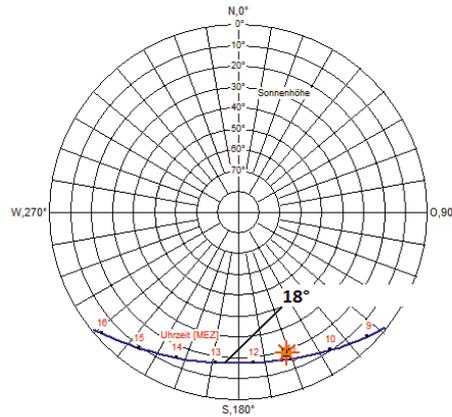


Abbildung 12-79: Sonnenstandsdiagramm für den bewölkten Wintertag 13.12. am Standort Stuttgart

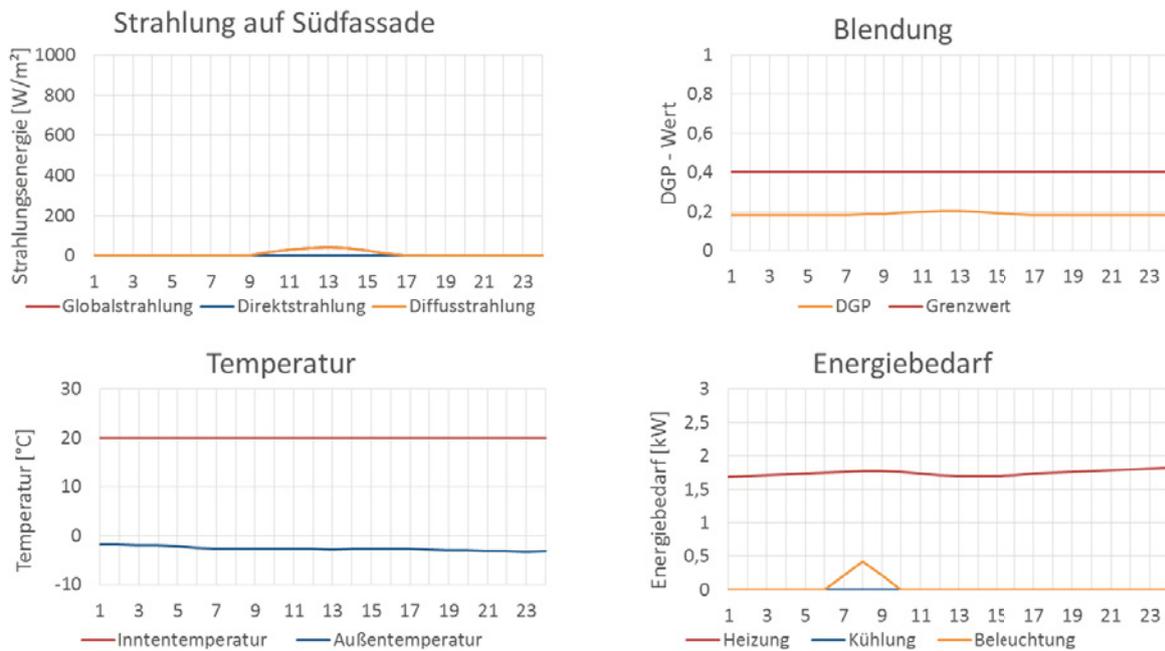


Abbildung 12-80: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.3.1.1.5 Helsinki | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag

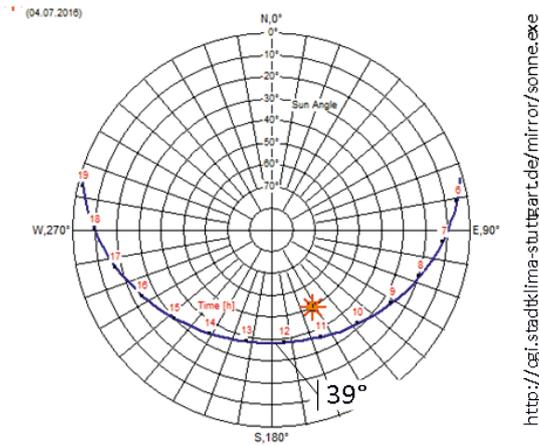


Abbildung 12-81: Sonnenstandsdiagramm für den wechselhaften Frühlingstag 13.04. am Standort Helsinki

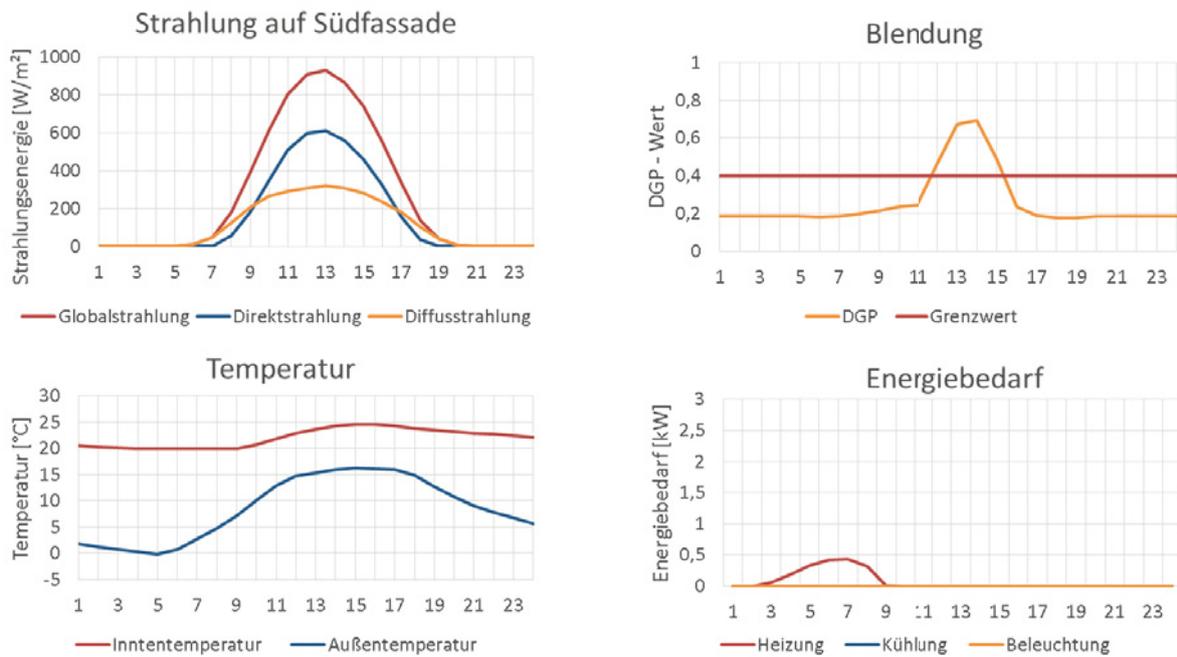


Abbildung 12-82: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wechselhaften Frühlingstag (13.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.3.1.1.6 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

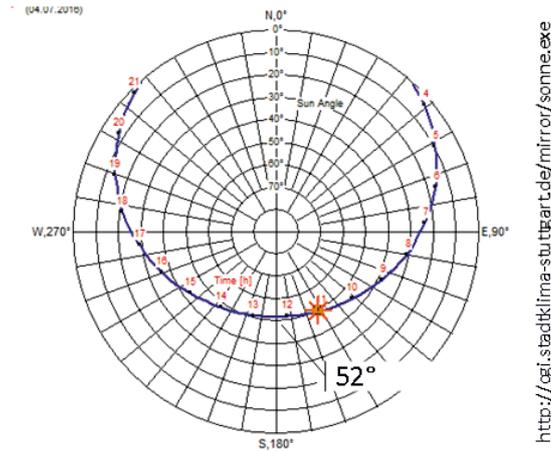


Abbildung 12-83: Sonnenstandsdiagramm für den wolkenlosen Sommertag 08.07. am Standort Helsinki

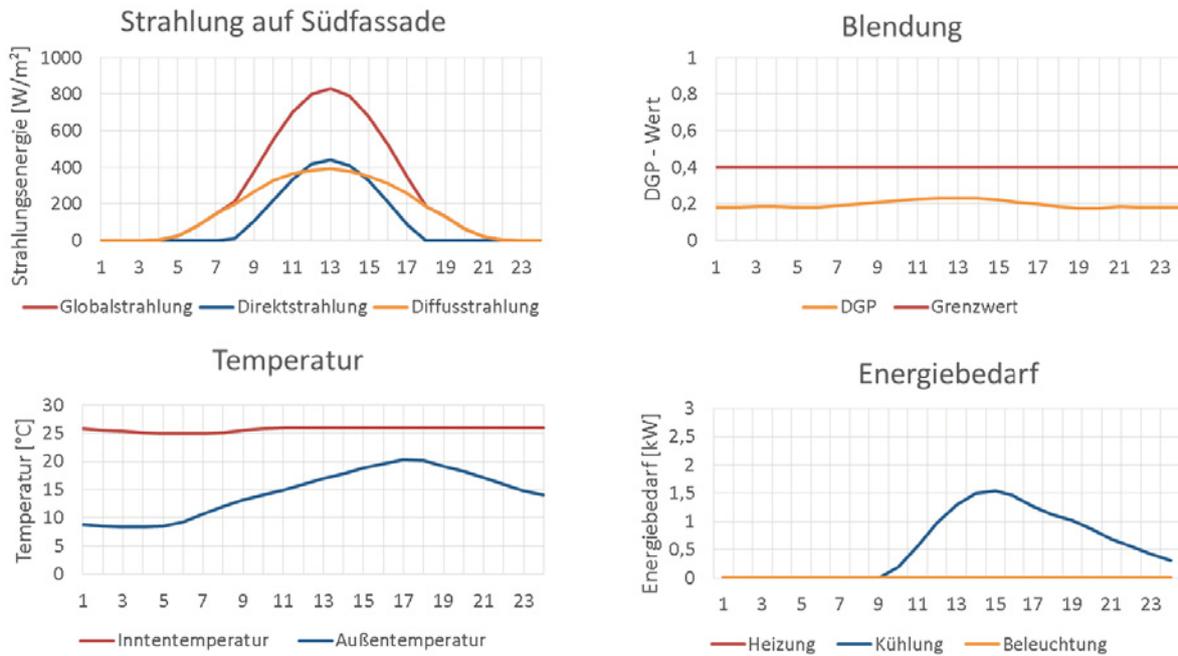


Abbildung 12-84: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.3.1.1.7 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Wintertag

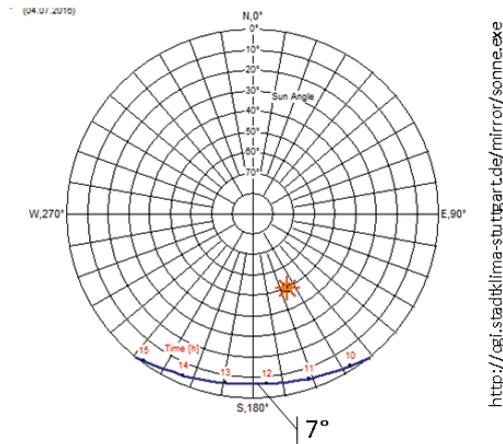


Abbildung 12-85: Sonnenstandsdiagramm für den wolkenlosen Wintertag 06.12. am Standort Helsinki

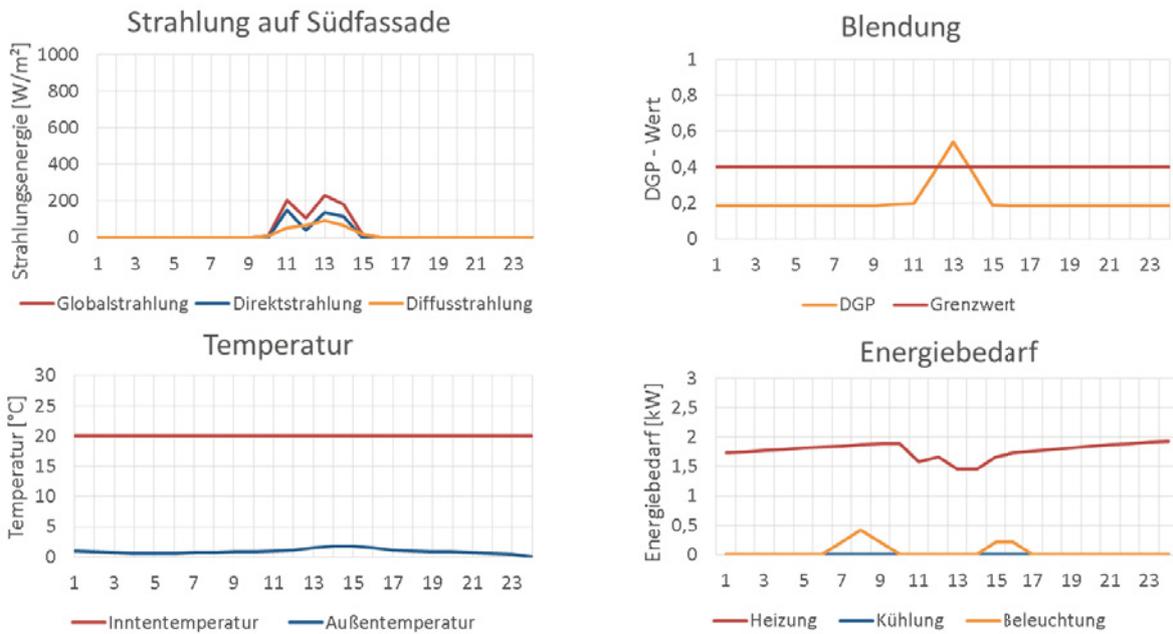


Abbildung 12-86: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Wintertag (06.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.3.1.1.8 Valencia | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

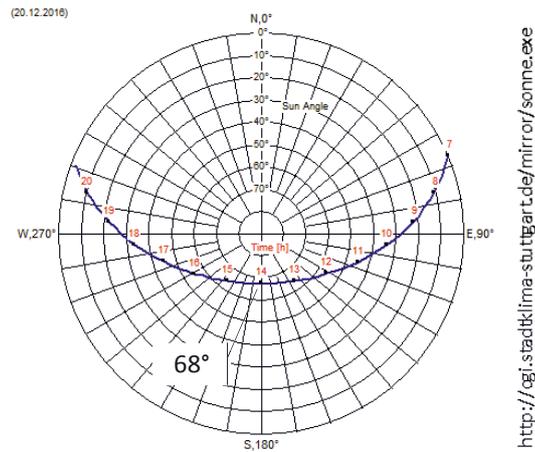


Abbildung 12-87: Sonnenstandsdiagramm für den wolkenlosen Sommertag 02.08. am Standort Valencia

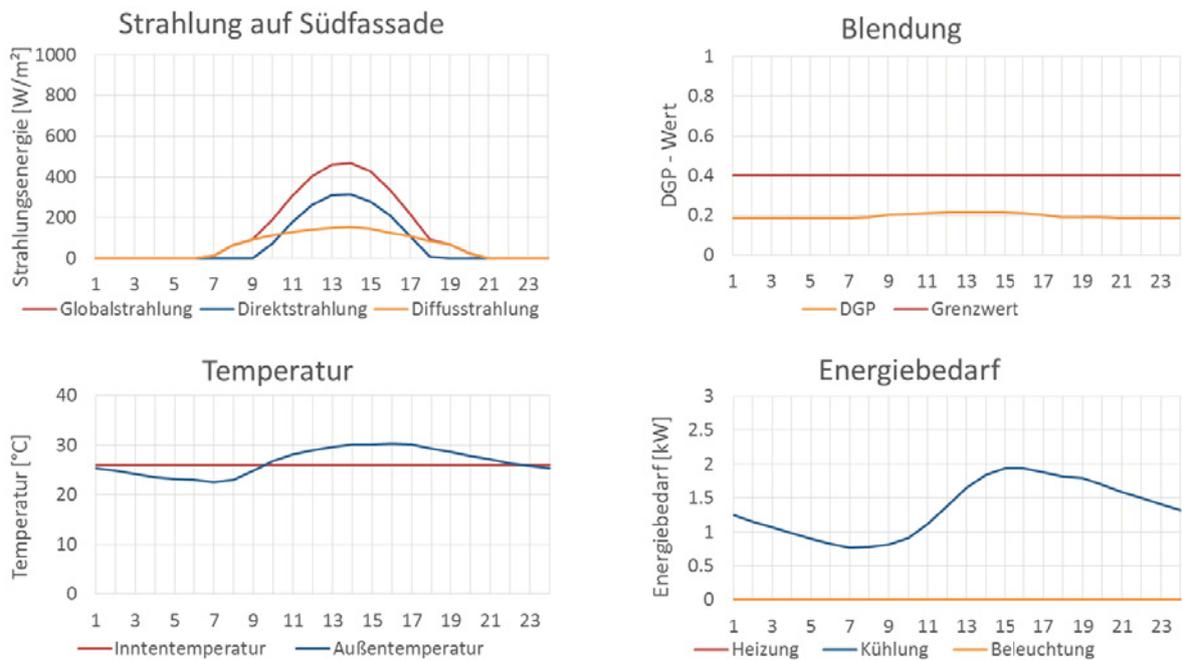


Abbildung 12-88: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.3.1.1.9 Accra | Klassenraum | wolkenloser Tag

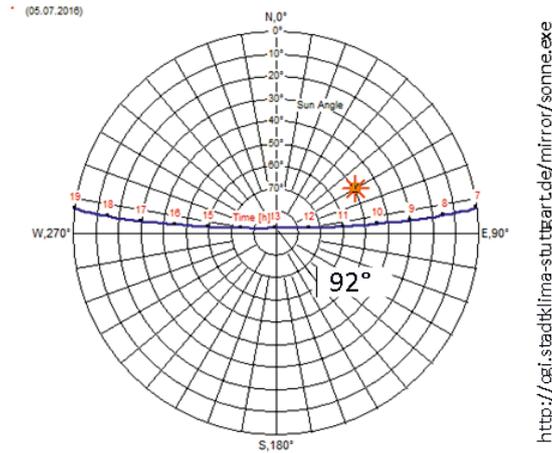


Abbildung 12-89: Sonnenstandsdiagramm für den wolkenlosen Tag 08.04. am Standort Accra

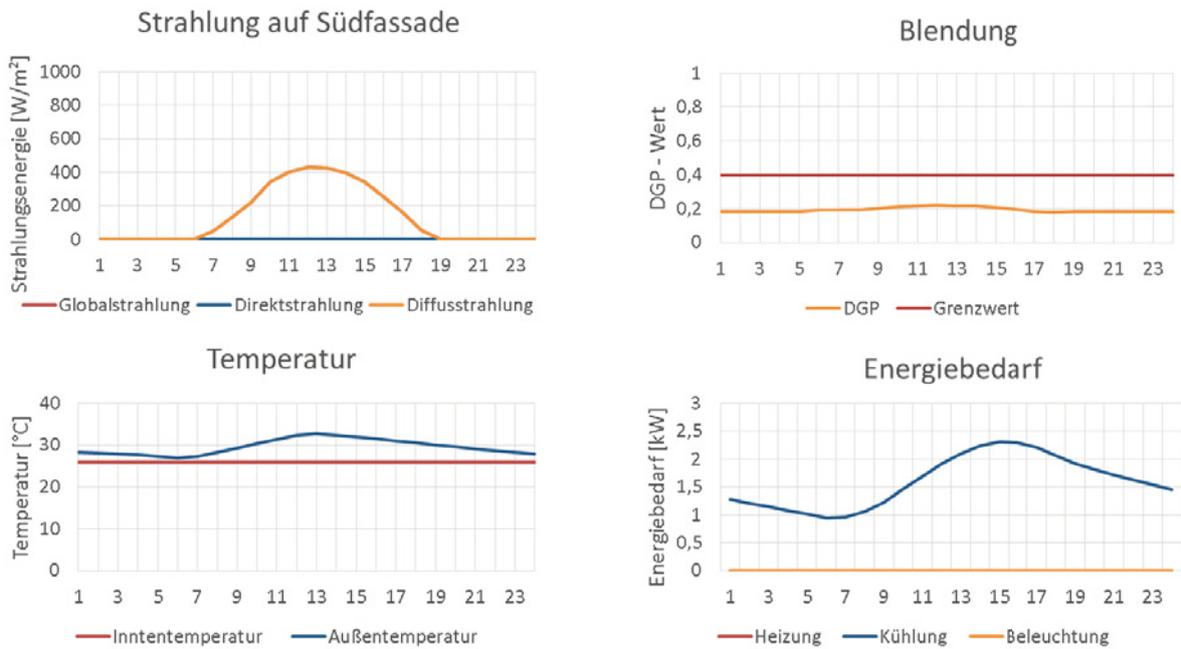


Abbildung 12-90: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.3.1.2 Tagesanalysen auf der Basis des Monitorings im Fassadenprüfstand

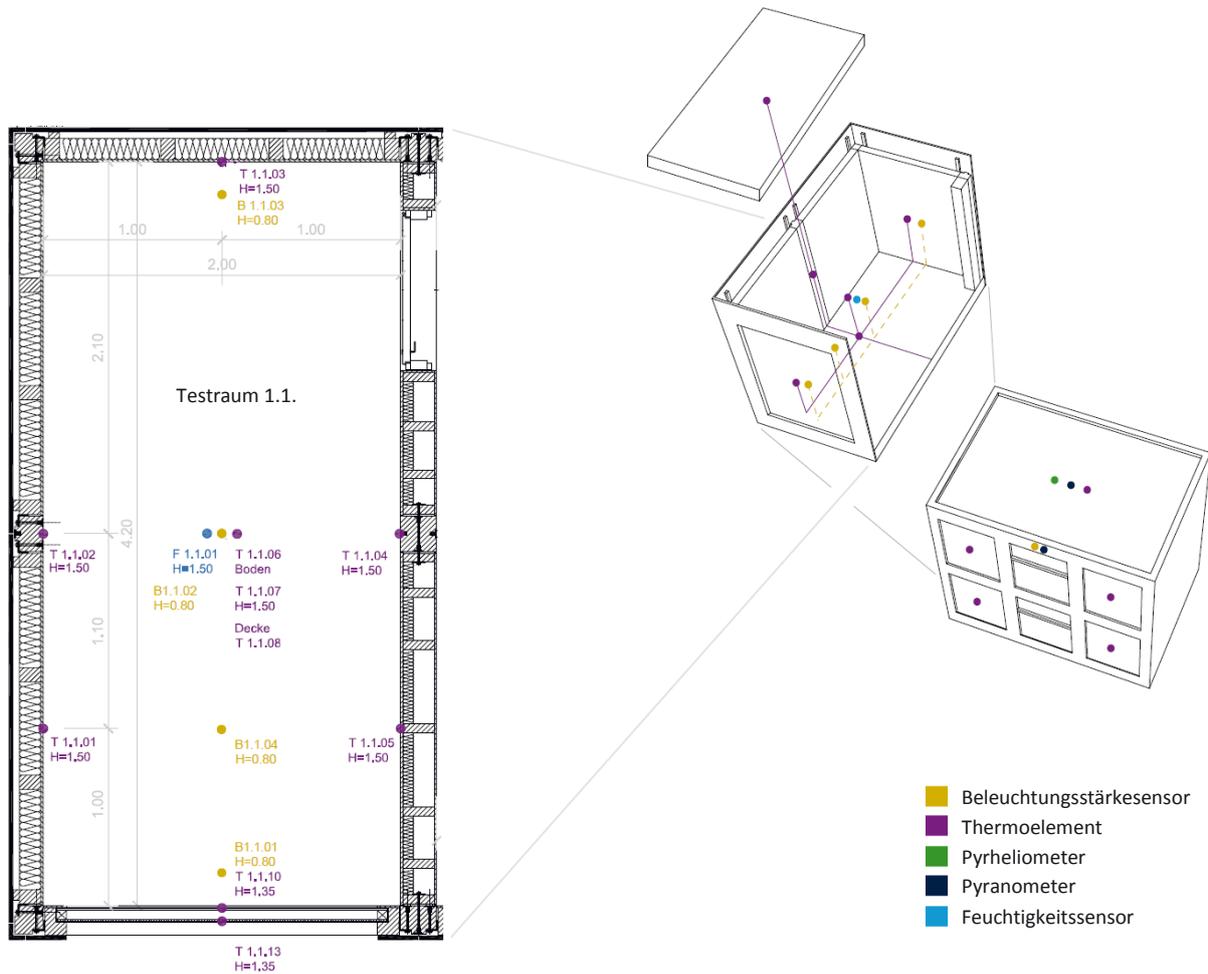


Abbildung 12-91: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 1.1. mit MicroShade® MS-A Vertical in der Südfassade. Positionierung der Sensoren.



12.3.1.2.1 Stuttgart | Fassadenprüfstand | wolkenloser Wintertag

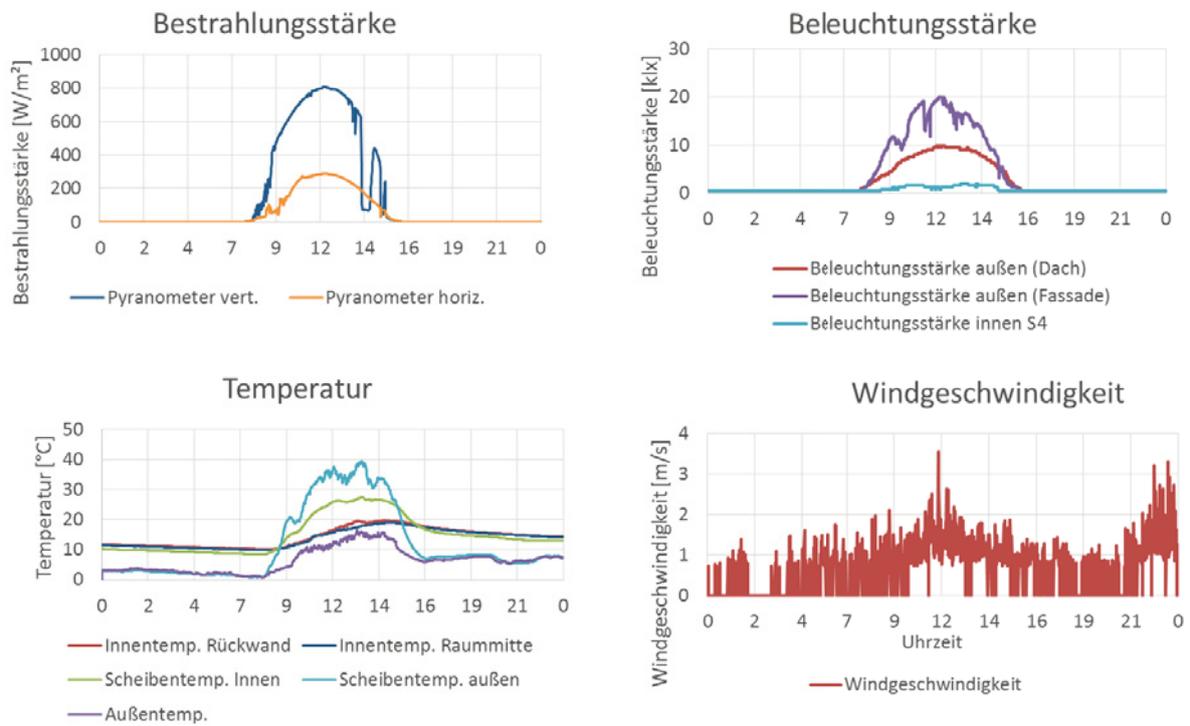


Abbildung 12-92: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (14.12.2015). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Beleuchtungsstärke.



12.4 Verglasungen mit konstanten Eigenschaften (Referenzverglasungen)

12.4.1 Referenzverglasung 1: Zweifachwärmeschutzverglasung

12.4.1.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen

12.4.1.1.1 Stuttgart | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag

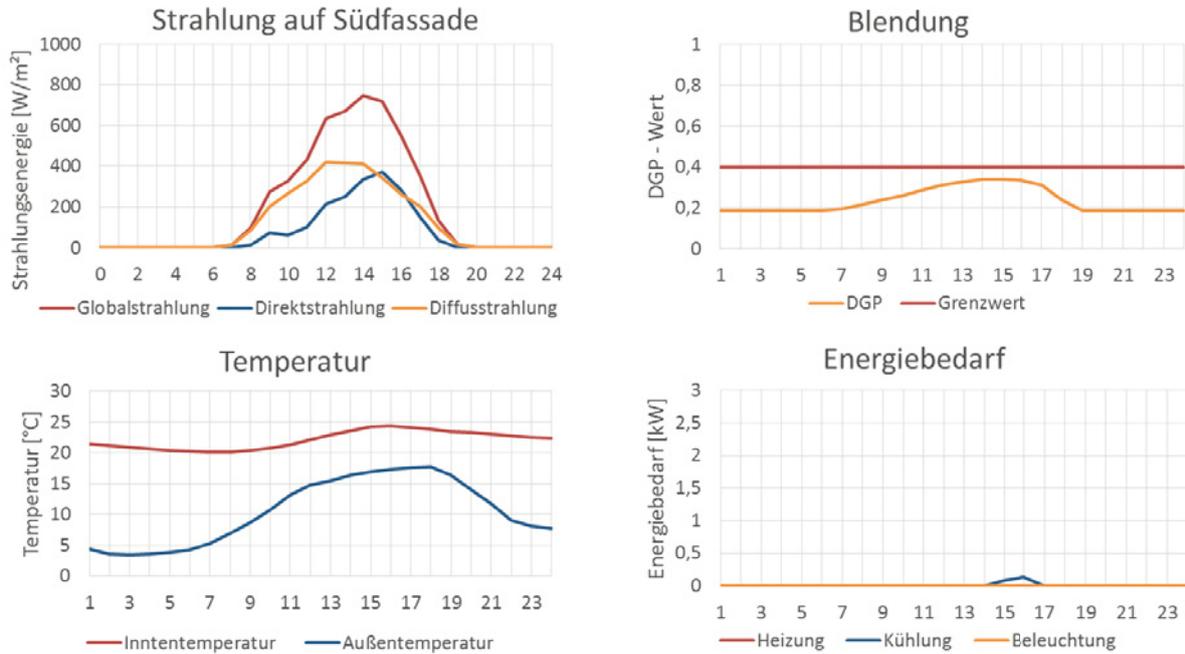


Abbildung 12-93: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.1.1.2 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

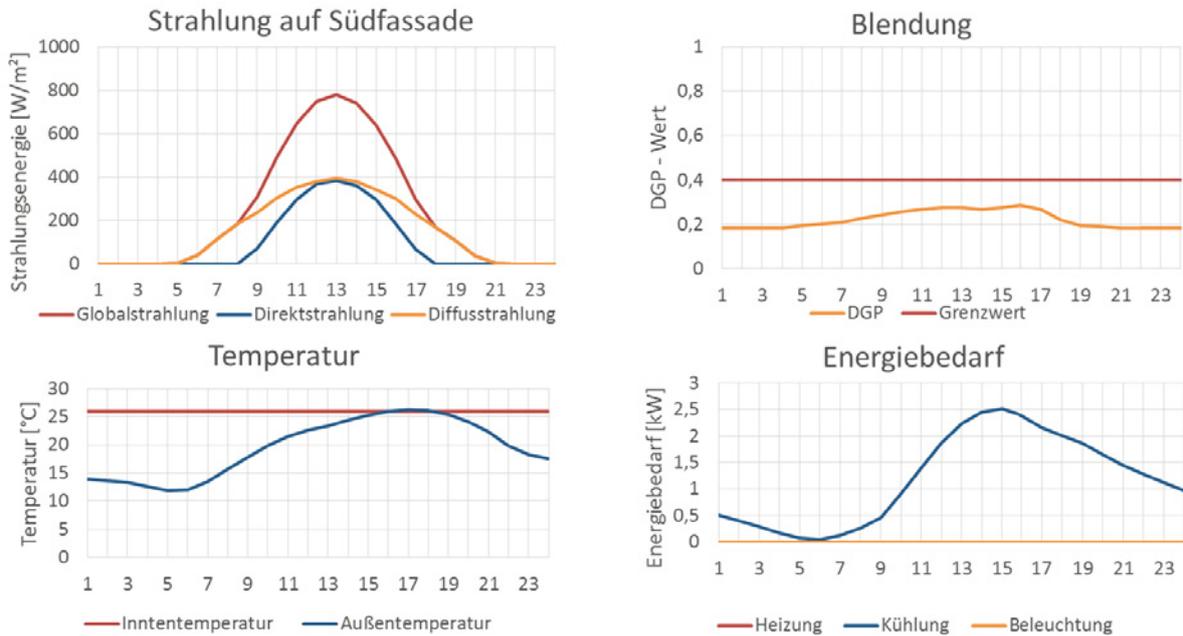


Abbildung 12-94: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.1.1.3 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Sommertag

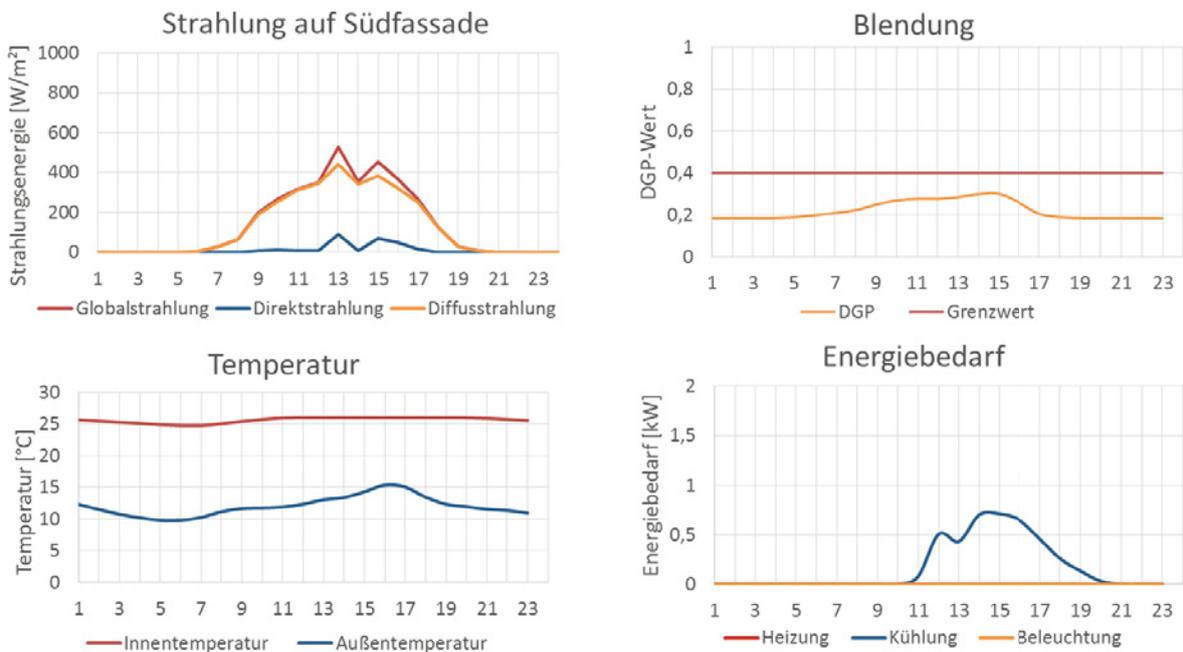


Abbildung 12-95: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.1.1.4 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Wintertag

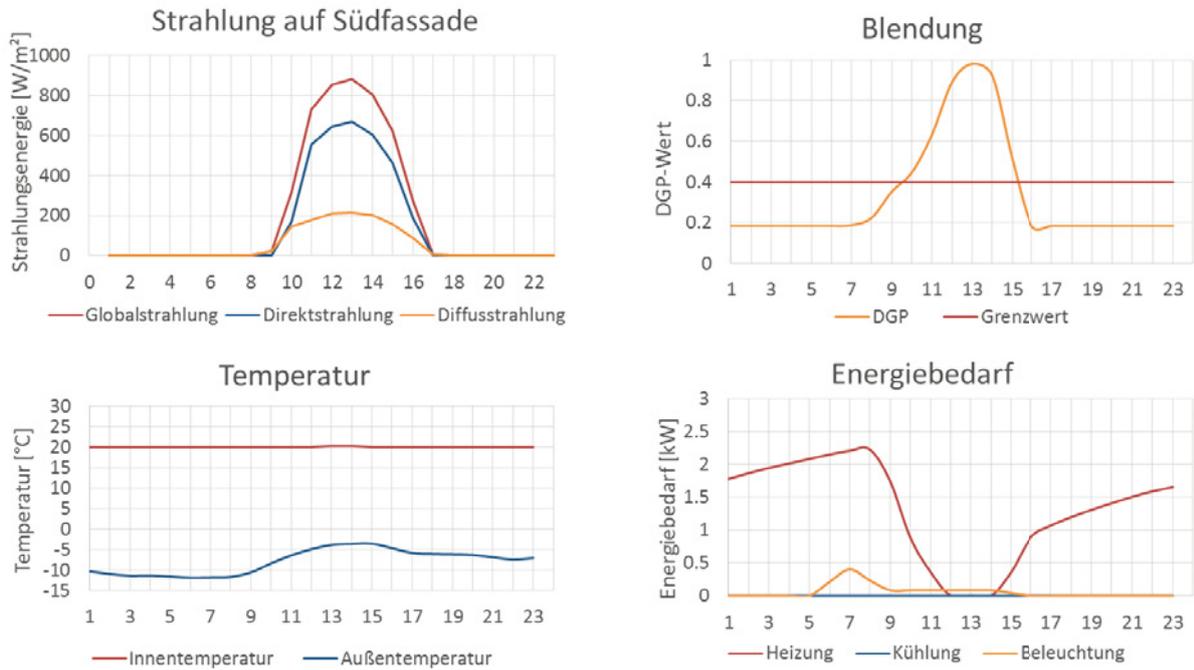


Abbildung 12-96: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.1.1.5 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Wintertag

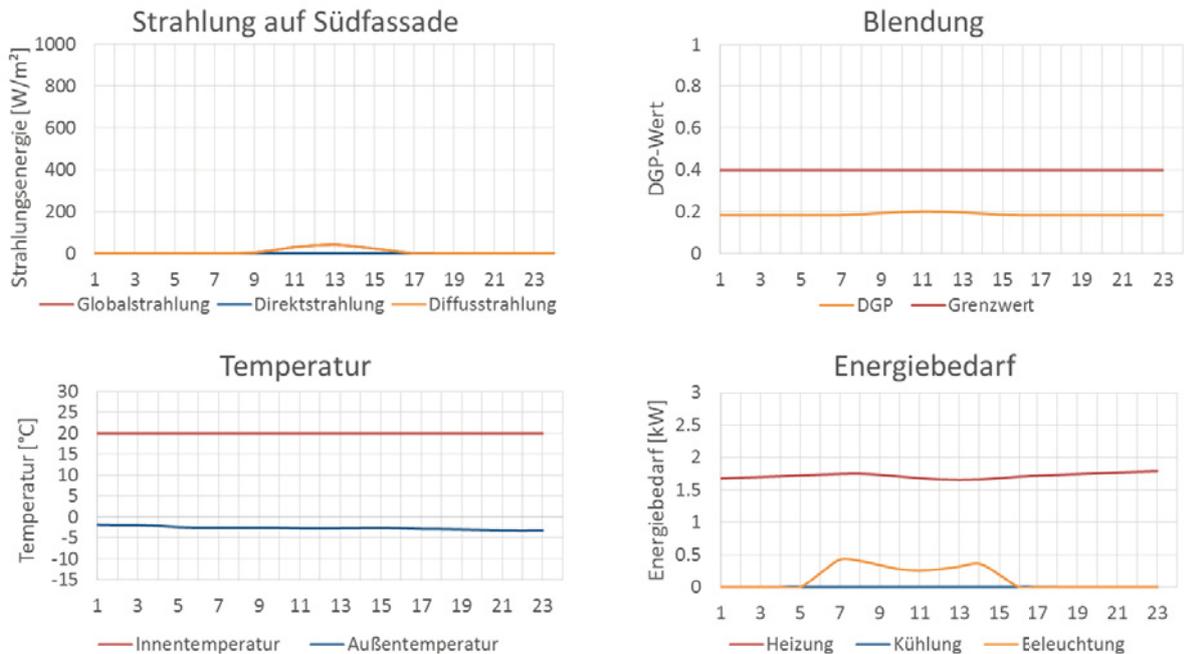


Abbildung 12-97: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.1.1.6 Helsinki | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag

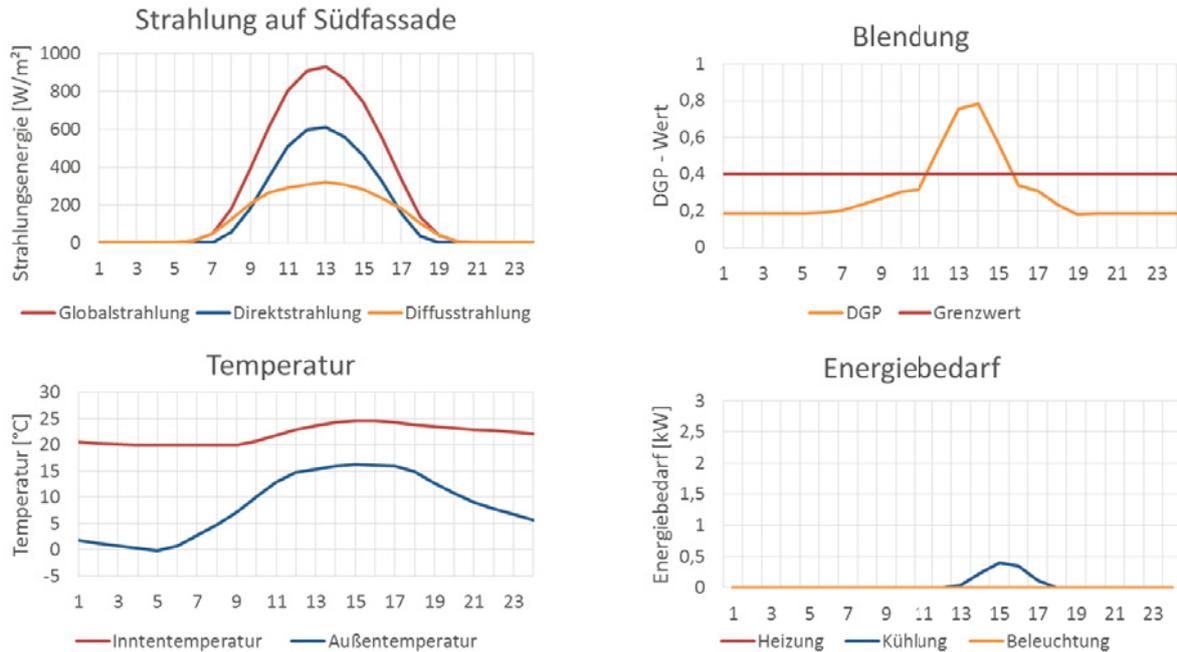


Abbildung 12-98: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wechselhaften Frühlingstag (13.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.1.1.7 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

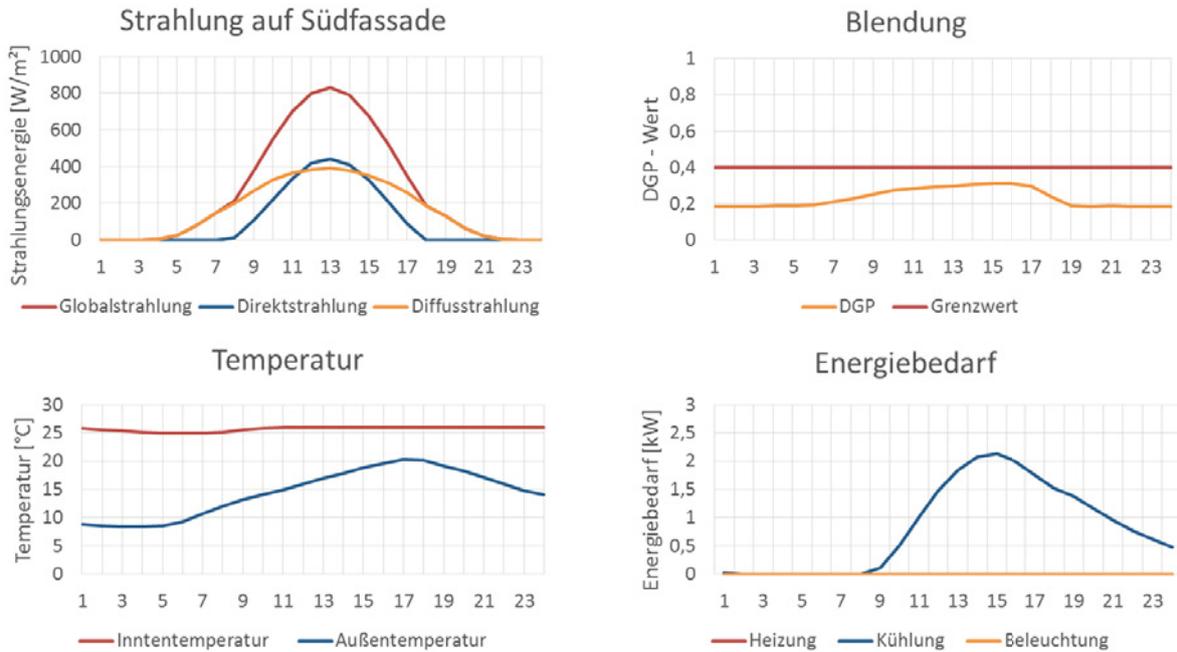


Abbildung 12-99: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.1.1.8 Helsinki | Klassenraum | bewölkter Sommertag

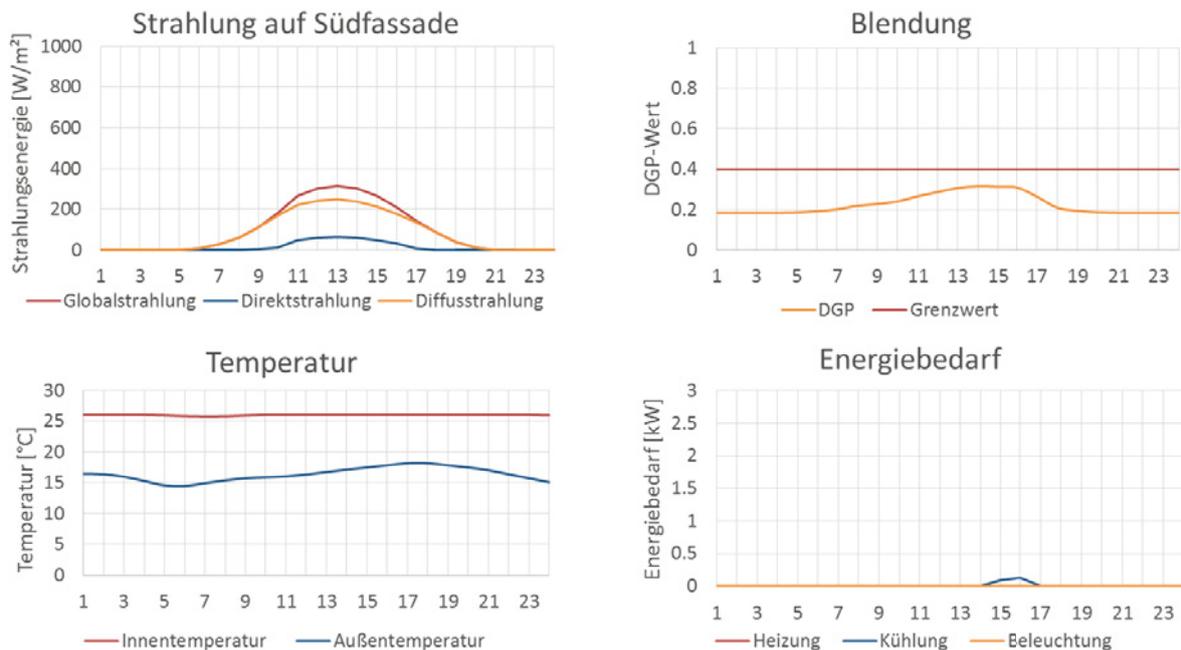


Abbildung 12-100: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem bewölkten Sommertag (07.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.1.1.9 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Wintertag

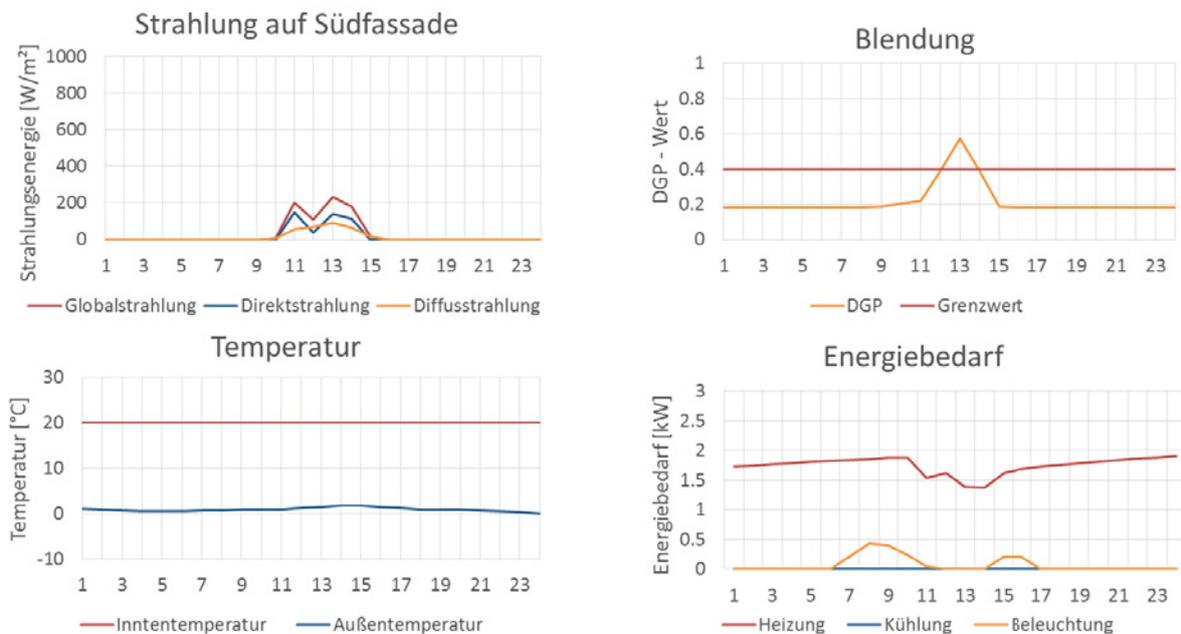


Abbildung 12-101: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Wintertag (06.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.1.1.10 Helsinki | Klassenraum | bewölkter Wintertag

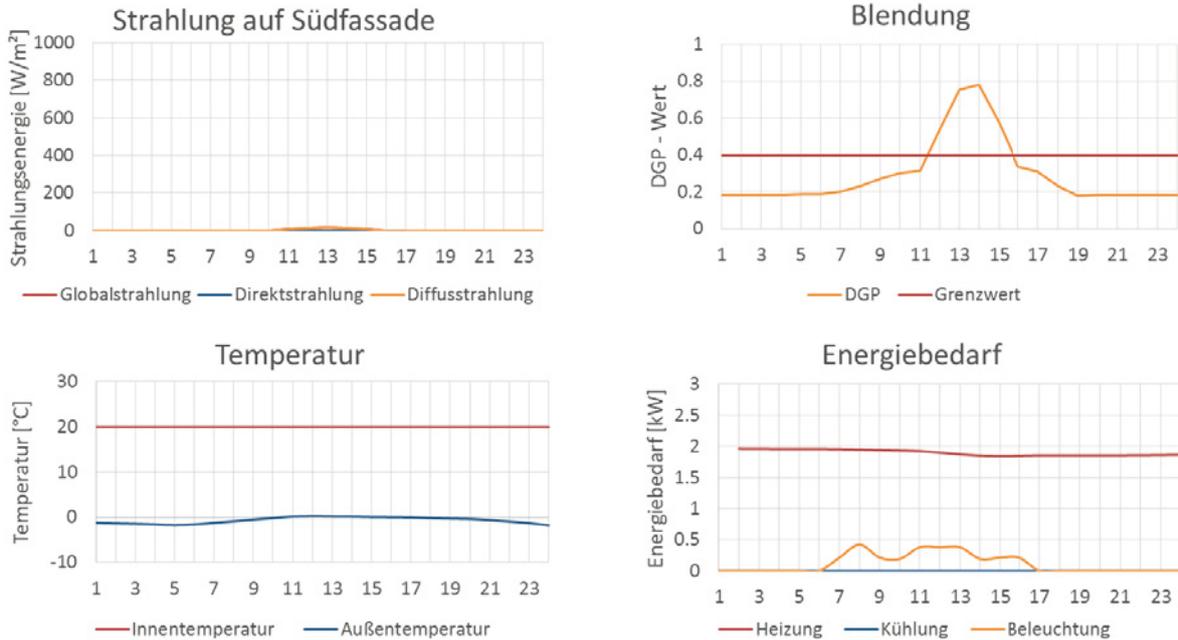


Abbildung 12-102: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem bewölkten Wintertag (31.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.1.1.11 Valencia | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag

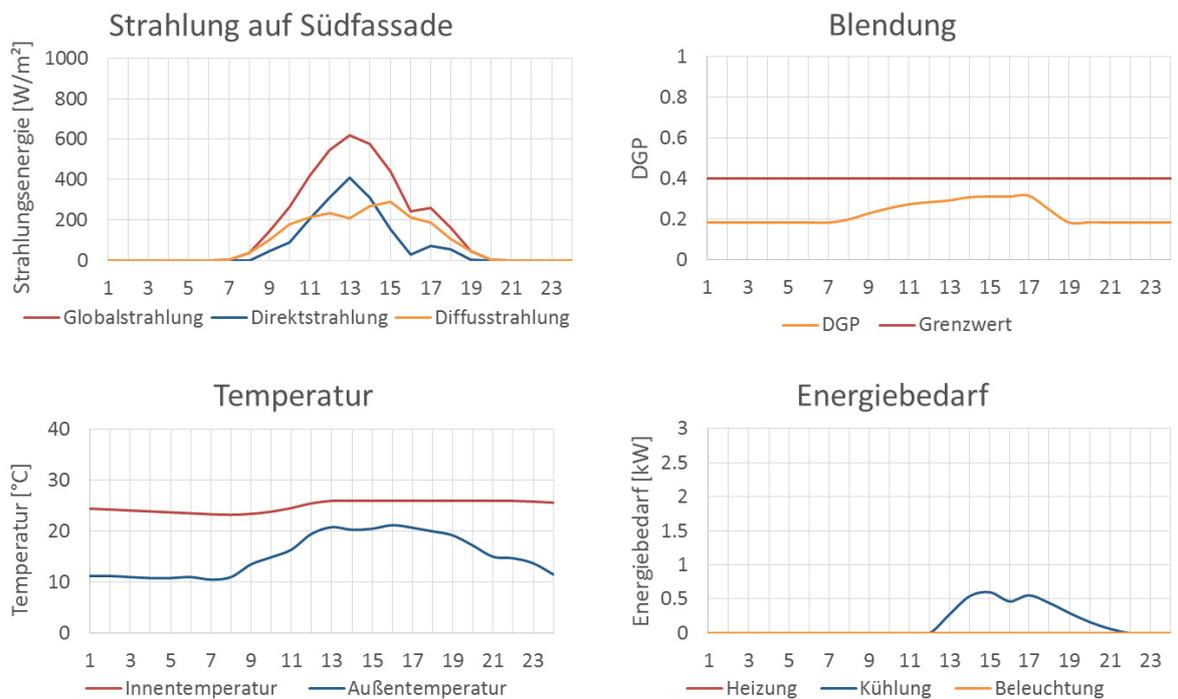


Abbildung 12-103: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wechselhaften Frühlingstag (05.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.1.1.12 Valencia | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

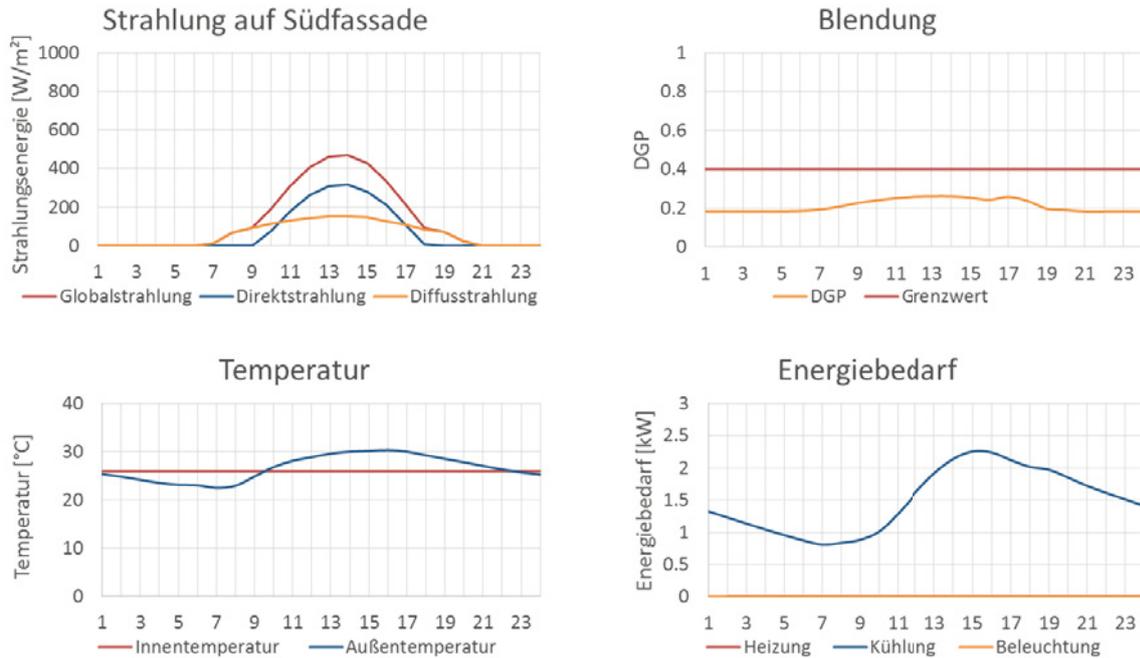


Abbildung 12-104: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.1.1.13 Valencia | Klassenraum | bewölkter Sommertag

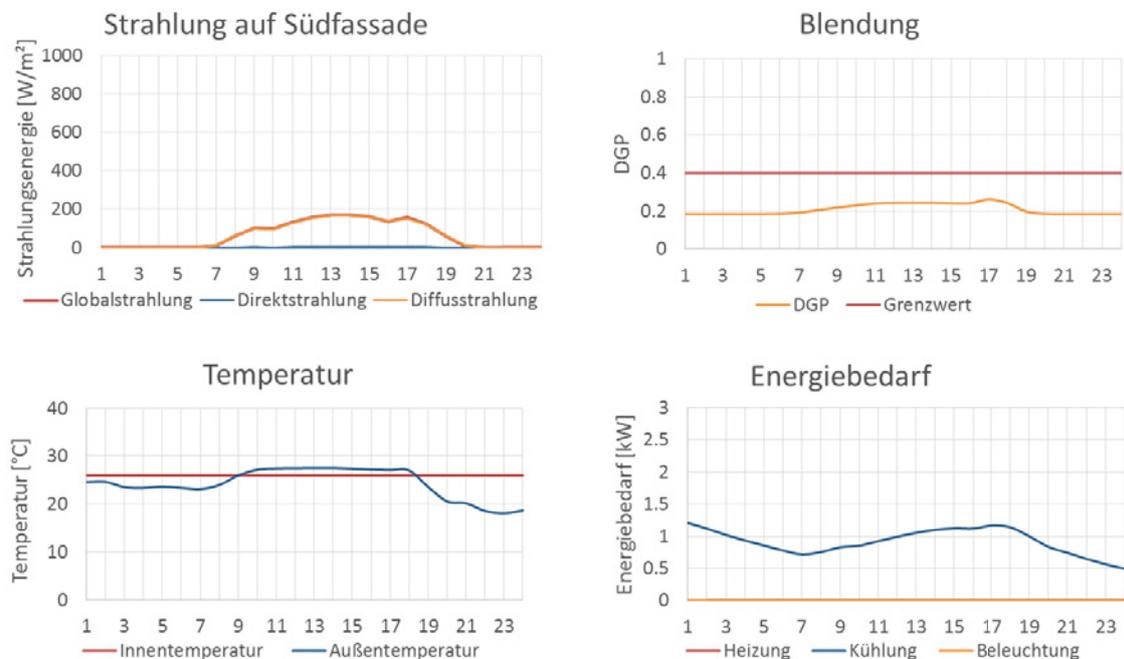


Abbildung 12-105: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem bewölkten Sommertag (10.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.1.1.14 Valencia | Klassenraum | wolkenloser Wintertag

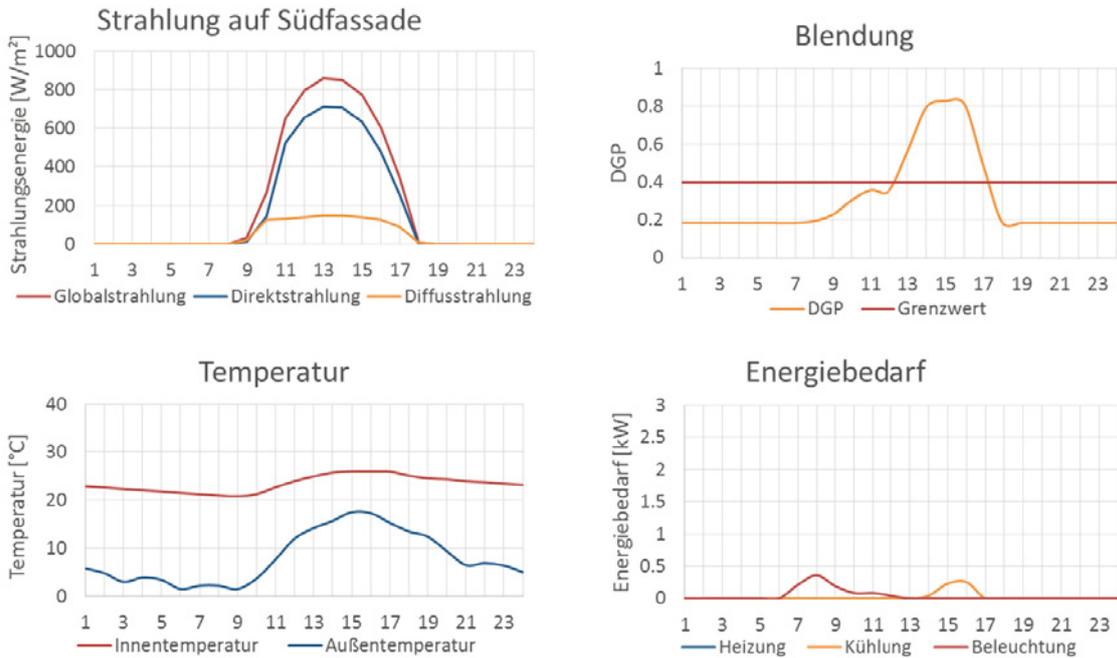


Abbildung 12-106: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Wintertag (07.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.1.1.15 Valencia | Klassenraum | bewölkter Wintertag

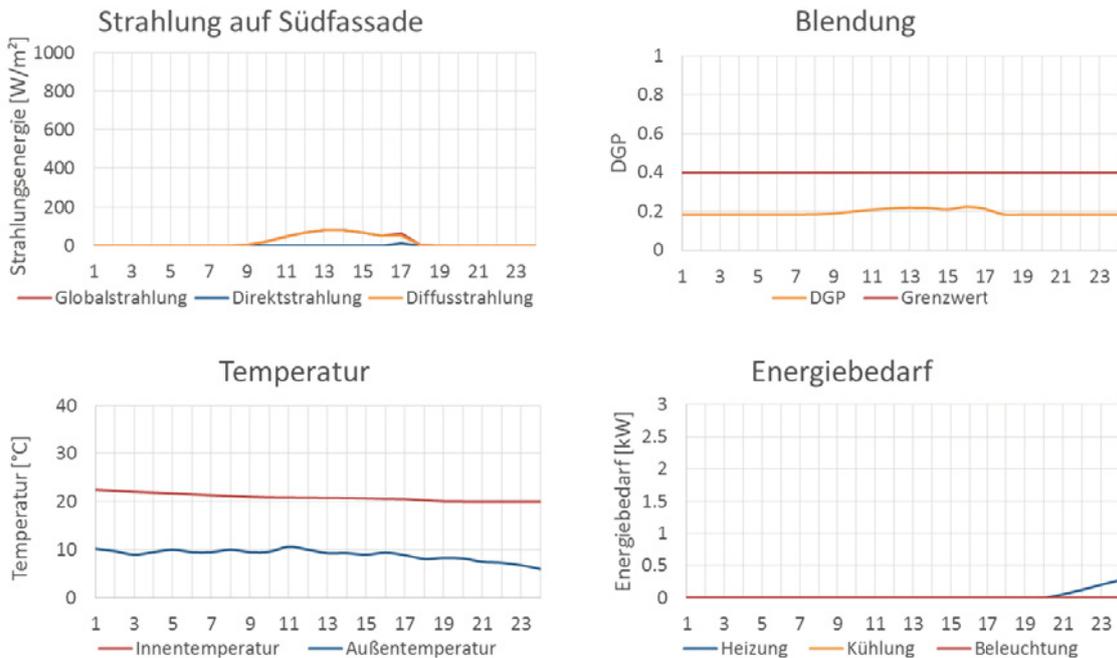


Abbildung 12-107: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem bewölkten Wintertag (29.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.1.1.16 Accra | Klassenraum | wolkenloser Tag

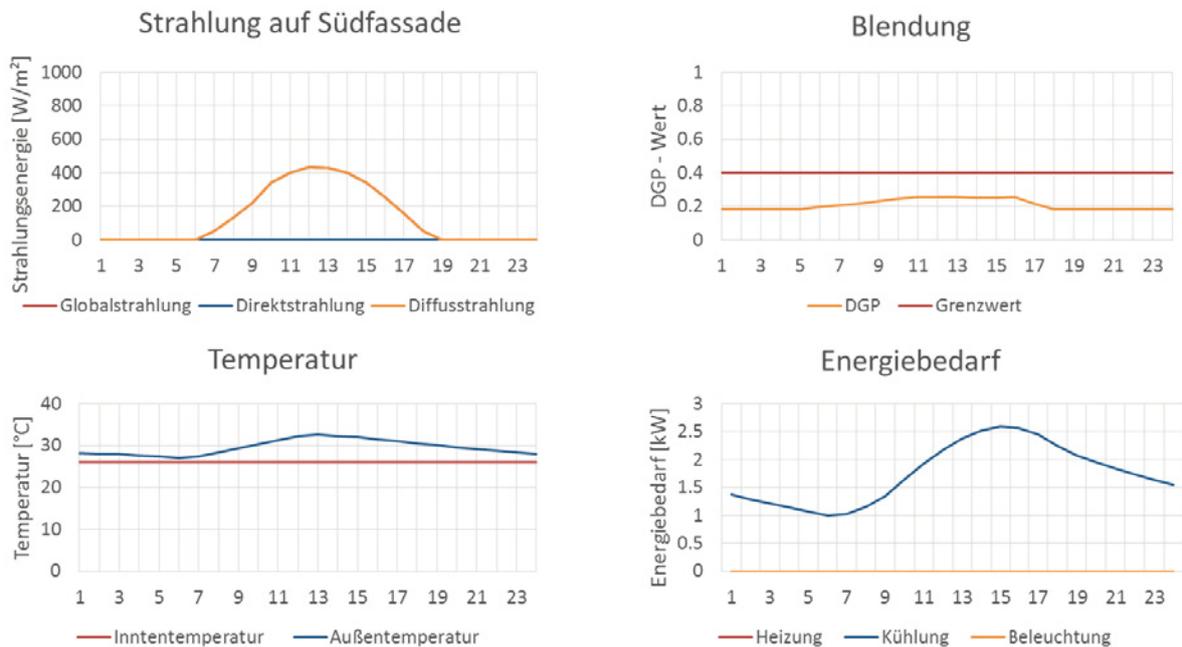


Abbildung 12-108: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.1.1.17 Accra | Klassenraum | bewölkter Tag

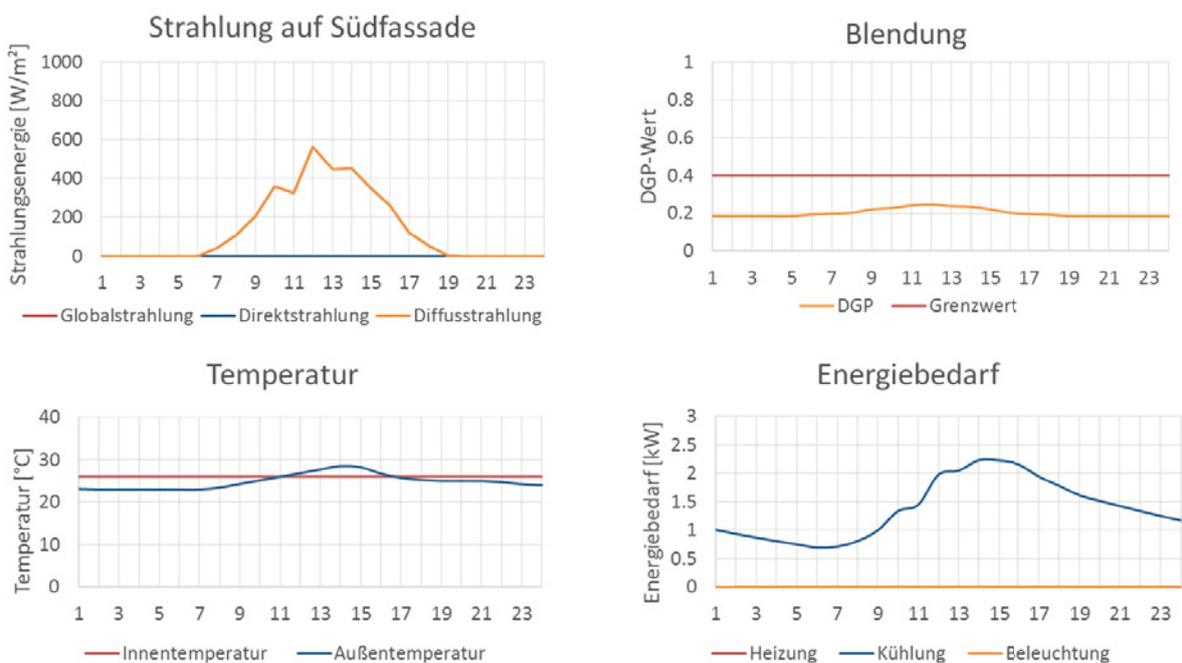


Abbildung 12-109: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Accra an einem bewölkten Tag (28.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.2 Referenzverglasung 2: OKATHERM Funktions-Isolierglas

12.4.2.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen

12.4.2.1.1 Stuttgart | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag

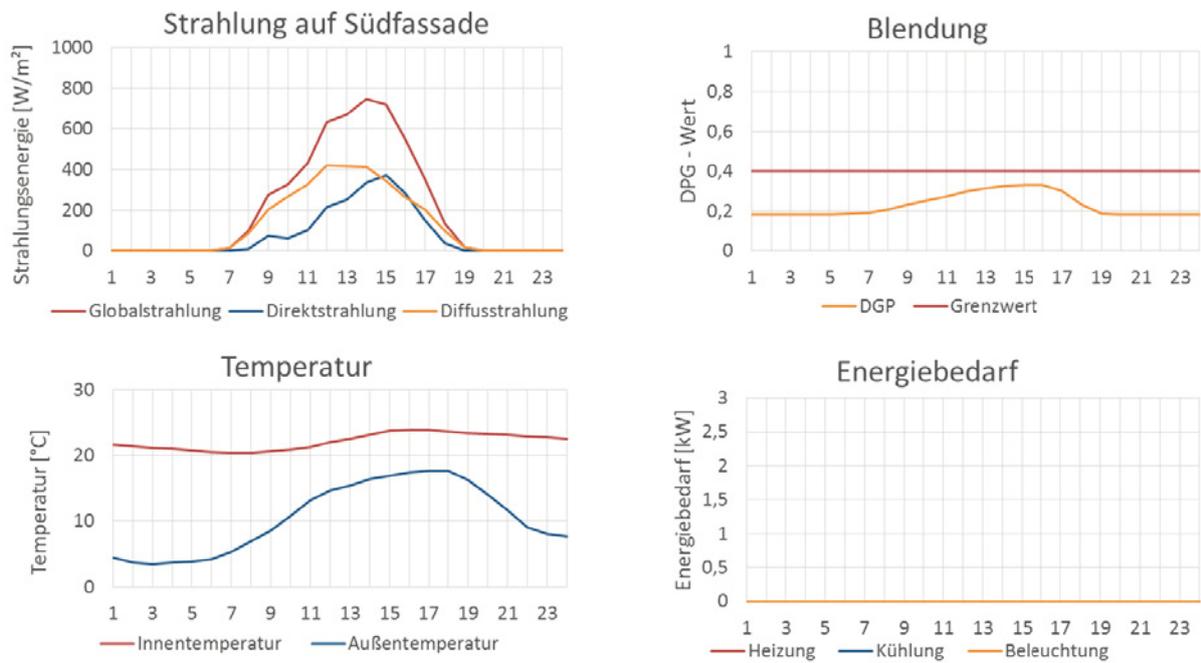


Abbildung 12-110: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.2.1.2 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

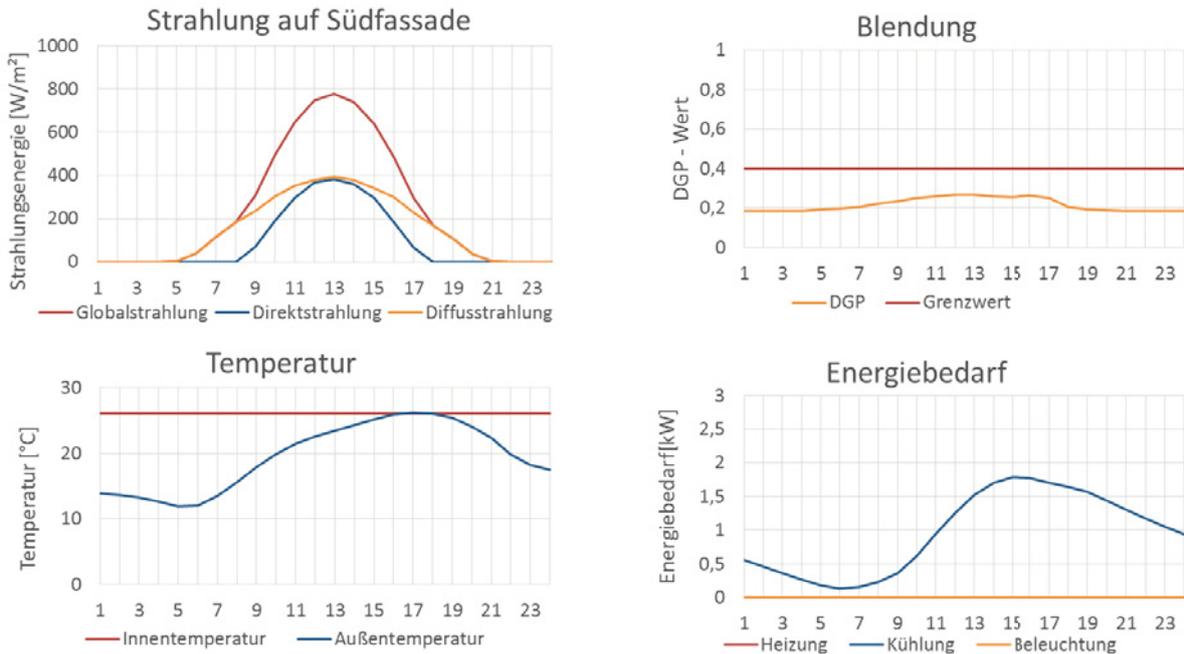


Abbildung 12-111: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.2.1.3 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Sommertag

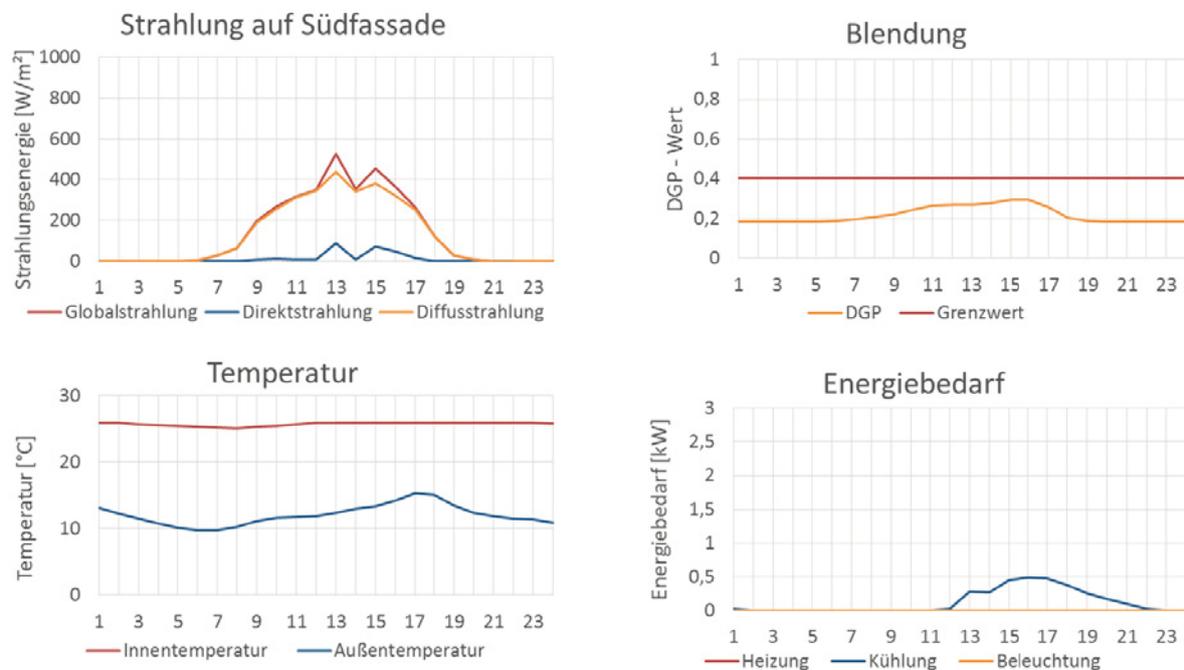


Abbildung 12-112: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.2.1.4 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Wintertag

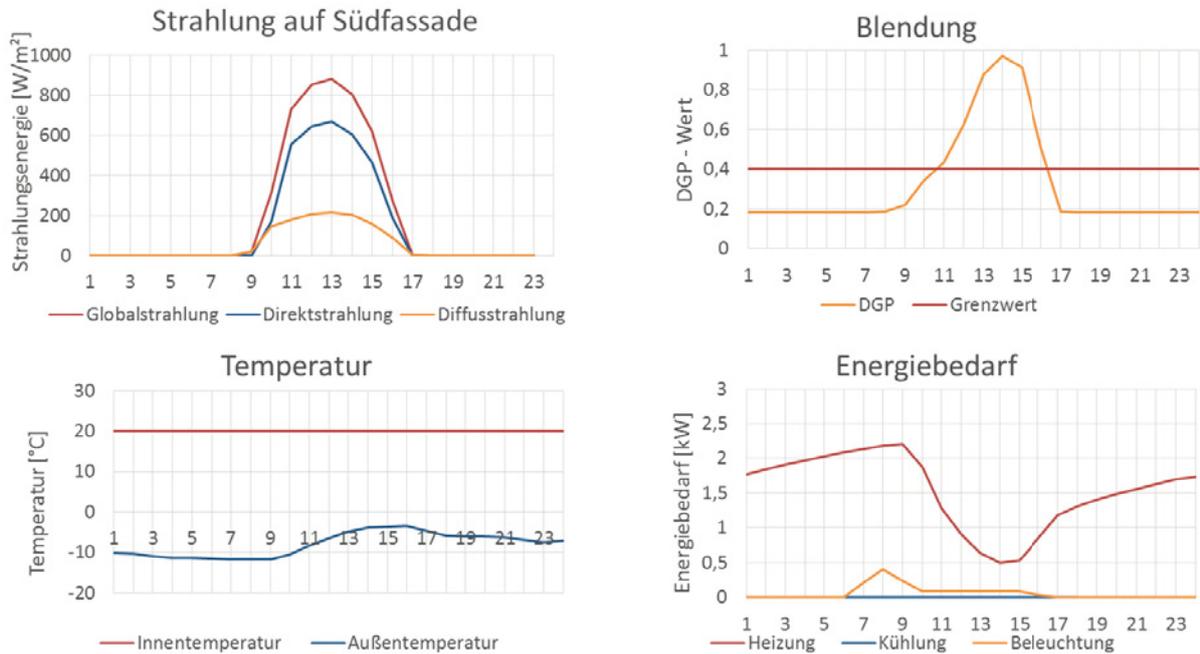


Abbildung 12-113: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.2.1.5 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Wintertag

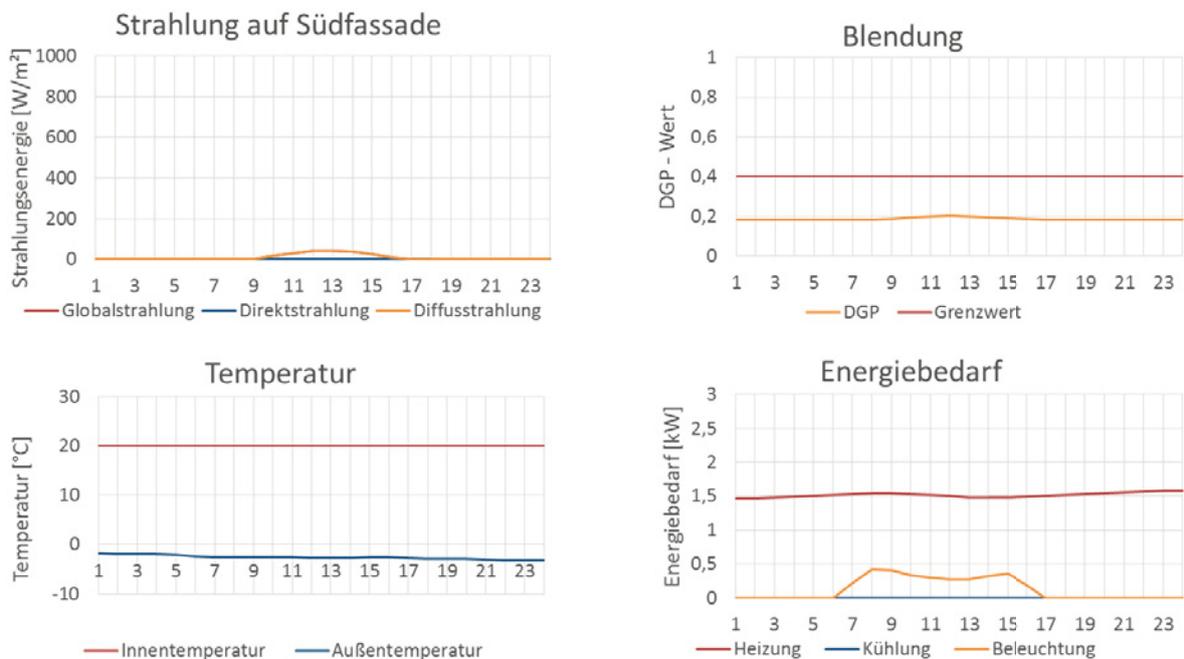


Abbildung 12-114: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.2.1.6 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

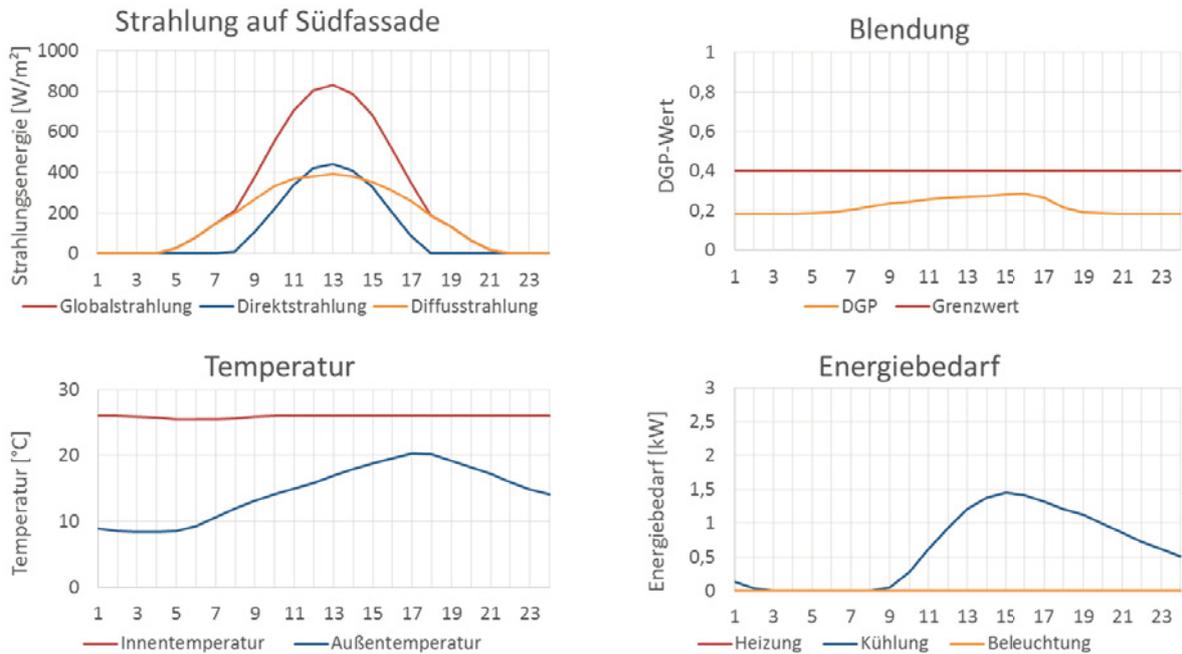


Abbildung 12-115: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.2.1.7 Valencia | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

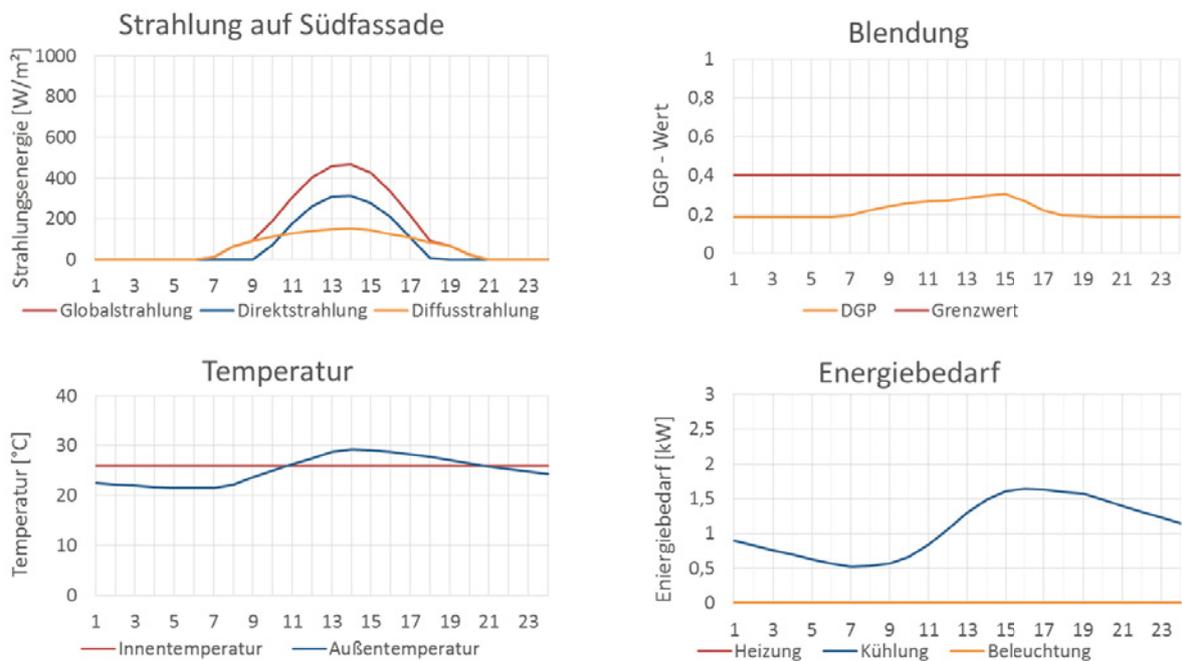


Abbildung 12-116: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.2.1.8 Accra | Klassenraum | wolkenloser Tag

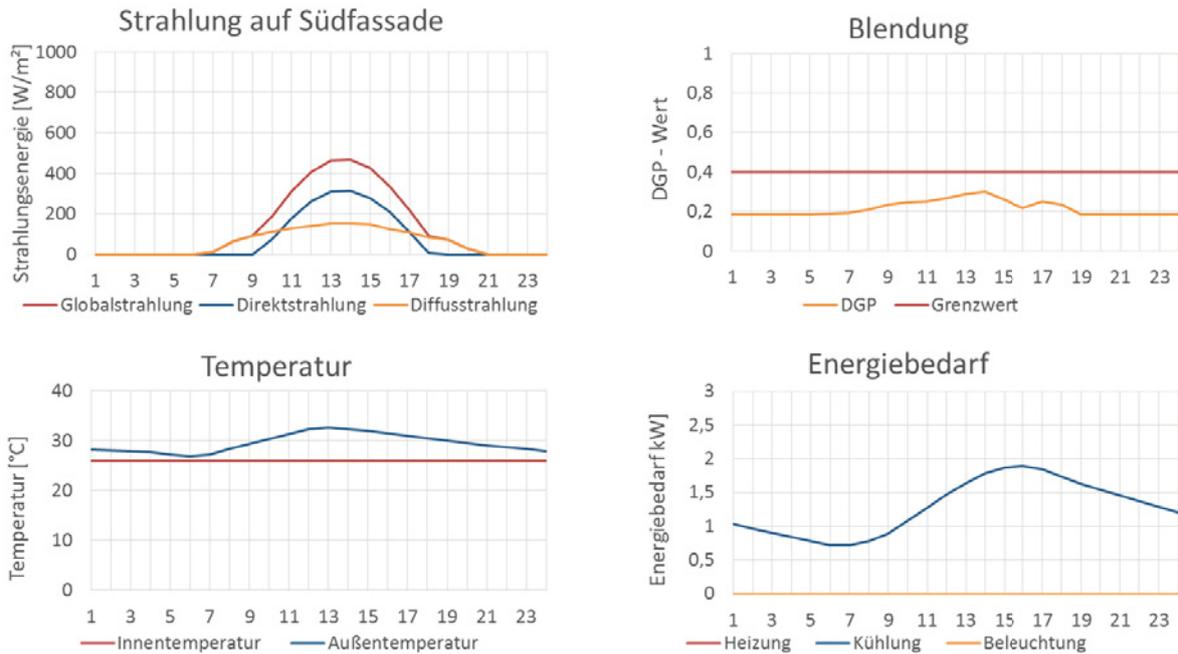


Abbildung 12-117: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Accra an einem sonnigen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.

12.4.2.1.9 Accra | Klassenraum | bewölkter Tag

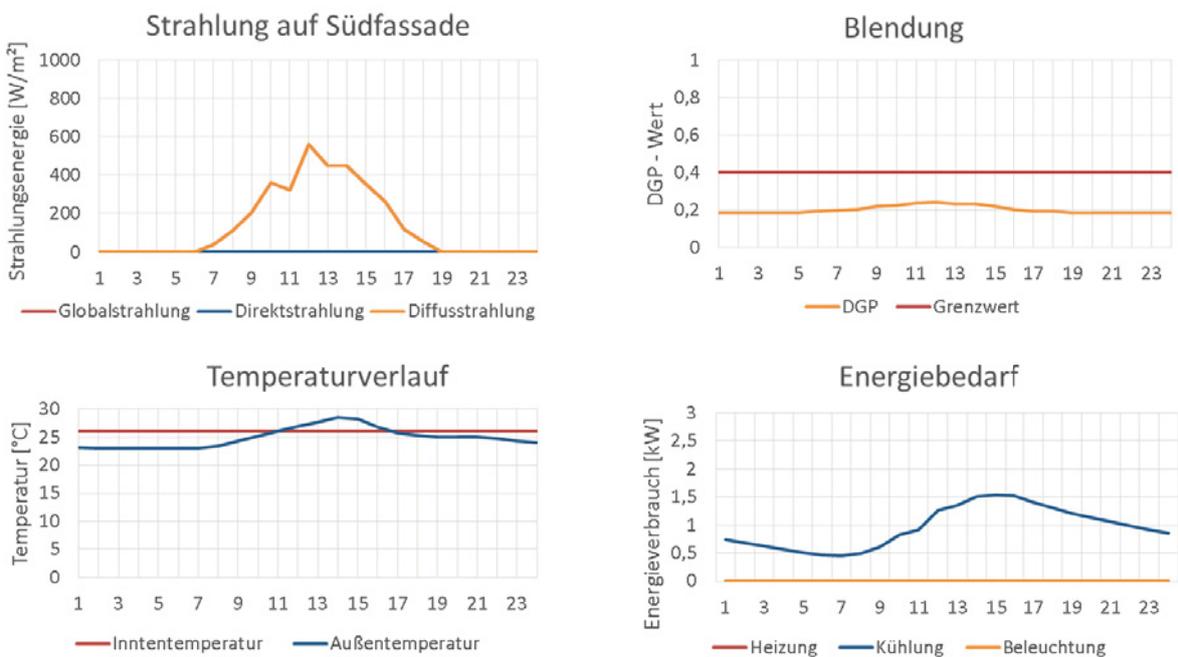


Abbildung 12-118: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Accra an einem bewölkten Tag (28.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3 Referenzverglasung 3: Zweifachwärmeschutzverglasung mit außenliegender Jalousie

12.4.3.1 Tagesanalysen auf der Basis von numerischen Simulationen

12.4.3.1.1 Stuttgart | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag

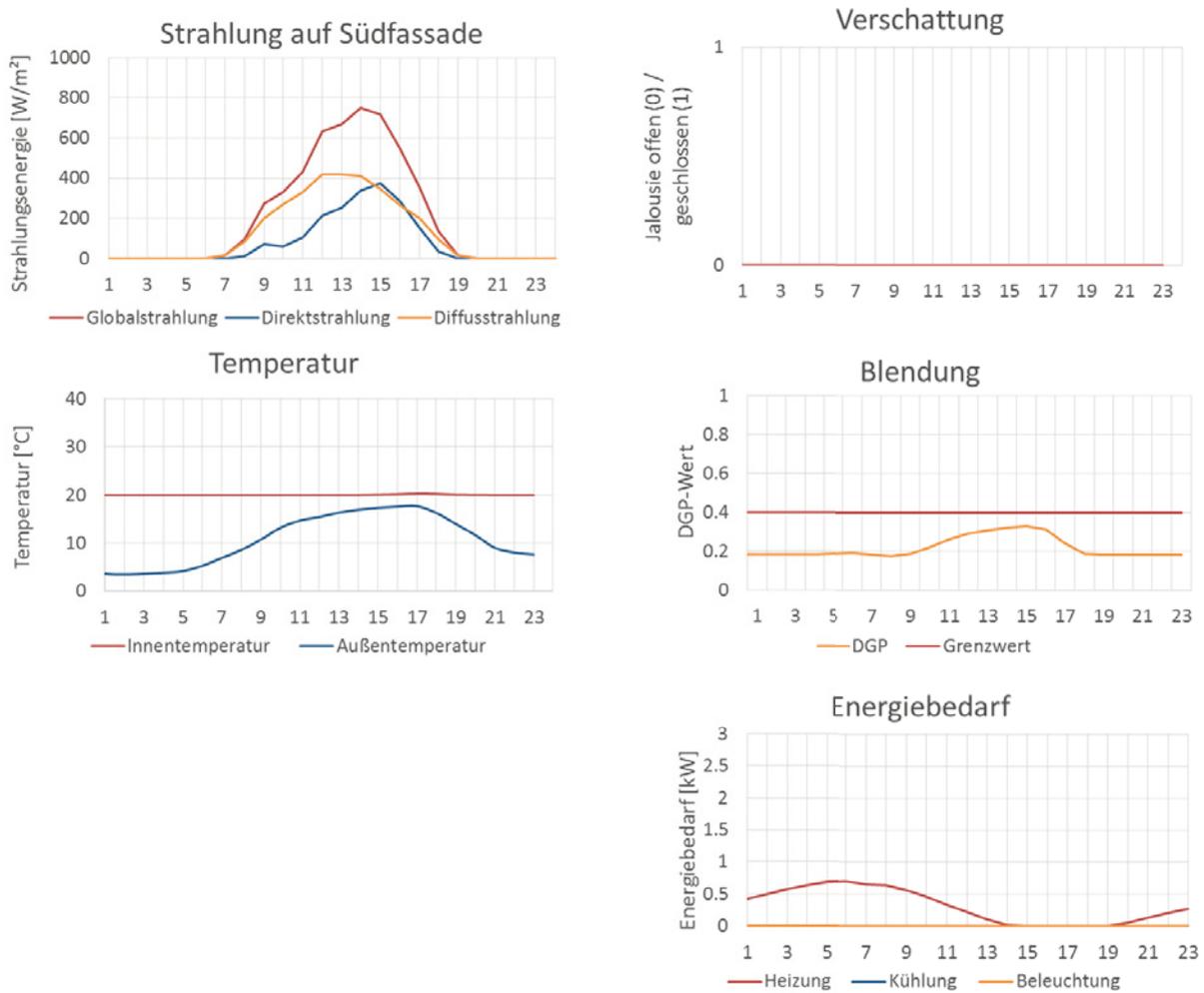


Abbildung 12-119: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.2 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

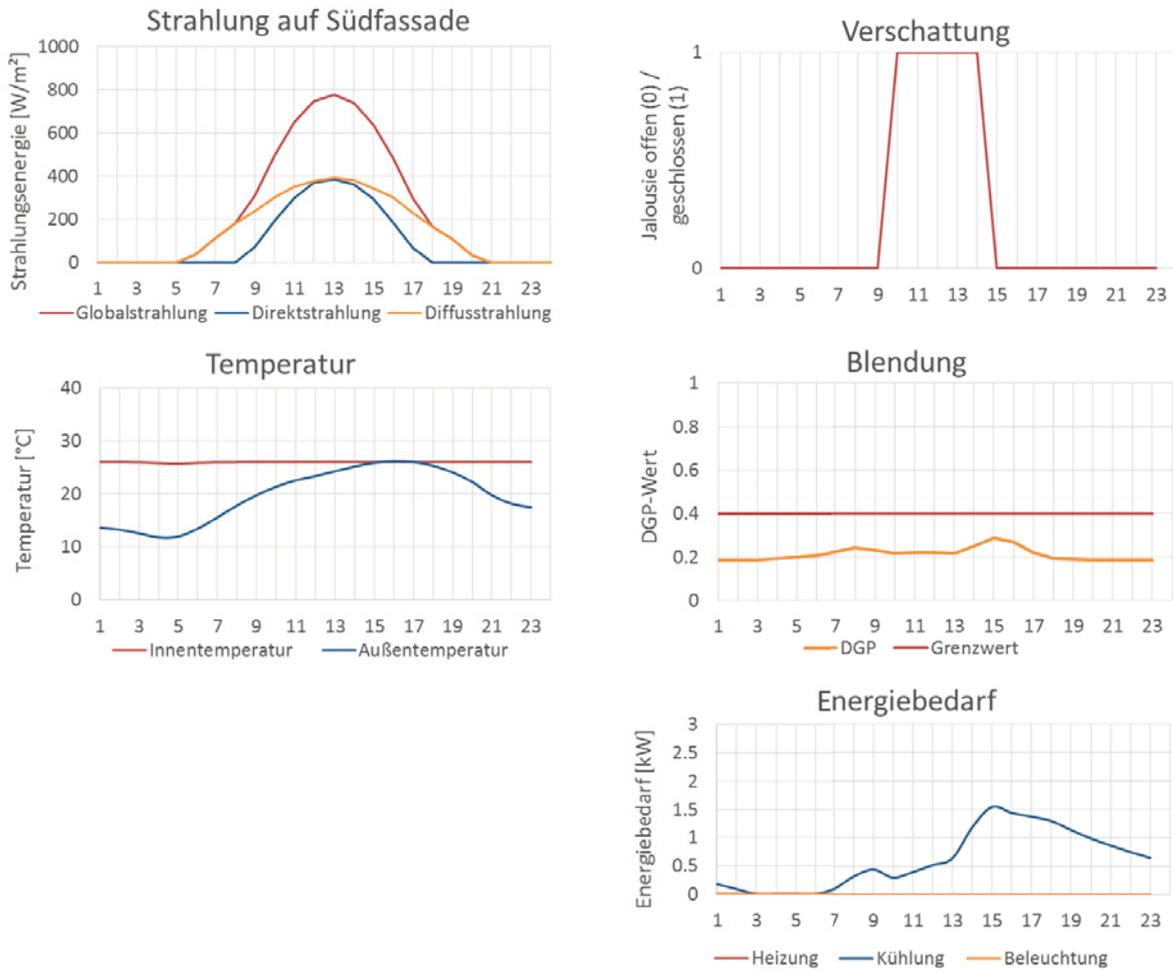


Abbildung 12-120: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.3 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Sommertag

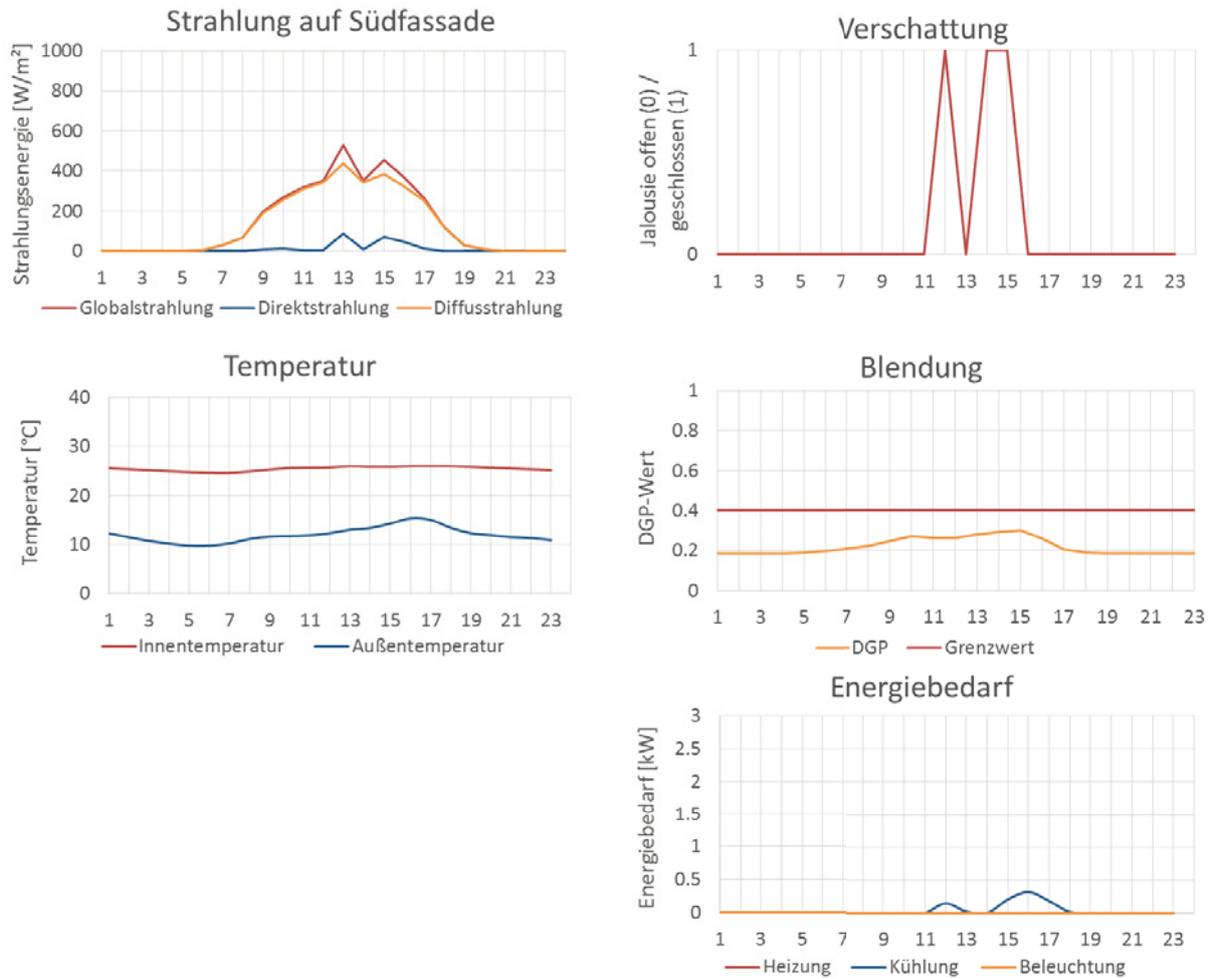


Abbildung 12-121: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.4 Stuttgart | Klassenraum | wolkenloser Wintertag

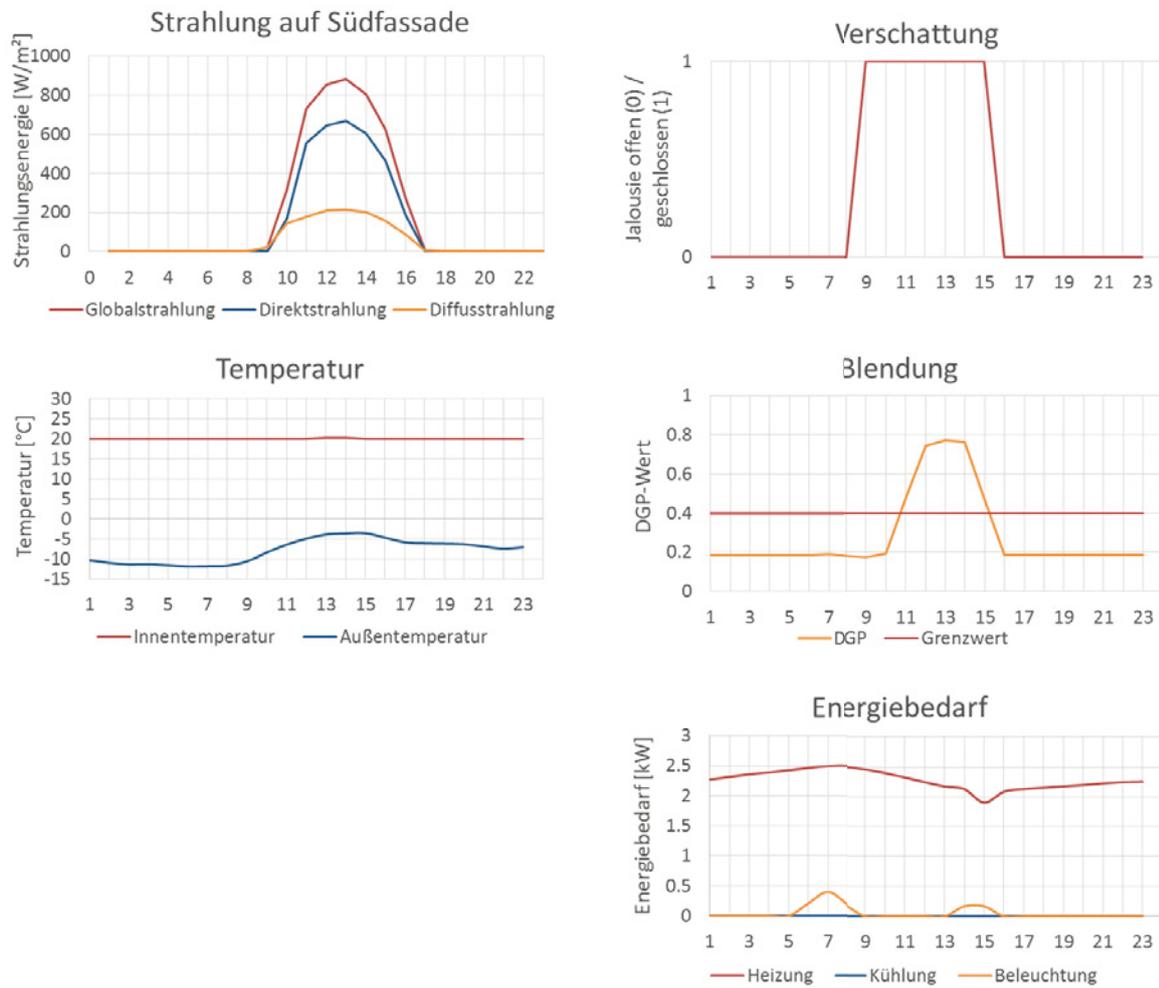


Abbildung 12-122: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.5 Stuttgart | Klassenraum | bewölkter Wintertag

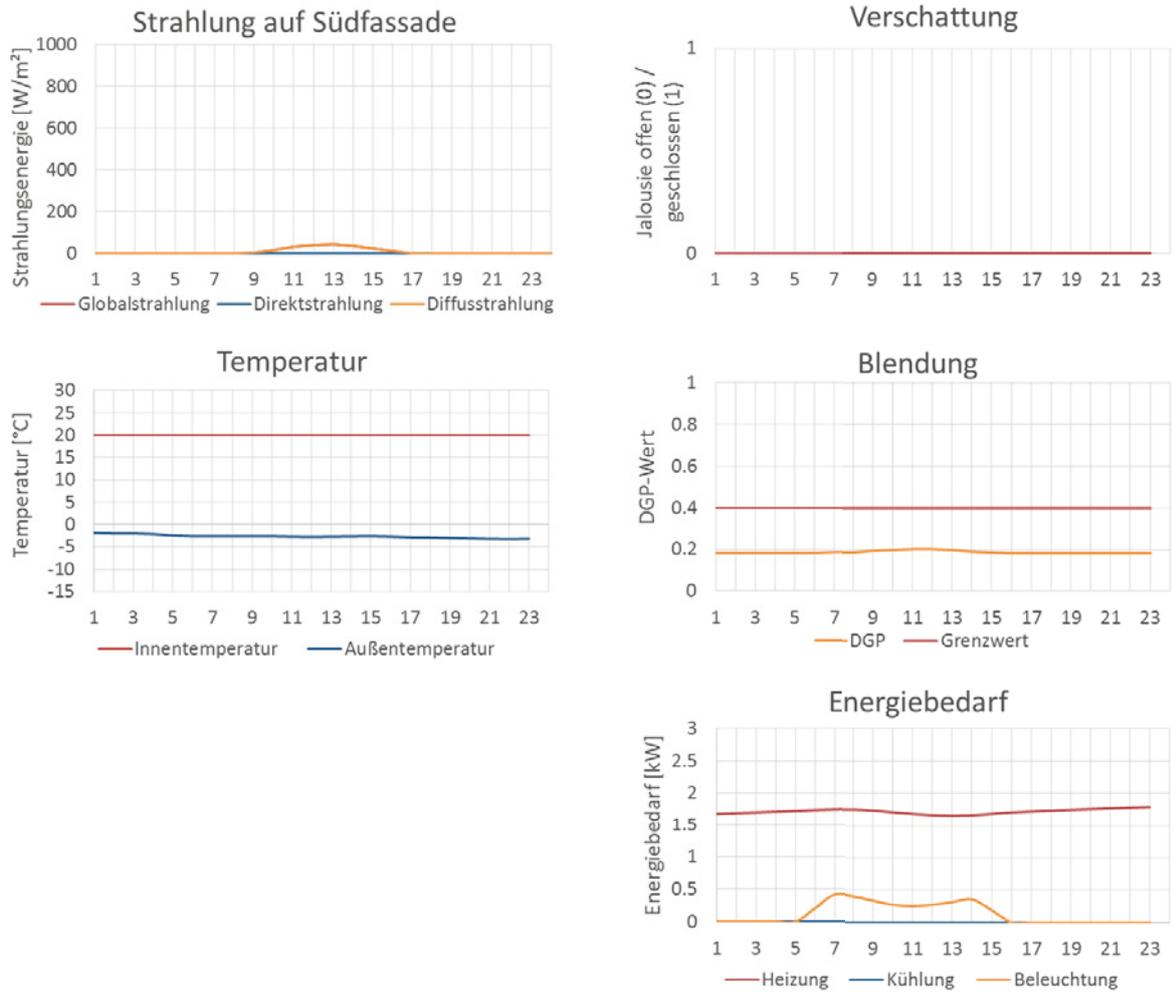


Abbildung 12-123: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.6 Helsinki | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag

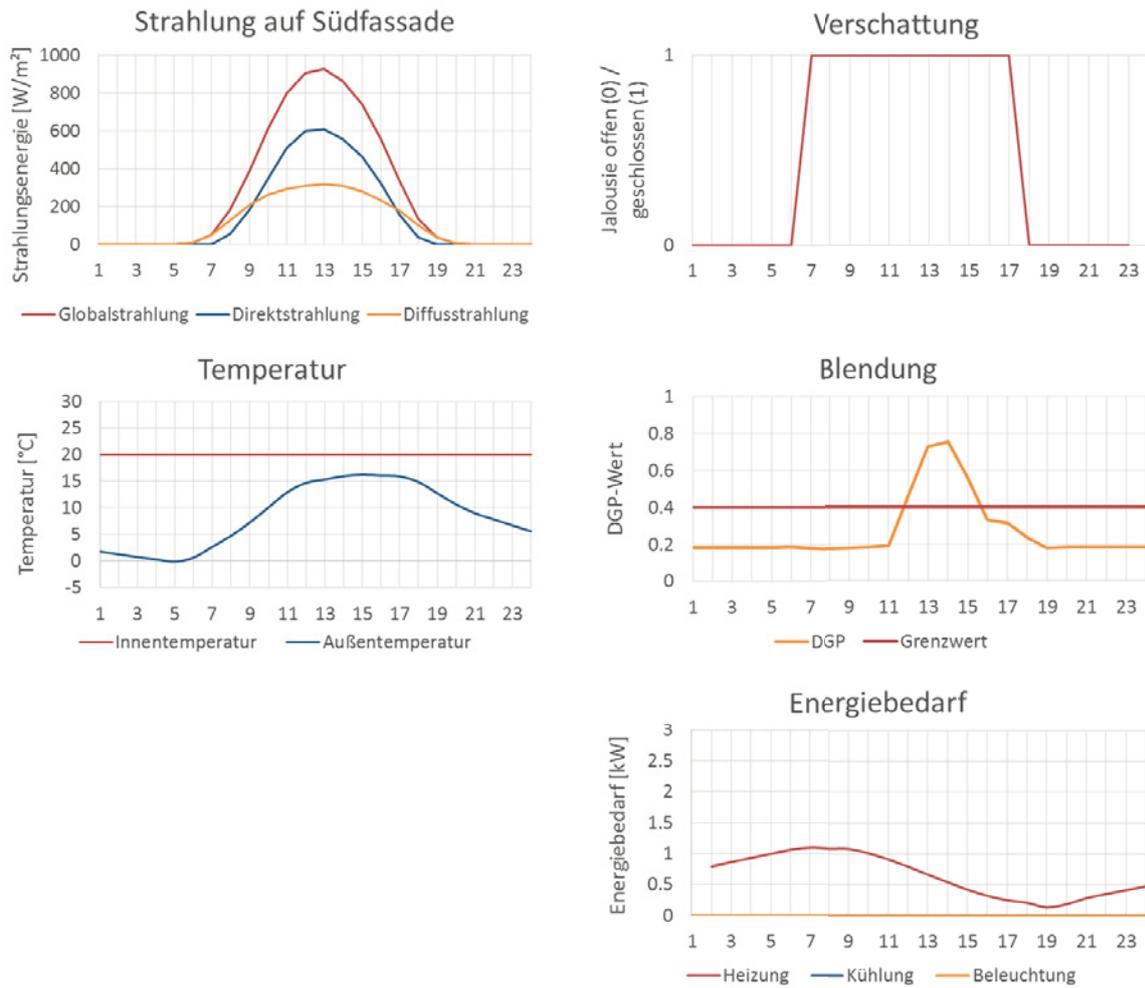


Abbildung 12-124: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wechselhaften Frühlingstag (13.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.7 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

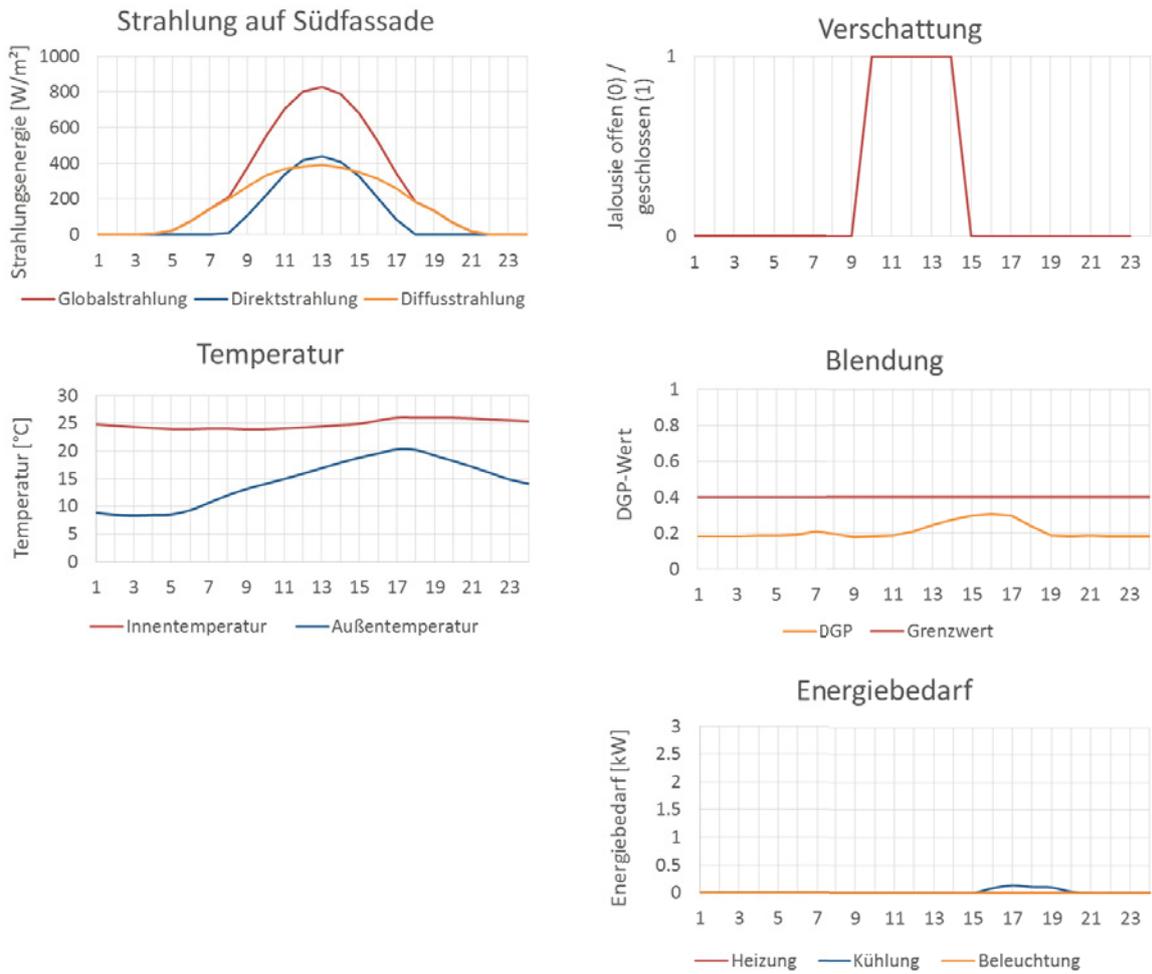


Abbildung 12-125: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.8 Helsinki | Klassenraum | bewölkter Sommertag

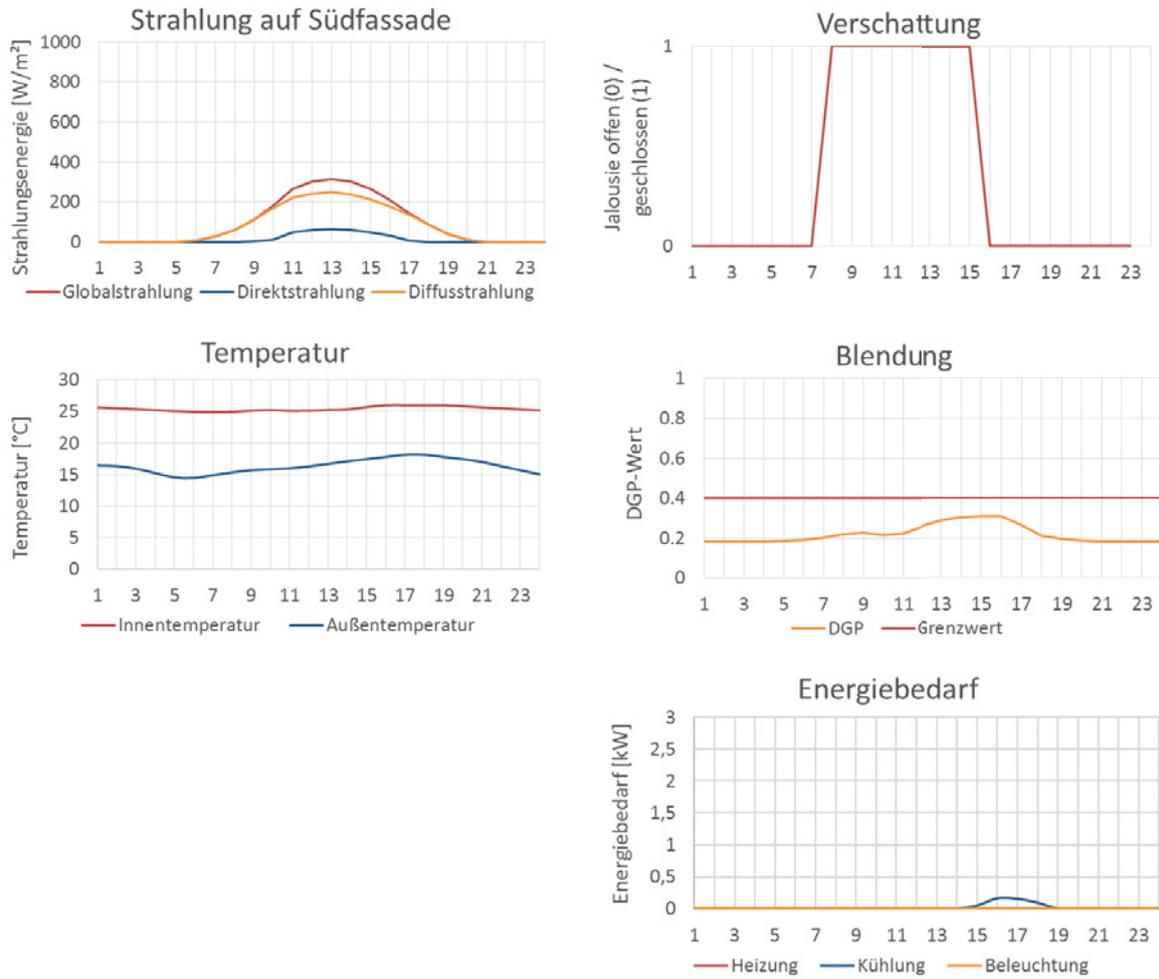


Abbildung 12-126: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem bewölkten Sommertag (07.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.9 Helsinki | Klassenraum | wolkenloser Wintertag

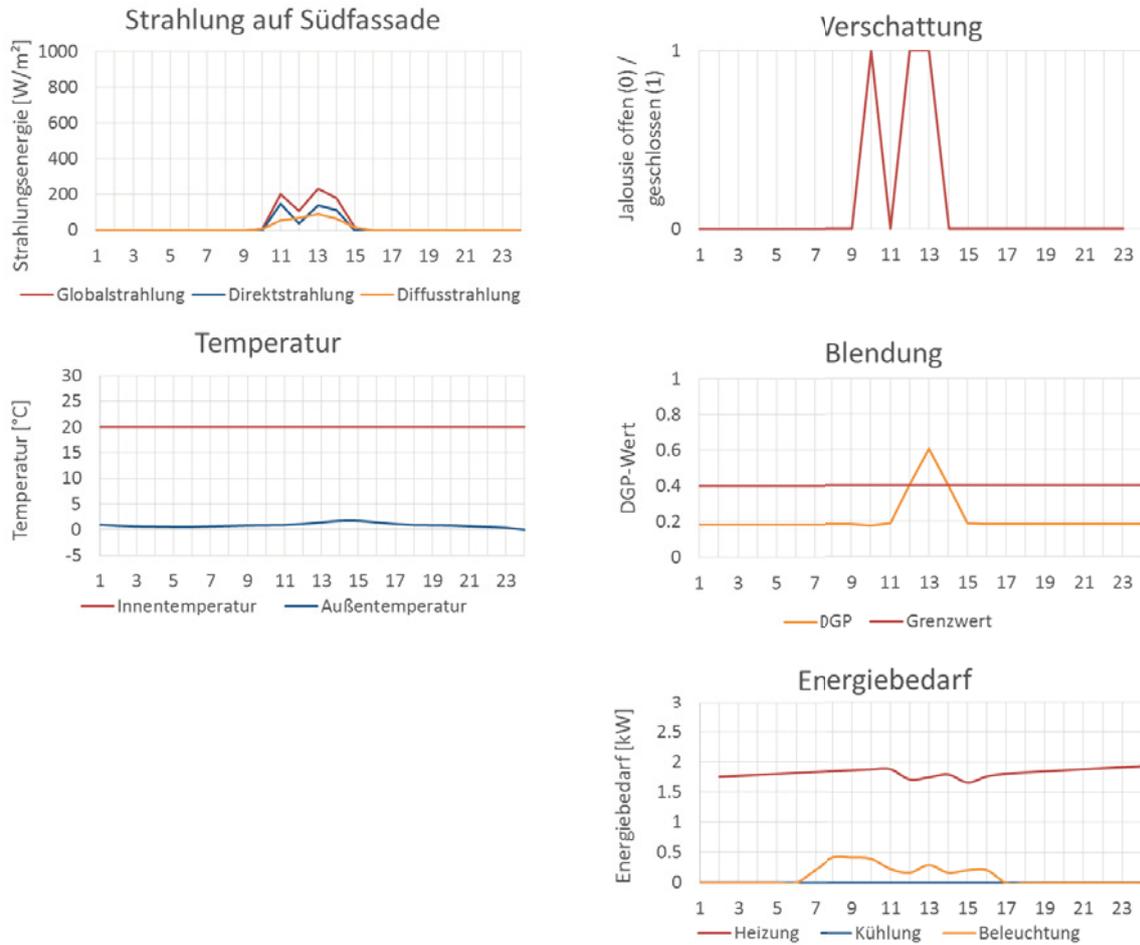


Abbildung 12-127: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Wintertag (06.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.10 Helsinki | Klassenraum | bewölkter Wintertag

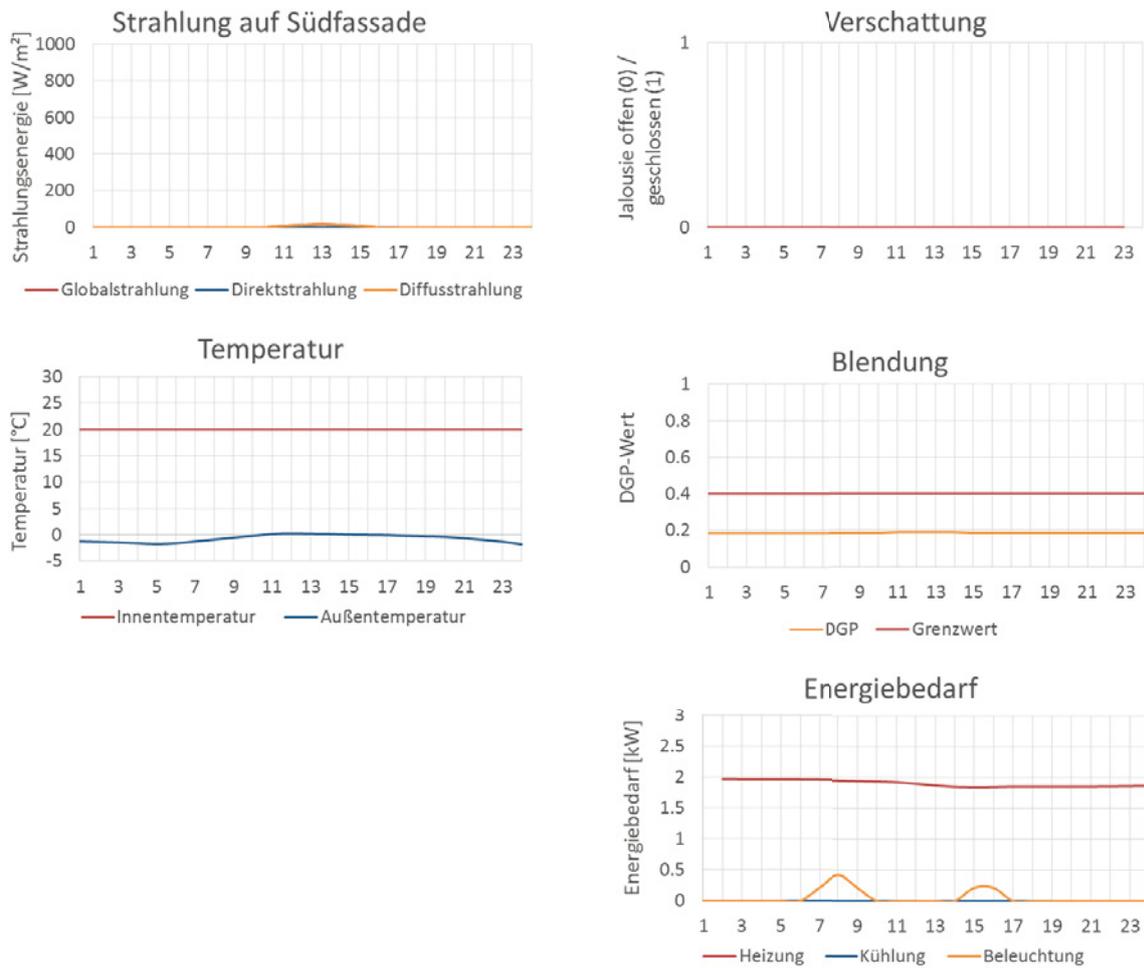


Abbildung 12-128: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem bewölkten Wintertag (31.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.11 Valencia | Klassenraum | wechselhafter Frühlingstag

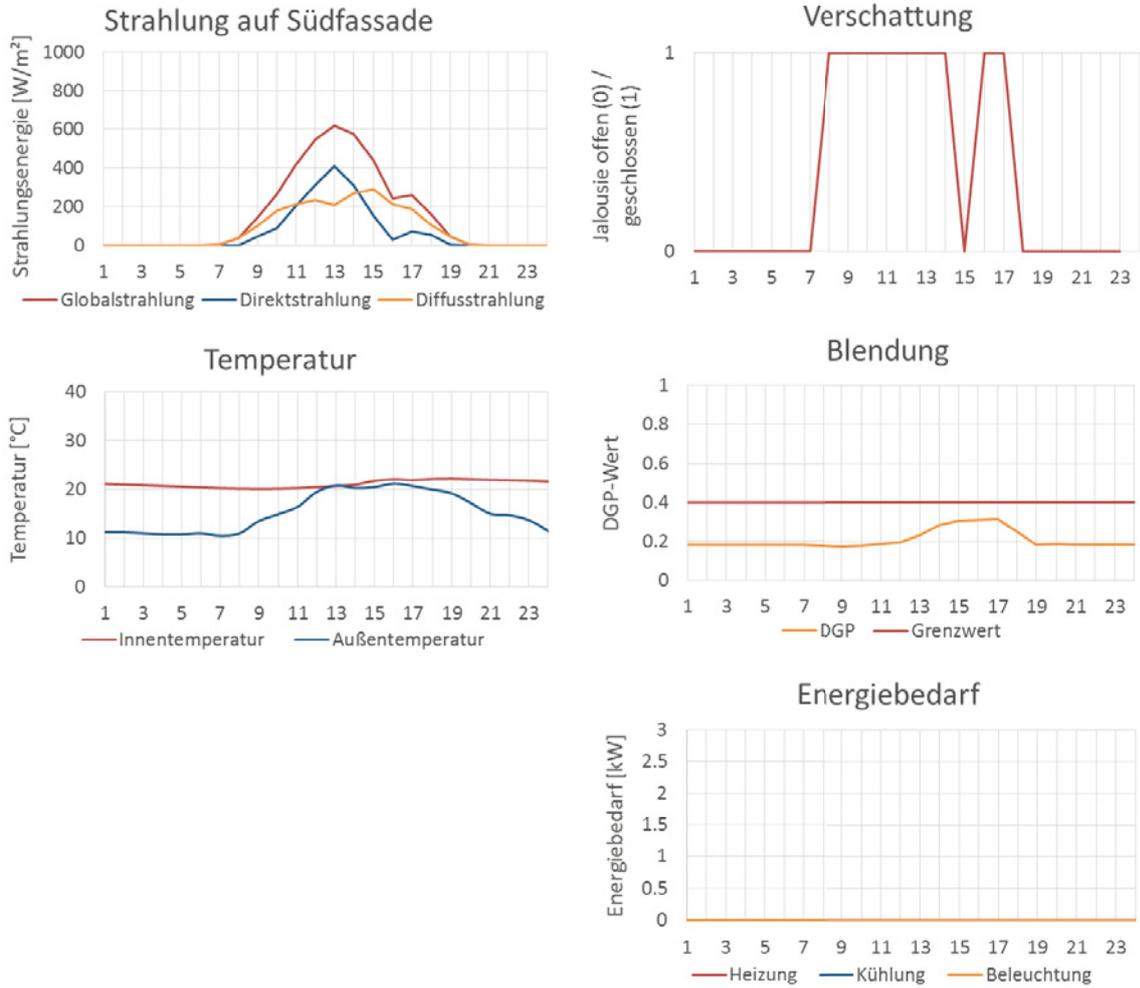


Abbildung 12-129: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wechselhaften Frühlingstag (05.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.12 Valencia | Klassenraum | wolkenloser Sommertag

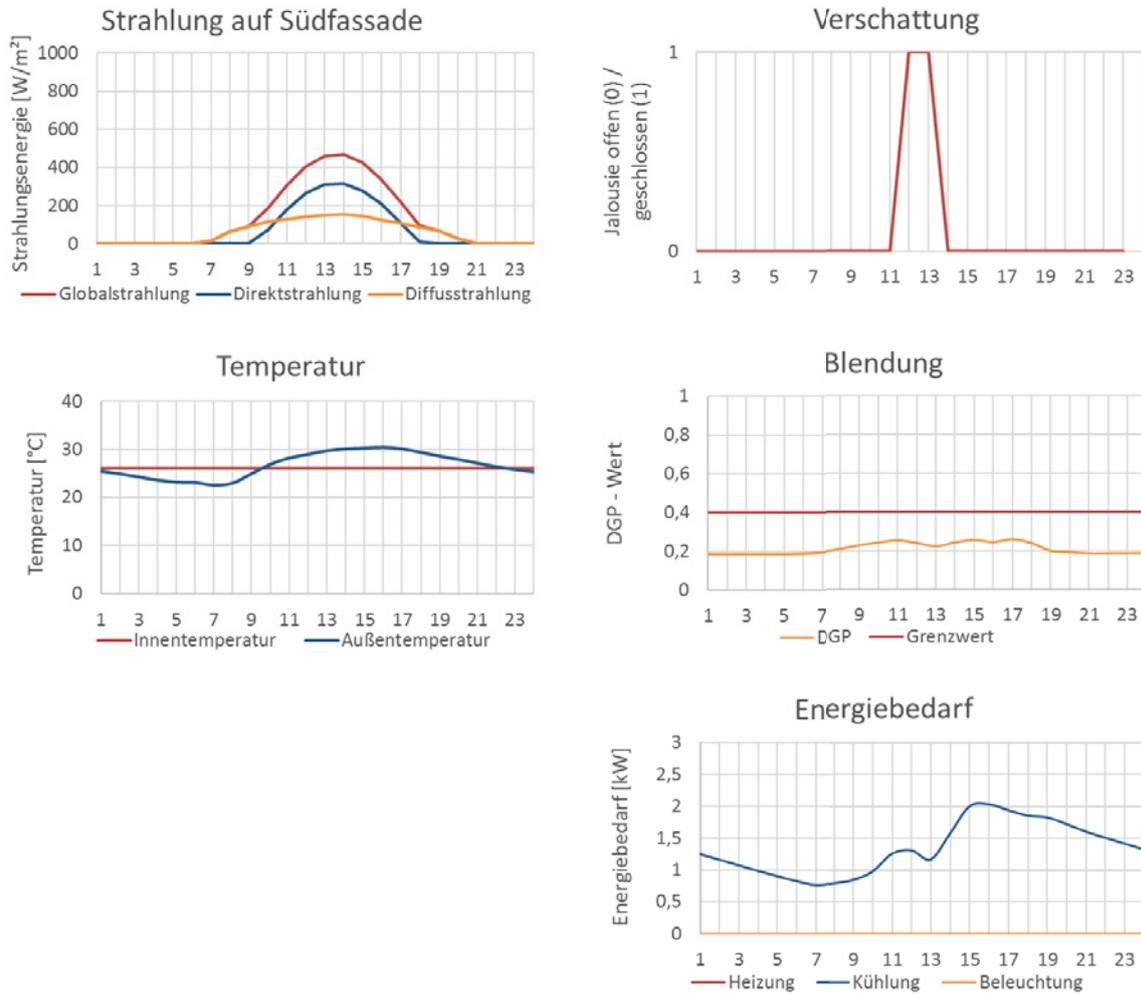


Abbildung 12-130: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.13 Valencia | Klassenraum | bewölkter Sommertag

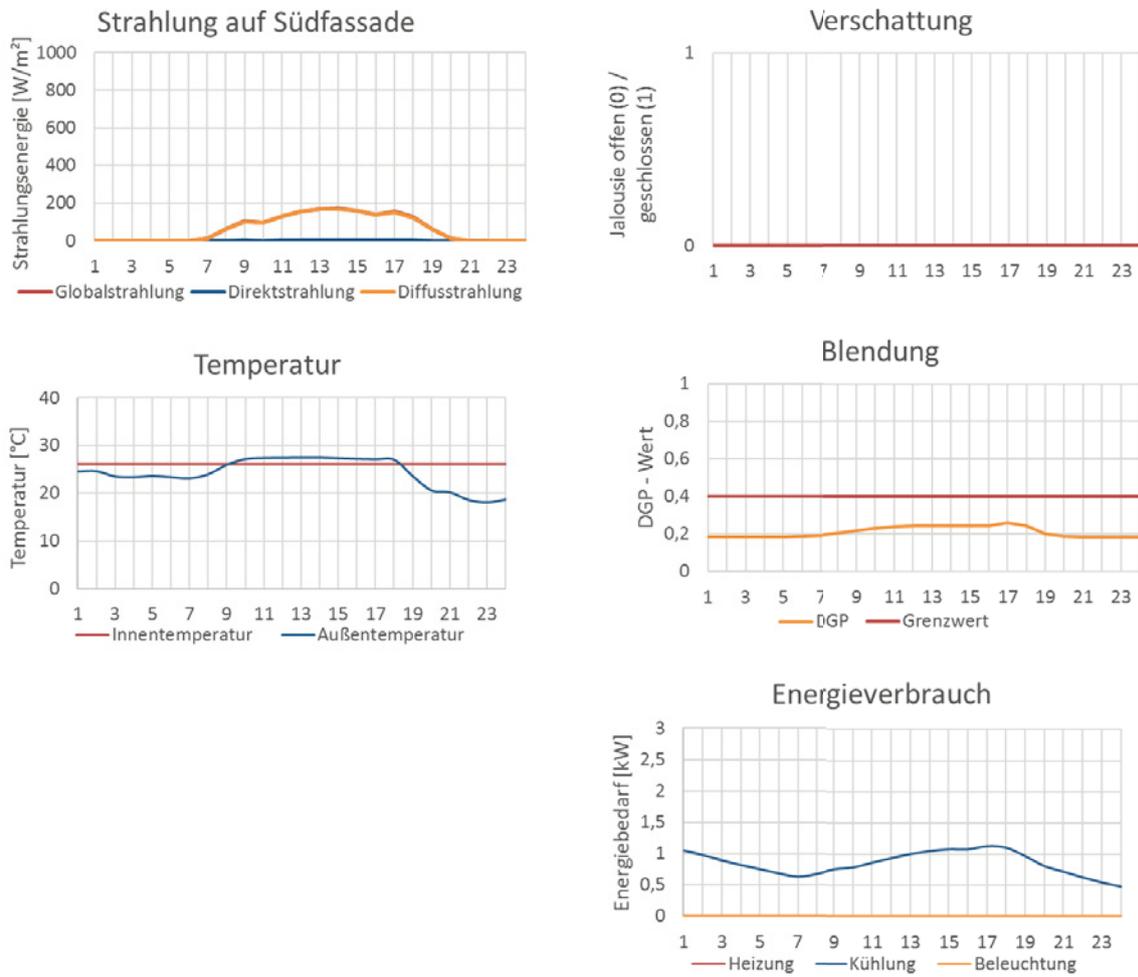


Abbildung 12-131: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem bewölkten Sommertag (10.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.14 Valencia | Klassenraum | wolkenloser Wintertag

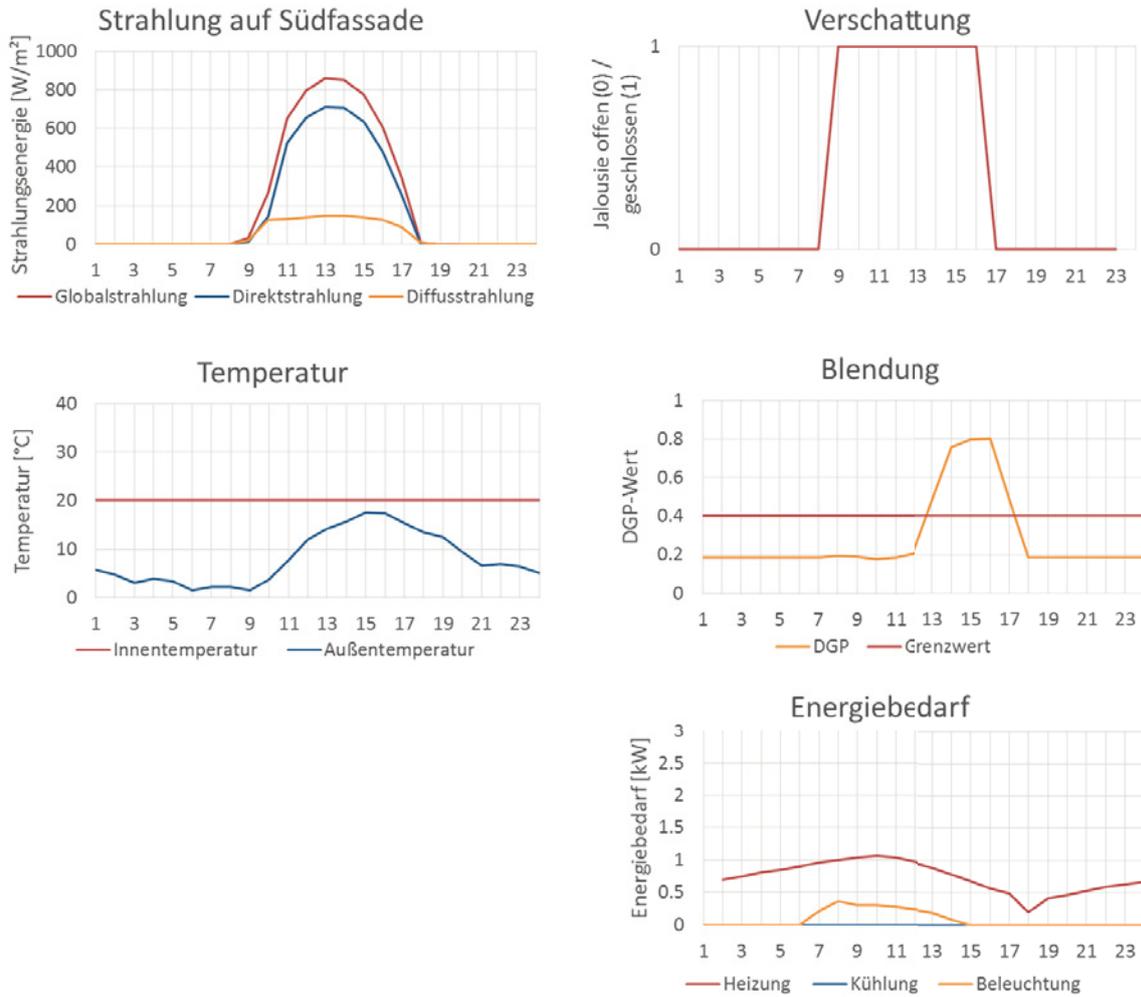


Abbildung 12-132: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Wintertag (07.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.15 Valencia | Klassenraum | bewölkter Wintertag

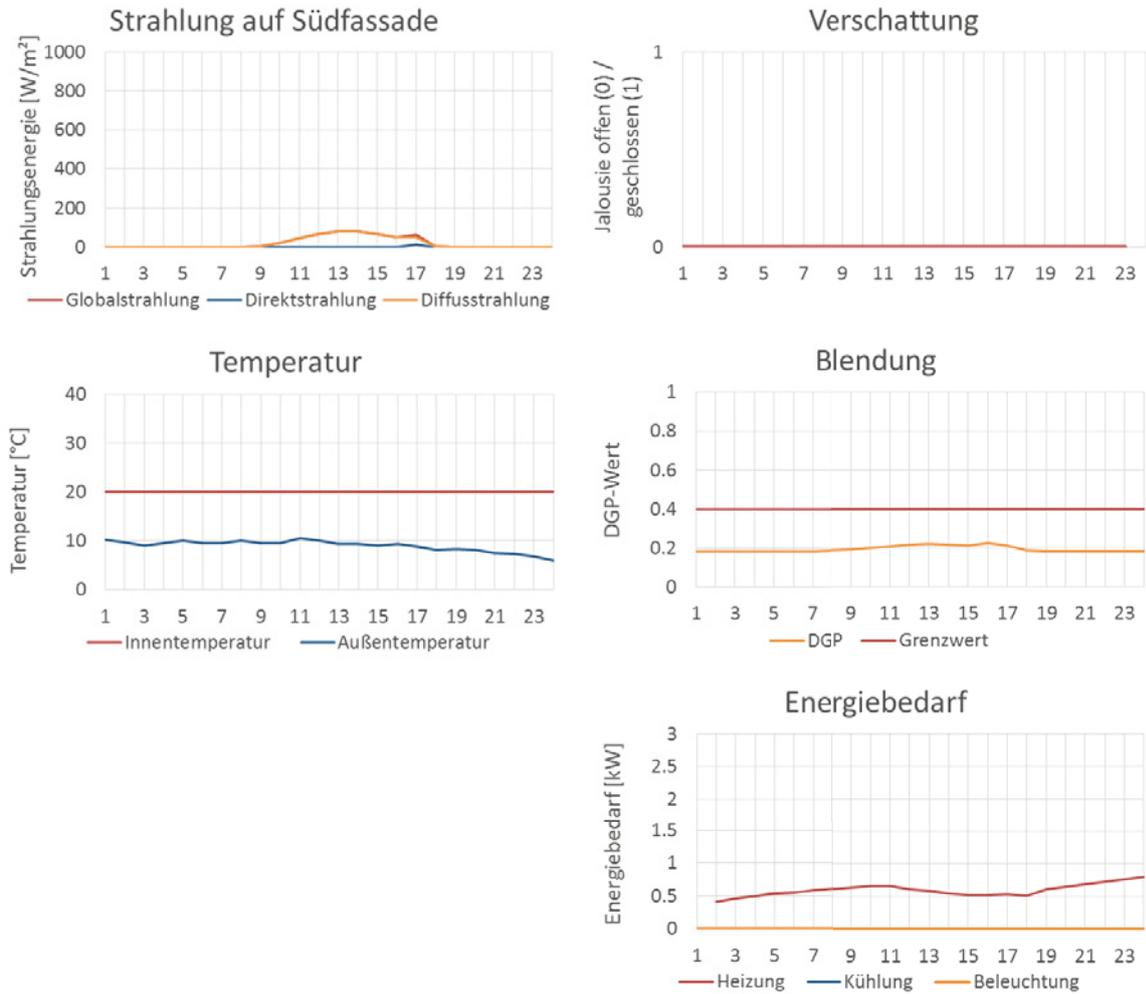


Abbildung 12-133: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem bewölkten Wintertag (29.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.16 Accra | Klassenraum | wolkenloser Tag

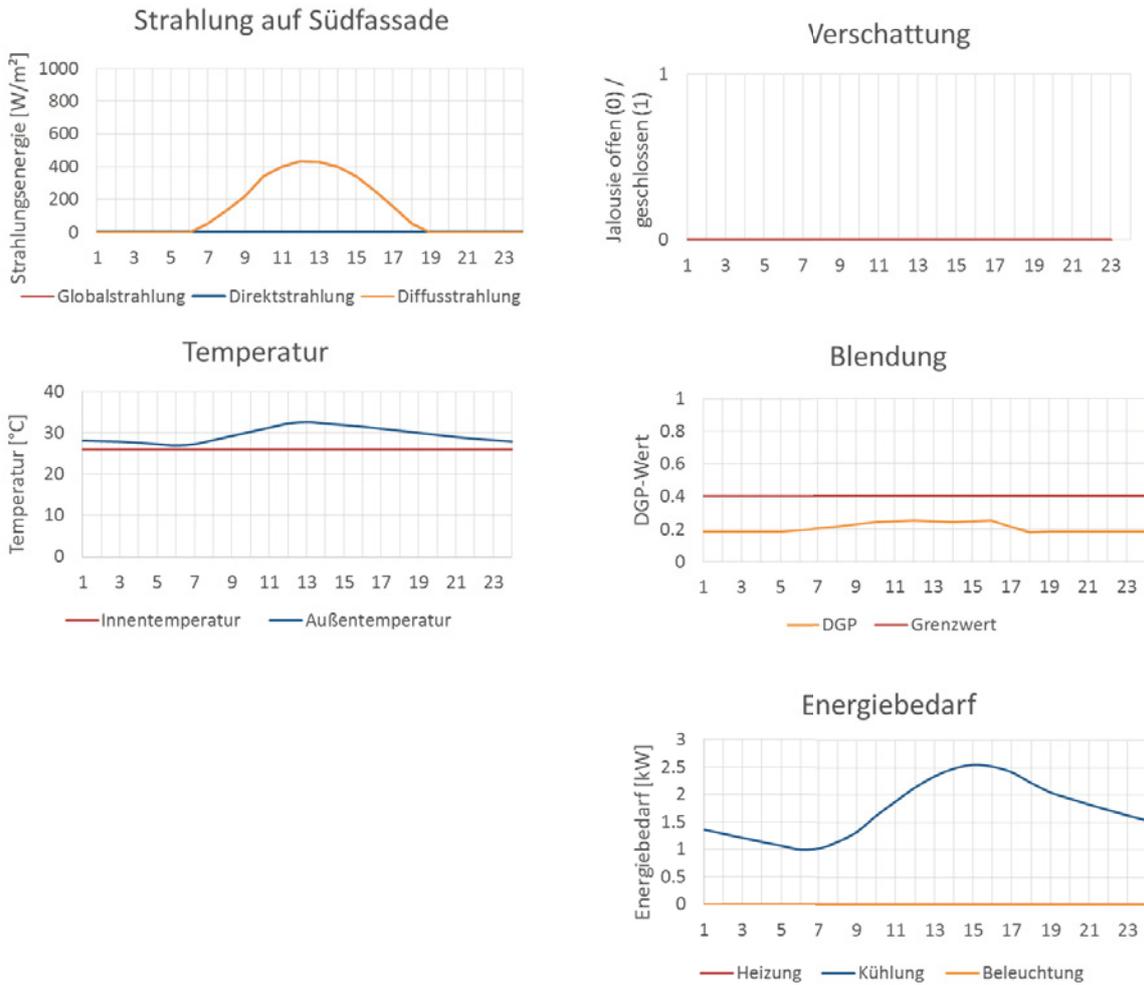


Abbildung 12-134: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



12.4.3.1.17 Accra | Klassenraum | bewölkter Tag

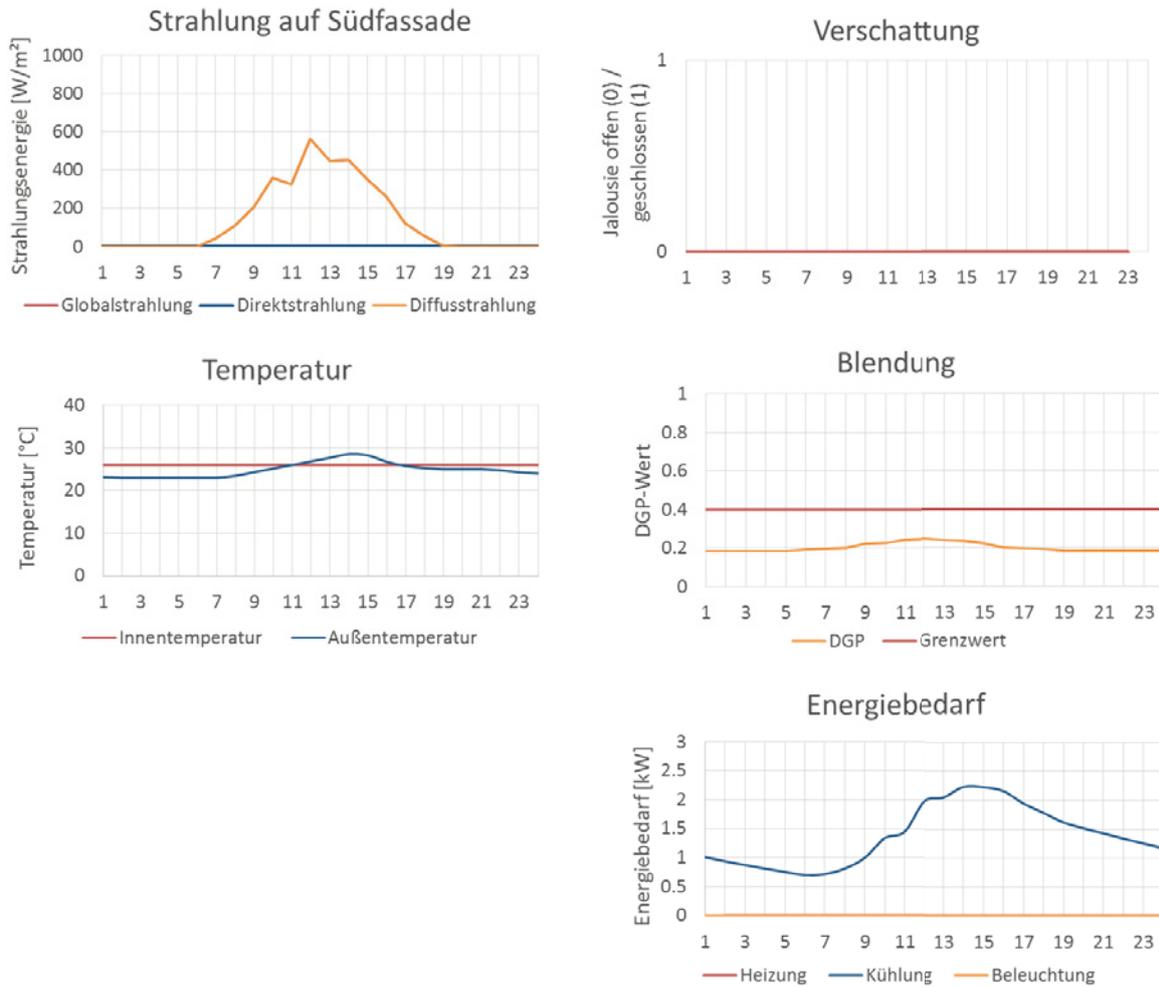


Abbildung 12-135: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Accra an einem bewölkten Tag (28.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.



13 Verzeichnisse

13.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Arbeitsplanung. Schematische Darstellung 14

Abbildung 2-1: Übersicht der im Projekt analysierten Verglasungen 17

Abbildung 2-2: Prinzipskizze von Suntuitive® Dynamic Glass [17] 18

Abbildung 2-3: Anwendung von Suntuitive® Dynamic Glass, Hotel in Shenzhen, China [16] 19

Abbildung 2-4: Links: Temperaturverlauf als Funktion der gespeicherten Wärmemenge bei sensibler und latenter Wärmespeicherung, rechts: Materialklassen, die als PCM untersucht und eingesetzt werden. © ZAE Bayern [18] 20

Abbildung 2-5: Kristallisationsprozess innerhalb eines GLASSX®-Verglasungsaufbaus [19] 21

Abbildung 2-6: Gängige Ausführungsformen einer GLASSX®-Verglasung: a. und b. GLASSX®crystal mit in Polycarbonat-Profilen eingeschlossenem PCM und einer Prismenplatte im Scheibenzwischenraum, c. Zweifachisolierverglasung mit in Polycarbonat-Profilen eingeschlossenem PCM für Anwendung in Glas-Doppelfassaden und in Innenräumen als GLASSX®store [19] 21

Abbildung 2-7: GLASSX®crystal eingebaut im ILEK-Fassadenprüfstand, links: Zustand an einem heißen Sommertag (13.08.2015), rechts: Zustand an einem kalten Wintertag (12.02.2016) 22

Abbildung 2-8: Anwendung von GLASSX®crystal, Marche international support office, Kempththal [19] 22

Abbildung 2-9: Typischer Aufbau eines elektrochromen Systems mit kathodischer Schicht [20] 23

Abbildung 2-10: Anwendung der ECONTROL®-Verglasung: Fraunhofer IST Braunschweig [23] 24

Abbildung 2-11: Anwendung von SageGlass®: Saint-Gobain Nordamerika-Zentrale, Malvern, Pennsylvania, USA, Bernardon, Jacobs, Phot.: Jeffrey Tataro [22] 25

Abbildung 2-12: Anwendung von Ipatherm-Heizglas: Loftcube, Berlin, Werner Aisslinger [28] 26

Abbildung 2-13: Anwendung von OKAFLEX Typ E [29] 27

Abbildung 2-14: Funktionsweise der MicroShade®-Verglasung [30] 28

Abbildung 2-15: Mikroskopaufnahme einer perforierten MicroShade®-Folie (Phot.: ILEK) 29

Abbildung 2-16: Anwendung von MicroShade® (Quelle: MicroShade A/S, [31]) 29

Abbildung 2-17: Funktionsweise der OKASOLAR F O/U-Verglasung [33] 30

Abbildung 2-18: Anwendung der OKASOLAR F-Verglasung, Profilmittel office building, Marktheidenfeld [34] . 30

Abbildung 3-1: Schema der Datenbankstruktur. Vereinfachte Darstellung. 31

Abbildung 4-1: UV/VIS – Spektrometermessplatz 32

Abbildung 4-2: G-Wert, Tvis und Tsol der Suntuitive®-Verglasung in Abhängigkeit von der Scheibentemperatur (Temperatur der thermochromen Schicht) (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48) 35

Abbildung 4-3: Zuweisung der Abdunklungsstufen von Suntuitive® Dynamic Glass. Bildquelle: Pleotint (überarbeitet) 35

Abbildung 4-4: Transmissionsmessung der Probe GLASSX®crystal, PCM im flüssigen und im kristallinen Zustand 36

Abbildung 4-5: Reflexionsmessung der Probe GLASSX®crystal, PCM im flüssigen und im kristallinen Zustand... 37

Abbildung 4-6: G-Wert, Tvis und Tsol der ECONTROL®-Verglasung in Abhängigkeit von der Schaltstufe (Spektralverteilung Quelle: EControl-Glas, Mittelwerte berechnet mit LBNL Optics 5.1/Window 7.4.6) 38

Abbildung 4-7: G-Wert, Tvis und Tsol der SageGlass® classic in Abhängigkeit von der Schaltstufe (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48) 39

Abbildung 4-8: Aufbau des Ipatherm-Verbunds (links) und der Isolierverglasung mit integriertem Ipatherm-Verbundglas (rechts) 40

Abbildung 4-9: Transmissionsmessung der Probe Ipatherm-Heizglas (Ipatherm-Verbund) im eingeschalteten (Trans_on) und ausgeschalteten Zustand (Trans_off) 41

Abbildung 4-10: Reflexionsmessung der Probe Ipatherm-Heizglas (Ipatherm-Verbund) im eingeschalteten Zustand (auf der Vorderseite der Probe: Ref_f_MW_on, auf der Rückseite der Probe: Ref_b_MW_on) und im ausgeschalteten Zustand (auf der Vorderseite der Probe: Ref_f_MW_off, auf der Rückseite der Probe: Ref_b_MW_off) 41



Abbildung 4-11: G-Wert, Tvis und Tsol der OKAFLEX-Verglasung in Abhängigkeit von der Lamellenposition für Strahlungseinfall senkrecht zur Verglasung	42
Abbildung 4-12: Tvis und g-Wert der OKAFLEX-Lamellen in Abhängigkeit der Lamellenposition und des Strahlungseinfallswinkels (Quelle: Okalux, „Infotext OKAFLEX Flexible Lichtsteuerung“).....	43
Abbildung 4-13: Gemessene spektrale Transmissionswerte der Probe MicroShade® MS-A.....	45
Abbildung 4-14: Gemessene spektrale Reflexionswerte der Probe MicroShade® MS-A.....	46
Abbildung 4-15: Winkelselektive Lichttransmission des oberen (F O) und des unteren Verglasungsbereichs (F U) (als 0° wird ein zur Verglasung senkrechter Strahlungseinfall definiert), Quelle: Okalux.....	48
Abbildung 5-1: Konzeption des Fassadenprüfstands für die Versuche an den Verglasungen im Rahmen des Projekts – Grundriss Erdgeschoss, entspr. Grundvariante Obergeschoss. Copyright ILEK.	53
Abbildung 5-2: Konzeption des Fassadenprüfstands – Grundriss Obergeschoss. Drei unterschiedliche, mögliche Ausbauvarianten. Copyright ILEK.	53
Abbildung 5-3: Aufbau des Fassadenprüfstands – Fotodokumentation. Copyright ILEK.....	54
Abbildung 5-4: Die erste Testkonfiguration adaptiver Verglasungen im Fassadenprüfstand. Copyright ILEK.	55
Abbildung 5-5: Sensorische Ausstattung des Fassadenprüfstands. Schematische Darstellung, Copyright ILEK. .	56
Abbildung 5-6: Kombinierte Simulationsstrategie für die lichttechnische und energetische Evaluierung.....	57
Abbildung 5-7: Aufteilung der Erde in Beleuchtungsklimazonen [46]	60
Abbildung 5-8: Überlagerung der Beleuchtungsklimazonen mit der durchschnittlichen horizontalen Globalstrahlung nach SolarGIS © 2015 Global Horizontal Irradiation (GHI) [47]	60
Abbildung 5-9: Weltkarte der Köppen-Geiger Klimazonen nach Chen und Chen („data source: global observational dataset by Kenji Matsuura and Cort J. Willmott“)[50].....	62
Abbildung 5-10: Lage der gewählten repräsentativen Orte.....	63
Abbildung 5-11: Simulationsmodell des Fassadenprüfstands (des Einzelbüros).....	65
Abbildung 5-12: Simulationsmodell des Großraumbüros.....	66
Abbildung 5-13: Simulationsmodell des Klassenraums	67
Abbildung 6-1: Temperaturbasierte Abdunklung (rot: Heizungsbereich, blau: Kühlungsbereich).....	69
Abbildung 6-2: Regelungsstrategie I (RS I), schematische Darstellung	69
Abbildung 6-3: Regelungsstrategie I (RS I), detaillierte Darstellung für vier Abdunklungsstufen.....	70
Abbildung 6-4: Regelungsstrategie II (RS II), schematische Darstellung	70
Abbildung 6-5: Regelungsstrategie II (RS II), detaillierte Darstellung für vier Abdunklungsstufen.....	71
Abbildung 6-6: Regelungsstrategie III (RS III), detaillierte Darstellung für vier Abdunklungsstufen.....	72
Abbildung 6-7: Direkte Blendung an den ausgewählten Sonnenständen während eines Jahres im Fassadenprüfstand, Stuttgart. In Lila wurden Blendkurven der direkten Blendung für die Südfassade dargestellt.	73
Abbildung 6-8: Verlauf der Tageshöchst- und Tagesminimalhöhen der Sonnenposition im Fester innerhalb eines Jahres im Fassadenprüfstand in Stuttgart.....	74
Abbildung 6-9: Verlauf der Tageshöchst- und Tagesminimalhöhen der Sonnenposition im Fester innerhalb eines Jahres im Fassadenprüfstand an allen Standorten	74
Abbildung 6-10: Simulationsmodell des Fassadenprüfstands (Einzelbüro) mit Fensterunterteilung.....	75
Abbildung 6-11: Bestrahlungsstärkebasierte stufenweise Abdunklung	75
Abbildung 6-12: Regelungsstrategie IV (RS IV), schematische Darstellung.....	76
Abbildung 6-13: Regelungsstrategie IV (RS IV), detaillierte Darstellung für vier Abdunklungsstufen	76
Abbildung 6-14: Links: Jahresverläufe der Direkt-, Diffus- und Globalstrahlung auf die Südfassade in Stuttgart. Rechts: Energiebedarf des Einzelbüros im Jahresverlauf (Januar bis Dezember), qualitativ dargestellt (Fassadenprüfstand, Stuttgart, konstanter Transmissionsgrad der Verglasung).....	77
Abbildung 7-1: Belegungsszenarien der drei untersuchten Nutzungen für die Ermittlung interner Wärmegewinne (Bildquelle: www.educate-sustainability.eu, überarbeitet).....	78
Abbildung 7-2: Jahresenergiebedarfe (ohne interne Wärmegewinne)	79
Abbildung 7-3: Jahresenergiebedarfe (mit internen Wärmegewinnen).....	80



Abbildung 7-4: Thermische Analyse von GLASSX®crystal im Testraum 0_1 des Fassadenprüfstands im November 2015. Gemessene Temperaturwerte: T0_1_07 – Innenraumtemperatur in Raummitte, T_Dach – Außentemperatur erfasst auf dem Dach des Fassadenprüfstands, T0_1_09 – Oberflächentemperatur der Verglasung auf der Raumseite, T0_1_12 – Oberflächentemperatur der Verglasung auf der Außenseite.	81
Abbildung 7-5: Jahresenergiebedarfe (ohne interne Wärmegewinne), RS I	82
Abbildung 7-6: Jahresenergiebedarfe (mit internen Wärmegewinnen), RS I	82
Abbildung 7-7: Jahresenergiebedarf im Fassadenprüfstand – Vergleich der Regelungsstrategien (ohne interne Wärmegewinne).....	84
Abbildung 7-8: Jahresenergiebedarf für künstliche Beleuchtung im Fassadenprüfstand – Vergleich der Regelungsstrategien.....	85
Abbildung 7-9: Analyse des Schaltverhaltens der ECONTROL®-Verglasung im Fassadenprüfstand am wechselhaften Frühlingstag 27.04.2016 (Außentemperatur zwischen 5°C und 10°C, Globalstrahlung auf die Horizontale zur Mittagszeit ca. 1000 W/m ²). Oben: Schaltprogramm Stufe 0-1-2-3-4-3-2-1-0, unten (von links nach rechts): Schaltprogramm Stufe 0-2-4-2-0, Schaltprogramm Stufe 0-4-0, Schaltprogramm Stufe 0-3-0.	86
Abbildung 7-10: Leistungsaufnahme der ECONTROL®-Verglasung an einem sonnigen Frühlingstag 02.03.2017	88
Abbildung 7-11: Jahresenergiebedarfe (ohne interne Wärmegewinne)	89
Abbildung 7-12: Jahresenergiebedarfe (mit internen Wärmegewinnen).....	89
Abbildung 7-13: Jahresenergiebedarfe im Fassadenprüfstand mit SageGlass® classic – Vergleich der Regelungsstrategien (Simulation ohne interne Wärmegewinne).....	90
Abbildung 7-14: Vergleichende Darstellung der Abdunklungsstufen der ursprünglichen SageGlass® (Sage) mit dem modifizierten Schaltstufenmodell desselben Systems (Sage mod)	91
Abbildung 7-15: Jahresenergiebedarfe im Fassadenprüfstand – Vergleich der Verglasungsmodelle „Sage“ und „Sage mod“ sowie Referenzverglasungen 1 (Ref) und 3 (Jal) (Strategie RS I ohne interne Wärmegewinne)	91
Abbildung 7-16: Jahresenergiebedarfe im Fassadenprüfstand – Vergleich der Strategien I und III für die modifizierte elektrochrome Verglasung. Energiebedarfe der Referenzverglasung 1 (Ref) und 3 (Jal) wurden ebenfalls aufgetragen.	92
Abbildung 7-17: Monitoring der Außentemperatur und der Bestrahlungsstärke im ILEK-Fassadenprüfstand mit Visualisierung unterschiedlicher Heizungsarten (Radiatorheizung / Ipatherm-Heizglas).....	93
Abbildung 7-18: Thermisch-energetische Analyse der Ipatherm-Verglasung	94
Abbildung 7-19: Jahresenergiebedarfe (Simulation ohne interne Wärmegewinne)	95
Abbildung 7-20: Jahresenergiebedarfe (Simulation mit internen Wärmegewinnen).....	95
Abbildung 7-21: Jahresenergiebedarfe (ohne interne Wärmegewinne)	97
Abbildung 7-22: Jahresenergiebedarfe (mit internen Wärmegewinnen).....	97
Abbildung 7-23: Jahresenergiebedarfe der Referenzverglasungen (Simulation mit internen Wärmegewinnen)	98
Abbildung 7-24: Jahresenergiebedarfe der Referenzverglasung 2 im Fassadenprüfstand bei der Verwendung des CEN- und des NFRC-Standards zur Berechnung der Verglasungskennwerte (Simulation ohne interne Wärmegewinne). Verglichen werden die jeweiligen Gesamtenergiebedarfe für Heizung, Kühlung und Beleuchtung.	99
Abbildung 7-25: Jahresenergiebedarfe der Referenzverglasung 2 im Fassadenprüfstand bei der Verwendung des CEN- und des NFRC-Standards zur Berechnung der Verglasungskennwerte (Simulation mit internen Wärmegewinnen). Verglichen werden die jeweiligen Gesamtenergiebedarfe für Heizung, Kühlung und Beleuchtung.	100
Abbildung 8-1: Simulation der Blendungswahrscheinlichkeiten im Jahresverlauf für den Klassenraum an den ausgewählten Standorten für die Referenzverglasung 1	101
Abbildung 8-2: Häufigkeit der DGP-Grenzwertüberschreitung während der Nutzeranwesenheit	102
Abbildung 8-3: Leuchtdichtemessungen im Fassadenprüfstand. Sonniger Frühlingstag 25.05.2016, Temperatur der Innenscheibe: 25 °C. Oben: Dokumentation der Messvorrichtung (bestehend aus Leuchtdichtemesskamera, Stativ und Laptop; Aufnahmen mit Spiegelreflexkamera), unten: Leuchtdichtendarstellung in Candela/m ² (Aufnahmen mit Leuchtdichtekamera).....	103



Abbildung 8-4: Abdunklungshäufigkeiten der Suntuitive-Verglasung während des Jahres. Links: bei Betrachtung des jeweils ganzen Tages (24 h) über den Zeitraum eines ganzen Jahres, rechts: während der Nutzungszeiten. Die Zuweisung der Abdunklungsstufen entspricht der Abbildung 4-2..... 104

Abbildung 8-5: Tageslichtautonomie, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum, für Suntuitive® Dynamic Glass (Suntuitive), Referenzverglasung 1 (Ref) und Referenzverglasung 3 (Jal). 105

Abbildung 8-6: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Fassadenprüfstand beim Einsatz von GLASSX®crystal zur Mittagszeit. Links: sonniger Wintertag (26.01.2016), rechts: bewölkter Wintertag (02.02.2016)..... 106

Abbildung 8-7: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Tagesverlauf beim Einsatz von GLASSX®crystal (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Wintertag (26.01.2016))..... 106

Abbildung 8-8: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Tagesverlauf beim Einsatz von GLASSX®crystal (Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Wintertag (02.02.2016)) 107

Abbildung 8-9: Tageslichtquotient im Tagesverlauf beim Einsatz von GLASSX®crystal (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Wintertag (26.01.2016)) 107

Abbildung 8-10: Tageslichtquotient im Tagesverlauf beim Einsatz von GLASSX®crystal (Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Wintertag (02.02.2016)) 107

Abbildung 8-11: GLASSX®crystal im ILEK-Fassadenprüfstand an einem kalten Wintertag (12.02.2016). Links: Außenansicht, Mitte und rechts: Detailstudien des Phasenübergangs. 108

Abbildung 8-12: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts während der Nutzeranwesenheit (ECONTROL® smart 55/10 angesteuert nach Strategie RS I)..... 109

Abbildung 8-13: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts bei Anwesenheit des Nutzers (Strategie I (EC, RS 1), bei Einstellung der EC-Verglasung in den Schaltgrenzzuständen (EC, St 0 und EC, St 4)) 110

Abbildung 8-14: Messungen der Leuchtdichteverteilung (Abdunklungsstufe 0, Fassadenprüfstand, Stuttgart, wechselhafter Frühlingstag (25.05.2016)) 111

Abbildung 8-15: Messungen der Leuchtdichteverteilung (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Sommertag, 13:30 Uhr, Außenbeleuchtungsstärke ca. 90 klx). Oben: Aufnahmen mit Blickrichtung nach Süden, unten: Aufnahmen mit Blickrichtung nach Westen. Links: Abdunklungsstufe 0, rechts: Abdunklungsstufe 4 der ECONTROL®-Verglasung..... 111

Abbildung 8-16: Abdunklungshäufigkeiten der nach RS I angesteuerten ECONTROL®-Verglasung während des Jahres. Links: über das gesamte Jahr, rechts: während der Nutzungszeiten. 113

Abbildung 8-17: Abdunklungshäufigkeiten der ECONTROL®-Verglasung während des Jahres in Stuttgart und Accra. Links: über das gesamte Jahr, rechts: während der Nutzungszeiten. Vergleich der Strategien RS I und RS III. 114

Abbildung 8-18: Tageslichtautonomie, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum, für ECONTROL®-Verglasung angesteuert nach Strategie RS I (EC), Referenzverglasung 1 (Ref) und Referenzverglasung 3 (Jal). 115

Abbildung 8-19: Tageslichtautonomie beim Einsatz der ECONTROL®-Verglasung – Vergleich der Strategien RS I und RS III in Stuttgart und Accra 116

Abbildung 8-20: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Fassadenprüfstand beim Einsatz von ECONTROL® smart 55/10 (Stuttgart, sonniger Frühlingstag, Beleuchtungsstärke außen: 114 klx – 120 klx)..... 117

Abbildung 8-21: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Fassadenprüfstand beim Einsatz von ECONTROL® smart 55/10 (Stuttgart, bewölkter Frühlingstag, Beleuchtungsstärke außen: 32 klx – 40 klx) 117

Abbildung 8-22: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Tagesverlauf beim Einsatz von ECONTROL® smart 55/10 (Abdunklungsstufe 4, Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Sommertag (21.06.2016)) 118

Abbildung 8-23: Tageslichtquotient im Tagesverlauf beim Einsatz von ECONTROL® smart 55/10 (Abdunklungsstufe 4, Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Sommertag (21.06.2016)) 118

Abbildung 8-24: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts während der Nutzeranwesenheit (Strategie I (T-DGP))..... 119

Abbildung 8-25: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts bei Anwesenheit des Nutzers (Strategie I (RS I), in Bezug auf die Grenzzustände der Verglasung (St 0 und St 4)) 120



Abbildung 8-26: Testaufbau im Fassadenprüfstand. Links: Testraum 1.1. mit SageGlass® während des Abdunklungsvorgangs, rechts: Referenzraum mit Referenzverglasung 2 an einem sonnigen Herbsttag 29.09.2016 120

Abbildung 8-27: Messungen der Leuchtdichtevertelung (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Herbsttag (29.09.2016)). Oben: Testraum 1.1. ausgestattet mit SageGlass® (rechte Scheibe im Zustand maximaler Transmission, linke Scheibe im Zustand minimaler Transmission), unten: Referenzraum. 121

Abbildung 8-28: Abdunklungshäufigkeiten der nach Strategie RS I angesteuerten SageGlass® classic-Verglasung während eines Jahres. Links: gesamtes Jahr, rechts: während der Nutzungszeiten. 123

Abbildung 8-29: Tageslichtautonomie, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum, für SageGlass®-Verglasung angesteuert nach Strategie RS I bei ganzflächig gleicher Abdunklung (S), Referenzverglasung 1 (Ref) und Referenzverglasung 3 (Jal). 124

Abbildung 8-30: Abdunklungshäufigkeiten der SageGlass® classic-Verglasung (SAGE) und der modifizierten Sage-Verglasung (SAGE opt) während der Nutzungszeiten, Regelungsstrategie RS I 126

Abbildung 8-31: Durchschnittliche Lichttransmissionswerte der SageGlass® classic-Verglasung (SAGE) und der modifizierten Sage-Verglasung (SAGE opt), gewichtet nach Abdunklungshäufigkeiten infolge der Regelungsstrategie I, im Fassadenprüfstand (FP), im Klassenraum (KL) und im Großraumbüro (GB) 127

Abbildung 8-32: Tageslichtautonomie, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum, für die SageGlass®-Verglasung angesteuert nach Strategie RS I (S), die Referenzverglasung 1 (Ref), die Referenzverglasung 3 (Jal) sowie die modifizierte Sage-Verglasung (S, opt.). Die Werte für die modifizierte Verglasung (S, opt.) wurden in Blau dargestellt. 128

Abbildung 8-33: Abdunklungshäufigkeiten der modifizierten Sage-Verglasung, Vergleich der Strategien RS I und RS III. Bei der Strategie RS III werden die Helligkeitskombinationen der beiden Felder (s. Kapitel 6.3) nach der Helligkeit des unteren Felds zusammengefasst. Die Helligkeitskombinationen für das untere Feld in der Schaltstufe 0 („unten hell“) wurden in Stuttgart zusätzlich nach Schaltstufe des oberen Felds differenziert. .. 129

Abbildung 8-34: Tageslichtautonomie der modifizierten elektrochromen Verglasung in Stuttgart und in Accra. Vergleich der Strategien RS I und RS III. 129

Abbildung 8-35: Messungen der Leuchtdichtevertelung (Fassadenprüfstand, Stuttgart, wechselhafter Frühlingstag (25.05.2016)) 131

Abbildung 8-36: Beleuchtungsstärken und Tageslichtquotienten im Fassadenprüfstand im Tagesverlauf an einem bewölkten Sommertag (08.06.2016) 132

Abbildung 8-37: Beleuchtungsstärken im Fassadenprüfstand im Tagesverlauf an einem sonnigen Sommertag (06.06.2016) 133

Abbildung 8-38: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts während der Nutzeranwesenheit 134

Abbildung 8-39: Abdunklungshäufigkeiten der nach RS I angesteuerten OKAFLEX-Verglasung während eines Jahres. Links: das gesamte Jahr, rechts: während der Nutzungszeiten. Stufe 0: Jalousie offen, Stufe 1: Lamellenneigung 45°, Stufe 2: Lamellenneigung zur Vertikalen 30°, Stufe 3: Lamellen geschlossen. 135

Abbildung 8-40: Tageslichtautonomie der nach RS I angesteuerten OKAFLEX-Verglasung (Okaflex) im Vergleich mit den Referenzverglasungen 1 (Ref), 2 (Okatherm) und 3 (Jal) an vier Standorten, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum 136

Abbildung 8-41: Häufigkeit der Überschreitung des DGP-Grenzwerts während der Nutzeranwesenheit 137

Abbildung 8-42: Tageslichtautonomie der MicroShade-Verglasung (MicroShade) im Vergleich mit den Referenzverglasungen 1 (Ref), 2 (Okatherm) und 3 (Jal) an vier Standorten, berechnet für das Nutzungsszenario Klassenraum 138

Abbildung 8-43: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Fassadenprüfstand beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Stuttgart, links: sonniger Wintertag, rechts: bewölkter Wintertag) 139

Abbildung 8-44: Tageslichtquotient im Fassadenprüfstand beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Stuttgart, links: sonniger Wintertag, rechts: bewölkter Wintertag) 139

Abbildung 8-45: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Tagesverlauf beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Wintertag (26.01.2016)) 140



Abbildung 8-46: Tageslichtquotient im Tagesverlauf beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Fassadenprüfstand, Stuttgart, sonniger Wintertag (26.01.2016))..... 140

Abbildung 8-47: Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Tagesverlauf beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Wintertag (02.02.2016)) 140

Abbildung 8-48: Tageslichtquotient im Tagesverlauf beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (Fassadenprüfstand, Stuttgart, bewölkter Wintertag (02.02.2016)) 141

Abbildung 12-1: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums. 154

Abbildung 12-2: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem sonnigen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums. 155

Abbildung 12-3: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums. 156

Abbildung 12-4: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem sonnigen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums. 157

Abbildung 12-5: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem sonnigen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums. 158

Abbildung 12-6: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem sonnigen Wintertag (06.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums. 159

Abbildung 12-7: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Valencia an einem sonnigen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums. 160

Abbildung 12-8: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs des Raums. 161

Abbildung 12-9: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 1.1. mit Suntuitive® Dynamic Glass in der Südfassade. Positionierung der Sensoren..... 162

Abbildung 12-10: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem sonnigen Frühlingstag (20.04.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit. 163

Abbildung 12-11: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem sonnigen Frühlingstag (20.04.2016). Links: Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke auf die Horizontale (Außenbeleuchtungsstärke vor der Verglasung (Südfassade) und auf dem Gebäudedach, Innenbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche 1,20 m hinter der Fassade (Sensor B1.1.04)). Rechts: Detailaufnahme der Innenbeleuchtungsstärke für den Zeitraum 7 – 18 Uhr..... 163

Abbildung 12-12: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem sonnigen Sommertag (06.06.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit. 164

Abbildung 12-13: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem sonnigen Sommertag (06.06.2016). Links: Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke auf die Horizontale (Außenbeleuchtungsstärke vor der Verglasung (Südfassade) und auf dem Gebäudedach, Innenbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche 1,20 m hinter der Fassade (Sensor B1.1.04)). Rechts: Detailaufnahme der Innenbeleuchtungsstärke für den Zeitraum 7 – 18 Uhr..... 164



Abbildung 12-14: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (08.06.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit. 165

Abbildung 12-15: Tagesanalyse für Suntuitive® Dynamic Glass, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem sonnigen Frühlingstag (20.04.2016). Links: Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke auf die Horizontale (Außenbeleuchtungsstärke vor der Verglasung (Südfassade) und auf dem Gebäudedach, Innenbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche 1,20 m hinter der Fassade (Sensor B1.1.04)). Rechts: Detailaufnahmen der Innenbeleuchtungsstärke und des Tageslichtquotienten für den Zeitraum 7 – 18 Uhr. . 165

Abbildung 12-16: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Positionierung der Sensoren. 167

Abbildung 12-17: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Strahlungsverlauf im November 2015. 168

Abbildung 12-18: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Windgeschwindigkeiten im November 2015. 168

Abbildung 12-19: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Relative Luftfeuchte im November 2015. 169

Abbildung 12-20: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Temperaturverlauf im November 2015, Innen- und Außenlufttemperaturen (Sensorenbezeichnung s. Abbildung 12-16). 169

Abbildung 12-21: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Temperaturverlauf im November 2015, Oberflächentemperaturen auf Scheiben-Innenseite (Sensorenbezeichnung s. Abbildung 12-16). 170

Abbildung 12-22: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Temperaturverlauf im November 2015, Oberflächentemperaturen auf Scheiben-Außenseite (Sensorenbezeichnung s. Abbildung 12-16). 170

Abbildung 12-23: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit GLASSX®crystal in der Südfassade. Temperaturverlauf im November 2015, Vergleich ausgewählter Oberflächen- und Lufttemperaturen (Sensorenbezeichnung s. Abbildung 12-16). 171

Abbildung 12-24: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 172

Abbildung 12-25: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 173

Abbildung 12-26: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 174

Abbildung 12-27: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 175

Abbildung 12-28: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 176

Abbildung 12-29: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 177

Abbildung 12-30: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 178



Abbildung 12-31: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	179
Abbildung 12-32: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS II. Simulation des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der minimalen Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	180
Abbildung 12-33: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS II. Simulation des Fassadenprüfstands in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der minimalen Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	181
Abbildung 12-34: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS IV (I_{min} , I_{max})=(30 W/m ² , 400 W/m ²). Simulation des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	182
Abbildung 12-35: Analyse der Abdunklungsvorgänge im Jahresverlauf für ECONTROL® smart 55/10 im Fassadenprüfstand in Stuttgart, geregelt nach RS IV. Vergleich der Regelungsparameter der RS IV (I_{min} , I_{max})=(30 W/m ² , 400 W/m ²) und (I_{min} , I_{max})=(150 W/m ² , 400 W/m ²).	182
Abbildung 12-36: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS IV (150-400). Simulation des Fassadenprüfstands in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	183
Abbildung 12-37: Analyse der Abdunklungsvorgänge im Jahresverlauf für ECONTROL® smart 55/10 im Fassadenprüfstand in Accra, geregelt nach RS IV (150-400).	183
Abbildung 12-38: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10, geregelt nach RS IV (400-800). Simulation des Fassadenprüfstands in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	184
Abbildung 12-39: Analyse der Abdunklungsvorgänge im Jahresverlauf für ECONTROL® smart 55/10 im Fassadenprüfstand in Accra, geregelt nach RS IV (400-800).	184
Abbildung 12-40: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 1.2. mit ECONTROL® smart 55/10 in der Südfassade. Positionierung der Sensoren.	185
Abbildung 12-41: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10 im Zustand maximaler Transmission. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem größtenteils sonnigen Sommertag (06.06.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. O: im oberen Verglasungsbereich, U: im unteren Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit und der Luftfeuchtigkeit.	186
Abbildung 12-42: Tagesanalyse für ECONTROL® smart 55/10 im Zustand maximaler Transmission, Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem größtenteils sonnigen Sommertag (06.06.2016). Links: Tagesverlauf der Beleuchtungsstärke auf die Horizontale (Außenbeleuchtungsstärke vor der Verglasung (Südfassade) und auf dem Gebäudedach, Innenbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche 1,20 m hinter der Fassade (Sensor B1.2.04)). Rechts: Detailaufnahme der Innenbeleuchtungsstärke für den Zeitraum 7 – 18 Uhr.	186
Abbildung 12-43: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	187
Abbildung 12-44: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	188
Abbildung 12-45: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	189
Abbildung 12-46: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	190



Abbildung 12-47: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 191

Abbildung 12-48: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 192

Abbildung 12-49: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 193

Abbildung 12-50: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 194

Abbildung 12-51: Tagesanalyse für SageGlass® classic, geregelt nach RS I. Simulation des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs. 195

Abbildung 12-52: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 1.1. mit SageGlass® classic in der Südfassade. Positionierung der Sensoren. 196

Abbildung 12-53: Tagesanalyse für SageGlass® classic im Zustand maximaler Transmission. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Herbsttag (25.09.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke. 197

Abbildung 12-54: Tagesanalyse für SageGlass® classic im Zustand maximaler Transmission. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem bewölkten Herbsttag (06.10.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke. 198

Abbildung 12-55: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 0.1. mit Ipatherm-Heizglas in der Südfassade. Positionierung der Sensoren. 199

Abbildung 12-56: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Frühlingstag (20.04.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke. 200

Abbildung 12-57: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem bewölkten Frühlingstag (23.04.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke. 201

Abbildung 12-58: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem größtenteils sonnigen Sommertag (06.06.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke. 202

Abbildung 12-59: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (08.06.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke. 203

Abbildung 12-60: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (27.02.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke. 204

Abbildung 12-61: Tagesanalyse für Ipatherm-Heizglas. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (20.02.2016). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur (Scheibentemp. U: im unteren Verglasungsbereich, O: im oberen Verglasungsbereich), der Windgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit und der Beleuchtungsstärke. 205



Abbildung 12-62: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	206
Abbildung 12-63: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	207
Abbildung 12-64: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	208
Abbildung 12-65: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	209
Abbildung 12-66: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	210
Abbildung 12-67: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	211
Abbildung 12-68: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	212
Abbildung 12-69: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04. Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	213
Abbildung 12-70: Tagesanalyse für OKAFLEX Typ E, geregelt nach RS I. Simulation des Klassenraums in Accra an einem bewölkten Tag (28.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Abdunklungsvorgänge, der Blendung und des Energiebedarfs.	214
Abbildung 12-71: Sonnenstandsdiagramm für den wechselhaften Frühlingstag 03.04. am Standort Stuttgart	215
Abbildung 12-72: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.	215
Abbildung 12-73: Direkte Transmission kurzweiliger Strahlung (Q_{Trans}) und sekundäre Wärmeabgabe in den Raum (secHeatGain) beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (MS) im Vergleich mit Referenzverglasung 1 (Ref). Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.) ohne interne Wärmegevinne.	216
Abbildung 12-74: Sonnenstandsdiagramm für den sonnigen Sommertag 13.07. am Standort Stuttgart	217
Abbildung 12-75: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem sonnigen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.	217
Abbildung 12-76: Direkte Transmission kurzweiliger Strahlung (Q_{Trans}) und sekundäre Wärmeabgabe in den Raum (secHeatGain) beim Einsatz von MicroShade® MS-A Vertical (MS) im Vergleich mit Referenzverglasung 1 (Ref). Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem sonnigen Sommertag (13.07.) ohne interne Wärmegevinne.	218
Abbildung 12-77: Sonnenstandsdiagramm für den bewölkten Sommertag 01.08. am Standort Stuttgart	219
Abbildung 12-78: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs.	219
Abbildung 12-79: Sonnenstandsdiagramm für den bewölkten Wintertag 13.12. am Standort Stuttgart	220



Abbildung 12-80: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 220

Abbildung 12-81: Sonnenstandsdiagramm für den wechselhaften Frühlingstag 13.04. am Standort Helsinki.. 221

Abbildung 12-82: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wechselhaften Frühlingstag (13.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 221

Abbildung 12-83: Sonnenstandsdiagramm für den wolkenlosen Sommertag 08.07. am Standort Helsinki 222

Abbildung 12-84: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 222

Abbildung 12-85: Sonnenstandsdiagramm für den wolkenlosen Wintertag 06.12. am Standort Helsinki 223

Abbildung 12-86: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Wintertag (06.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 223

Abbildung 12-87: Sonnenstandsdiagramm für den wolkenlosen Sommertag 02.08. am Standort Valencia 224

Abbildung 12-88: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs..... 224

Abbildung 12-89: Sonnenstandsdiagramm für den wolkenlosen Tag 08.04. am Standort Accra 225

Abbildung 12-90: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 225

Abbildung 12-91: Monitoring des Fassadenprüfstands, Testraum 1.1. mit MicroShade® MS-A Vertical in der Südfassade. Positionierung der Sensoren. 226

Abbildung 12-92: Tagesanalyse für MicroShade® MS-A Vertical. Monitoring des Fassadenprüfstands in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (14.12.2015). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Beleuchtungsstärke 227

Abbildung 12-93: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 228

Abbildung 12-94: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 229

Abbildung 12-95: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 229

Abbildung 12-96: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 230

Abbildung 12-97: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 230

Abbildung 12-98: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wechselhaften Frühlingstag (13.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 231

Abbildung 12-99: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 231



Abbildung 12-100: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem bewölkten Sommertag (07.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 232

Abbildung 12-101: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Wintertag (06.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 232

Abbildung 12-102: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem bewölkten Wintertag (31.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 233

Abbildung 12-103: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wechselhaften Frühlingstag (05.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 233

Abbildung 12-104: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 234

Abbildung 12-105: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem bewölkten Sommertag (10.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 234

Abbildung 12-106: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Wintertag (07.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 235

Abbildung 12-107: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem bewölkten Wintertag (29.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 235

Abbildung 12-108: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 236

Abbildung 12-109: Tagesanalyse für Referenzverglasung 1. Simulation des Klassenraums in Accra an einem bewölkten Tag (28.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 236

Abbildung 12-110: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 237

Abbildung 12-111: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 238

Abbildung 12-112: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (01.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 238

Abbildung 12-113: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 239

Abbildung 12-114: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 239

Abbildung 12-115: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 240



Abbildung 12-116: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 240

Abbildung 12-117: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Accra an einem sonnigen Tag (08.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 241

Abbildung 12-118: Tagesanalyse für OKATHERM. Simulation des Klassenraums in Accra an einem bewölkten Tag (28.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 241

Abbildung 12-119: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wechselhaften Frühlingstag (03.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 242

Abbildung 12-120: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 243

Abbildung 12-121: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Sommertag (13.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 244

Abbildung 12-122: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem wolkenlosen Wintertag (10.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 245

Abbildung 12-123: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Stuttgart an einem bewölkten Wintertag (13.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 246

Abbildung 12-124: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wechselhaften Frühlingstag (13.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 247

Abbildung 12-125: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Sommertag (08.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 248

Abbildung 12-126: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem bewölkten Sommertag (07.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 249

Abbildung 12-127: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem wolkenlosen Wintertag (06.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 250

Abbildung 12-128: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Helsinki an einem bewölkten Wintertag (31.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 251

Abbildung 12-129: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wechselhaften Frühlingstag (05.04.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 252

Abbildung 12-130: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Sommertag (02.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 253

Abbildung 12-131: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem bewölkten Sommertag (10.08.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 254

Abbildung 12-132: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem wolkenlosen Wintertag (07.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 255



Abbildung 12-133: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Valencia an einem bewölkten Wintertag (29.12.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 256

Abbildung 12-134: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Accra an einem wolkenlosen Tag (08.04). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 257

Abbildung 12-135: Tagesanalyse für Referenzverglasung 3. Simulation des Klassenraums in Accra an einem bewölkten Tag (28.07.). Tagesverläufe der Solarstrahlung, der Temperatur, der Blendung und des Energiebedarfs. 258

13.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Optische und thermische Kenndaten von Suntuitive® Dynamic Glass (Typ Suntuitive® Azuria), berechnet nach CEN-Standard (Quelle: Pleotint) und nach NFRC-Standard (Quelle: LBNL Window 7.4.6), in Abhängigkeit von der Temperatur der thermochromen Schicht..... 34

Tabelle 4-2: Transmissions- und Reflexionswerte der Probe GLASSX®crystal (GLASSX®-Probe, Quelle: spektrometrische Messungen, ILEK, Elementgesamtdicke 22 mm) sowie Transmissions- und g-Werte des Systems GLASSX®store (GLASSX®store, Quelle: GLASSX AG, Elementgesamtdicke 34 mm – 38 mm). 36

Tabelle 4-3: Kennwerte der ECONTROL®-Verglasung für zwei extreme Schaltzustände (CEN - Quelle: EControl-Glas[23], NFRC – Spektralverteilung Quelle: EControl-Glas, Mittelwerte berechnet mit LBNL Optics 5.1/Window 7.4.6) 38

Tabelle 4-4: Kennwerte der SageGlass® classic (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48)..... 39

Tabelle 4-5: Kennwerte des Ipatherm-Heizglases (Ipatherm monolithisch - Quelle: spektrometrische Vermessung, ILEK, Mittelwerte berechnet, Ipatherm Isolierglas - Quelle: Mittelwerte des Ipatherm-Verbunds: ILEK, sonstige Komponenten des Isolierglasaufbaus: IGDB v48, berechnet mit LBNL Window 7.4.6) 40

Tabelle 4-6: Kennwerte der OKAFLEX-Verglasung für zwei ausgewählte Lamellenstellungen (Quelle: Berechnung nach CEN-Standard - Okalux, Berechnung nach NFRC-Standard - LBNL Window 7.4.6.)..... 42

Tabelle 4-7: Winkelabhängige g-Werte der untersuchten MicroShade®-Verglasung (Quelle: MicroShade A/S). 44

Tabelle 4-8: Winkelabhängige Transmissionswerte der untersuchten MicroShade®-Verglasung (Quelle: MicroShade A/S) 44

Tabelle 4-9: Winkelabhängige Reflexionswerte der untersuchten MicroShade®-Verglasung (Quelle: MicroShade A/S)..... 45

Tabelle 4-10: Bauphysikalische Kennwerte der untersuchten MicroShade®-Verglasung für zur Verglasung senkrechten Strahlungseinfall (CEN - Quelle: MicroShade A/S, NFRC - Quelle: LBNL Window 7.4.6) 45

Tabelle 4-11: Bauphysikalische Kenndaten des oberen (F O) und des unteren Verglasungsbereichs (F U) in Abhängigkeit vom Strahlungseinfallswinkel (als 0° wird ein zur Verglasung senkrechter Strahlungseinfall definiert), Quelle: Okalux, Berechnung gem. CEN-Standard 47

Tabelle 4-12: Optische und thermische Kenndaten der Referenzverglasung 1 (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48) 49

Tabelle 4-13: Optische und thermische Kenndaten des OKATHERM Funktions-Isolierglases (Quelle: LBNL Window 7.4.6, IGDB v48) 50

Tabelle 5-1: Statistische Interpretation des DGP-Werts nach Wienold und Christoffersen [43] (95 % Konfidenzintervall) 59

Tabelle 5-2: Erklärung der Klimaformeln europäischer Klimaregionen 61

Tabelle 5-3: Übersicht und Lage der gewählten repräsentativen Orte 63

Tabelle 6-1: Regelungskonzepte für elektrochrome Verglasungen gemäß Literaturrecherche [58] 68

Tabelle 7-1: Auswirkung des Simulationszeitschritts auf den simulierten Jahresenergiebedarf im Fassadenprüfstand 87

Tabelle 9-1: Tabellarische Zusammenstellung der wesentlichen Produktcharakteristiken..... 146



Tabelle 10-1: Tabellarischer Vergleich der Randbedingungen zur Berechnung der Verglasungskennwerte nach NFRC und CEN, zit. nach Hanam et al. [70] 147
Tabelle 10-2: Tabellarischer Vergleich der Wärmeübergangskoeffizienten zur Berechnung der U-Werte von Verglasungen nach NFRC und CEN, zit. nach RDH Building Engineering [71] 147
Tabelle 10-3: Tabellarischer Vergleich der Wärmedurchgangsberechnungsmethoden nach NFRC und CEN, zit. nach RDH Building Engineering [71] 148
Tabelle 12-1: Auswahl repräsentativer Tage während des Jahres 153

13.3 Formelverzeichnis

Formel 2-1: Reaktionsgleichung einer auf Wolframoxid basierenden elektrochromen Verglasung 23
Formel 5-1: Daylight Glare Probability nach Wienold und Christoffersen [36] 59

13.4 Abkürzungsverzeichnis

Avis	Lichtabsorption
Asol	Strahlungsabsorption
DGP	Daylight Glare Probability, Wahrscheinlichkeit der Blendung durch Tageslicht
E	Beleuchtungsstärke
E _v	vertikale Beleuchtungsstärke
g	g-Wert, Gesamtenergiedurchlassgrad
I	Bestrahlungsstärke
IEQ	Indoor Environment Quality
L	Leuchtdichte
P _i	Positionsindex der Quelle i
T	Temperatur
TMY	Typical Meteorological Year, Testreferenzjahr
T _{vis}	Lichttransmission
T _{sol}	Strahlungstransmission
R _{vis}	Lichtreflexion
R _{sol}	Strahlungsreflexion
U	U-Wert, Wärmeduchgangskoeffizient
ω _{si}	Raumwinkel der Quelle i

13.5 Literaturverzeichnis

1. Husser, M., Haase, W., Sobek, W.: Towards the Applications of Adaptive Glazing Systems (eingereicht). In: NEXT facades., Graz (2017)
2. Haase, W., Husser, M., Sobek, W.: Adaptive Glazing Systems – Survey of Systems (eingereicht). In: AIM 2017 – IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics., München (2017)
3. Husser, M., Haase, W., Hoß, P., Sobek, W.: New Possibilities of Sun and Glare Protection with a Structured Switchable Glazing. In: Challenging Glass 5 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass., Ghent (2016)
4. Haase, W., Husser, M., Sobek, W.: Adaptiv schaltbare Verglasungen – Übersicht ausgewählter Systeme. In: Glasbau 2017, Hrsg.: Weller, B., Tasche, S. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG., Dresden / Berlin (2017)
5. Pfeiffer, A., Archis Architekten + Ingenieure GmbH: Interview (2015)
6. Auernhammer, I., Auernhammer Wohlrab Architektur: Interview (2016)
7. Harary, J.M., Research Frontiers Inc.: Interview (2014)



8. ActiveGlass Technologies plc: Interview (2014)
9. Bezzel, E., MicroShade A/S: Interview (2016)
10. Smart Windows Market & Industry Background - ActiveGlass Technologies plc, <http://www.active-glass.eu/smart-technologies/smart-windows-market-industry-background/>, Zugriff am: 22.10.2014.
11. Wiekert, M.: Hochleistungs-Flachglas in den USA wieder stärker, <http://www.gtai.de/GTAI/Naviga-tion/DE/Trade/maerkte,did=949874.html>, Zugriff am: 04.09.2014.
12. Global Markets and Technologies for Smart Glass. BCC Research Report (2012), <https://www.bccre-search.com/market-research/advanced-materials/smart-glass-technology-global-markets-vm065b.html>, Zugriff am: 22.10.2014.
13. Huber, H.: Glastechnologie. Schaltende und schaltbare Gläser. ARCH Baufokus. 144–145, 120–125 (1998)
14. Nitz, P., Wagner, A.: Schaltbare und regelbare Verglasungen, BINE Informationsdienst, Themeninfo 1/02, http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Themen-Infos/l_2002/themen0102inter-netx.pdf, Zugriff am: 23.11.2016.
15. Kamalisarvestani, M., Saidur, R., Mekhilef, S., Javadi, F.S.: Performance, materials and coating technologies of thermochromic thin films on smart windows. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 26, 353–364 (2013). doi:10.1016/j.rser.2013.05.038
16. Suntuitive Dynamic Glass Projects, <http://www.suntuitive.com/projects.html>, Zugriff am: 13.09.2016.
17. Suntuitive Technical Information, http://www.suntuitive.com/uploads/1/2/4/1/12414735/suntui-tive_technical_brochure_70115.pdf, Zugriff am: 11.11.2016.
18. Schmidt, M., Lüdemann, B., Disch, R.: Latentwärmespeicher in Gebäuden - Phasenübergang puffert Wärme, BINE Informationsdienst, Themeninfo 1/2009, <http://www.bine.info/publikationen/publikation/latent-waermespeicher-in-gebaeuden/phasenuebergang-puffert-waerme/>, Zugriff am: 09.09.2016.
19. GLASSX AG - Downloads, <http://glassx.ch/index.php?id=564>, Zugriff am: 09.09.2016.
20. Granqvist, C.G.: Handbook of Inorganic Electrochromic Materials. Elsevier Science (1995)
21. Wittkopf, H.: Elektrochrome Beschichtungen. Sonnenschutzgläser der neuen Generation. *Vak. Forsch. Prax.* 22, 26–30 (2010)
22. Products | SageGlass, <https://www.sageglass.com/products>, Zugriff am: 13.09.2016.
23. ECONTROL® – Sonnenschutz mit dimmbarem Glas, <https://www.econtrol-glas.de/>, Zugriff am: 13.09.2016.
24. Baetens, R., Jelle, B.P., Gustavsen, A.: Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 94, 87–105 (2010). doi:10.1016/j.solmat.2009.08.021
25. Deinlein, T.: Electrochromic facades - glass with adjustable properties. *Stahlbau.* 69, 568–570 (2000)
26. Kraft, A., Rottmann, M., Heckner, K.-H.: Steuerbare elektrochrome Farbfilter - Intelligente Verglasung für Fahrzeuge, Gebäude oder Displays. *Laser+Photonik.* 28–30 (2006)
27. Vorteile von Heizglas | GLASPROFI24, <http://www.glasprofi24.de/heizglas>, Zugriff am: 09.09.2016.
28. INTERPANE - Project - Loftcube by Werner Aisslinger, <http://ge.archello.com/en/project/loftcube-werner-aisslinger>, Zugriff am: 07.11.2016.
29. OKALUX GmbH - Home, <http://www.okalux.com/okalux-gmbh-home/>, Zugriff am: 07.11.2016.
30. Oebbeke, A.: Microlamellen-Isolierglas als energie- und kosteneffizienter passiver Sonnenschutz, <http://www.baulinks.de/webplugin/2014/1463.php4>, Zugriff am: 09.09.2016.
31. Kleine Perforierung, große Wirkung. GLASWELT 11-2012.
32. Oebbeke, A.: Dreifachverglasung mit integrierter Tageslichtlenkung von Okalux, <http://www.bau-links.de/webplugin/2011/0134.php4>, Zugriff am: 09.09.2016.



33. Okalux: OKASOLAR Leistungsfähige Systeme zur Tageslichtnutzung, http://www.okalux.de/fileadmin/img/images/Produkte/Marken/Prospekte/OKASOLAR_klein_2015.pdf, Zugriff am: 09.09.2016.
34. Profilmetall office building, Marktheidenfeld, 2012 - OKALUX, <http://www.archilovers.com/projects/86701/profilmetall-office-building.html>, Zugriff am: 09.09.2016.
35. DIN EN 410 Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen; deutsche Fassung EN 410: 2011. (2011)
36. International Glazing Database, <https://windows.lbl.gov/materials/igdb/>, Zugriff am: 11.11.2016.
37. Reinhart, C.F.: Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design, Harvard University, <https://dl.dropboxusercontent.com/u/16228160/Daysim3.0.Tutorial.pdf>, Zugriff am: 26.10.2016. (2010)
38. SGG PLANITHERM LUX | Saint-Gobain Glass Germany, <http://de.saint-gobain-glass.com/product/2573/sgg-planitherm-lux>, Zugriff am: 02.06.2017
39. Güthler Beschattungen gB, <http://guethler-glasfassaden.com/produkte/guethler-beschattungen-gb/>, Zugriff am: 02.06.2017
40. Gassel, A.: Beiträge zur Berechnung solarthermischer und exergieeffizienter Energiesysteme, Dissertation, Technische Universität Dresden, Dresden (1996)
41. Solar Energy Laboratory: TRNSYS 17 - Volume 1 Getting Started, http://trnsys.de/download/en/trnsys_shortinfo_en.pdf, Zugriff am: 28.05.2016. (2009)
42. Solar Energy Laboratory: TRNSYS 16 - Volume 6 Multizone Building modeling with Type56 and TRNBuild, <http://web.mit.edu/parmstr/Public/Documentation/06-MultizoneBuilding.pdf>, Zugriff am: 28.05.2016. (2007).
43. Wienold, J., Christoffersen, J.: Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy Build.* 38, 743–757 (2006). doi:10.1016/j.enbuild.2006.03.017
44. Hegger, M.: Energie-Atlas. Birkhäuser, Basel; Berlin (2008)
45. Wetter, Klima, Klimawandel. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2009)
46. Gude, M.: Atmosphäre, <http://slideplayer.org/slide/865742/>, Zugriff am: 09.09.2016. (2010)
47. Global Horizontal Irradiation (GHI), <http://solargis.com/assets/graphic/free-map/GHI/Solargis-World-GHI-solar-resource-map-en.png>, Zugriff am: 09.09.2016.
48. Heyer, E.: Witterung und Klima: eine allgemeine Klimatologie. Teubner, Leipzig (1988)
49. Klimadiagramme weltweit, <http://www.klimadiagramme.de/>, Zugriff am: 09.10.2014.
50. Chen, D., Chen, H.W.: Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: An example for 1901–2010. *Environ. Dev.* 6, 69–79 (2013). doi:10.1016/j.envdev.2013.03.007
51. Lawrenz, H.-P., Schettler-Köhler, H.-P., Voss, K.: Energieeinsparung contra Behaglichkeit? Selbstverlag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn (2004)
52. Hartwig, H.: Konzepte für die Integration selbstregelnder, thermotroper Schichten in moderne Gebäudehüllen zur passiven Nutzung der Sonnenenergie, TU München, München (2003)
53. Witting, W.: Licht. Sehen. Gestalten: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen für Architekten und Lichtdesigner. Birkhäuser, Basel (2014)
54. DGUV Information 215-410 „Bildschirm- und Büroarbeitsplätze – Leitfaden für die Gestaltung“, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2015)
55. VDI 6011 Blatt 1 Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung - Grundlagen. (2002)
56. VDI 6011 Blatt 2 Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung - Dachoberlichter. (2006)
57. Technische Regeln für Arbeitsstätten "Raumabmessungen und Bewegungsflächen" - ASR-A1-2. (2013)



58. Haase, W., Husser, M.: Adaptive Verglasungssysteme. Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien. Zwischenbericht I. Universität Stuttgart, Stuttgart (2013)
59. Husser, M., Haase, W.: Adaptive Verglasungssysteme. Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien. Zwischenbericht II. Universität Stuttgart, Stuttgart (2014)
60. ASR A 3.4 Technische Regeln für Arbeitsstätten - Beleuchtung. (2011)
61. Van Den Wymelenberg, K.: Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review. Energy Build. 51, 165–176 (2012). doi:10.1016/j.enbuild.2012.05.008
62. Dittmar, M.: Schaltverhalten dimmbarer Verglasung, <https://www.econtrol-glas.de/knowledge-center/technologie/schaltverhalten/>, Zugriff am: 21.11.2016.
63. Licht, U.B.: Tageslicht - Kunstlicht: Grundlagen, Ausführung, Beispiele. DETAIL, München (2005)
64. Houchmand, M.: Messtechnische Erfassung des Einflusses verschiedener adaptiver Verglasungen auf die Innenraumhelligkeitsverteilung und Blendwirkung, Bachelorarbeit am ILEK, Universität Stuttgart, Stuttgart (2016)
65. National Fenestration Rating Council Incorporated: NFRC 100-2004 Procedure for Determining Fenestration Product U-Factors. Greenbelt, MD (2004)
66. National Fenestration Rating Council Incorporated: NFRC 200-2010 Procedure for Determining Fenestration Product Solar Heat Gain Coefficient and Visible Transmittance at Normal Incidence. Greenbelt, MD (2010)
67. ISO 15099 Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations. (2003)
68. DIN EN ISO 10077-1 Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten. (2010)
69. DIN EN 673 Glas im Bauwesen - Bestimmung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren. (2011)
70. Hanam, B., Jaugelis, A., Finch, G.: Energy Performance of Windows: Navigating North American and European Window Standards. In: 14th Canadian Conference on Building Science and Technology. Toronto, Ontario (2014)
71. RDH Building Engineering: International Window Standards. BC: RDH Building Engineering Ltd., Vancouver (2014)
72. Ebanks, P.-G.: A comparison of the NFRC and CEN thermal transmittance calculation methods in North America's eight climate zones, Ryerson University, Toronto (2014)
73. DIN 5034-1 Tageslicht in Innenräumen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. (2011)
74. DIN EN 12464-1 Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen; Deutsche Fassung EN 12464-1:2011. (2011)
75. ASR A 3.4 Technische Regeln für Arbeitsstätten - Beleuchtung. (2011)
76. BGI 827 Sonnenschutz im Büro - Hilfen für die Auswahl von geeigneten Blend- und Wärmeschutzvorrichtungen an Bildschirm- und Büroarbeitsplätzen. Berufsgenossenschaftliche Information (BGI) / VBG (2014)
77. Referentenentwurf für eine Verordnung zur Änderung der Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV). (2004)
78. DIN EN ISO 7730 Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005. (2014)
79. DIN EN 15251 Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. (2012)