

Regelungskonzepte für schaltbare Verglasungen zur Optimierung des Innenraumkomforts

Von der Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart zur Erlangung der
Würde eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Marzena Husser

geboren in Poznań, Polen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)
Universität Stuttgart

Mitberichter: Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner
Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau (fbta)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Tag der mündlichen Prüfung: 08.07.2019

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart

2019

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) an der Universität Stuttgart, im Rahmen von drei Forschungsprojekten: „Schaltbare Verglasung auf der Basis von lyotropen und nematischen Flüssigkristallen“, gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Adaptive Verglasungssysteme. Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien“, gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung und „i³: intelligente, interaktive, integrative Fassadenverglasung für Sonnenschutzanwendungen“, gefördert von der Baden-Württemberg-Stiftung.

Mein ausdrücklicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek für seinen wissenschaftlichen Rat und inspirierende Denkanstöße sowie für das mir entgegengebrachte Vertrauen während der Bearbeitung dieser Arbeit. Ihm danke ich ebenfalls für die Übernahme des Hauptberichts.

Weiterhin bedanke ich mich beim Herrn Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Mein besonderer Dank gilt dem Forschungsleiter des Instituts, Herrn Dr.-Ing. Walter Haase. Durch seine Vorarbeiten im Bereich adaptiver Verglasungen gab er mir die Anregung für diese Arbeit und stand mir während der Bearbeitung mit fachlichen Ratschlägen zur Seite.

Bei allen Angehörigen des Instituts bedanke ich mich für ihre Unterstützung, die kollegiale Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich herzlich für den Rückhalt in dieser Zeit.

Kurzfassung

Die Fassade, als Schnittstelle zwischen dem Innen- und dem Außenraum, wird mit zahlreichen Anforderungen konfrontiert. Sie soll sowohl einen positiven Einfluss auf die Gebäudeenergiebilanz ausüben als auch zur Gewährleistung des Nutzerkomforts im Innenraum beitragen. Insbesondere bei transparenten Gebäudehüllen wird die Erfüllung dieser Anforderungen wesentlich durch die Eigenschaften der eingesetzten Verglasungen bestimmt. Besondere Qualitäten großflächig verglaster Fassaden hinsichtlich der Tageslichtversorgung und der ästhetischen Wirkung werden häufig ihren wärmetechnischen Nachteilen gegenübergestellt. Wird im Innenraum eine thermische und eine visuelle Behaglichkeit angestrebt, so ist dies allein durch die Auslegung traditioneller Verglasungen, ohne zusätzliche Funktionselemente und Energieeinsatz, meistens nicht möglich. Da sich diese Verglasungen durch invariante Eigenschaften auszeichnen, dienen bisherige Ansätze entweder einer lichttechnischen oder einer energetischen Optimierung des Fassadenaufbaus. Dies hat entweder eine Optimierung des visuellen Komforts (des Lichtdurchgangs) oder des thermischen Komforts und der Energieeffizienz (des Wärmedurchgangs) zur Folge. In den meisten Klimazonen kann zudem die Auslegung traditioneller Verglasungssysteme nur für wenige Situationen im Jahr optimal sein, in allen anderen Situationen müssen erhebliche Kompromisse in Kauf genommen werden.

Bei adaptiven Verglasungen ist dagegen eine Kontrolle der Licht- und Energietransmission in bestimmten Wellenlängenbereichen möglich. Inwiefern sich diese positiv auf den Innenraumkomfort und den Raumenergiebedarf auswirkt, hängt nicht nur vom Systemaufbau, sondern auch von den zugrundeliegenden Regelungsstrategien der adaptiven Fassade ab. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Möglichkeiten zur Aufhebung der Diskrepanz der genannten Optimierungsziele untersucht. Der Gegenstand der Untersuchung war eine an der Universität Stuttgart entwickelte, elektrisch steuerbare Verglasung auf Flüssigkristallbasis (s.g. TN-Verglasung), deren Transmissionseigenschaften situationsbedingt verändert werden können. Das Ziel der Arbeit war die Untersuchung der Möglichkeiten einer Komfortsteigerung bei gleichzeitiger Minimierung des Raumenergiebedarfs durch die Anwendung unterschiedlicher Regelungsstrategien der genannten Verglasung.

Die Effektivität der Regelungskonzepte wurde durch den Einfluss der entsprechend geschalteten Verglasung auf die Behaglichkeit und die Minimierung des Kühl-, Heiz- und Be-

leuchtungsenergiebedarfs eines Modellraums simulativ evaluiert. Hierfür wurde eine Simulationsmethode zur kombinierten lichttechnischen und thermischen Simulation vorgeschlagen und angewendet. Die Untersuchungen zur Komfortoptimierung wurden mittels einer Parameterstudie und einer multikriteriellen Optimierung vorgenommen und anschließend in Ansteuerungskonzepte der schaltbaren Verglasung umgesetzt. Repräsentative Simulationsergebnisse wurden durch Messungen in einem großmaßstäblichen Prototyp, einem Fassadentestgebäude mit Einzelbüroräumen in Stuttgart, validiert.

Durch numerische und experimentelle Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Unterteilung der TN-Verglasungen in einzeln ansteuerbare Bildpunkte die Trennung der Blendschutzfunktion von der Sonnenschutzfunktion der Verglasung ermöglicht. Während der Heizsaison kann durch die partielle Abdunklung der Verglasung eine Blendschutzfunktion ausgebildet werden, bei gleichzeitiger Nutzung solarer Gewinne. In der Kühlsaison werden die Schutzfunktion vor übermäßiger Solarstrahlung sowie die Blendschutzfunktion benötigt. Hier kann die Verglasung zur Reduzierung des Kühlaufwands beitragen. Hinsichtlich des thermischen Komforts konnten bei einer geeigneten Auslegung des Verglasungssystems trotz ausgeprägter Absorptionseigenschaften der schaltbaren Zellen keine negativen Auswirkungen in Form von strahlungsasymmetriebedingter Unbehaglichkeit festgestellt werden. Durch die Veränderung der Transmissionseigenschaften der Verglasung werden hauptsächlich visuelle Innenraumbedingungen verändert. In fasadennahen Raumbereichen ermöglicht die TN-Verglasung eine bessere nutzbare Raumausleuchtung als bei Referenzverglasungen (sowohl ohne Sonnenschutzelemente als auch mit außenliegenden, mechanischen Sonnenschutzsystemen). Insbesondere Regelungsstrategien mit Berücksichtigung der Innenraumhelligkeit führen zur Verbesserung des visuellen Komforts im Vergleich zu Referenzverglasungen.

Gesamtenergetisch betrachtet, stellen die TN-Verglasungen eine Alternative zu Referenzverglasungen mit externer Verschattung dar. Durch die simulationsbasierte Analyse der Raumenergiebedarfe konnte nachgewiesen werden, dass durch die entwickelten Regelungsstrategien sowohl die Potentiale der hellen Verglasungszustände hinsichtlich der Tageslichtversorgung und der Nutzung solarer Energiegewinne in der Heizsaison, als auch die Potentiale der dunklen Verglasungszustände bezüglich der dabei ausgeprägten Sonnenschutzfunktion ausgenutzt werden. Dadurch bestätigt sich die Fähigkeit der analysierten adaptiven transparenten Fassaden, auf variable Randbedingungen reagieren zu können und unter diesen Bedingungen sowohl zur Steigerung des visuellen (entscheidend) und des thermischen (im kleineren Maße) Komforts als auch zur Reduzierung des Raumenergiebedarfs beizutragen.

Abstract

(Kurzfassung)

The façade, as an interface between the interior and the exterior environment, performs multiple tasks. It should not only ensure the highest possible comfort for building occupants but also contribute to minimizing the energy demand of the building. Especially for highly glazed façades, the fulfillment of these tasks depends largely on the properties of the glazing systems used. Aesthetical and daylighting qualities of these façades are often accompanied by thermal disadvantages. Ensuring thermal and visual comfort for the building's occupants is only possible by the use of additional elements, including sun protection and glare protection systems. Optimising conventional glazing units with regard to both thermal and visual aspects is hardly possible because of their invariant properties. For many climate zones a conventional glazing system design can be optimal for a few situations in a year; under other climatic conditions tradeoffs have to be accepted.

Adaptive glazing systems on the contrary are distinguished by adjustable light and energy transmittance that could enable the elimination of the mentioned compromises. Though, the impact of these variable properties on the indoor comfort and the energy demand of the buildings depends not only on the system design, but also on its control strategy. Within the context of the work presented, control strategies for a partially switchable, liquid crystal based glazing system (TN glazing, developed at the University of Stuttgart) were developed. The subject of this dissertation was the investigation of the possibilities to enhance both visual and thermal indoor comfort with respect to the energy efficiency, by means of different control strategies for the switchable TN glazing.

The performance analysis of the proposed control strategies was carried out for a model room representing a cellular office with a fully glazed façade, considering various climatic conditions. Combined dynamic thermal and daylighting simulations were a means of these investigations. The analysis of the potentials of the glazing's transmittance variation with regard to the comfort optimisation was carried out using parameter studies and numerical optimisation. Subsequently, open- and close-loop control strategies were derived and implemented in a large-scale prototype (façade test facility with four "single office" test rooms in Stuttgart). Representative optimisation results were validated by means of the room monitoring.

The visual and thermal performance of the controlled glazing system implemented in the actual prototype shows good agreement with the simulation. The effective daylight and

shading control functionalities of the analysed glazing were proven thereby. The ability for tinting the glazing partially allows for the separation of daylight provision and glare protection functions. During the heating season, selective glare protection can be achieved by tinting the appropriate area of the glazing, enabling solar heat gains through the remaining area. During the cooling season, both sun and glare protection can be addressed in order to enhance the indoor thermal comfort and reduce cooling loads. At dynamically changing outdoor conditions, the influence of the adaptivity on the thermal comfort is limited and dependent on the thermal capacity of the room investigated (in spite of high absorptance of the switchable elements, loss in comfort due to radiation asymmetry could be excluded). Lighting conditions are mostly affected by the switching process. Particularly control strategies regarding the parameter indoor illuminance enable better visual comfort than analysed conventional glazing systems.

In terms of energy demand, the TN-glazing has the potential to replace conventional insulating glazing units with external shading elements. The developed control strategies enable exploiting the sun protection functionality of dark switching states and the potentials of light switching states in terms of daylight and heat gain provision in the heating season. This confirms the potential of the adaptive glazing system to respond to variable outdoor conditions and to enhance the visual (significantly) and thermal (slightly) indoor conditions as well as to reduce the energy demand of highly glazed buildings.

Streszczenie pracy

(Kurzfassung)

Jako przegrody między wnętrzem budynku a światem zewnętrznym, fasady muszą spełniać liczne, coraz bardziej kompleksowe wymagania. Muszą się one przyczynić nie tylko do zapewnienia komfortu termicznego i optycznego użytkowników, lecz także sprostać wymaganiom dotyczącym efektywności energetycznej. W przypadku fasad przeszklonych spełnienie tych wymagań w znacznym stopniu zależy od właściwości zastosowanych przeszkleń. Jednakże mimo ich wyjątkowej jakości architektonicznej, w większości stref klimatycznych duże przeszklone fasadowe nie są w stanie zapewnić zarówno termicznego jak i optycznego komfortu we wnętrzu bez dodatkowych mechanicznych elementów osłonowych. Systemy szklane o stałych właściwościach mogą być zoptymalizowane albo pod względem optycznym (n.p. wysoki poziom przepuszczalności światła), albo termicznym i energetycznym (n.p. niski poziom transmisji promieniowania słonecznego w celu ochrony wnętrza przed przegrzewaniem w sezonie letnim). Jak widać, optymalizacja tradycyjnych przeszkleń nie tylko nie obejmuje wszystkich wymaganych aspektów, lecz także ogranicza się do konkretnych warunków klimatycznych. W przypadkach, gdy warunki te podlegają zmianie w ciągu roku, systemy o stałych właściwościach są rozwiązaniami kompromisowymi.

W przeciwieństwie do tradycyjnych systemów, przeszklone o zmiennych właściwościach umożliwiają kontrolę przepuszczalności światła i energii w określonych zakresach długości fal. Zakres, w jakim ta selektywna kontrola właściwości wywiera wpływ na komfort użytkowników i efektywność energetyczną budynku, zależy zarówno od właściwości przeszkleń, jak i od strategii ich kontroli. W ramach niniejszej pracy zostały zbadane możliwości niwelacji dyskrepancji między optymalizacją termiczną i optyczną przeszkleń fasadowych przy pomocy procesów adaptacyjnych. W tym celu została zdefiniowana szyba zespolona z podzielonymi na piksele modułami ciekłokrystalicznymi o zmiennych właściwościach optycznych. Przeszklone na bazie modułów ciekłokrystalicznych charakteryzuje zdolność do odwracalnych zmian optycznych (przyciemnienie) pod wpływem napięcia elektrycznego. Podział na piksele umożliwia zmianę właściwości wybranych obszarów przeszkleń. Prace nad adaptacją modułów ciekłokrystalicznych do zastosowań architektonicznych prowadzone są od ok. 15 lat na Uniwersytecie w Stuttgarcie (patrz wykaz literatury). Dla zaprojektowanej szyby zespolonej zostały opracowane strategie kontroli. Przedmiotem pracy była identyfikacja takich strategii kontroli, które umożliwiają

maksymalizację komfortu optycznego i cieplnego z zachowaniem efektywności energetycznej.

Analiza efektywności zaproponowanych strategii nastąpiła na drodze dynamicznych symulacji komputerowych budynku biurowego o przeszklonej elewacji południowej, z zastosowaniem odpowiednio zsynchronizowanych programów do symulacji energetycznej i optycznej. Wpływ procesów adaptacyjnych na maksymalizację komfortu w pomieszczeniach został zanalizowany przy pomocy studiów parametrycznych, optymalizacji wieloparametrowej oraz symulacji automatycznych regulatorów. Rezultaty symulacji zostały zweryfikowane na przykładzie budynku testowego wzniesionego w skali 1:1 w Stuttgarcie.

Badania numeryczne i eksperymentalne dowiodły możliwości separacji maksymalnej przepuszczalności światła dziennego i ochrony przed olśnieniem w ramach jednego przeszklenia. Podczas sezonu grzewczego wydzielone obszary ochrony użytkowników przed olśnieniem nie udaremniają możliwości wykorzystania zysków słonecznych i światła dziennego w pozostałych obszarach przeszklenia. W okresie letnim redukcja transmisyjności energii słonecznej umożliwia ograniczenie przegrzewania pomieszczeń i zmniejszenie zapotrzebowania na energię do chłodzenia. Wpływ zastosowanych strategii kontroli przeszklenia na komfort cieplny jest pozytywny, jednak ograniczony i zależny od zdolności akumulacji ciepła przegród budynku (mimo wysokiego stopnia absorpcji modułów ciekłokrystalicznych zjawiska miejscowego dyskomfortu termicznego mogły zostać wykluczone). Zdecydowanie większy wpływ adaptacja przeszklenia wywiera na zmianę warunków świetlnych we wnętrzach. Zwłaszcza strategie uwzględniające parametr jasności w pomieszczeniu prowadzą do poprawy komfortu optycznego w pomieszczeniu, w porównaniu do systemów referencyjnych. Pod względem całkowitego zapotrzebowania budynku na energię (do chłodzenia, ogrzewania i oświetlenia sztucznego), analizowane przeszklenie okazuje się alternatywą do mechanicznych osłon przeciwsłonecznych. Zaproponowane strategie kontroli umożliwiają zarówno wykorzystanie potencjałów jasnych stanów przeszklenia umożliwiających wykorzystanie oświetlenia dziennego i zysków słonecznych, jak i ciemnych stanów hamujących efekty przegrzania i olśnienia.

Rezultaty badań dowiodły, że przy pomocy odpowiedniej kontroli analizowanego przeszklenia o zmiennych właściwościach optycznych możliwe jest zapewnienie przede wszystkim optymalnego komfortu optycznego oraz, w określonych granicach, komfortu termicznego przez cały rok, przy jednoczesnym zachowaniu korzystnego bilansu energetycznego budynku.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung.....	v
Abstract.....	vii
Streszczenie pracy	ix
1. Einleitung.....	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung	2
1.3 Untersuchungsmethoden	2
2. Grundlagenermittlung.....	5
2.1 Bauphysikalische Anforderungen an eine Fassadenverglasung.....	6
2.2 Behaglichkeitsfaktoren.....	9
2.3 Kriterien zur Bewertung des Innenraumkomforts.....	11
2.3.1 Thermischer Komfort	11
2.3.1.1 Temperatur	12
2.3.1.2 Strahlungsasymmetrie	12
2.3.1.3 Direkte Bestrahlung von Personen	13
2.3.1.4 PMV- und PPD- Werte.....	14
2.3.2 Visueller Komfort	14
2.3.2.1 Helligkeit	15
2.3.2.2 Tageslichtversorgung	15
2.3.2.3 Erfassung der Blendung	17
2.3.2.4 Sichtverbindung nach außen	20
2.4 Untersuchungen zu den Optimalbereichen wesentlicher Komfortparameter	21
2.4.1 Temperatur	21
2.4.2 Beleuchtungsstärke	22
2.4.3 Zusammenhänge zwischen den Komfortparametern	24

2.4.4	Gewichtungskonzepte	25
3.	Adaptive Verglasungen	29
3.1	Übersicht der Systeme.....	30
3.2	Eigenschaften der schaltbaren Flüssigkristallverglasung	31
3.2.1	Funktionszelle	31
3.2.1.1	Aufbau und Funktionsweise	31
3.2.1.2	Optische und strahlungsphysikalische Eigenschaften.....	35
3.2.1.3	Winkelabhängigkeit der Zelleneigenschaften.....	38
3.2.1.4	Schaltstufenzuordnung.....	41
3.2.2	Untersuchte Isolierglasaufbauten.....	43
3.2.2.1	Transmissionseigenschaften	45
3.2.2.2	Gesamtenergiedurchlassgrad	45
3.2.2.3	Selektivität.....	46
3.2.2.4	Wärmedurchgangskoeffizient.....	47
3.2.2.5	Thermisches Verhalten.....	47
3.2.2.6	Zusammenfassung optischer und bauphysikalischer Eigenschaften.....	51
3.2.2.7	Multifunktionalität und Interaktivität	55
4.	Testumgebung	57
5.	Numerische Simulationen	63
5.1	Simulationswerkzeuge	64
5.2	Rahmenbedingungen	66
5.2.1	Klimatische Bedingungen.....	66
5.2.2	Nutzungsszenario.....	69
5.2.3	Simulierte Verglasungssysteme	71
6.	Einfluss der Schaltvorgänge auf Komfortparameter.....	73
6.1	Thermischer Komfort	75
6.1.1	Einfluss des Schaltvorgangs auf die Änderung der Innentemperatur.....	75
6.1.1.1	Experimentelle Validierung: Tests im Fassadenprüfstand.....	84
6.1.1.2	Ergänzende thermische Untersuchung: Anregung für die Weiterentwicklung der TN-Verglasung	86
6.1.2	Strahlungsasymmetrie	87
6.1.3	Direkte Bestrahlung von Personen	88

6.1.4	PMV-Werte	90
6.2	Visueller Komfort	93
6.2.1	Einfluss des Schaltvorgangs auf die Änderung der Beleuchtungsstärke	93
6.2.1.1	Experimentelle Validierung: Tests im Fassadenprüfstand	95
6.2.2	Tageslichtversorgung	96
6.2.3	Blendung	97
6.2.4	Sichtverbindung nach außen	102
6.3	Gewichtung der Komfortparameter: Optimierungsalgorithmus für repräsentative Wetterbedingungen	104
6.3.1	Definition des Optimierungsproblems	104
6.3.2	Pareto-Analyse	108
6.3.3	Optimierung mit GenOpt	110
6.4	Energetische Betrachtung der Schalteinflüsse	115
7.	Regelungskonzepte	123
7.1	Recherche zu Regelungs- und Steuerungskonzepten für Beleuchtungs- und Verschattungssysteme	124
7.1.1	Künstliche Beleuchtung	124
7.1.2	Sonnenschutzvorrichtungen	125
7.1.3	Elektrochrome Verglasungen	126
7.1.4	Erkenntnisse für die Ansteuerung von TN-Verglasungen	129
7.2	Entwicklung von Regelungskonzepten für eine schaltbare Flüssigkristallverglasung	129
7.2.1	Leitidee: Trennung der Blendschutzfunktion von der Sonnenschutz- und Lichtversorgungsfunktion	129
7.2.2	Transmissionsregelung nach ausgewählten Parametern	131
7.2.3	Iterative Regelungs- und Steuerungsstrategien I - VI	136
7.2.4	Strategie VII: P-Regler	141
8.	Untersuchungen zur Effektivität der Regelungskonzepte	145
8.1	Analyse der Adaptationsvorgänge an repräsentativen Tagen	145
8.1.1	Simulationsergebnisse	145
8.1.2	Messtechnische Untersuchungen	154

8.2	Analyse der Abdunklungshäufigkeiten im Jahresverlauf.....	160
8.3	Thermischer Komfort im Jahresverlauf	162
8.4	Visueller Komfort im Jahresverlauf.....	163
	8.4.1 Tageslichtversorgung.....	163
	8.4.2 Blendung.....	165
8.5	Energetische Jahresanalysen der Regelungsstrategien am Beispiel des Standorts Stuttgart.....	167
	8.5.1 Variantenstudie der Simulationsparameter.....	167
	8.5.1.1 Anlagenwirkungsgrade	167
	8.5.1.2 Jalousieneinstellung	169
	8.5.1.3 Kühlsollwert.....	171
	8.5.1.4 Interne Wärmegewinne.....	172
	8.5.2 Energetischer Vergleich der Ansteuerungsstrategien.....	173
	8.5.3 Ergänzende energetische Untersuchung: Anregung für die Weiterentwicklung der TN-Verglasung.....	176
8.6	Energetische Jahresanalysen für weitere Standorte	178
9.	Zusammenfassung und Ausblick.....	181
9.1	Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse.....	181
9.2	Anregungen für weiterführende Arbeiten.....	183
10.	Anhang 1: Dokumentation des Fassadentestgebäudes	185
11.	Anhang 2: Dokumentation der Leuchtdichtemessungen	189
12.	Anhang 3: Detaillierte Darstellung iterativer Ansteuerungsstrategien	193
13.	Anhang 4: Tagesprofile der Solarstrahlung	201
14.	Verzeichnisse	203
14.1	Bezeichnungen und Symbole	203
14.2	Abbildungsverzeichnis.....	206
14.3	Tabellenverzeichnis	216
14.4	Literatur.....	218

1. Einleitung

1.1 Motivation

Angesichts der Notwendigkeit einer Minimierung des Energiebedarfs von Gebäuden wird das Bauwesen immer häufiger vor die Frage nach der Anpassungsfähigkeit an die Umweltbedingungen gestellt. Die Fassade, als Schnittstelle zwischen dem Innen- und dem Außenraum, rückt dabei in den Fokus des Forschungsinteresses. Die Anforderungen an diese reichen vom Einfluss auf die Gebäudeenergiebilanz bis hin zum Beitrag zur Gewährleistung des Nutzerkomforts. Insbesondere bei transparenten Gebäudehüllen wird die Erfüllung dieser Anforderungen wesentlich durch die Eigenschaften der eingesetzten Verglasungen bestimmt. Besondere Qualitäten großflächig verglaster Fassaden hinsichtlich der Tageslichtversorgung und der ästhetischen Wirkung werden häufig ihren wärmetechnischen Nachteilen gegenübergestellt. Werden Veränderungen der Einwirkungen (veränderliche Außen- und Innenraumbedingungen) betrachtet, so zeigen sich die bisher bekannten transparenten Gebäudehüllen mit konstanten physikalischen Eigenschaften wenig anpassungsfähig. Um eine Flexibilität der transparenten Gebäudehüllen zu erzielen, wird derzeit das Prinzip der Mehrschichtigkeit angewendet. Durch die Kombination einzelner Funktionselemente wie Glas mit Beschichtungen, externer Sonnenschutz, innenliegender Blendschutz mit entsprechender Gebäudetechnik gelingt dies jedoch nur mangelhaft. Der nächste Schritt in der Entwicklung einer adaptiven Fassade sind adaptive Verglasungen. Diese zeichnen sich durch variable optische und strahlungsphysikalische Eigenschaften aus. Die Änderung der Eigenschaften kann entweder passiv (als Reaktion auf einen Auslöser, z.B. einen Temperaturanstieg) oder aktiv erfolgen. Aktive Systeme ermöglichen eine kontrollierte Beeinflussung der jeweiligen Eigenschaften, meistens durch das Anlegen einer elektrischen Spannung. Zu diesen Systemen gehören die an der Universität Stuttgart maßgeblich entwickelten schaltbaren Verglasungen auf der Basis der aus der Bildschirmtechnik stammenden Flüssigkristalltechnologie. Die schnell, nach Bedarf bereichsweise schaltbaren Zellen weisen hohe Potentiale für das Bauwesen auf, deren energetisch und komforttechnisch optimierter Einsatz blieb jedoch bisher weitgehend unerforscht.

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Wird im Innenraum sowohl thermische als auch visuelle Behaglichkeit angestrebt, so ist dies allein durch die Auslegung einer traditionellen Verglasung, ohne zusätzliche Funktionselemente und ohne Energieeinsatz, unter den meisten Bedingungen nicht möglich. Diese Verglasungen zeichnen sich durch invariante Transmissionseigenschaften für bestimmte Wellenlängenbereiche: den sichtbaren Wellenlängenbereich und den nahen Infrarotbereich des Sonnenspektrums aus. Daher dienen bisherige Ansätze entweder einer lichttechnischen oder einer energetischen Optimierung der transparenten Fassade, was entweder eine Optimierung des visuellen Komforts (des Lichtdurchgangs) oder des thermischen Komforts beziehungsweise der Energieeffizienz (des Wärmedurchgangskoeffizienten und des Gesamtenergiedurchlassgrads) zur Folge hat. In den meisten Klimazonen kann die Auslegung traditioneller Verglasungssysteme nur für wenige Situationen im Jahr optimal sein, in allen anderen Situationen müssen erhebliche Kompromisse in Kauf genommen werden. Bei adaptiven Verglasungen ist dagegen eine Kontrolle der Transmission in bestimmten Wellenlängenbereichen möglich. Inwiefern sich diese positiv auf den Innenraumkomfort und den Raumenergiebedarf auswirkt, hängt nicht nur vom Systemaufbau und den Systemeigenschaften, sondern auch von den zugrundeliegenden Regelungsstrategien zum Betrieb der adaptiven Fassade ab. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Chancen und Methoden zur Aufhebung der Diskrepanz der genannten Optimierungsziele analysiert. Das Ziel der Arbeit war die Untersuchung der Möglichkeiten einer Komfortverbesserung bei gleichzeitiger Minimierung des Raumkonditionierungsbedarfs durch die Anwendung unterschiedlicher Regelungsstrategien für elektrisch steuerbare Verglasungen auf Flüssigkristallbasis. Die Effektivität der entwickelten Regelungskonzepte wurde durch den Einfluss der entsprechend geschalteten Verglasungen auf die Behaglichkeit und die Minimierung des Kühl-, Heiz- und Beleuchtungsenergiebedarfs beurteilt.

1.3 Untersuchungsmethoden

Als Grundlage für die Problemlösung wurden sowohl Anforderungen an Fassadenverglasungen als auch Komfortbedingungen von Innenräumen auf der Basis einer Literaturrecherche analysiert (Kapitel 2). Die Systemeigenschaften der adaptiven Flüssigkristallverglasung (Kapitel 3) wurden den ermittelten Anforderungen gegenübergestellt. Die spektralen Charakteristika der Einzelkomponenten fanden dabei in der numerischen Modellierung des Verglasungssystems mit der Software Window and Optics (von Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL) Verwendung. Der Einfluss der Verglasungsadaptivität auf die jeweiligen Komfortparameter wurde mittels numerischer Simulationen untersucht. Parameterstudien mit der Software TRNEdit (von Transsolar u.a.) sowie Multiparameter-Optimierungsstudien mit der Software GenOpt (von LBNL) und TRNSYS (von Transsolar u.a.) bildeten dabei die Basis dieser, im Kapitel 6 aufgeführten, Untersuchun-

gen. Die vorgeschlagenen Regelungskonzepte der Verglasung (Kapitel 7) wurden zunächst mittels dynamischer Jahressimulationen evaluiert (Kapitel 8). Für diese gekoppelten Tageslicht- und wärmetechnischen Simulationen wurde eine Simulationsstrategie mit DAYSIM (von C. Reinhart u.a.) und TRNSYS entwickelt und angewendet. Die Überprüfung der in Kapiteln 6 und 8 aufgeführten Simulationsergebnisse erfolgte jeweils durch eine experimentelle Validierung in einem für diesen Zweck entworfenen und in Stuttgart errichteten Fassadentestgebäude. Somit konnten die Potentiale der schaltbaren Verglasung und die Effektivität der entwickelten Ansteuerungskonzepte hinsichtlich der visuellen und thermischen Komfortparameter in einem praxisnahen Kontext betrachtet werden. In Abbildung 1-1 ist das erläuterte Arbeitsprogramm schematisch dargestellt.

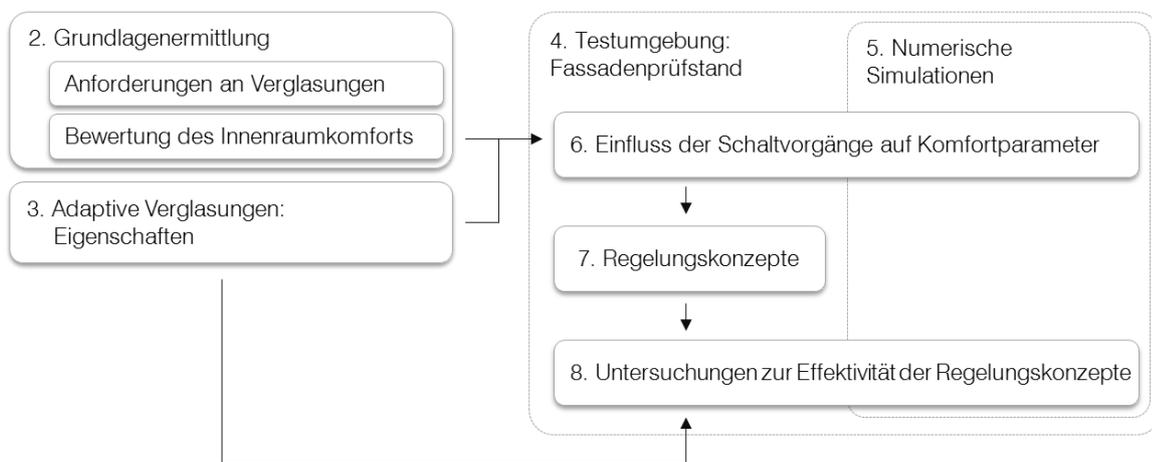


Abbildung 1-1: Darstellung der Inhalte der nachfolgenden Kapitel

2. Grundlagenermittlung

Die Anforderungen, die an Fassadenverglasungen gestellt werden, determinieren die Auswahl geeigneter Verglasungsaufbauten. Nachfolgend werden bauphysikalische Anforderungen sowie Behaglichkeitsparameter analysiert, die mithilfe der in dieser Arbeit betrachteten Verglasung beeinflusst werden können. Die Zusammenhänge zwischen diesen Komfortparametern und die anzustrebende Gewichtung der thermischen und der visuellen Komfortaspekte werden auf der Basis einer Literaturrecherche untersucht. Eine Übersicht der Inhalte dieses Kapitels und deren Wechselwirkungen mit weiteren Analysen ist in Abbildung 2-1 gegeben.

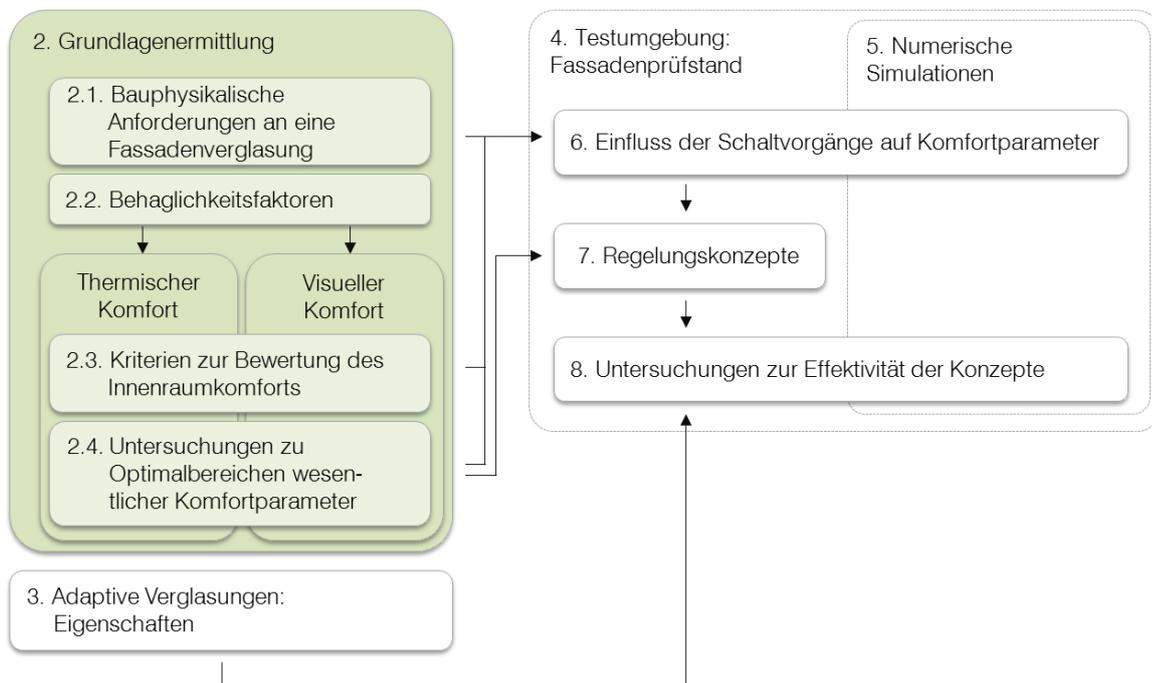


Abbildung 2-1: Inhaltsübersicht - Kapitel 2

2.1 Bauphysikalische Anforderungen an eine Fassadenverglasung

The ultimate task of architecture is to act in favor of man to interpose itself between man and the natural environment in which he finds himself, in such a way as to remove the gross environmental load from his shoulders.

James Marston Fitch im Jahr 1972 [1], zit. nach [2]

James Marston Fitch [1] fasste die Aufgaben der Architektur wie folgt zusammen: Sie muss in erster Linie dem Menschen dienen. Seine Interpretation dieses Diensts ist die Befreiung des Menschen von den Umweltbelastungen. Da die Gebäudehülle die Schnittstelle zwischen dem Nutzer und dem Außenraum bildet, kann die Aussage von James Fitch auf sie übertragen werden. Diese Interpretation der Rolle einer Gebäudehülle korrespondiert mit ihrem ursprünglichen Verständnis. Der Schutz vor den Kräften der Natur und der feindlichen Außenwelt war historisch gesehen der unmittelbare Anlass zur Erschaffung von Raumabschlüssen [3]. Seit der Moderne wird die Architekturwahrnehmung jedoch durch einen Paradigmenwechsel geprägt, die Gestaltungsschwerpunkte wurden neu gewichtet. Am Beispiel des Farnsworth House (Abbildung 2-2) drückte Mies van der Rohe das neue Verständnis der Gebäudehülle aus. Ihre vordergründige Rolle ist nicht mehr ausschließlich der Schutz vor Umwelteinflüssen, sondern auch die Kommunikation mit der Außenwelt. Die Natur soll auch innerhalb der Gebäudehülle jederzeit erlebbar sein, was mithilfe großzügiger Fassadenverglasungen möglich wird. Michelle Addington [2] ficht jedoch den revolutionären Charakter der modernen Fassadenarchitektur an. Die neuen Fassadenkonzepte des 20-ten Jahrhunderts sollen sich auf dem Fundament des Fortschritts in der Haustechnik entwickelt haben. Durch den Einsatz der Gebäudetechnik werde der Innenraum in solch einem konstanten Zustand gehalten, welcher jedem Erlebnis der Außenwelt fremd ist [2] (vgl. auch [4]). Im 21-ten Jahrhundert stellt sich die Frage, wie dieser Vorwurf der Unehrllichkeit widerlegt werden kann. Eine Antwort können Verglasungen liefern, die die Dynamik des natürlichen Lichts widerspiegeln ohne einen Discomfort im Raum zu verursachen und die eine energieeffiziente Raumtemperierung ermöglichen. In Kombination mit geeigneten Lüftungskonzepten können sie zur Wiederherstellung des Gleichgewichts zwischen den Schutz- und den Versorgungsfunktionen der Fassade beitragen. Diese zwei Gruppen der Fassadenfunktionen nach Hegger et al. [4] und ihre Beeinflussbarkeit durch variable Verglasungseigenschaften sind in Abbildung 2-3 dargestellt.



Abbildung 2-2: Paradigmenwechsel in der Fassadenwahrnehmung. Links: traditionelles Grassoehaus, Island, Phot. M. Husser, rechts: Farnsworth House, Mies van der Rohe, Illinois, 1950/51, Phot.: M. Hemmerling, ILEK.

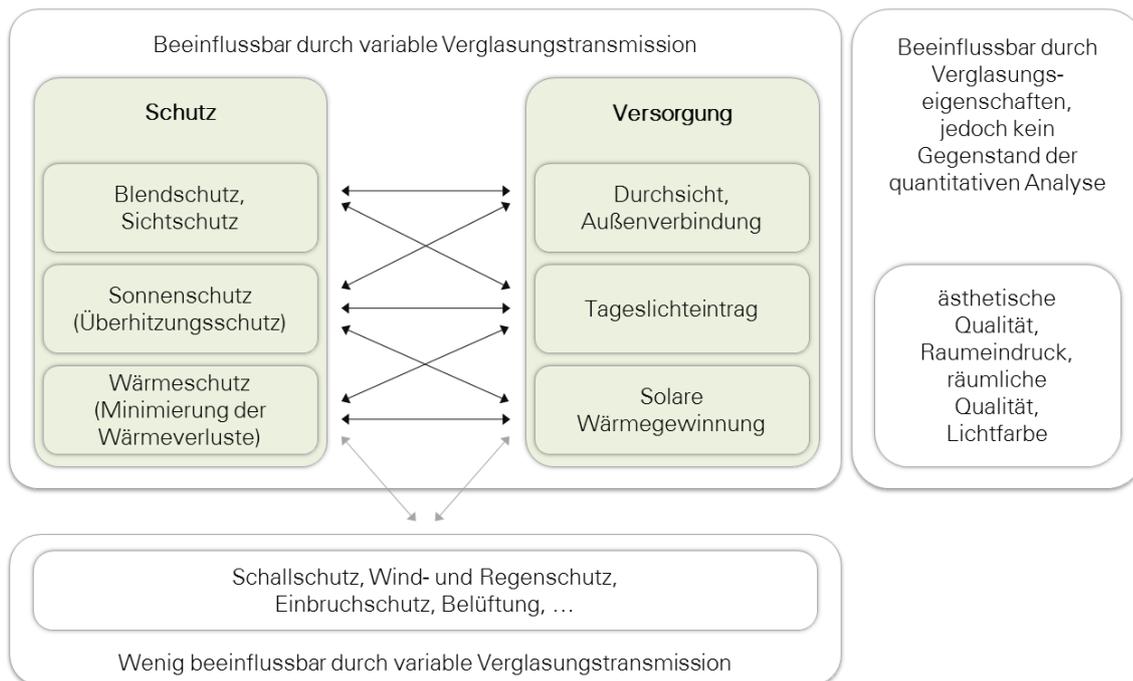


Abbildung 2-3: Schutz- und Versorgungsfunktionen der Gebäudehülle und deren Wechselwirkungen

Die Schutzaufgaben der Gebäudehülle bestehen hauptsächlich darin, den Innenraum vor Witterung zu schützen. Werden aber Behaglichkeitsanforderungen im Innenraum genauer betrachtet, so steigt auch die Vielfalt der Anforderungen an die Fassade. Sowohl sommerlicher Überhitzungsschutz als auch winterlicher Wärmeschutz sollen gewährleistet werden. Der Blendschutz und der Sichtschutz sollen nach Bedarf erfolgen können. Zur komplexen klimaregulierenden Funktion der Fassade gehören darüber hinaus Versorgungsaspekte, wie solare Wärmeengewinnung oder die Versorgung des Innenraums mit Tageslicht und der visuellen Verbindung mit dem Außenraum.

Um diesen Anforderungen zu entsprechen, erfolgt der Aufbau traditioneller Fassadenverglasungen nach dem Prinzip der Mehrschichtigkeit. Einzelne Funktionselemente wie Glas mit Beschichtungen, externer Sonnenschutz, innenliegender Blendschutz und Gebäudetechnik werden additiv kombiniert. Es wird trotzdem ersichtlich, dass die genannten Aufgaben einer Gebäudehülle bei traditionellen Verglasungselementen zu Zielkonflikten führen können, beispielsweise zwischen der Forderung nach Durchsicht und dem Schutz vor Solarstrahlung. Die Nutzung eines Sonnenschutzsystems erfolgt üblicherweise auf Kosten der Transparenz. Die Schließung herkömmlicher Jalousien als Sonnenschutzmaßnahme bedeutet eine Störung des Sichtkontakts zum Außenraum. Darüber hinaus wird der Tageslichteintrag minimiert und der Energiebedarf für künstliche Beleuchtung erhöht. Eine hohe Transparenz der Fassade zu Zeiten intensiver Solareinstrahlung kann dagegen erheblich zum Anstieg der Kühllasten und des Blendungsrisikos beitragen.

Eine aktive Steuerung des Licht- und Energieeintrags ins Gebäude ist daher essenziell. Durch die in der vorliegenden Arbeit betrachtete adaptive Verglasung wird die Kontrolle der Lichttransmission und des Energieeintrags ins Gebäude auf neuartige Weise, in einem kompakten und multifunktionalen System gewährleistet. Die Besonderheit dieser Verglasung ist die Veränderbarkeit ihres Transmissionsgrads. Seine Änderung kann nicht nur vollflächig, sondern auch partiell erfolgen. Dadurch können insbesondere während der kühlen Jahreszeiten solare Gewinne effizienter genutzt werden. Die partielle Abdunklung der Verglasung kann an den Aufenthaltsort des Nutzers im Raum angepasst werden und nur dort erfolgen, wo dies zur Vermeidung der Blendung notwendig ist. Bei Blendungsgefahr wird weder eine ganzflächige Verdunklung noch eine zusätzliche Blendschutzvorrichtung erforderlich. Dank der im Kapitel 3.2 vorgestellten variablen Eigenschaften der genannten Verglasung eröffnen sich zahlreiche Möglichkeiten zur gleichzeitigen Bewältigung der Schutz- und Versorgungsfunktionen der Fassade.

2.2 Behaglichkeitsfaktoren

Das Wohlbefinden der Menschen in Innenräumen wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Der Begriff der Behaglichkeit, häufig als Komfort bezeichnet (aus engl. „comfort“), hat sich im Bauwesen zunächst im Bereich der Klimatechnik etabliert, wo er hauptsächlich als thermische Behaglichkeit interpretiert wurde. Nach DIN EN ISO 7730 wird die Behaglichkeit als Gefühl der Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima definiert [5]. Bereits diese Definition impliziert zahlreiche Wahrnehmungsaspekte und individuelle Erfahrungswerte, die subjektive „Gefühle“ der Zufriedenheit prägen. Tatsächlich wird der Begriff der Behaglichkeit zunehmend in einem breiteren Spektrum interpretiert [3]. Um deren verschiedene Aspekte abzugrenzen, wird häufig zwischen thermischer, visueller, hygienischer oder akustischer Behaglichkeit unterschieden. Der folgenden Abbildung 2-4 können die einzelnen Behaglichkeitsfaktoren entnommen werden. Neben physikalisch messbaren Faktoren sind auch individuelle physiologische und intermediäre Faktoren für das Gefühl der Behaglichkeit ausschlaggebend. Nicht alle Faktoren können mithilfe der Adaptivität von Fassadenverglasungen beeinflusst werden. Durch die Veränderung der Transmissionseigenschaften der Verglasungen werden hauptsächlich visuelle und thermische Rahmenbedingungen verändert. Diese sind in der Abbildung 2-4 grün markiert.

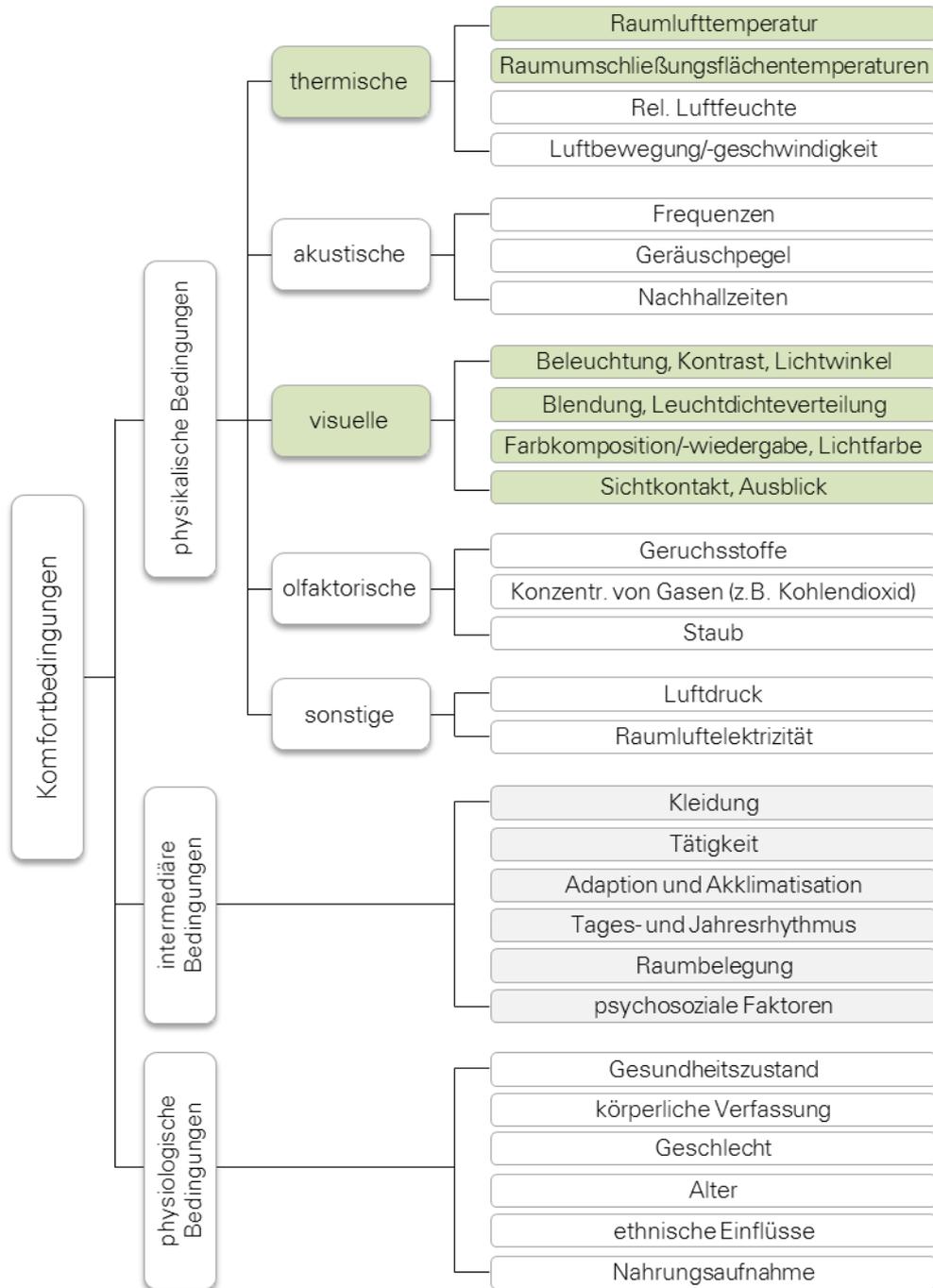


Abbildung 2-4: Erweiterte systematische Darstellung von Behaglichkeitsfaktoren auf der Grundlage von Hegger u.a. [4]. Grün: beeinflussbar durch Variabilität der Eigenschaften der untersuchten adaptiven Verglasung. Grau: durch die Verglasungen nicht beeinflussbare nutzungsspezifische Parameter, die jedoch zur Anwendbarkeitsevaluierung herangezogen werden können.

2.3 Kriterien zur Bewertung des Innenraumkomforts

2.3.1 Thermischer Komfort

Die thermische Behaglichkeit kann anhand von zwei Bedingungen beurteilt werden: das thermische Gleichgewicht des Körpers mit seiner Umgebung und das Erfüllen der thermischen Erwartungen der betroffenen Person durch das Umgebungsklima [6]. Dementsprechend kann die Beschreibung der thermischen Behaglichkeit mittels zweier Modelle erfolgen. Das Wärmebilanzmodell ist das etablierte Modell, das im Jahr 1970 von Ole Fanger [7] entwickelt wurde und unter anderem in die DIN EN ISO 7730 [5] einfließt. Das „Erwartungsmodell“ (vgl. Lawrenz [6]) basiert auf dem Konzept der menschlichen Adaption. Demnach stellt sich thermischer Komfort dann ein, „wenn das Umgebungsklima den Erwartungen der Nutzer entspricht“ [6]. Dieses Konzept findet sich in der vorrangig für nicht-klimatisierte Räume formulierten DIN EN 15251 [8], in die das sogenannte adaptive Komfortmodell nach de Dear und Bragger [9] sowie Nicol und Humphreys [10] eingegangen ist.

Das von Fanger erstellte und in die DIN EN ISO 7730 einfließende Wärmebilanzmodell wurde primär zur Auslegung raumlufttechnischer Anlagen verwendet. „Das Verfahren beruht auf der Wärmebilanz des menschlichen Körpers, wobei neben Bekleidungs- und Tätigkeitsgrad [...] auch die Lufttemperatur, die mittlere Strahlungstemperatur sowie die relative Luftgeschwindigkeit und die Raumluftheuchte mit in die Berechnung einfließen“ [11]. Berechnet werden dabei das vorausgesagte mittlere Votum und der Prozentsatz unzufriedener Nutzer, die im Kapitel 2.3.1.4 näher erläutert werden.

Strikte Vorgaben für die Umgebungsbedingungen mit einem geringen Toleranzmaß können meistens nur durch den Einsatz von Anlagentechnik eingehalten werden. In neuen Normen wird daher der Ansatz verfolgt, bei freier Lüftung höhere Temperaturen zuzulassen. Im CEN-Bericht CR 1752 wurden zuerst Gebäudekategorien A bis C zur Unterscheidung der Räume nach Erwartungsniveau hinsichtlich der Raumluftheuchte eingeführt, die in späteren Normen Eingang fanden. ASHRAE 55 unterscheidet seit der Ausgabe 2005 zwischen Gebäuden „mit großem Einfluss des Nutzers auf das Raumklima“ und Gebäuden ohne „großen Einfluss des Nutzers auf das Raumklima“ (vgl. [6]). Diese Differenzierung „entspricht [...] der praktischen Erfahrung: Wenn ein Nutzer sein Raumklima z.B. durch (Nicht-)Bedienen des Sonnenschutzes oder durch das (Nicht-)Öffnen eines Fensters beeinflussen kann, ist er ‚toleranter‘ gegenüber dem Raumklima“ [6]. Im Sommer werden beispielsweise höhere und im Winter niedrigere Temperaturen toleriert, unter der Voraussetzung einer möglichen Einflussnahme auf das Umgebungsklima. Die adaptiven Komfortmodelle gewinnen zunehmend an Bedeutung.

2.3.1.1 Temperatur

Alle bekannten Komfortmodelle führen die Temperatur als ausschlaggebende Größe für die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit. Neben der Luftgeschwindigkeit, der Luftfeuchtigkeit, intermediärer und physiologischer Faktoren, die durch eine Veränderung der Verglasungstransmission nicht wesentlich beeinflusst werden können, sind die Lufttemperatur und die Temperaturen der Raumumschließungsflächen von zentraler Bedeutung für den thermischen Komfort. Durch Wärmestrahlung von warmen Raumumschließungsflächen wird die diesen zugewandte Körperoberfläche erwärmt, kalte Flächen bewirken dagegen deren Abkühlung („Strahlungszug“). Zur Gesamtbeurteilung der Temperatureinflüsse wurde deshalb der Begriff „operative (empfundene) Temperatur“ eingeführt. Die operative Temperatur T_{op} ergibt sich aus dem arithmetischen Mittel der Lufttemperatur T_{in} und der mittleren Strahlungstemperatur der Umschließungsflächen. Für gut gedämmte Gebäude (U-Werte der Gebäudehülle im Bereich von ca. $1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$) kann nach Bernard [12] $T_{op} \approx T_{in}$ angenommen werden.

2.3.1.2 Strahlungsasymmetrie

Die sich aus Temperaturunterschieden zwischen sich gegenüberliegenden Raumumschließungsflächen ergebende Strahlungsasymmetrie (asymmetrische Strahlungstemperatur) wird in DIN EN ISO 7730 behandelt. Die resultierende Unzufriedenheit der Raumnutzer wird entsprechend Formel (2-1) im Fall einer warmen Wand und nach Formel (2-2) im Fall einer kalten Wand bestimmt.

$$PD_{\text{warm}} = \frac{100}{1 + \exp(3,72 - 0,052 * \Delta T_{\text{pr}})} - 3,5 \quad (2-1)$$

PD_{warm} - Prozentsatz der Unzufriedenen aufgrund lokaler Unbehaglichkeit bei einer warmen Wand [%]

ΔT_{pr} - asymmetrische Strahlungstemperatur [°C]

Gültigkeitsbereich: $\Delta T_{\text{pr}} < 35 \text{ °C}$

$$PD_{\text{kalt}} = \frac{100}{1 + \exp(6,61 - 0,345 * \Delta T_{\text{pr}})} \quad (2-2)$$

PD_{kalt} - Prozentsatz der Unzufriedenen aufgrund lokaler Unbehaglichkeit bei einer kalten Wand [%]

ΔT_{pr} - asymmetrische Strahlungstemperatur [°C]

Gültigkeitsbereich: $\Delta T_{\text{pr}} < 15 \text{ °C}$

Die Strahlungstemperatur ergibt sich aus der Multiplikation der Oberflächentemperaturen der im Strahlungsaustausch stehenden Teilflächen der Raumumschließung und deren Einstrahlzahlen nach Formel (2-4) [13, 14].

$$T_s = \sum_{i=1}^n \varphi_i T_i \quad (2-3)$$

T_s	- Strahlungstemperatur der Umgebung [K]
n	- Anzahl im Strahlungsaustausch stehender Flächen der Raumumschließung [-]
φ_i	- Einstrahlzahl der Fläche i [m]
T_i	- Oberflächentemperatur der Fläche i [K]

Die Einstrahlzahl der rechteckigen Fläche i beim Strahlungsaustausch zwischen dieser und einem Kugelelement, welches sich senkrecht unterhalb einer Ecke dieser Fläche befindet, kann nach Formel (2-4) berechnet werden.

$$\varphi_i = \frac{1}{4\pi} \arctan \frac{ab}{h\sqrt{a^2+b^2+h^2}} \quad (2-4)$$

φ_i	- Einstrahlzahl der Fläche i [-]
a	- Länge der Fläche i [m]
b	- Breite der Fläche i [m]
h	- Abstand des Kugelelements von der Fläche i [m]

Bei einer warmen Verglasung darf der Unterschied der Strahlungstemperaturen zwischen dieser und der gegenüberliegenden Wand ca. 23 K nicht überschreiten, damit der Prozentsatz der Unzufriedenen aufgrund lokaler Unbehaglichkeit nicht über 5 % steigt (vgl. DIN EN ISO 7730, Tabelle A.4) [5, 15]. Der entsprechende Maximalwert der Strahlungsasymmetrie aufgrund einer kalten Wand beträgt ca. 10 K.

2.3.1.3 Direkte Bestrahlung von Personen

Bereits Ole Fanger [7] hat den hohen Einfluss lokal wirkender, punktförmiger Strahlungsquellen auf das thermische Empfinden erkannt. In einer kalten Umgebung führt beispielsweise die Bestrahlung durch Infrarotstrahler zur angenehmen Erhöhung der empfundenen Temperatur [7], in einer warmen Umgebung kann jedoch eine direkte Sonneneinstrahlung eine lokale thermische Unbehaglichkeit verursachen. In DIN EN 14501 [16] wurde daher eine Klassifizierung der Sonnenschutzsysteme hinsichtlich der Schutzfunktion vor direkter Sonneneinstrahlung (und somit vor lokaler Unbehaglichkeit) eingeführt. Als Maß der Ab-

schwächung der Direktbestrahlung wird in der genannten Norm der direkt-direkte Strahlungstransmissionsgrad der Sonnenschutzeinrichtung in Verbindung mit der Verglasung definiert. Vereinfacht wird dabei der normal-normale Transmissionsgrad (für senkrechten Strahlungseinfall) angewendet¹ [16]. Die Wirksamkeit der Sonnenschutzsysteme wird in Abhängigkeit von diesem gemäß Tabelle 2-1 klassifiziert.

Sonnen- schutz- klasse	0	1	2	3	4
	(sehr geringer Schutz)	(geringer Schutz)	(mäßiger Schutz)	(hoher Schutz)	(sehr hoher Schutz)
$\tau_{sol,n-n}$	$\tau_{sol,n-n} \geq 0,2$	$0,15 \leq \tau_{sol,n-n} < 0,2$	$0,1 \leq \tau_{sol,n-n} < 0,15$	$0,05 \leq \tau_{sol,n-n} < 0,1$	$\tau_{sol,n-n} < 0,05$

Tabelle 2-1: Klassifizierung der Sonnenschutzsysteme auf der Basis des normal-normalen Strahlungstransmissionsgrads des Sonnenschutzes (in Verbindung mit der Verglasung) hinsichtlich der Auswirkung auf den thermischen Komfort nach DIN EN 14501 [16]

2.3.1.4 PMV- und PPD- Werte

Die Methode der Komfortbewertung nach dem Wärmebilanzmodell basiert auf der Berechnung des vorausgesagten mittleren Votums (PMV, Predicted Mean Vote) der Raumnutzer. Dieser Wert dient folglich zur Berechnung des Prozentsatzes Unzufriedener Nutzer (PPD, Predicted Percentage of Dissatisfied). Der PMV-Wert wird im Bereich von -3 (kalt) bis +3 (heiß) angegeben. Nach DIN EN ISO 7730 gelten $-0,5 < PMV < 0,5$ (entspricht $PPD < 10\%$) als Grenzen des allgemein gültigen Komfortbereichs für Gebäude der Kategorie B (normale Anforderungen), wohingegen in Räumen mit annehmbaren, moderaten Anforderungen (Kategorie C, z.B. Bestandsgebäude) größere Temperaturschwankungen zugelassen werden $-0,7 < PMV < 0,7$ ($PPD < 15\%$)².

2.3.2 Visueller Komfort

Visuelle Komfortparameter werden hauptsächlich in DIN EN 12464-1 [17] und DIN EN 12665 [18] behandelt. Diese Normen wurden jedoch für die Planung von Systemen zur künstlichen Beleuchtung entwickelt. Für die Untersuchung der adaptiven Fassadensys-

¹ Der Strahlungstransmissionsgrad des Glases ist bei schrägem Strahlungseinfall niedriger.

² Räume mit einem hohen Erwartungsniveau (Aufenthaltsräume für sehr empfindliche Personen, z.B. Krankenzimmer, Kategorie A), für die nach DIN EN ISO 7730 engere Grenzen von PMV und PPD gelten, befinden sich außerhalb des Betrachtungsrahmens der vorliegenden Arbeit.

teme ist die Transmission des Tageslichts entscheidend. Der positive Einfluss des Tageslichts auf das Wohlbefinden der Raumnutzer wurde in mehreren Studien bestätigt [19–31], er kann jedoch anhand der genannten Regelwerke nicht umfassend beurteilt werden. In DIN 5034 [32] wurde ein Versuch unternommen, die Besonderheit des Tageslichts in die Behaglichkeitsbetrachtung einzubeziehen. Eine Bewertung des visuellen Komforts in Gebäuden mit Berücksichtigung des Tageslichts wird auch in diversen Zertifizierungssystemen zur Förderung des nachhaltigen Bauens vorgenommen. Je nach System werden verschiedene Parameter in Betracht gezogen, für die geforderte Mindestgrenzen festgelegt werden. Parameter wie Lichtverteilung und Helligkeit, Tageslichtangebot, Ausblick (Sichtverbindung nach außen) und Blendfreiheit haben die größte Bedeutung für die Ermittlung des visuellen Komforts in Aufenthaltsräumen. Dabei wird natürliches Licht aufgrund seiner umfassenden Spektralcharakteristik dem Kunstlicht vorgezogen [33]. In den nachfolgenden Kapiteln werden lichttechnische Größen zur Quantifizierung der genannten Qualitäten erläutert.

2.3.2.1 Helligkeit

Die Beleuchtungsstärke und die Leuchtdichte sind die grundsätzlichen lichttechnischen Größen zur Quantifizierung der Helligkeit. Die Beleuchtungsstärke E (Éclairage) ist definiert als Quotient aus dem Lichtstrom und der beleuchteten Fläche. Sie wird in Lux [lx] ($1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} / 1 \text{ m}^2$) angegeben. Die Beleuchtungsstärke kann mithilfe von Beleuchtungsstärkesensoren gemessen werden und dient daher zur Beurteilung der Helligkeiten in Räumen. Sie wird jedoch mit dem Auge nicht direkt wahrgenommen.

Leuchtdichte L (Luminance) [cd/m^2], als „die von einer Fläche ausgehende Lichtstärke in eine Richtung, bezogen auf die in die Abstrahlrichtung projizierte Fläche“ [34], ist die Größe der tatsächlich wahrgenommenen Helligkeit. Sie wird bestimmt durch die Beleuchtungsstärke und die Reflexionseigenschaften der angestrahlten Oberfläche [24]. Bei einer geneigten Empfangsfläche wird der Einfluss ihres Neigungswinkels berücksichtigt.

2.3.2.2 Tageslichtversorgung

Positive Auswirkungen des Tageslichts auf das menschliche Wohlbefinden, die Zufriedenheit mit der Umgebung sowie die Gesundheit (unter anderem durch den Einfluss auf den zirkadianen Rhythmus) wurden bereits in mehreren Studien nachgewiesen (s. z.B. [19, 21–23, 29–31, 35–37]). Es stellt sich jedoch die Frage nach einer geeigneten Methode zur Quantifizierung des Tageslichtangebots in Innenräumen. Hierfür können entweder beleuchtungsstärke- oder leuchtdichtebasierte Indizes herangezogen werden. Darüber hinaus kann das Verhalten der Raumnutzer (z.B. Anwesenheitszeiten) in die Ermittlung der Indizes einfließen. Beleuchtungsstärkebasierte Indizes können weiter unterteilt werden in

jene, die unabhängig von Klima und Gebäudeorientierung berechnet werden (Tageslichtquotient TQ bzw. DF (Daylight Factor)), und klimaspezifische Indizes (Tageslichtautonomie DA (Daylight Autonomy), Continuous Daylight Autonomy (DA_{con}), nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke UDI (Useful Daylight Illuminance), Jährliche Nutzbelichtung JNB bzw. Annual Light Exposure) [38]. Leuchtdichtebasierte Indizes dienen hauptsächlich der Beurteilung der Blendungsgefahr. Die Blendungsfaktoren (UGR, DGP) werden im Kapitel 2.3.2.3 gesondert erläutert. Als Indizes mit Berücksichtigung des Nutzerverhaltens werden jährliche Profile der oben genannten Indizes während der Anwesenheitszeiten definiert (jährliche DGP- oder DA-Profile) [38].

Diese Quantifizierung kann dabei „statisch“ oder „dynamisch“ erfolgen. „Statische“ Faktoren dienen zur momentanen Analyse der Beleuchtungssituation, „dynamische“ Kennzahlen bilden die Situationen in Gebäuden unter den veränderlichen Bedingungen im Jahresverlauf nach. Unter den statischen Faktoren wird der Tageslichtquotient am häufigsten zur Ermittlung der Tageslichtversorgung eingesetzt [39]. Unter den dynamischen Faktoren hat sich bisher die Tageslichtautonomie am besten etabliert [40]. Dynamische Faktoren: UDI (Useful Daylight Illuminance) und DA_{con} (Continuous Daylight Autonomy) sind laut Reinhart, Mardaljevic und Rogers [40] ebenfalls vielversprechend, obwohl eine einheitliche Definition der ihnen zugrundeliegenden Grenzwerte der Beleuchtungsstärken weiterer Forschung bedarf und in jedem Anwendungsfall gesondert betrachtet werden muss (vgl. auch [41]).

In der vorliegenden Arbeit werden die Faktoren: Tageslichtautonomie und nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke näher betrachtet. Als Tageslichtautonomie (DA) wird der prozentuelle Anteil der Nutzungszeit (Büroarbeitszeit) während des Jahres definiert, wenn die geforderte minimale Beleuchtungsstärke (von 500 lx bzw. 300 lx³) am Messpunkt auf der Arbeitsfläche allein mit dem Tageslicht erreicht wird [42]. Die nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke (UDI) gibt den prozentuellen Anteil der Nutzungszeit während des Jahres an, wenn die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche „nutzbar“ ist. Um dies zu verifizieren, werden folgende Grenzwerte festgelegt: Nach Nabil und Mardaljevic [43] ist die Beleuchtungsstärke unter 100 lx als zu niedrig, über 2000 lx als zu hoch und daher als nicht „nutzbar“ qualifiziert [40]. Nach Nabil, Reinhart, Mardaljevic und Rogers ist die Beleuchtungsstärke über 2000 lx ein Indikator für eine hohe Wahrscheinlichkeit der Sonnenschutzbetätigung durch die Nutzer und ein mögliches Auftreten von Blendung [40, 43] (vgl. auch Kapitel 2.4.2). In der vorliegenden Arbeit werden zum besseren Vergleich mit

³ Ein beispielhafter Vergleich der DA-Werte in Abhängigkeit der geforderten minimalen Beleuchtungsstärke ist in [42] gegeben.

DA-Profilen Grenzwerte von 300 lx [44] bzw. 500 lx [17] bis 2500 lx [45] betrachtet (s. Kapitel 8.2).

2.3.2.3 Erfassung der Blendung

Laut DIN 5340 wird die Blendung „durch zu hohe Leuchtdichte oder Leuchtdichteunterschiede ausgelöste visuelle Störfempfindung mit oder ohne nachweisbare Minderung von Sehfunktionen“ [46] definiert. Wenn eine messbare Beeinträchtigung der Sehleistung festgestellt werden kann, handelt es sich um s.g. physiologische Blendung. Ist eine Beeinträchtigung der Sehleistung nicht nachweisbar und trotzdem eine Blendung subjektiver Natur auftritt, spricht man von einer psychologischen Blendung.

Bereits aus der genannten Definition der Blendung ist der hohe Stellenwert der Leuchtdichte im Bezug auf Blendungserscheinungen erkennbar. Besonders relevant und intensiv studiert wurde dieser mit der Verbreitung von Bildschirmarbeitsplätzen in den 1980er Jahren. Aufgrund von durch hohe Leuchtdichten ausgelösten Reflexionen in den Bildschirmen wurden Empfehlungen zu maximalen vertretbaren Leuchtdichtewerten formuliert, die jedoch stark in Abhängigkeit von der Reflexionsklasse der eingesetzten Bildschirme variieren. Darüber hinaus wurden Grenzwerte der akzeptablen Leuchtdichtekontraste im Arbeitsfeld definiert. Zwischen der Infeldleuchtdichte (Arbeitsaufgabe) und dem näheren Umfeld (Arbeitsplatz) wird ein Leuchtdichtenverhältnis von maximal ca. 1:3 empfohlen. Zwischen der Infeldleuchtdichte und der Leuchtdichte im fernerem Umfeld (Arbeitsumgebung) sollte das Verhältnis von ca. 1:10 nicht überschritten werden [47, 48]. Für die Leuchtdichten von Fenstern bzw. Kunstlichtquellen und benachbarten Flächen (bzw. Arbeitsaufgabe) wird ein Verhältnis von maximal 1:40 als akzeptabel genannt [47]. Beispielsweise beim Einsatz von im Jahr 2006 modernen Flachbildschirmen (mit Leuchtdichten im Bereich von 200 cd/m² - 400 cd/m²) ergäben sich demnach für einen Bildschirmarbeitsplatz „optimale“ Leuchtdichte-Kontrastverhältnisse (berechnet als einfacher Kontrastwert nach Formel (2-5) [49]) von 200 : 600 : 2000 : 8000 cd/m² [50]⁴.

$$C_{\text{simple}} = \frac{L_{\text{max}}}{L_{\text{min}}} \quad (2-5)$$

C_{simple} - Einfacher Kontrastwert [-]

⁴ Wenn Spiegelungen der Fensterflächen auf den Bildschirmen ausgeschlossen werden können, werden höhere Leuchtdichten akzeptiert als im Fall möglicher Spiegelungen (vgl. [48, 51]). Bei einer zur Fensterfront parallelen Ausrichtung des Bildschirms gewinnt die Direktblendung von der Fassade an Bedeutung.

L_{\max}	- Leuchtdichte einer hellen Fläche [cd/m ²]
L_{\min}	- Leuchtdichte einer dunklen Fläche [cd/m ²]

Da jedoch Tageslicht in Innenräumen eine positive psychologische Wirkung entfaltet und einen Bezug zur Außenwelt und zur Dynamik der Außenbeleuchtungsstärke herstellt, werden Störungen durch hohe Helligkeiten (Blendung) „abgeschwächt“ empfunden [50, 51]. Folglich können im Allgemeinen höhere Leuchtdichte-Grenzwerte angesetzt werden, insbesondere im Hinblick auf die psychologische Blendung. Laut Voss [50] ist dabei „ein Grenzwert, der die mittlere Leuchtdichte von Fensterflächen begrenzt, nur bedingt geeignet“, denn der Raumwinkel („gesehene Größe“) der potentiellen Blendquelle ist bei Blendungseffekten ebenfalls entscheidend [50]. Daher wird die Beurteilung des Diskomforts aufgrund zu hoher Helligkeiten vorrangig mithilfe von Blendungsindizes durchgeführt. Die grundlegende Gleichung für die psychologische Blendung gestaltet sich als Zusammenspiel der Größen, Lagen und Leuchtdichten der Blendquellen im Blickfeld im Verhältnis zur mittleren Leuchtdichte außerhalb der Blendquelle [52]:

$$\text{Blendung} = \sum_{i=1}^n \frac{L_{s,i}^{\text{exp}} \omega_{s,i}}{L_b^{\text{exp}} P_i^{\text{exp}}} \quad (2-6)$$

i	- Laufende Nummer der Blendquelle [-]
n	- Gesamtanzahl der Blendquellen [-]
exp	- Wichtungsexponent der jeweiligen Variablen
$L_{s,i}$	- Leuchtdichte der Blendquelle i (source luminance) [cd/m ²]
L_b	- Hintergrundleuchtdichte bzw. Umgebungsleuchtdichte (background luminance) [cd/m ²]
$\omega_{s,i}$	- Raumwinkel der Blendquelle i (Raumwinkel, unter dem die Blendquelle gesehen wird) [sr]
P_i	- Positionsindex (Wichtungsfaktor, der den Einfluss der Blendquellenposition im Sichtfeld ausdrückt, für Blendquellen zentral im Sichtfeld nimmt er den Maximalwert 1 an) [-]

Im Allgemeinen lässt sich beobachten, dass größere (ω_s) und hellere (L_s) Blendquellen das Blendungsrisiko erhöhen. Das Risiko wird dagegen durch höhere Umgebungsleuchtdichten (L_b) und größere Entfernungen der Blendquelle von der Mitte des Sichtfelds vermindert.

Ausgehend von dieser Basisgleichung haben mehrere Forscher mittels Nutzerbefragungen verschiedene Blendungsindizes entwickelt, zunächst unter Verwendung kleinformatiger Lichtquellen unter Laborbedingungen. Die Blendung durch Tageslicht wird erst seit wenigen Jahren untersucht. Folgende Blendungsermittlungsverfahren wurden bisher entwickelt (Auflistung nach [53–57]):

- Blendung durch kleine Lichtquellen (meistens Kunstlicht) kann ausgedrückt werden durch: Allgemeine Blendungsformel (Blendungsgrad) nach Hesse, DGR (Discomfort Glare Rating), GI (British Glare Index), Leuchtdichtegrenzverfahren nach Fischer und Söllner (zulässige mittlere Leuchtdichte gleichmäßig angebrachter Leuchten), CGI (CIE Glare Index), UGR (Unified Glare Rating).
- Blendung durch großformatige Lichtquellen (Tageslicht) wird mithilfe folgender Kennzahlen quantifiziert: SR (Glare Subjective Rating), DGI (Daylight Glare Index), DGI_N (New Daylight Glare Index), PGSV (Predicted Glare Sensation Vote), VCP (Visual Comfort Probability), Grenzwerte der Fensterleuchtdichten, vertikale Beleuchtungsstärke E_v , DGP (Daylight Glare Probability) und DGPs (simplified DGP).

Für den Anwendungsfall der direkten Blendung durch die im Fenster sichtbare Sonne wird der DGP-Index von Jakubiec und Reinhart [52] für am besten geeignet erachtet (es ist geplant, diesen in die neue europäische Tageslichtnorm aufzunehmen [53]). In Simulationsprogrammen wird zur Berechnung des DGP-Werts folgende Formel nach Wienold und Christoffersen [58] verwendet:

$$DGP = 5,87 \times 10^{-5} E_v + 9,18 \times 10^{-2} \log \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{L_{s,i}^2 \omega_{s,i}}{E_v^{1,87} P_i^2} \right) + 0,16 \quad (2-7)$$

DGP	- Blendungswahrscheinlichkeit durch Tageslicht (Daylight Glare Probability) [-]
E_v	- vertikale Beleuchtungsstärke am Auge des Beobachters [cd/m^2]
n	- anzahl der Blendquellen im Gesichtsfeld des Beobachters [-]
i	- laufende Nummer der Blendquelle [-]
$L_{s,i}$	- Leuchtdichte der Blendquelle i [cd/m^2]
$\omega_{s,i}$	- Raumwinkel, der von der Blendquelle i eingenommen wird [sr]
P_i	- Positionsindex der Quelle i [-]

Der zweite Term der Gleichung zeigt Parallelen zur Basisform der Blendungsgleichung (2-6), in diesem Blendungsindex sind jedoch zwei wesentliche Neuerungen inbegriffen. Die Identifizierung der Blendquellen erfolgt auf der Basis eines Vergleichs von Bereichen mit hohen Leuchtdichten und vertikaler Beleuchtungsstärke für einen Blickwinkel von 2π sr [58]. Daher können beispielsweise hoch reflektierende Raumumgebungsflächen oder eine Arbeitsplatte als Blendquellen identifiziert werden, auch wenn der bedeckte Himmel dies nicht ist. Durch die zusätzliche Einführung des ersten Terms der Gleichung wird der vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge des Beobachters als Blendungsdeterminante zusätzlich Gewicht verliehen. Daher kann auch ohne hohe Helligkeitskontraste im Blickfeld, lediglich durch hohe Absolutwerte der Beleuchtungsstärke, ein Blendungseffekt detektiert werden. Insgesamt berücksichtigt der DGP-Wert die meisten möglichen Blendungsursachen unter den bekannten Blendungsindizes [52]. Der DGP wurde im Bereich 0,2 –

0,8 validiert. Der Wert DGP = 0,4 wird als Grenzwert definiert, bei dessen Überschreitung eine hohe Wahrscheinlichkeit störender Blendung auftritt (vgl. Tabelle 2-2)⁵.

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

Tabelle 2-2: Statistische Interpretation des DGP-Werts nach Wienold und Christoffersen [58] (95 % Konfidenzintervall)

2.3.2.4 Sichtverbindung nach außen

Sowohl relevante normative Empfehlungen [17, 44] als auch Gebäudezertifizierungssysteme [60] definieren die Sichtverbindung nach außen als eine der wichtigen Voraussetzungen für den visuellen Komfort in Aufenthaltsräumen. Nach LEED beispielsweise sollte eine Sichtverbindung nach außen in mindestens 90 % aller genutzten Räume vorhanden sein, nach BREEAM müssen ihn alle Arbeitsbereiche in einer Distanz von 7 m zu einem Fenster in sitzender Augenhöhe aufweisen. Auch DGNB bezieht sie in die Bewertung des Komforts ein [60, 61]. Obwohl eine genaue Quantifizierung des Einflusses der Sichtverbindung auf den visuellen Komfort schwierig und von mehreren Parametern abhängig ist, unter anderem von der Art des Ausblicks [62] (zit. nach [40]), zeigen dennoch mehrere Forscher positive Auswirkungen auf das Wohlbefinden der Nutzer auf, die sich bei einem Ausblick nach draußen ergeben [63–69].

Für konventionelle Sonnenschutzsysteme wird in DIN EN 14501 der Sichtkontakt nach außen bei Tageslicht dadurch definiert, „dass ein sich auf der Innenseite in einem Abstand von 1 m zum vollständig ausgefahrenen Produkt [z.B. Jalousie] aufhaltender Beobachter eine Person oder einen Gegenstand erkennen kann, die (der) sich außen im Abstand von 5 m zur Jalousie oder Abschluss befindet“ [16]. Als weitere Bewertungskriterien für die Sichtverbindung können eine klare Durchsicht, Qualität der Farbwiedergabe, Verzerrungsfreiheit oder Anisotropien [70] bzw. Homogenität der Durchsicht genannt werden.

⁵ Diese Interpretation kann jedoch in Abhängigkeit von zusätzlichen Faktoren, wie z.B. Jahreszeit oder Ausblick, variieren. „Vergleichbar mit der höheren präferierten Beleuchtungsstärke werden im Frühling auch höhere DGP-Werte als „nicht blendend“ bewertet als in den anderen Jahreszeiten, dementsprechend wird im Herbst und Winter häufiger Blendung empfunden als im Frühling. [...] Der Einfluss der Nutzerbewertung des Ausblicks entspricht dem von Hopkinson (1972) und von Tuaycharoen und Tregenza (2007) beobachteten Effekt, dass umso höhere DGP-Werte als „nicht blendend“ bewertet werden, je angenehmer der Ausblick empfunden wird“ [59].

2.4 Untersuchungen zu den Optimalbereichen wesentlicher Komfortparameter

2.4.1 Temperatur

Während Fanger'sche Komfortdiagramme die in DIN EN ISO 7730 etablierten, von Außenbedingungen unabhängigen Komfortbereiche aufzeigen (Abbildung 2-5), wird in adaptiven Komfortmodellen und der DIN EN 15251 eine Flexibilität der Komfortgrenzen eingeführt. Nach DIN EN 15251 werden die Komforttemperatur und deren zugelassene Toleranzbereiche in Abhängigkeit vom gewichteten, gleitenden Mittel der Außenlufttemperatur über sieben Tage definiert. Während der Kühleisaison betragen die als behaglich empfundenen Temperaturwerte ca. 22 °C (akzeptabler Komfortbereich 20 °C bis 24 °C), während sie im Sommer auf ca. 26 °C (akzeptabler Komfortbereich 24 °C bis 28 °C) ansteigen^{6,7}. Somit können für weitere Untersuchungen Temperaturwerte von ca. 24 °C als repräsentativer Jahresmittelwert verwendet werden.

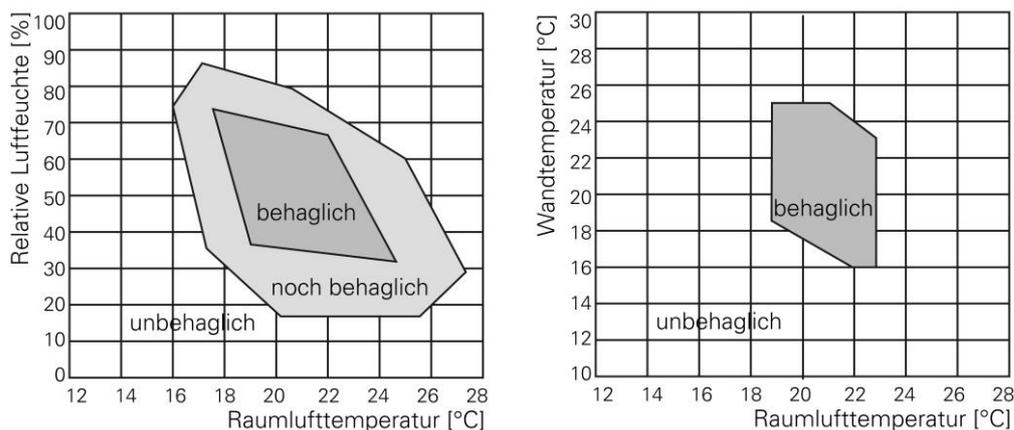


Abbildung 2-5: Fanger'sche Behaglichkeitsdiagramme [7]

Bezüglich des thermischen Komforts wird die Temperaturspanne von 20 °C bis 26 °C (empfohlen für die Auslegung von Konditionierungsanlagen in der Gebäudekategorie II nach DIN EN 15251 [8] (entspricht Kategorie B nach DIN EN ISO 7730 [5], vgl. Kapitel 2.3.1)) als Richtwertebereich in die energetischen Simulationen und zur Auslegung der Regelungsstrategien herangezogen. Eine Erhöhung der oberen Temperaturgrenze auf 28

⁶ Unter der Voraussetzung, dass der Nutzer seine Bekleidung je nach Jahreszeit variieren kann

⁷ Eine Zusammenfassung der Temperaturempfehlungen für statische und adaptive Komfortmodelle nach aktuellen Richtlinien ist in [71] gegeben.

°C in Anlehnung an adaptive Komfortmodelle (s. Kapitel 2.3.1) wird als Alternative zur Auslegung der Regelungsstrategien untersucht.

2.4.2 Beleuchtungsstärke

Die horizontale Beleuchtungsstärke auf der Höhe der Arbeitsfläche dient als eines der anerkannten Mittel zur Beurteilung von Helligkeitsniveaus in Räumen. Werte von mindestens 300 lx bis 500 lx werden dabei für Büroarbeitsplätze empfohlen [17, 72]. Bei Räumen, die ausschließlich durch Tageslicht beleuchtet werden, beträgt der normative Mindestwert 300 lx [17]. Laut LEED-Zertifizierung bedeutet sogar eine Beleuchtungsstärke von 269 lx am Mittag der Tagundnachtgleiche in mindestens 75 % der genutzten Räume auf der Höhe der Arbeitsfläche eine ausreichende Tageslichtversorgung [72]. Mehrere Studien weisen jedoch darauf hin, dass Nutzer wesentlich höhere Beleuchtungsstärkeniveaus bevorzugen. Nach Heinzerling et al. [73] führen erst Helligkeiten ab ca. 750 lx bzw. 1250 lx zu einer Zufriedenheit der ca. 80 % - 100 % Nutzer. Als optimal wird überwiegend (vgl. Tabelle 2-3) der Bereich von ca. 1200 lx bis 1250 lx eingestuft. Eine Zusammenfassung der Studienergebnisse ist in Tabelle 2-3 gegeben.

Quelle	Untere Grenze [lx]	Obere Grenze [lx]	Optimum [lx]
DIN EN 12464-1 [17]	500 (überwiegend Kunstlicht)	-	-
DIN 5034-1 [44]	300 (Tageslicht)	-	-
Moosmann (2014) [59]	-	-	Ca. 650 – 1350 (1050 - 1100 im Frühling, 650 im Sommer, 850 - 1350 im Herbst, 750 - 1250 im Winter) (Jahresmittel bei Nutzern unter 30 Jahren: 1150, über 50 Jahre: 850)
Mäkitalo (2013) [74]	500	-	-
Fernandes, Lee und Ward (2013) [63]	800	-	-
Mardaljevic u. a. (2012) [72]	300	3000	-
Cao u. a. (2012) [75]	100	2100	1000 – 1200
Loonen (2010) [76]	700	-	-
Wienold (2007a) [77]	300	-	-
Wienold (2007b) [78]	-	-	1500 – 3000 (Ca. 2600 bei kleinen bis mittleren Fenstergrößen, ca. 3300 bei großen Fenstergrößen)
Schuster (2006) [37]	-	3750 (am Auge)	Ca. 1200 - 1250 (1000 morgens, 1500 mittags)
Nabil, Mardaljevic (2005) [43]	100	2000	500 - 2000
Vine u.a. (1998) [79]	-	-	Ca. 650 - 1500 morgens, 250 - 1050 nachmittags

Tabelle 2-3: Übersicht der Studienergebnisse zu zulässigen und optimalen Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsfläche (Werte gerundet)

2.4.3 Zusammenhänge zwischen den Komfortparametern

Beispiele von statistischen Analysen im Zuge der Bewertung der Innenraumklima-Qualität (Indoor environmental quality (IEQ) Assessment), die in den letzten Jahren zunehmend im Gebäudebetrieb durchgeführt wurden, spiegeln die Bandbreite der Komfortempfindungen wider. In diesem Bereich tätige Forscher wie Wong oder Huang postulierten, die jeweiligen Komfortparameter nie einzeln zu betrachten. Wie am Beispiel der Abbildung 2-6 ersichtlich ist, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Zufriedenheit mit einem der Komfortparameter (Temperatur) und dem Niveau der jeweils anderen (Beleuchtungsstärke, aber auch Schallpegel oder Luftqualität).

Wong u.a. [80] führten Nutzerbefragungen in Bürogebäuden in Hong Kong durch, wobei sie mittels multipler Regressionsanalyse Formeln für die Zufriedenheit mit den einzelnen Parametern des Innenraumklimas sowie für die allgemeine Zufriedenheit mit der Innenraumumgebung erstellten. Im Rahmen der verfügbaren Wertebereiche haben Wong u.a. die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern jeweils paarweise untersucht. Diese sind in Abbildung 2-6 beispielhaft für die Temperatur und die Beleuchtungsstärke dargestellt. Ein Diagramm der Zufriedenheit mit der Beleuchtungsstärke und der Temperatur nach Huang u.a. [81] ist in Abbildung 2-7 dargestellt. Demnach wird beispielsweise bei höheren Beleuchtungsstärken ein größeres Temperaturspektrum akzeptiert als in einer dunklen Umgebung.

Diese Zusammenhänge implizieren die Notwendigkeit der bestmöglichen Erfüllung sowohl thermischer als auch visueller Komfortbedingungen.

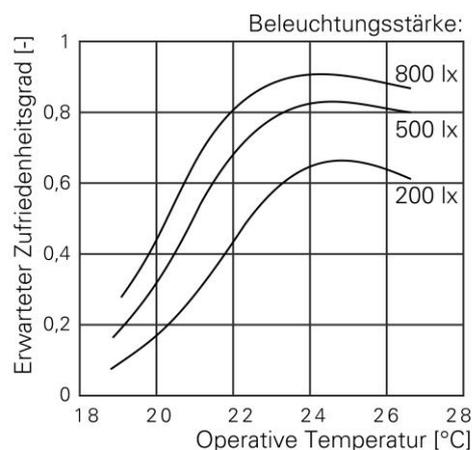


Abbildung 2-6: Zusammenhang thermischer und visueller Komfortparameter bei der Beurteilung der Zufriedenheit mit der Innenraumumgebung nach Wong et al. [80]

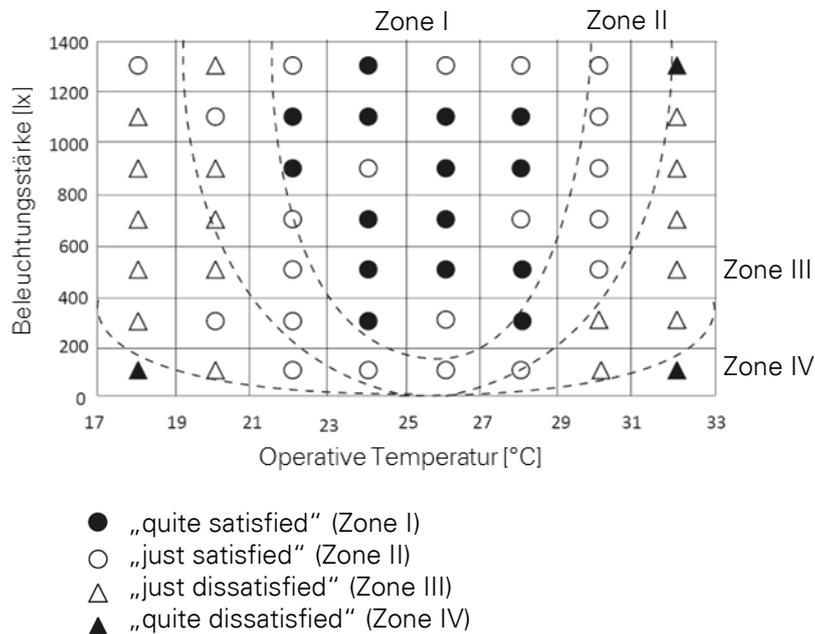


Abbildung 2-7: Zufriedenheit mit operativer Temperatur in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke nach Huang et al. [81]

2.4.4 Gewichtungskonzepte

Die Zusammenhänge der jeweiligen Komfortparameter sind nicht immer symmetrisch. Manche der Parameter weisen einen größeren Einfluss auf die Gesamtzufriedenheit mit der Umgebung auf als andere Parameter. Ein Extremfall dieser unterschiedlichen Gewichtungen ist z.B. das von Huang et al. [81] formulierte, allerdings umstrittene (vgl. z.B. Gossauer [82]) „veto-Recht“ der Parameter Temperatur und Geräuschpegel. Eine Unzufriedenheit mit diesen Faktoren verursache automatisch eine Gesamtunzufriedenheit mit der Umgebung (im Gegensatz zu anderen Parametern, auf deren Änderungen der Mensch mit einer geringeren Empfindlichkeit reagiert). Kim und de Dear [83] führten eine Unterteilung der Komfortparameter in „Basic-“, „Bonus-“ und „Proportionalfaktoren“ ein. Laut den Autoren werden bestimmte Parameter, „Basic“-Faktoren, bei einer Zufriedenheit mit dem Umgebungsklima als „selbstverständlich“ angenommen und gewinnen erst dann an Bedeutung, wenn sie Unzufriedenheit verursachen. Andere Faktoren erscheinen dagegen genauso wichtig, wenn sie zufriedenstellendes Niveau erreichen wie bei unbehaglichen Werten. In diesem Fall handelt es sich um „Proportionalfaktoren“. „Bonus-Faktoren“ würden bei zu niedrigen Werten keine Gesamtunzufriedenheit mit der Umgebung verursachen. Daraus ergeben sich je nach Zufriedenheitsgrad unterschiedliche Gewichtungsfaktoren für die Komfortparameter.

Bereits im Jahr 1989 veröffentlichte Vischer [84] Befragungsergebnisse aus Bürogebäuden in den USA. Mittels statistischer Auswertung berechnete sie Korrelationen der einzelnen Komfortparameter mit der von den Nutzern selbst eingeschätzten Produktivität und mit ihren gesundheitlichen Beschwerden. Demnach haben der thermische und der visuelle Komfort am Arbeitsplatz vor allem einen Einfluss auf das Gesundheitsempfinden der Nutzer (hierbei ist der thermische Komfort wichtiger) und die Zufriedenheit mit der Beleuchtungssituation ist einer der drei wichtigsten Faktoren für die allgemeine Zufriedenheit mit dem Arbeitsplatz. Nachfolgend wird eine Übersicht der Gewichtungskonzepte anhand der Literaturrecherche gegeben. Die meisten Konzepte stammen aus dem Forschungsbereich der IEQ (Indoor Environment Quality)-Analyse, die in meist neu errichteten Gebäuden auf der Basis der Nutzerbefragung durchgeführt wird. Der von Marino u.a. [85] vorgeschlagene Komfortindex (abgeleitet aus Befragungen im europäischen Projekt HOPE [86]) basiert zudem auf der Berechnung von s.g. EQI-Index (Environment Quality Index) und BQI-Index (Building Quality Index). Ncube und Riffat [87] entwickelten ein Computerprogramm zur Einschätzung der Behaglichkeit in klimatisierten Bürogebäuden in Großbritannien (Indoor Environment Quality Assessment Tool). Die Gewichtungskoeffizienten einzelner Komfortparameter wurden dabei auf der Basis von Befragungen von 68 Büroangestellten berechnet. Zum Vergleich zogen die Autoren einen nach der von Chiang u.a. [88] vorgeschlagenen AHP-Methode (Analytical Hierarchy Process) berechneten Koeffizienten hinzu⁸. Darüber hinaus wiesen Ncube und Riffat auf die Notwendigkeit einer weiteren Anpassung der Gewichtungsfaktoren an bestimmte Randbedingungen hin. Gemäß Literaturrecherche von Frontczak und Wargocki [89] werden bei den meisten Untersuchungen die thermischen Bedingungen als wichtiger erachtet als die visuellen Bedingungen. Heinzerling et al. [73] führten ähnliche Literaturrecherche durch, wobei sie auf große Diskrepanzen zwischen den jeweiligen Ergebnissen und den Datenerfassungsmethoden der referenzierten Forscher stießen. Die von Humphreys [90] veröffentlichten Ergebnisse der statistischen Erhebungen im Rahmen eines europaweiten Projekts SCATs (Smart Controls and Thermal Comfort) in Büroräumen in Jahren 1998 und 1999 zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Komfortbewertungen in den einzelnen Ländern auf. Der Autor begründete sie mit soziokulturellen Differenzen. Auf die Komplexität der Betrachtungsweisen wies auch Schakib-Ekbatan [91] hin, die aus Ergebnissen der Nutzerbefragungen in neun Bürogebäuden eine ähnliche Wichtigkeit der Lichtverhältnisse und der Raumtemperatur ableitete, welche darüber hinaus mit zusätzlichen Faktoren wie räumli-

⁸ Obwohl die einzelnen Koeffizienten Unterschiede von bis zu 53 % aufweisen, sollen nach Aussage der Autoren beide Modelle sehr gut miteinander und mit tatsächlichen Befragungsdaten übereinstimmen: "Both methods also showed close agreement with the surveyed IEQ data" [87].

chen Bedingungen, Möblierung oder Sauberkeit zusammenhängen. Diese Aussagen stellen eine rigoristische Interpretation der Gewichtungskoeffizienten für Komfortparameter in Frage.

Da bei den jeweiligen Autoren die Gewichtung der jeweiligen Parameter nach unterschiedlichen Systemen erfolgt (z.B. von 0 bis 10 oder von 0 bis 1), wurde sie in der nachfolgenden Zusammenfassung auf die Summe 1 normiert. Die normierten Gewichtungsfaktoren können den Vergleichsdiagrammen: Abbildung 2-8 und Abbildung 2-9 entnommen werden.

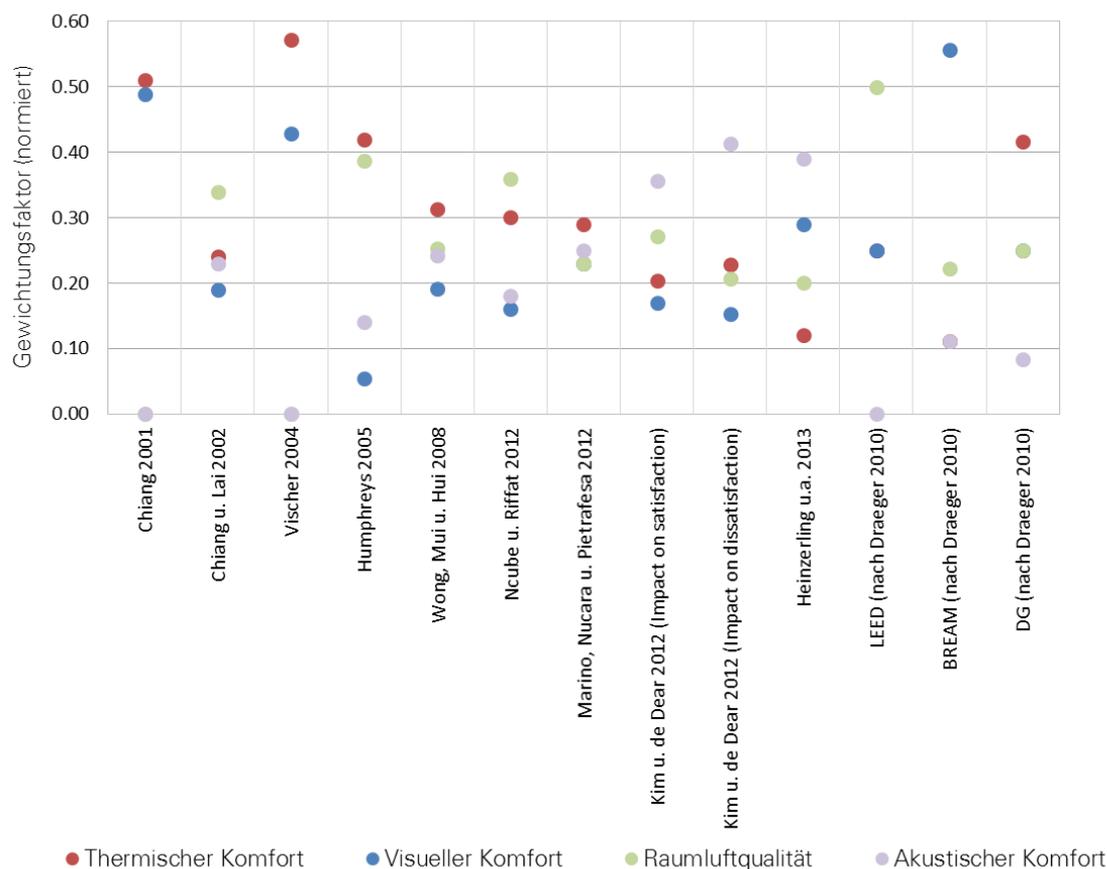


Abbildung 2-8: Gewichtungsfaktoren für thermische, visuelle, akustische und olfaktorische Komfortaspekte gemäß Literaturrecherche

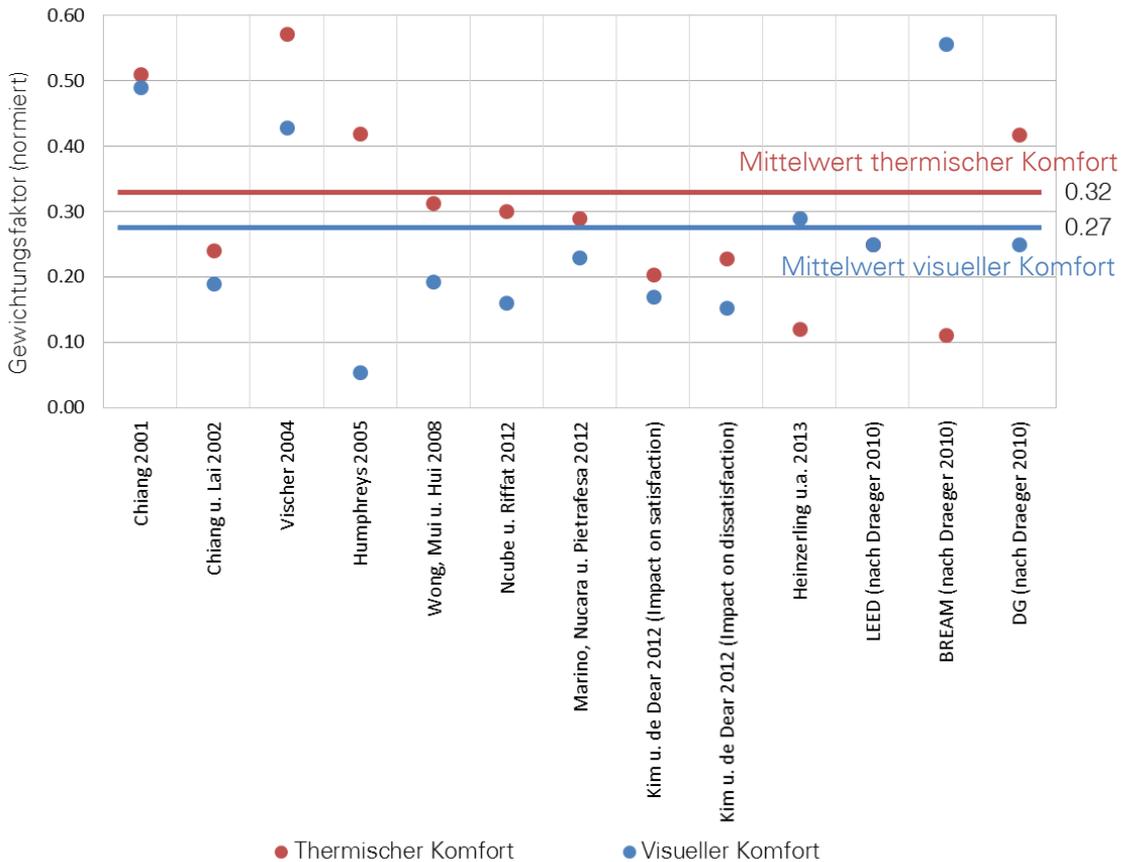


Abbildung 2-9: Mittelwerte aus den recherchierten Gewichtungsfaktoren für den thermischen und den visuellen Komfort

Die thermischen und die visuellen Komfortaspekte sind demnach die Parameter mit dem größten Einfluss auf die Gesamtzufriedenheit mit dem Innenraumklima. Da die thermischen und die visuellen Komfortaspekte sich von entscheidender Bedeutung für das Wohlbefinden in Aufenthaltsräumen erwiesen, ist deren Optimierung mithilfe schaltbarer Verglasungen das Hauptziel der vorliegenden Arbeit.

Die aus den von den zitierten Forschern untersuchten Gewichtungsverhältnissen gebildeten Mittelwerte zeigen einen leicht höheren Stellenwert des thermischen Komforts im Verhältnis zum visuellen Komfort, wobei der Unterschied lediglich geringfügig und abhängig von den jeweiligen Studienbedingungen ist.

3. Adaptive Verglasungen

Während bei statischen Verglasungen die Sonnen- und Blendschutzfunktionen von zusätzlichen Komponenten erfüllt werden, zielt die Entwicklung adaptiver Verglasungssysteme auf die Integration möglichst vieler Funktionen in einem Element ab (s. Abbildung 3-1). Ein besonderes adaptives System ist die behandelte substrukturierte, flüssigkristallbasierte Verglasung. Nach einer Übersicht der auf dem Markt vorhandenen adaptiven Verglasungssysteme wird diese detailliert charakterisiert.

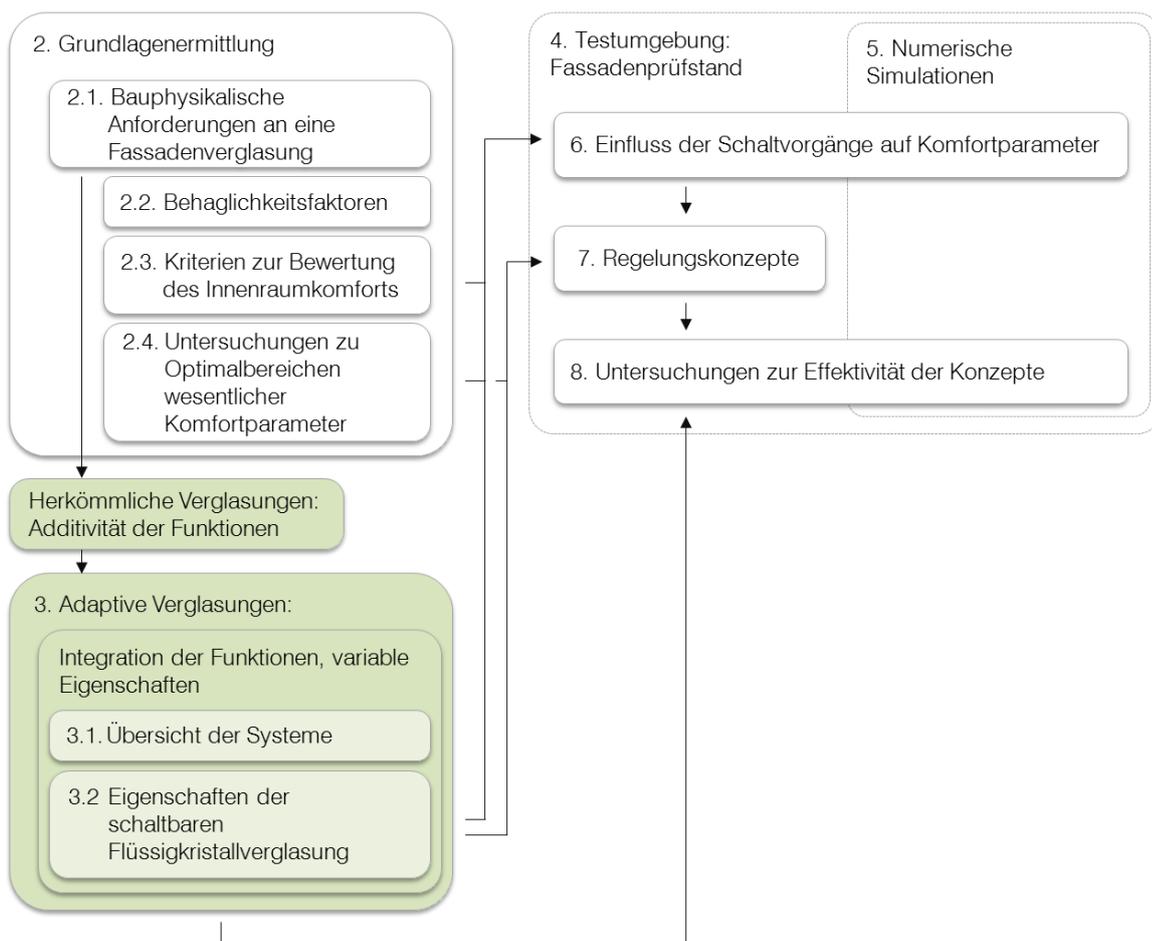


Abbildung 3-1: Inhaltsübersicht - Kapitel 3

3.1 Übersicht der Systeme

Seit über zwanzig Jahren werden zahlreiche Verglasungssysteme mit variablen Eigenschaften entwickelt und verschiedene Funktionsprinzipien untersucht. Eine umfassende Übersicht der verfügbaren adaptiven Verglasungen, deren Charakteristika und Analysen der Auswirkung auf den Nutzerkomfort und den Energiebedarf von Gebäuden ist im Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Adaptive Verglasungssysteme“ [41] gegeben. Grundsätzlich können die adaptiven Verglasungssysteme in passive und aktive Systeme unterteilt werden. Passive Systeme verändern ihre Eigenschaften automatisch als Reaktion auf eine Zustandsveränderung des Auslösers (meist Temperatur oder Sonnenlicht). Bei aktiven Systemen erfolgt die Veränderung der Licht- und/oder Energietransmission in Abhängigkeit einer, beispielsweise elektrischen, Steuergröße. Repräsentativ für die passive Wirkungsweise sind phototrope, thermotrope und thermochrome Verglasungen. Zu aktiven Systemen gehören z.B. elektrochrome und gasochrome Verglasungen, Suspended-Particle-Devices (SPD), Systeme auf Basis von Polymer-Dispersed Liquid Crystals (PDLC) oder schaltbare Spiegel auf Metallhybridbasis.

Die meisten aktiven Systeme sind in allen Schaltzuständen transparent und variieren ihre Lichtdurchlässigkeit durch Abdunklungsvorgänge, wohingegen beispielsweise PDLC- oder thermotrope Systeme ihren Zustand zwischen transparent und transluzent verändern [41, 92]. Die bereits als "privacy-Glas" erhältlichen PDLC-Systeme können nicht zur Kontrolle des Energieflusses durch die Fassade verwendet werden, da der Schaltvorgang lediglich die Transparenz, nicht die Menge des durchgelassenen Lichts, beeinflusst. Die elektrochromen Verglasungen auf Wolframoxid-Basis sind bereits für Fassadenanwendungen kommerziell verfügbar. Deren Abdunklungsvorgang geht mit einer bläulichen Verfärbung einher und resultiert in einer Veränderung sowohl des Licht- als auch des Energieflusses. Elektrische Energie wird dabei nur während des Umschaltvorgangs benötigt. Ihr größter Nachteil besteht jedoch in der relativ geringen (und temperatur- und formatabhängigen) Schaltgeschwindigkeit. Das Schalten einer ca. 2,2 m² großen Verglasung zwischen zwei Extremzuständen dauert bei Frühlingstemperaturen (gemessen bei ca. 10 °C) ca. 17 Minuten. Ein anderes System mit klarer Durchsicht in allen Schaltzuständen ist das SPD-System. Diese Verglasungen charakterisieren zwar kurze Schaltzeiten, aber auch eine hohe Betriebsspannung von ca. 80 V, die auch zum Halten des hellen Zustands benötigt wird. Darüber hinaus besitzen sie einen sichtbaren Gelbstich [41, 93]. Die an der Universität Stuttgart maßgeblich entwickelten schaltbaren, flüssigkristallbasierten Verglasungen, die in der vorliegenden Arbeit behandelt werden, weisen ebenfalls kurze Schaltzeiten auf, können farbneutral ausgeführt werden und sind frei von Trübungseffekten. Ihre Eigenschaften werden nachfolgend erläutert.

3.2 Eigenschaften der schaltbaren Flüssigkristallverglasung

Die entscheidende Funktionalität der betrachteten schaltbaren Verglasung ist durch ein dünnes, in den Isolierglasaufbau eingebettetes Funktionsmodul („TN-Zelle“) gegeben, dessen Aufbau und Eigenschaften nachfolgend dargelegt werden.

3.2.1 Funktionszelle

3.2.1.1 Aufbau und Funktionsweise

Die TN-Zelle besteht aus zwei Dünnglasscheiben, zwischen denen eine wenige Mikrometer dicke Flüssigkristallschicht eingeschlossen ist. Während klassische, feste Kristalle dreidimensionale Strukturen bilden, bei denen die Elementarzelle in drei Raumrichtungen wiederholt vorkommt, tritt der periodische Aufbau der Flüssigkristalle nur in einer oder zwei Richtungen auf [94]. Die Flüssigkristalle weisen sowohl bestimmte Eigenschaften von Flüssigkeiten (z.B. Fließverhalten) als auch elektrische und optische Eigenschaften von kristallinen Feststoffen (z.B. starke Doppelbrechung) auf.

Je nach Impuls zur Strukturbildung werden Flüssigkristalle in zwei Gruppen unterteilt: thermotrope Flüssigkristalle (mit Anwendung in der Technik) und lyotrope Flüssigkristalle (mit Anwendung hauptsächlich in Waschmittelindustrie und Pharmazie). Thermotrope Flüssigkristalle werden unterhalb ihrer Schmelzpunkt-Temperatur zu Festkörpern, zwischen dem Schmelzpunkt und dem Klärpunkt nehmen sie eine flüssigkristalline Form an, oberhalb der Klärpunkt-Temperatur werden sie isotrop. Lyotrope Flüssigkristalle entstehen durch Zugabe eines Tensids⁹, daher ist die Bildung von lyotropen Flüssigkristallstrukturen nicht nur von der Temperatur, sondern vor allem von der Tensidkonzentration abhängig [95].

Je nach Form und Orientierung der Moleküle zueinander werden unterschiedliche Phasen von Flüssigkristallen unterschieden. Die einfachste von ihnen ist die nematische Phase, die häufig von Flüssigkristallen mit kalamitischer (stäbchenförmiger) Molekülgestalt angenommen wird [94]. Die meisten thermotropen Flüssigkristalle besitzen eine kalamitische Molekülform. In der nematischen Phase weisen die Längsachsen der Moleküle eine Vorzugsrichtung auf. Befinden sich die Moleküle im elektrischen Feld, so wirkt darauf ein Drehmoment, das ihre Ausrichtung beeinflusst. Die schnelle Ausrichtung und die optische Anisotropie von nematischen Flüssigkristallen im elektrischen Feld wurde Mitte der

⁹ Tensid: „Lösungsvermittler“, Substanz, die die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit oder die Grenzflächenspannung zwischen zwei Phasen herabsetzt, sodass Dispersionen von z.B. zwei eigentlich nicht miteinander mischbaren Flüssigkeiten, wie Öl und Wasser, möglich werden

1960er Jahre zur Grundlage für die Funktionsweise von Flüssigkristallanzeigen und -bildschirmen (LCD) [96].

Die in der Bildschirmtechnik etablierte Technologie wurde auch in der betrachteten schaltbaren Verglasung verwendet. Eingesetzt wurde hier ein thermotroper Flüssigkristall in der verdrillt-nematischen (twisted nematic, TN) Phase, platziert zwischen zwei Glassubstraten. Durch transparente Orientierungsschichten auf den Innenflächen der beiden Glasscheiben werden die Längsachsen der benachbarten Flüssigkristallmoleküle in Vorzugsrichtung gebracht. Wenn die Orientierungsschichten um 90° zueinander gedreht sind, ändert sich auch die Vorzugsrichtung der Flüssigkristallmoleküle graduell zwischen den beiden Orientierungsschichten. Durch die Flüssigkristallmoleküle kann somit die Polarisations Ebene des Lichts gedreht werden. Werden zwei Polarisationsfilter, deren Durchlassrichtungen mit der Vorzugsrichtungen der Flüssigkristallmoleküle übereinstimmen, auf beiden Glassubstraten angebracht, so ist es möglich, den Lichtfluss durch die TN-Zelle zu kontrollieren. Durch das Anlegen einer geringen Spannung ($< 15\text{ V}$) wird die Orientierung der Flüssigkristallmoleküle verändert und dabei die Transmission (der Anteil des durchgelassenen Lichts) gesteuert. Elektrisch leitfähige Schichten (transparente Elektroden) innerhalb der Zellen dienen dem Aufbau des elektrischen Felds (vgl. Abbildung 3-2) [97].

Für die ersten Prototypen der TN-Zellen für Architekturwendungen wurde die TN-Zelle verändert (modifizierte TN-Zelle, MTN-Zelle), da damals zur Verfügung stehende Polarisationsfilter eine geringe UV-Stabilität aufwiesen. Im Fall einer MTN-Zelle wurden die Polarisatoren als nanometerdünne Beschichtungen aus einem lyotropen Flüssigkristall auf den nach innen gewandten Seiten der Glassubstrate aufgebracht [97, 98]. Ca. fünf Jahre später konnten kommerziell erhältliche, UV-stabile Folienpolarisatoren auf den Außenseiten der Glassubstrate zum Einsatz kommen. Somit stellt eine TN-Zelle ein einfacheres System als die MTN-Zelle dar. Mittels Laserstrukturierung oder photolithographischer Verfahren ist es möglich, eine TN-Zelle, ähnlich wie in LCD-Bildschirmen, in einzelne Bildpunkte (Pixel) aufzuteilen. Jeder Pixel kann autonom angesteuert werden, was die Möglichkeit einer partiellen Fassadenverdunklung eröffnet. In Kooperation mit der Firma BMG MIS GmbH konnten Muster der substrukturierten schaltbaren Zellen („TN-Module“) gefertigt werden. Zur Lösung der Fragestellung der vorliegenden Arbeit werden diese substrukturierten TN-Zellen herangezogen. Dennoch konnten bereits mit den ersten Prototypen der manuell hergestellten MTN-Zellen relevante thermische Analysen von Laminatverbunden und Versuche im Sonnensimulator durchgeführt werden, die im Kapitel 3.2.2 vorgestellt werden. Die Erkenntnisse aus diesen Versuchen können auf die TN-Zellen übertragen werden.

Der Aufbau der TN-Zelle sowie einige Prototypen zur Veranschaulichung des Entwicklungsprozesses sind in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 dargestellt.

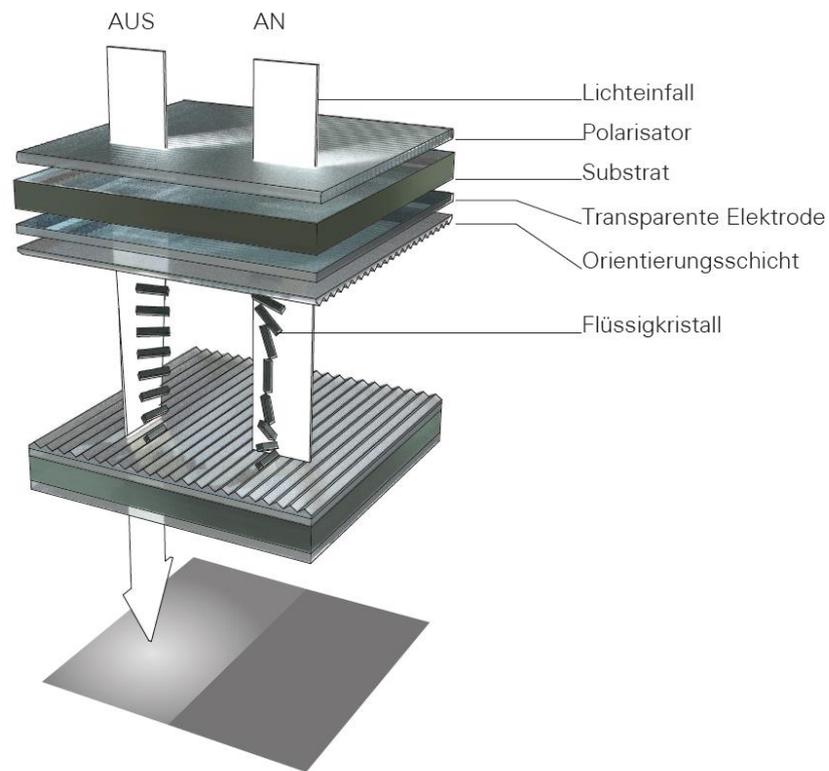


Abbildung 3-2: TN-Zelle mit externen Polarisatoren (Rendering: D. Meurer, ILEK)

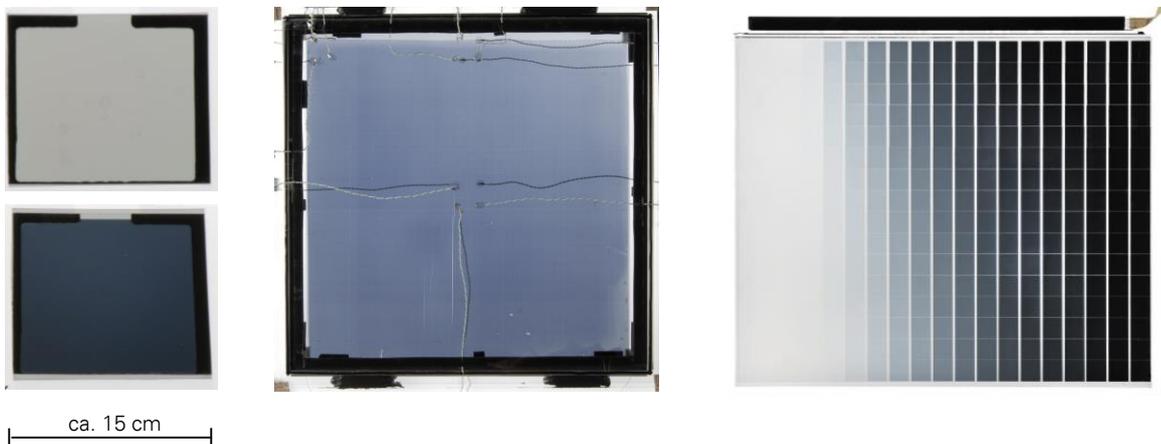


Abbildung 3-3: Prototypen schaltbarer Zellen. Links: erste MTN-Zellen mit internen Polarisatoren (Phot. G. Metzger, ILEK, Juli 2009), Mitte: MTN-Zelle mit internen Polarisatoren in einem Isolierglasaufbau, ausgestattet mit Thermoelementen für Versuche im Sonnensimulator (Phot. G. Metzger, ILEK, Februar 2011), rechts: die in der vorliegenden Arbeit betrachtete, bereichsweise schaltbare TN-Zelle mit externen Polarisatoren (Phot. G. Metzger, ILEK, Dezember 2015).

Bedingt durch die Produktionsausstattung und die Layout-Maskenabmessungen für den photolithographischen Strukturierungsprozess betrug die maximale herstellbare Zellengröße ca. 310 mm x 275 mm. Bei entsprechender Ausstattung könnten jedoch mit dieser Technologie auch geschosshohe TN-Zellen gefertigt werden. Im Rahmen der Layoutentwicklung in Kooperation mit der Firma BMG MIS GmbH wurde das Ziel verfolgt, die nicht ansteuerbare Fläche zwischen den einzelnen Bildpunkten zu reduzieren. Im Bereich der Zwischenräume der Pixel werden die Kontaktierungsleitungen zur Ansteuerelektronik, die sich am oberen Modulrand befindet, geführt. Die neusten, in Abbildung 3-3 rechts dargestellten Module¹⁰, die im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen, verfügen über 304 Pixel (19 Spalten und 16 Zeilen), die in jeweils 16 Graustufen geschaltet werden können. Eine Skizze der Flächeneinteilung eines TN-Moduls ist in Abbildung 3-4 gegeben. Der Flächenanteil der gesamten abdunkelbaren Fläche zur Modulgesamtfläche (Füllfaktor) beträgt ca. 90 %. Der Energiebedarf der schaltbaren Module inklusive Ansteuerelektronik beträgt im eingeschalteten Zustand ca. 1,1 W/m² – 3,3 W/m², in Abhängigkeit vom Abdunklungsgrad [100].

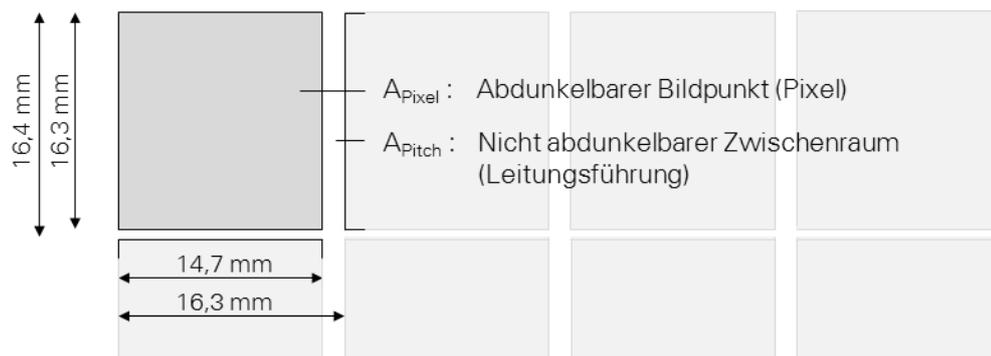


Abbildung 3-4: Ausschnitt eines schaltbaren TN-Moduls (Typ i³) mit Darstellung einiger Bildpunkte

¹⁰ Da die Module (Werksbezeichnung GV286) im Rahmen des Projekts „i³“ [99] hergestellt wurden, werden sie auch „Module des Typs i³“ genannt, bzw. „Module des Typs 2“ im Gegensatz zum ersten Layout „Typ 1“ mit größeren Abständen zwischen den Bildpunkten [93].

3.2.1.2 Optische und strahlungsphysikalische Eigenschaften

Am ILEK wurden spektrale Transmissions- und Reflexionsmessungen der hergestellten Proben durchgeführt. Mit den Spektraldaten konnten für die Proben Mittelwerte der Transmission (τ), der Reflexion (ρ) und der Absorption (α) im sichtbaren (vis) sowie im solaren (sol) Spektralbereich berechnet werden. Die Mittelwerte τ_{vis} , ρ_{vis} wurden nach DIN EN 410 [101] 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:

$$\tau_{vis} = \frac{\int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_\lambda V(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_\lambda V(\lambda) d\lambda} \quad (3-1)$$

$$\rho_{vis} = \frac{\int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_\lambda V(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_\lambda V(\lambda) d\lambda} \quad (3-2)$$

Die strahlungsphysikalischen Mittelwerte τ_{sol} , ρ_{sol} wurden mithilfe der spektralen Strahlungsfunktion S_λ im Bereich von 300 nm bis 2500 nm bestimmt:

$$\tau_{sol} = \frac{\int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_\lambda \tau(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_\lambda d\lambda} \quad (3-3)$$

$$\rho_{sol} = \frac{\int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_\lambda \rho(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda=300 \text{ nm}}^{2500 \text{ nm}} S_\lambda d\lambda} \quad (3-4)$$

$\tau(\lambda)$	- Spektraler Transmissionsgrad der Verglasung [-]
τ_{vis}	- Transmission im sichtbaren Wellenlängenbereich (Lichttransmissionsgrad) [-]
τ_{sol}	- Transmission im gesamten Solarspektrum von UV (ultraviolett), VIS (sichtbares Licht), NIR (nahinfrarot) [-]
$\rho(\lambda)$	- Spektraler Reflexionsgrad der Verglasung [-]
ρ_{vis}	- Reflexion im sichtbaren Wellenlängenbereich [-]
ρ_{sol}	- Reflexion im gesamten Solarspektrum von UV, VIS, NIR [-]
S_λ	- relative spektrale Globalstrahlungsflussverteilung [-]
$V(\lambda)$	- spektraler Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagsehen [-]
λ	- Wellenlänge [nm]

3 Adaptive Verglasungen

Die Mittelwerte der Absorption (α_{vis} , α_{sol}) ergeben sich durch die Subtraktion der Transmissions- und Reflexionswerte im entsprechenden Spektralbereich von 1 (bzw. 100 %).

Für die substrukturierten Module wurden die entsprechenden Mittelwerte flächenbezogen gewichtet (vgl. Abbildung 3-4). Für die Transmission im sichtbaren Wellenlängenbereich sind die entsprechenden Berechnungsformeln wie folgt gegeben (vgl. [93, 100]):

$$\tau_{vis,on,Modul} = \frac{A_{Pixel} \cdot \tau_{vis,on} + A_{Pitch} \cdot \tau_{vis,off}}{A_{Pixel} + A_{Pitch}} \quad (3-5)$$

$$\tau_{vis,off,Modul} = \tau_{vis,off} \quad (3-6)$$

$\tau_{vis,on,Modul}$ ($\tau_{vis,off,Modul}$)	- Gewichtete Lichttransmission der substrukturierten Zelle unter Berücksichtigung des Füllfaktors, für den Zustand minimaler (on) und maximaler (off) Transmission [-]
$\tau_{vis,on}$ ($\tau_{vis,off}$)	- Lichttransmission eines Bildpunkts, für den Zustand minimaler (on) und maximaler (off) Transmission [-]
A_{Pixel}	- Bildpunktfläche (Pixelfläche) [m ²]
A_{Pitch}	- Fläche des nicht abdunkelbaren Pixelzwischenraums [m ²]

Die ermittelten Spektralcharakteristika sind in Abbildung 3-5 und die Mittelwerte in Tabelle 3-1 dargestellt.

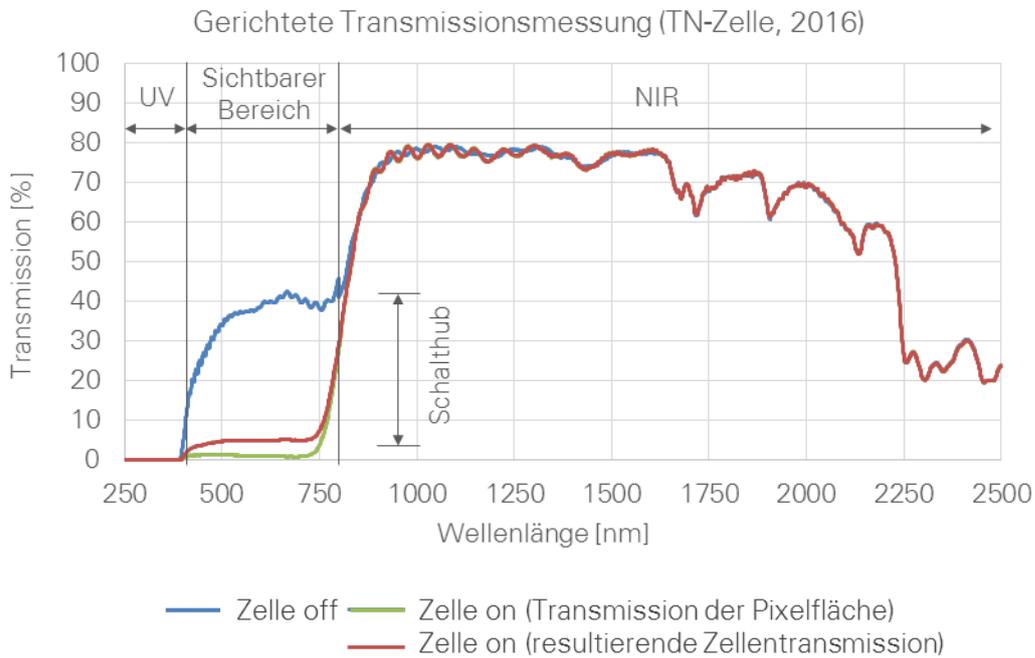


Abbildung 3-5: Gemessene normal-normale spektrale Transmission einer TN-Zelle (TN-Moduls), jeweils im Zustand maximaler Transmission (off) und im Zustand minimaler Transmission (on) (vgl. [99])

		τ_{vis} [-]	Schalthub τ_{vis} [-]	τ_{sol} [-]	ρ_{vis} [-]	ρ_{sol} [-]	α_{vis} [-]	α_{sol} [-]
Pixelfläche	on	0,01	0,36	0,28	0,06	0,12	0,93	0,60
	off	0,37		0,46	0,08	0,13	0,55	0,40
TN-Modul (gewichtete Werte unter Einbeziehung der Pixelflächen und Pixelzwischenräume)	on	0,05	0,32	0,30	0,06	0,12	0,89	0,58
	off	0,37		0,46	0,08	0,13	0,55	0,40

Tabelle 3-1: Mittelwerte der Transmission, Reflexion und Absorption der untersuchten schaltbaren Zelle (TN-Modul des Typs i³)

Mit den eingesetzten Polarisationsfolien kann die Energiedurchlässigkeit der schaltbaren Zelle im sichtbaren Wellenlängenbereich beeinflusst werden (die Absorptions- und damit Polarisations-eigenschaft sind auf das sichtbare Wellenlängenspektrum beschränkt). Der maximale Schaltheub ergibt sich aus der Differenz der maximalen (im ausgeschalteten Zustand) und der minimalen (im eingeschalteten Zustand) Transmission der Zelle. Die maximale Transmission der TN-Zelle beläuft sich auf ca. 37 % bei einem Schaltheub der abdunkelbaren Bereiche von ca. 36 %. Die maximalen Transmissionswerte der Flüssigkristallzellen sind vergleichbar mit denen von herkömmlichen Sonnenschutzverglasungen. Durch die Regelbarkeit der Transmission ergeben sich jedoch weiterreichende Potentiale. Bei minimalen Transmissionswerten im Bereich von ca. 5 % bis 1 % können zusätzliche Sonnen- und Blendschutzelemente entfallen.

Die hohen aus Tabelle 3-1 ablesbaren Absorptionswerte resultieren aus dem Einsatz des polarisierten Lichts. Ca. 50 % des Lichts wird durch die Polarisatorschichten absorbiert. Dies wirkt sich auf die Auslegung und die bauphysikalischen Eigenschaften einer Fassadenverglasung mit integrierten schaltbaren Zellen aus, die im Kapitel 3.2.2 detailliert erläutert werden.

3.2.1.3 Winkelabhängigkeit der Zelleneigenschaften

Ein Nachteil der verwendeten TN-Technologie ist ihre Blickrichtungsabhängigkeit. Bei einem schrägen Lichteinfall werden die Auswirkungen der vektoriellen Zerlegung der Lichtwelle bemerkbar. Der Anteil der Strahlung, der parallel zur Direktorrichtung verläuft, nimmt mit zunehmendem Winkel zu und wird damit nicht mehr vollständig durchgelassen bzw. gebremst, sondern gedreht. Bei LCD-Bildschirmen ist dadurch eine Kontrastverringerung bei großen Blickwinkeln feststellbar [102]. Dieser Effekt wirkt sich auch auf die winkelabhängige Transmissionsverteilung der TN-Zellen aus und ist insbesondere bei hohen Abdunklungszuständen visuell wahrnehmbar. Der angesteuerte Transmissionswert wird für nahezu senkrechten Strahlungseinfall erreicht, bei steigenden Blickwinkeln steigt die Lichttransmission an. Eine genaue Bestimmung der Winkelabhängigkeit, insbesondere in Verbindung mit der Winkelabhängigkeiten zusätzlicher Glasscheiben (bei Integration in einen Isolierglasaufbau, s. Kapitel 3.2.2), ist komplex und unterschiedlich je nach Zellentyp und angelegter Spannung. In Abbildung 3-6 ist ein Kontrastdiagramm einer Monopixelzelle (ein Bildpunkt) mit einem vergleichbaren Zellenaufbau im Zustand minimaler Transmission dargestellt. In Abbildung 3-7 sind die zugehörigen, mit einer Ulbrichtkugel gemessenen Lichttransmissionswerte in Abhängigkeit des Lichteinfallswinkels aufgetragen, für die Zelle im Zustand minimaler Transmission, im Zustand maximaler Transmission und für

eine mit 50 % der Maximalspannung angesteuerte Zelle¹¹. Die Veränderungen der einfallswinkelbedingten Transmission der Zelle in Abhängigkeit von der angelegten Spannung (Schaltstufe) sind ersichtlich.

Daher werden im Rahmen dieser Arbeit jeweils nur normal-normale Transmissionswerte der Zellen- und Verglasungsaufbauten angegeben. In Simulationsmodellen (Kapitel 5) wird vereinfacht ein für Glas charakteristischer Winkelabhängigkeitsverlauf angenommen (vgl. gestrichelte Verläufe in Abbildung 3-7). Die Auswirkungen der Abweichung der Winkelabhängigkeit der TN-Verglasungen mit integrierten Zellen auf den visuellen Komfort werden im Kapitel 6.2 fotografisch erfasst.

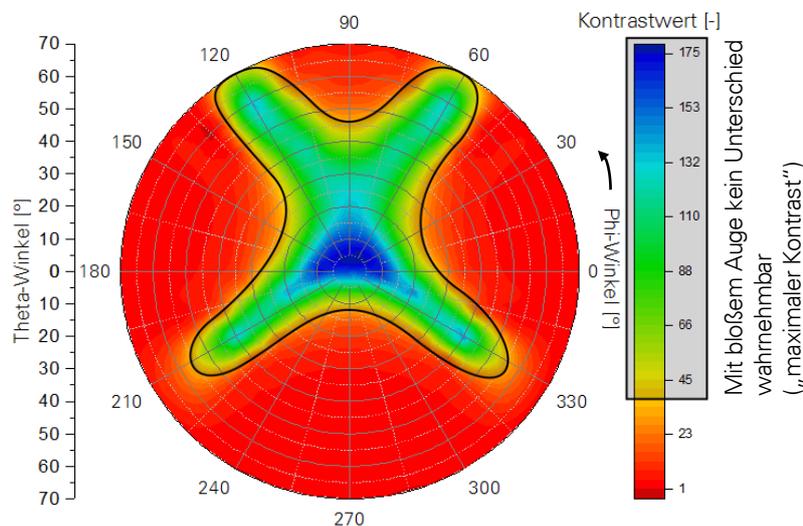


Abbildung 3-6: Kontrastdiagramm einer TN-Zelle (Datenquelle: BMG MIS, Messung am Bildpunkt). Theta-Winkel: Winkel zur Flächennormalen (Zenitwinkel), Phi-Winkel: Azimutwinkel (vgl. Abbildung 3-8).

¹¹ Für die vermessene Monopixelzelle betrug die Maximalspannung 12 V.

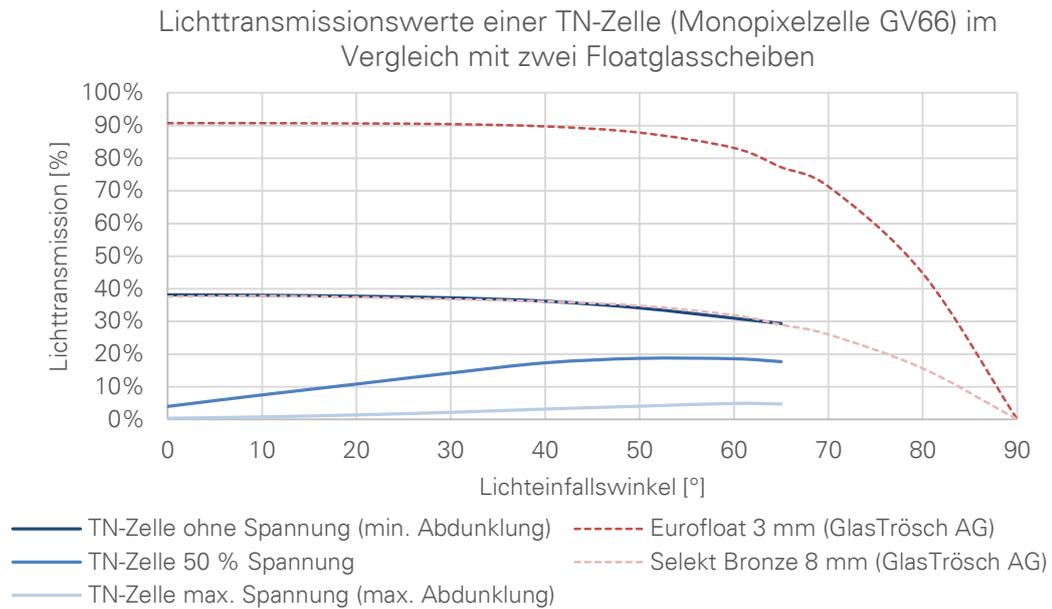


Abbildung 3-7: Gemessene direkt-hemisphärische Lichttransmission einer TN-Zelle (gemessen am Bildpunkt mit Ulbrichtkugel im Bereich 0° - 65°) für drei Schaltzustände, in Abhängigkeit des Zenitwinkels (beim Azimutwinkel = 0°), im Vergleich mit zwei beispielhaften Floatglasscheiben (unbeschichtet: Eurofloat 3 mm und beschichtet: Selekt Bronze 8 mm) mit für Glas charakteristischen Winkelabhängigkeitsverläufen der Transmission (Quelle: IGDB Glasdatenbank)

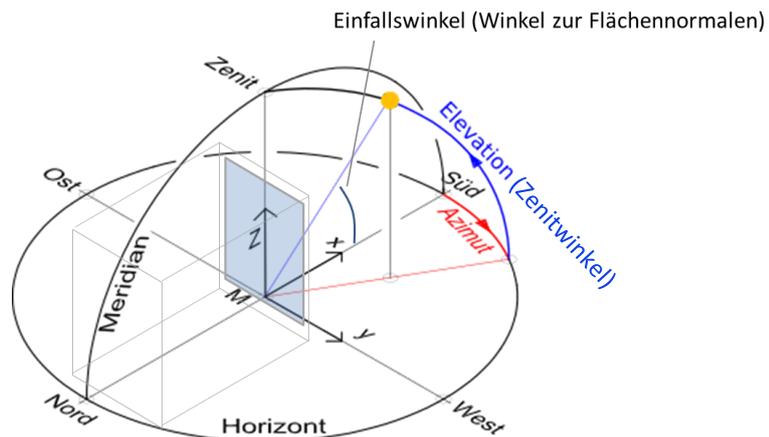


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung des Strahlungseinfallswinkels auf die Südfassade

3.2.1.4 Schaltstufenzuordnung

Die Schaltung der TN-Zelle auf eine erwünschte Transmission im Schalhubbereich kann stufenlos erfolgen. Dennoch wurden für die behandelten substrukturierten TN-Module für die Testzwecke 16 Schaltstufen vom Hersteller programmiert. Der ganze Schaltbereich wurde binär in 256 Graustufenwerten dargestellt. In Grauwert-Intervallen von 16 wurde jeweils eine Änderung der Schaltstufe programmiert, was insgesamt 16 Schaltstufen ergibt. Die gemessenen Transmissionswerte eines Pixels des TN-Moduls für die 16 Schaltstufen mit den zugehörigen Graustufenwerten sind in Abbildung 3-9 dargestellt. Aus der Abbildung ist der Verlauf der Transmissionsänderung in Abhängigkeit der Schaltstufe erkennbar. Obwohl die Graustufen-Bereiche linear definiert wurden, weicht der resultierende Transmissionsverlauf geringfügig von der Linearität ab, vereinfacht kann der Transmissionsverlauf dennoch als linear angenommen werden. Für die Simulationszwecke wurde der Schaltbereich in 11 Stufen mit linearer Transmissionsgradation unterteilt. Die nach (3-1) und (3-5) berechneten Transmissionswerte dieser 11 Stufen, flächengewichtet nach der Pixelfläche und der Fläche der Pixelzwischenräume, können der Abbildung 3-10 entnommen werden.

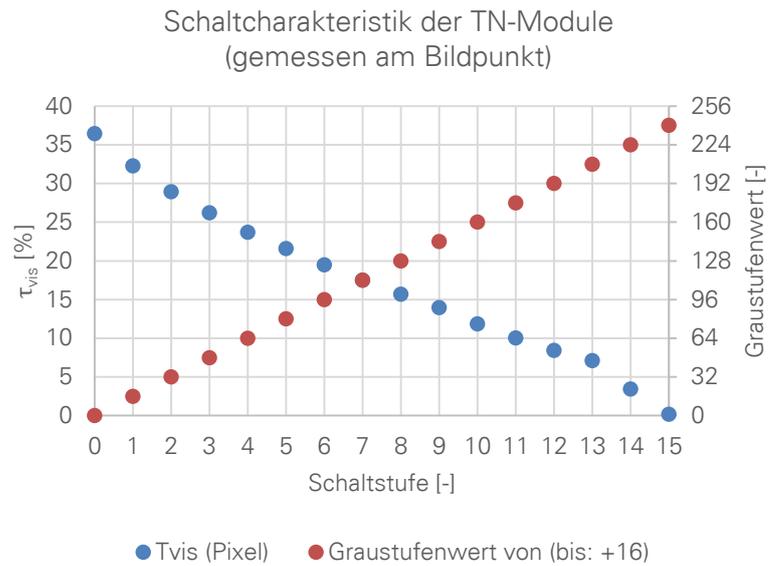


Abbildung 3-9: Schaltcharakteristik der TN-Module (Typ i³): gemessen am Bildpunkt, Schalthub unterteilt in 16 Schaltstufen.

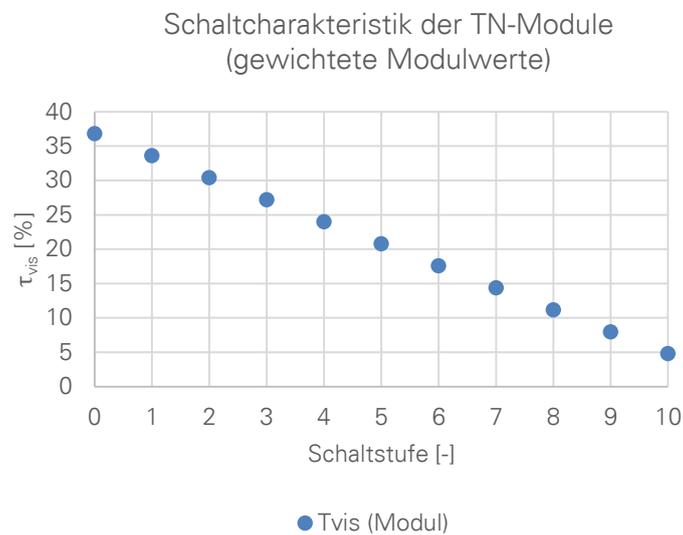


Abbildung 3-10: Schaltcharakteristik der TN-Module (Typ i³): berechnete, gewichtete Modulwerte (mit Berücksichtigung der Pixelfläche und der Pixelzwischenräume), Schalthub unterteilt für Simulationszwecke in 11 Schaltstufen.

3.2.2 Untersuchte Isolierglasaufbauten

Eine schaltbare Verglasung muss den üblichen statischen und wärmetechnischen Anforderungen an eine Fassadenverglasung genügen. Daher ist die Integration der schaltbaren Zelle in den Isolierglasaufbau notwendig.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden unterschiedliche Isolierglasaufbauten, deren Übersicht in Abbildung 3-12 gegeben ist, empirisch (Temperaturmessungen im Sonnensimulator) und mittels numerischer Simulationen untersucht. Optische und wärmetechnische Verglasungskennwerte wurden mit dem Programm Window 7 vom Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) berechnet. Die einzelnen Komponenten der Isolierverglasungen wurden entweder in der Software Optics 5 (LBNL) mithilfe der ten modelliert (schaltbare Komponenten) oder sie wurden aus der Datenbank IGDB (International Glazing Database) ausgewählt (Glas und Füllgase). Zur Berechnung der optischen Eigenschaften von Isolierverglasungen wird in der Software Window 7 ein Matrizenverfahren verwendet, das mehrfache Reflexionen innerhalb der Isolierverglasung berücksichtigt. Ebenfalls mit einem iterativen Matrizenverfahren erfolgte die Berechnung des Temperaturverlaufs innerhalb des Isolierglasaufbaus (Wärmeleitung, -strahlung und natürliche Konvektion im stationären Zustand wurden berücksichtigt).

Zwei unterschiedliche Einbettungsvarianten rückten dabei in den Fokus der Betrachtung. Die schaltbare Zelle wird entweder in den Zwischenraum der Isolierverglasung eingefügt (s. Abbildung 3-11 a) oder sie wird stoffschlüssig mit der außenseitigen Scheibe der Isolierverglasung verbunden (s. Abbildung 3-11 b). Um einen stoffschlüssigen Verbund zu erzeugen, kann die Anbindung der schaltbaren Zelle an die Außenscheibe über eine Verbundfolie (TPU- oder EVA-Folie) im Laminationsprozess vollflächig erfolgen. An kleinformatigen Mustern konnte die Ausführbarkeit und die Temperaturbeständigkeit der Laminare bestätigt werden [103]. Beim Einbau von ersten Prototypen in geschosshohe Isolierverglasungen wurde aus Sicherheitsgründen und aufgrund von produktionstechnischen Größenbeschränkungen eine punktförmige Befestigung an der Außenscheibe mittels Kunststoffhaltern angewendet (s. Abbildung 3-11 c).

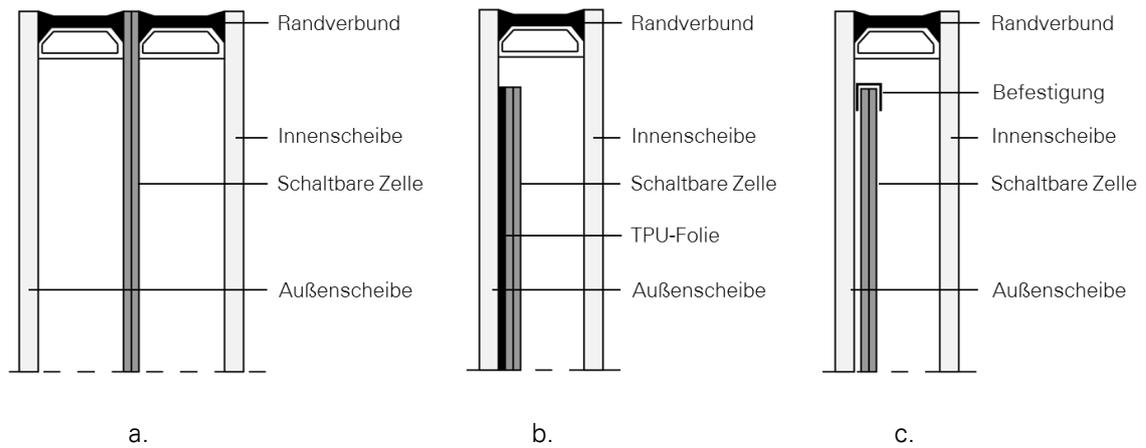


Abbildung 3-11: Integrationsmöglichkeiten schaltbarer Zellen in eine Isolierverglasung

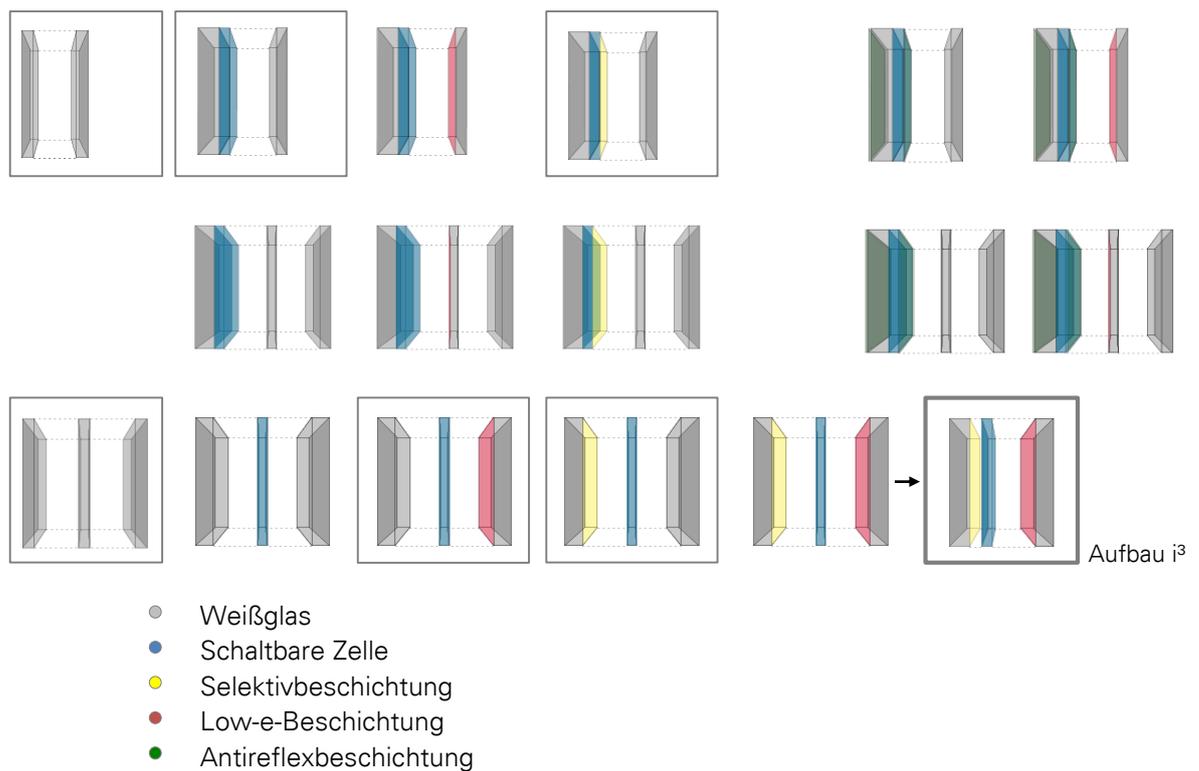


Abbildung 3-12: Schematische Darstellung der Isolierglasvarianten mit integrierten schaltbaren Zellen. Für jeden der Aufbauten wurden mehrere Beschichtungstypen verschiedener Hersteller eingesetzt und simuliert. Umrandete Aufbauten wurden für die Messungen des thermischen Verhaltens (Kapitel 3.2.2.5) verwendet.

Die Funktionsweise der Flüssigkristallzelle determiniert die grundlegenden Eigenschaften einer schaltbaren Isolierglaseinheit. Die in die bauphysikalische Charakterisierung der Verglasungen einfließenden Parameter der analysierten schaltbaren Verglasungsaufbauten wurden in Forschungsberichten zum Vorhaben „Schaltbare Verglasung auf der Basis von lyotropen und nematischen Flüssigkristallen“ [98, 104, 105] und den zugehörigen Veröffentlichungen [106–108] ausführlich erläutert und werden nachfolgend zusammengefasst.

3.2.2.1 Transmissionseigenschaften

Die Transmissionseigenschaften der schaltbaren TN-Verglasungen sind maßgeblich von den Eigenschaften der integrierten TN-Module abhängig. Diese wurden für die Pixelbereiche und die Pixelzwischenräume vermessen und flächengewichtet auf die gesamte Modulfläche umgerechnet (s. Tabelle 3-1). Mithilfe des Programms Window 7 wurden die mit diesen Transmissionswerten ausgestatteten Zellenmodelle um weitere Gläser und Beschichtungen zu Isolierverglasungen (s. Abbildung 3-12) ergänzt. Wie im Kapitel 3.2.1 erläutert, wurde die Unterteilung des Schalthebs für die Simulationszwecke in theoretische 11 Schaltstufen (0 bis 10) mit linearem Verlauf der Lichttransmission (τ_{vis}) vorgenommen.

3.2.2.2 Gesamtenergiedurchlassgrad

Der Gesamtenergiedurchlassgrad dient zur Beschreibung solarer Energiegewinne durch die Verglasung. „Der g-Wert ist die Summe, die sich aus der direkten Transmission von Solarenergie und der sekundären Wärmeabgabe des Fensters durch Strahlung und Konvektion in den Raum ergibt“ [98]. Er ist entsprechend Formel (3-7) definiert:

$$g = \tau_{sol} + q_i \quad (3-7)$$

g	- Gesamtenergiedurchlassgrad [-]
τ_{sol}	- Strahlungstransmissionsgrad [-]
q_i	- Sekundärer Wärmeabgabegrad [-]

Der Transmissionsanteil bildet den Hauptbestandteil des Wärmeflusses und kann durch die Schaltvorgänge der TN-Zelle im sichtbaren Bereich gesteuert werden. Der sekundäre Wärmeabgabegrad ist unter anderem für die Erwärmung der zum Innenraum gerichteten Verglasungsoberfläche entscheidend. Sofern schaltbare Isolierglasaufbauten mit Selektiv-

beschichtungen ausgestattet werden, erreichen sie ähnliche g-Werte wie moderne Sonnenschutzverglasungen¹². Ein Vergleich der entsprechenden Transmissions- und Gesamtenergiedurchlassgrade ausgewählter Verglasungen ist in Abbildung 3-13 gegeben.

3.2.2.3 Selektivität

Die Selektivität einer Verglasung wird als Quotient des Lichttransmissionsgrads durch den Gesamtenergiedurchlassgrad definiert. Insbesondere unter sommerlichen Bedingungen sind hohe Selektivitätswerte (ein geringer Gesamtenergiedurchlassgrad bei einer angemessenen Lichttransmission) erwünscht. Im Winter sollten sowohl die Lichtdurchlässigkeit als auch der Gesamtenergiedurchlassgrad möglichst hoch sein (Selektivität von ca. 1). Bei wechselnden Außenbedingungen lassen sich diese Anforderungen bei einer invarianten Verglasung nur als Kompromisslösung erfüllen. Eingesetzt werden hierfür meistens Selektivbeschichtungen. Diese Beschichtungen zeichnen sich durch hohe Transmissionswerte im sichtbaren Bereich des Sonnenspektrums und niedrigere Transmissionswerte im nahinfraroten Strahlungsbereich aus. Mit ihnen ausgestattete Verglasungen erreichen einen Selektivitätswert von bis zu ca. 2 - 2,5. „Diese hohen Selektivitätszahlen sind jedoch nur erzielbar, wenn der Sonnenschutzeffekt sehr gering ausgeprägt ist, beispielsweise mit Werten von $\tau_{\text{vis}} \sim 60\%$, sodass ein externes Sonnenschutzsystem meistens unvermeidbar ist. Bei Sonnenschutzverglasungen mit geringeren Lichttransmissionswerten von ca. 30 % liegen die Selektivitätswerte im Bereich von ca. 1,3“ [107] (vgl. [109]).

Für adaptive Verglasungen wurde der Begriff dynamische Selektivität eingeführt, welcher das Verhältnis von maximaler erreichbarer Lichttransmission (hier: im ausgeschalteten Zustand) zur minimalen Transmission (hier: im Zustand maximaler Abdunklung) beschreibt [111]. Die entwickelte schaltbare Verglasung weist je nach Schaltzustand statische Selektivitätswerte von bis zu 1,3 (im Zustand maximaler Transmission) auf, welche einer dynamischen Selektivität von 1,6 (TN-Zelle im Scheibenzwischenraum einer Zweifachverglasung) bis 2,6 (Zelle anlaminiert¹³ an die Außenscheibe der Zweifachverglasung) entsprechen.

¹² Bei modernen Sonnenschutzverglasungen liegen die g-Werte im Bereich von ca. 0,2 bis 0,5 und bei Wärmeschutzverglasungen zwischen ca. 0,6 bis 0,65 [109, 110].

¹³ Charakterisierung aller Lamine in dieser Arbeit bezieht sich auf Versuche mit MTN-Zellen (s. Kapitel 3.2.1.1).

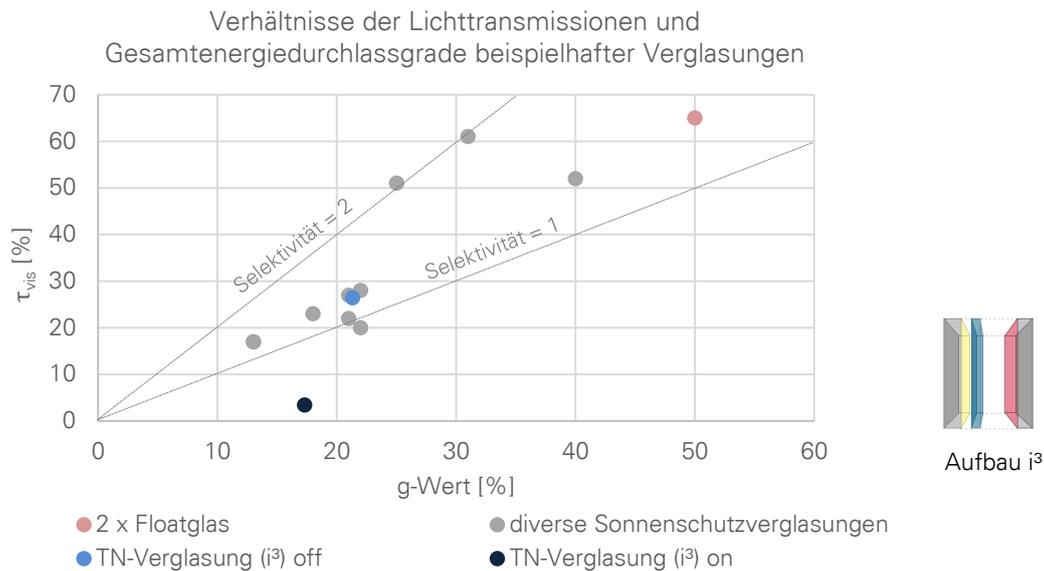


Abbildung 3-13: Gesamtenergiedurchlassgrad und Lichttransmission der schaltbaren TN-Verglasung (Aufbau i³) und einiger herkömmlicher Verglasungen

3.2.2.4 Wärmedurchgangskoeffizient

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) beeinflusst den Wärmestrom durch die Verglasung aufgrund von Temperaturdifferenzen auf beiden Seiten. Ein niedriger U-Wert mindert Wärmeverluste des Raums bei kalten Wetterverhältnissen. Bei einer Isolierverglasung wird er maßgeblich durch die Anzahl der Scheiben, Beschichtungen und Scheibenzwischenräume bestimmt. Daher hat eine an die Außenscheibe angebrachte, dünne TN-Zelle wenig Einfluss auf den U-Wert des Verglasungsaufbaus, wohingegen eine Anbringung der Funktionszelle als dritte Scheibe einer Isolierverglasung eine deutlichere Reduktion¹⁴ des U-Werts im Vergleich zu einer Zweifachverglasung bewirkt.

3.2.2.5 Thermisches Verhalten

Da das ausgeprägte Absorptionsverhalten der Zelle zu ihrer Aufheizung im Fall einer erhöhten solaren Einstrahlung führt, gewinnt die Wärmeabstrahlung von der Zelle zusätzlich an Bedeutung. Sie wird vor allem unter sommerlichen Bedingungen zum entscheidenden Kriterium für die Effektivität der Sonnenschutzfunktion der Verglasung. Daher wurde das

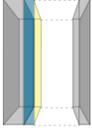
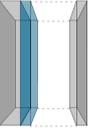
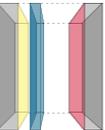
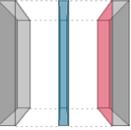
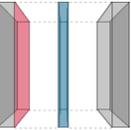
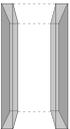
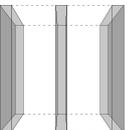
¹⁴ Für eine Minimierung des U-Werts sollten die Breiten der entstehenden Scheibenzwischenräume optimiert werden.

thermische Verhalten von den in Tabelle 3-2 aufgeführten Isolierglasaufbauten mit integrierten schaltbaren Zellen simulativ und messtechnisch analysiert.

Die in Abbildung 3-14 dargestellten Simulationsergebnisse für ausgewählte Probenaufbauten zeigten, dass auch an einem heißen Sommertag (Sommerbedingungen nach ISO 15099) die Temperatur der Innenscheibe einer schaltbaren Isolierverglasung, bei entsprechender Nutzung von Low-e-Schichten, die Temperatur einer konventionellen Isolierglas-scheibe nicht wesentlich überschreitet. Versuche im Sonnensimulator (Aufbau im Labor, Bestrahlung der Proben mit drei Metall-Halogenid-Strahlern, mit ca. 800 W/m² in der Probenebene bei einer Homogenitätsabweichung von max. 10 %, s.) für kleinformatige, ca. 40 cm x 40 cm, MTN-Verglasungen bestätigen diese Erkenntnis [98]. Die Ergebnisse der Versuche im Sonnensimulator folgen in Abbildung 3-15.

Trotz der geringfügigen Temperaturunterschiede bei beiden Untersuchungsmethoden sind sowohl die absorbierende Wirkung der schaltbaren Einheit, als auch die Vorteile der verwendeten Beschichtungen deutlich erkennbar. Auf der Position der Zelle („Pos. 4“) sind die höchsten Temperaturen im Isolierglas zu erwarten. Durch das Anbringen einer Selektivbeschichtung auf der nach innen gerichteten Seite der Außenscheibe (Abbildung 3-15, Aufbau 2d) können diese gesenkt werden. Wird eine Low-e-Beschichtung auf der nach außen gerichteten Seite der Innenscheibe aufgebracht (Abbildung 3-15, Aufbau 2b), so bleibt zwar die Zellentemperatur höher, die Temperatur der Innenscheibe („Pos. 6“) wird jedoch deutlich reduziert. Diese ist für die thermische Behaglichkeit im Raum von Bedeutung. Gemäß Ergebnissen von Langzeitversuchen (Isolierglas ohne Beschichtungen, Neigungswinkel 45° nach Süden, in Stuttgart seit ca. 2011 [98, 100, 105]) führen die im Sommer erreichbaren Zellentemperaturen von bis zu 86 °C zu keiner Funktionsbeeinträchtigung der Zellen. Darüber hinaus wurde die TN-Verglasung im Fassadenprüfstand (s. Kapitel 4) unter realen Bedingungen getestet. Bei Außentemperaturen von ca. 32 °C beträgt die Temperatur der Innenscheibe der schaltbaren Verglasung zu jedem Zeitpunkt weniger als 40 °C und übersteigt somit die Lufttemperatur in Raummitte um weniger als 10 °C.

Alle in Abbildung 3-14 bis Abbildung 3-15 dargestellten schaltbaren Verglasungen befanden sich im Zustand minimaler Transmission.

Schema	Test- methode	Probenaufbau
	S	Probe 30434a: 5 mm Weißglas 0,76 mm PVB 2,2 mm schaltbare MTN-Zelle (V25) Selekt-Beschichtung 12 mm Luft 3 mm Weißglas
	S Ms	Probe 4b: 6 mm ESG (grün) 0,76 mm PVB 2,2 mm schaltbare MTN-Zelle (V14/V9) 14,5 mm Luftraum 3 mm Weißglas
	S	TN-Verglasung (Typ 2, Aufbau i³): 6 mm Weißglas Selektivbeschichtung ipasol 69/37 3 mm Luft 2,6 mm TN-Zelle (GV286) 12 mm Luft Wärmeschutzbeschichtung iplus Top 6 mm Weißglas
	M _{FP}	TN-Verglasung (Typ 1): 6 mm Weißglas Selektivbeschichtung ipasol 69/37 ca. 3 mm Luft 2,6 mm TN-Zelle (GV186) ca. 40 mm Luft Wärmeschutzbeschichtung iplus Top 6 mm Weißglas
	Ms	Probe 2b: 3 mm Weißglas 5 mm Luftraum MTN-Zelle (Typ B) 10,3 mm Luftraum Wärmeschutzbeschichtung Zero E auf 2 mm Weißglas
	Ms	Probe 2d: 2 mm Weißglas Wärmeschutzbeschichtung Zero E 10 mm Luftraum MTN-Zelle (Typ B) 5 mm Luftraum 3 mm Weißglas
	S	Referenz 2-fach Weiß: 3 mm Weißglas 16 mm Luftraum 3 mm Weißglas
	Ms	Referenz 2-fach Float: 3 mm Floatglas 16 mm Luftraum 3 mm Floatglas
	S	Referenz 3-fach Weiß: 3 mm Weißglas 12 mm Luftraum 3 mm Weißglas 12 mm Luftraum 3 mm Weißglas
		Referenz 3-fach Float: 3 mm Floatglas 12 mm Luftraum 3 mm Floatglas 12 mm Luftraum 3 mm Floatglas

S: numerische Simulation (Window 7)

Ms: Messung im Sonnensimulator

M_{FP}: Messung im Fassadenprüfstand

Tabelle 3-2: Untersuchung des thermischen Verhaltens schaltbarer Verglasungen. Übersicht der Testaufbauten (Aufbau jeweils von außen nach innen). Für die Beschreibungen der einzelnen MTN-Zellentypen wird auf den Projektbericht [98] verwiesen.

3 Adaptive Verglasungen

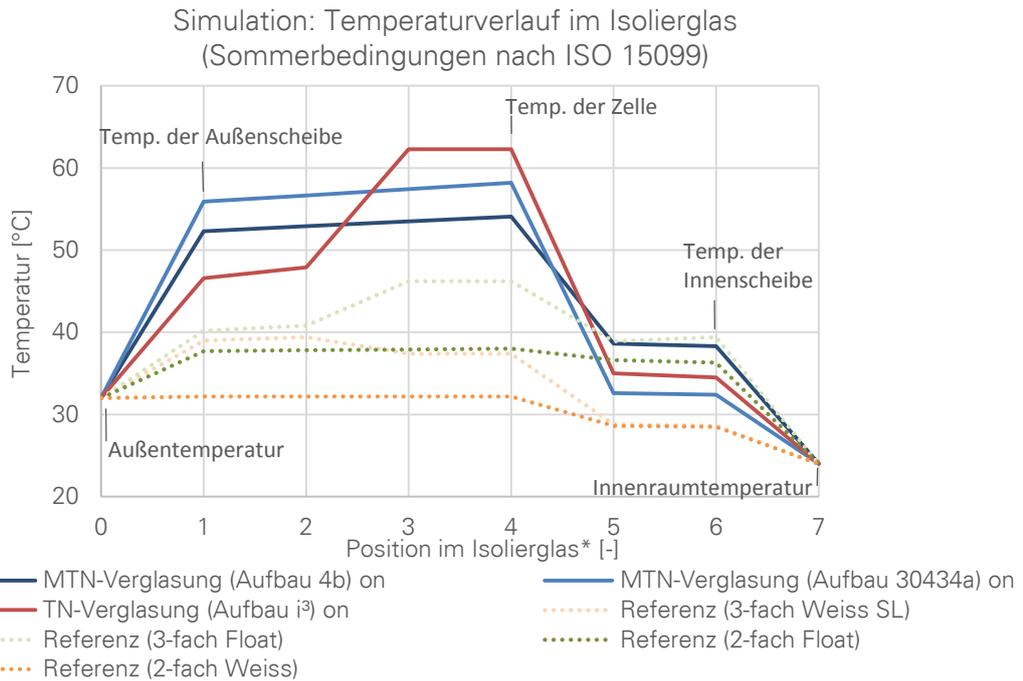


Abbildung 3-14: Simulierte Temperaturverläufe untersuchter Isoliergläser: einer schaltbaren MTN-Verglasung (Aufbau 30434a), einer TN-Verglasung (Aufbau i³) und vier Referenzverglasungen (*Bei Zweifachverglasungen sind Pos. 1-4 zusammenzufassen (Außenscheibe))

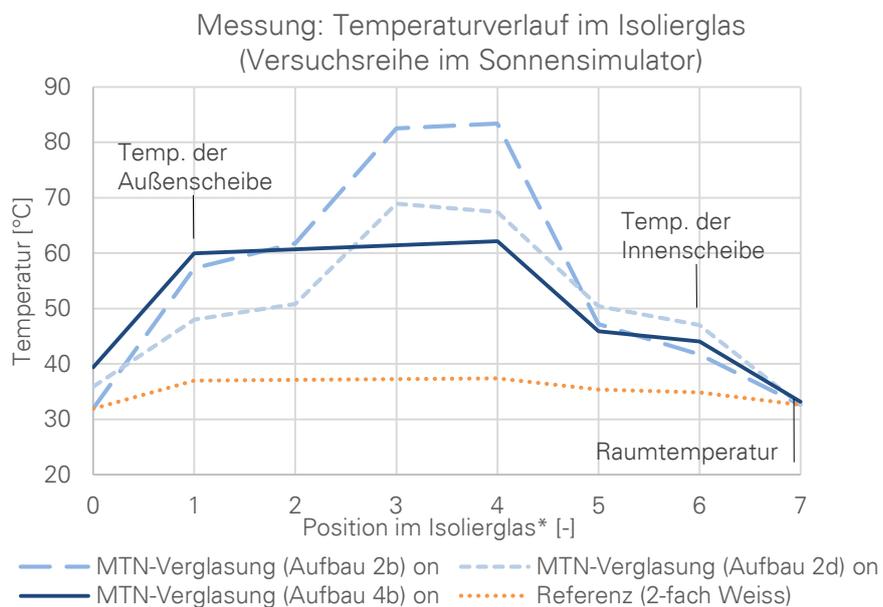


Abbildung 3-15: Gemessene Temperaturverläufe (*Bei Zweifachverglasungen sind Pos. 1-4 zusammenzufassen (Außenscheibe))

3.2.2.6 Zusammenfassung optischer und bauphysikalischer Eigenschaften

Infolge thermischer Berechnungen und Versuche im Sonnensimulator erwies sich die Anordnung der schaltbaren Zelle im Verbund mit der Außenscheibe der Isolierverglasung als bauphysikalisch vorteilhafteste Anbindungsvariante. Das Laminat aus der Trägerscheibe und der schaltbaren Zelle wurde durch weitere Glasscheiben zu einer Zweifach- oder Dreifachverglasung ergänzt. Durch die gute thermische Anbindung der absorbierenden Zelle an die Außenscheibe kann der unerwünschte Wärmeaustausch der Zelle mit dem Innenraum verringert werden. Entsprechend eingesetzte Selektiv- und Low-e-Beschichtungen (auf Position 2 und / oder 3 der Verglasung) beeinflussten den Licht- und Energiedurchgang besonders positiv. Insbesondere Selektivbeschichtungen ermöglichen eine Absenkung der raumseitigen Oberflächentemperatur der Verglasung im Sommer (vgl. Abbildung 3-14 und Abbildung 3-15)¹⁵.

Für den Einbau in geschosshohe Verglasungen und weiterführende Versuche im Fassadentestgebäude wurde daher ein Isolierglasaufbau mit einer Selektivbeschichtung auf der Position 2 der Verglasung, einer Low-e-Beschichtung auf der Position 5 der Verglasung und TN-Zellen möglichst nah der Innenseite der Außenscheibe gewählt (Aufbau i³, s. Tabelle 3-3). Auf vollflächiges Anlaminieren der schaltbaren Module wurde zur besseren Revisionsbarkeit der Prototypen verzichtet. Die dadurch entstehende geringfügige Verringerung des thermischen Austauschs der Zelle mit der Außenscheibe wurde in Kauf genommen. Trotz dieses Nachteils besitzt die gewählte Einbindungsvariante ebenfalls ein Zukunftspotential. Bei großflächigen schaltbaren Modulen führt sie zur Verbesserung des U-Werts der Verglasung und ermöglicht eine einfache Austauschbarkeit und Rezyklierbarkeit der Komponenten.

¹⁵ Die Untersuchungen zur Anwendung unterschiedlicher Beschichtungen in TN-Isolierverglasungen wurden im Projektbericht [98] ausführlich dokumentiert. „Die bereits durch die hochwertige Beschichtung gewährleistete hohe Lichtdurchlässigkeit kann zusätzlich durch Anbringen von Antireflexbeschichtungen um wenige Prozente verbessert werden. Die spektrale Charakteristik der Beschichtung erwies sich dabei von Bedeutung. Eine schaltbare Zweifachverglasung mit einer höherwertigen Selektivbeschichtung kann Dreifachverglasungen mit anderen Beschichtungen bauphysikalisch übertreffen, bei einer wesentlichen Gewichtsersparnis und einer geringen Erhöhung der Transmission“ [98].

Eine Zusammenfassung der optischen (τ_{vis}) und wärmetechnischen (τ_{sol} , g-Wert, U-Wert) Eigenschaften der schaltbaren Isolierverglasung ist in Abbildung 3-16 und Tabelle 3-3 gegeben (berechnet mit Window 7, NFRC-Randbedingungen nach ISO 15099)¹⁶. In Abbildung 3-17 sind die jeweiligen Transmissionszustände der im Fassadenprüfstand eingebauten Verglasung abgebildet.

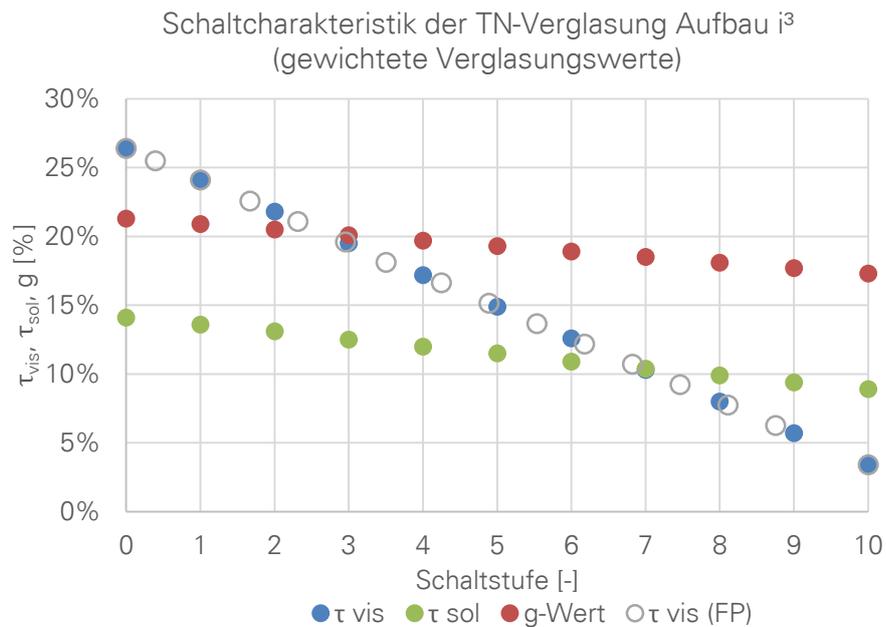


Abbildung 3-16: Schaltcharakteristik der TN-Verglasung (Aufbau i³), flächengewichtete Verglasungswerte τ_{vis} , τ_{sol} und g-Wert (incl. Pixel und Pixelzwischenräume), für den in 11 Schaltstufen unterteilten Schalthub, berechnet mit Window 7. Die Lichttransmissionswerte der zugehörigen 16 Schaltstufen der im Fassadenprüfstand eingebauten Verglasung (τ_{vis} (FP)) wurden zum Vergleich in Grau eingetragen.

¹⁶ Für die Berechnung wärmetechnischer Kennwerte stehen zwei Standards zur Verfügung, ein amerikanischer (National Fenestration Rating Council, NFRC, nach ISO 15099) und ein europäischer Standard (Comité Européen de Normalisation, CEN, nach EN 673), den unterschiedliche klimatische Randbedingungen als repräsentativ für den Verglasungseinsatz zugrunde liegen. Simulationen mit der amerikanischen Software wurden hauptsächlich nach dem NFRC-Standard nach ISO 15099 durchgeführt. Ein Vergleich der Randbedingungen bei beiden Berechnungsstandards ist im Projektbericht [41] gegeben. Vergleichsberechnungen haben bewiesen, dass die standardbedingten Unterschiede in der anschließenden energetischen Auswertung vernachlässigbar sind [41].

Verglasungs- aufbau		τ_{vis} [-]	τ_{sol} [-]	ρ_{vis} [-]	ρ_{sol} [-]	g-Wert [-]	S statisch [-]	S dyna- misch [-]	U-Wert [W/m ² K]
TN- Verglasung (Aufbau i ³)*	on	0,03	0,09	0,09	0,42	0,17	0,2	1,6	1,3
	off	0,27	0,14	0,11	0,43	0,21	1,3		

* 6 mm Weißglas | Selektivbeschichtung ipasol 69/37 | 3 mm Luft | 2,6 mm TN-Zelle | 12 mm Luft | Wärmeschutzbeschichtung iplus Top 6 | 6 mm Weißglas

Tabelle 3-3: Zusammenfassung thermischer und optischer Eigenschaften der betrachteten Verglasung mit integrierter schaltbarer Zelle (berechnet mit Window 7, NFRC-Randbedingungen nach ISO 15099)



Abbildung 3-17: Fotodokumentation der Schaltzustände (Phot.: G. Metzger | ILEK)

3.2.2.7 Multifunktionalität und Interaktivität

Die Substrukturierung der TN-Verglasung in einzelne Pixelbereiche erweitert das Spektrum der Adaptivität. Somit ist es möglich, die Dynamik der variablen optischen (Lichttransmission) und wärmetechnischen (g-Wert) Eigenschaften im vollen Umfang auszunutzen und diese Eigenschaften nicht nur im zeitlichen Verlauf zu verändern, sondern auch innerhalb einer Verglasung örtlich zu variieren. Die Blendschutzfunktion der Verglasung kann von ihrer Sonnenschutzfunktion, der Wärmegewinnungsfunktion oder der Lichtversorgungsfunktion kontrolliert getrennt werden. Darüber hinaus ermöglicht die Substrukturierung eine Flexibilität der Gestaltung, die durch die Gebäudenutzer interaktiv beeinflusst werden kann. Durch eine interaktive Schnittstelle zum Nutzer kann die Unterteilung in helle und dunkle Bereiche den Nutzerwünschen entsprechend erfolgen¹⁷. Dadurch ist diese Fassade in der Lage, nicht nur die traditionelle Definition des Sonnenschutzes, sondern auch die des Fensters zu revidieren. Die Auflösung der in der Baukultur präsenten Aufteilung des Gebäudes in Wand- und Fensterelemente könnte in naher Zukunft ihre Relevanz verlieren. Durch die Flexibilität der Schaltmuster einer TN-Fassade kann die Gebäudehülle als eine dynamische, flexible Einheit betrachtet werden. Die Bereiche des Lichteinfalls, der Wärmegewinnung und der Verdunklung können beliebig durch den Nutzer oder über ein automatisiertes Regelungssystem definiert werden (konzeptuelle Darstellung in Abbildung 3-18). Darüber hinaus kann die Verglasung auch als Bildschirmfläche zur Darstellung von Informationen oder grafischen Inhalten dienen [118].

¹⁷ Wie zahlreiche Studien [112–117] zeigen, erwarten die Nutzer der meisten Gebäude einen aktiven Einfluss auf die Gestaltung ihrer Umwelt, insbesondere der Tageslichtversorgung und des Außenbezugs. Nach Moosman [59] wirkt sich die in der Psychologie als „Selbstwirksamkeit“ bezeichnete Einflussnahme der Nutzer auf ihre Umgebung auf die Akzeptanz der Umgebungsbedingungen (z.B. Helligkeit und Temperatur) aus. Nutzer, die einen Einfluss auf die Umweltbedingungen haben, sind nicht nur toleranter gegenüber Abweichungen der Bedingungen von den jeweiligen Komfortbereichen, sondern auch leistungsfähiger.

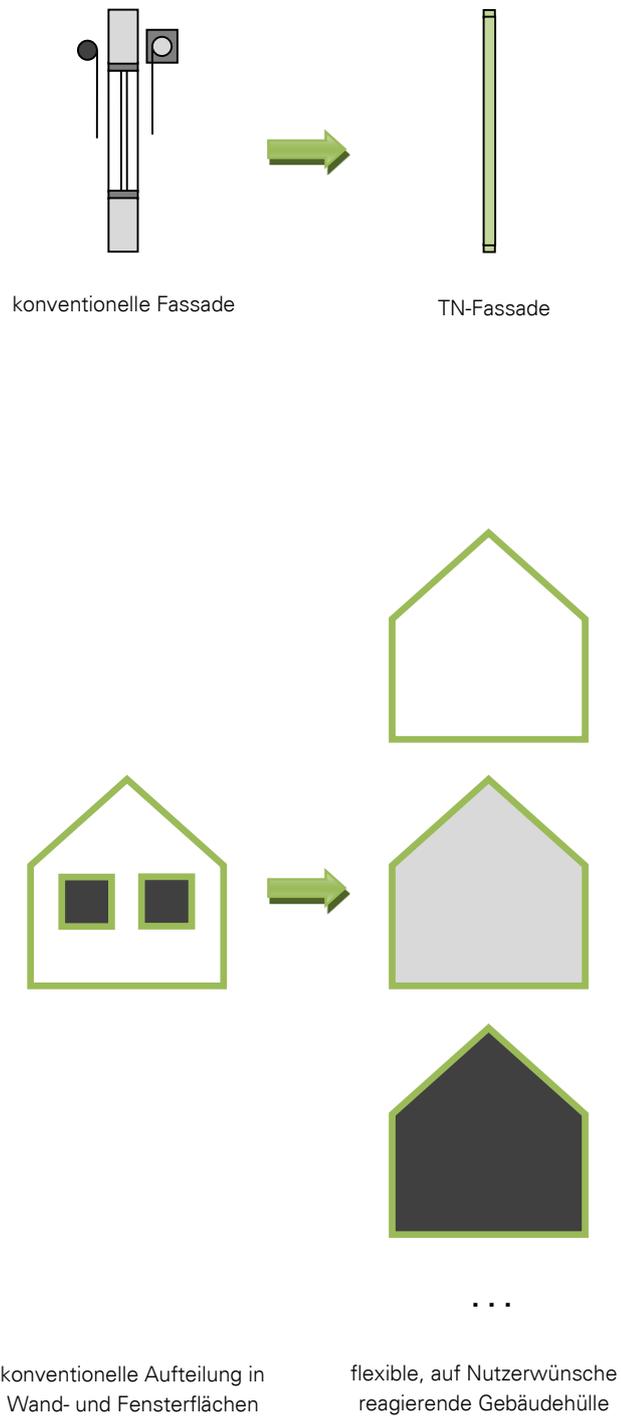


Abbildung 3-18: Adaptive Fassade als Ausdruck der Evolution der Gebäudehülle von der Additivität zur Multifunktionalität und Flexibilität

4. Testumgebung

In der vorliegenden Arbeit werden großflächig verglaste Fassaden in den Fokus der Betrachtung gestellt. Insbesondere bei Fensterflächenanteilen von über 65 % wird die Problematik des sommerlichen Wärmeschutzes besonders relevant [119]. Dieser hängt stark vom gewählten Sonnenschutzsystem und dessen Regelung ab [24, 120]. Für großflächig verglaste Gebäude (beispielsweise Hochhäuser) besteht darüber hinaus ein besonders großer Bedarf an alternativen Sonnenschutzlösungen, da sich traditionelle, bewegliche Sonnenschutzsysteme bei hohen Windlasten häufig als ungeeignet erweisen. Büro- und Verwaltungsbauten sind dabei die Gebäudetypen, an die besonders hohe Anforderungen hinsichtlich des visuellen und des thermischen Komforts gestellt werden [121]¹⁸. Laut Hartwig [121] werden diese Gebäude des Weiteren durch einen großen Bedarf an nutzungsspezifischen, automatisierten Regelungssystemen sowie hohe Anforderungen hinsichtlich Imagewirkung charakterisiert, wodurch sie sich als ein prädestinierter Gebäudetyp für den Einsatz adaptiver Verglasungen erweisen. Um die Eignung der schaltbaren Verglasungen für diesen Einsatzbereich und deren Verhalten unter realitätsnahen Bedingungen empirisch untersuchen zu können, wurde auf dem Universitätsgelände in Stuttgart ein Fassadentestgebäude (Fassadenprüfstand) errichtet. Dessen Auslegung sollte eine Nachbildung von in großflächig verglasten Büroräumen herrschenden Bedingungen ermöglichen.

Das in Holzrahmenbauweise ausgeführte Testgebäude verfügt über vier Messräume mit Abmessungen von jeweils $B \times T \times H = 2,00 \text{ m} \times 4,20 \text{ m} \times 2,70 \text{ m}$ und einen Technikbereich. Die Größe der Messräume entspricht jeweils einem Einzelbüro. Durch die modulare Wand- und Fassadenkonstruktion wurde die Möglichkeit vorgesehen, die ursprünglich südliche Orientierung der Testräume zu einem späteren Zeitpunkt zu verändern. Im Rahmen der Arbeit wurde die Südausrichtung der Verglasungen untersucht, da diese auf der nördlichen Hemisphäre die höchste Jahreseinstrahlung und die meisten Sonnenstunden (definiert als astronomisch mögliche Stundenanzahl mit direkter Sonneneinstrahlung, sofern keine Verschattung durch Nachbargebäude erfolgt [122]) von den vier Hauptausrichtungen erfährt [4]. In die Südfassade des Fassadenprüfstands wurden unterschiedliche

¹⁸ Eine ausführliche Analyse visueller und thermischer Anforderungen an Büroarbeitsplätzen findet sich im Projektbericht [41] wieder.

geschoss hohe Verglasungsmuster eingebaut. Eine Testkonfiguration mit der in der vorliegenden Arbeit vorrangig behandelten TN-Verglasung des Typs 2 (i³) im Raum 0.1 ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Der Aufbau des Fassadentestgebäudes ist im Anhang 1 detailliert dokumentiert. In Tabelle 4-1 sind die wesentlichen Charakteristika der Wand- und Deckenaufbauten gegeben.

In den Messräumen wurden dimmbare LED-Leuchten installiert, jeweils zwei Decken- und eine Pendelleuchte über dem Arbeitsplatz, die unabhängig voneinander angesteuert werden können. Mit in den Wandaufbauten verlegten Kapillarrohrmatten wurde ein Heiz- und Kühlsystem aufgebaut, das mit einer reversiblen Luft-Wasser-Wärmepumpe betrieben wird. Zur Erfassung der Raumklimadaten und der Außenbedingungen wurde das Testgebäude mit einer messtechnischen Ausstattung versehen. Die Solarstrahlung auf die horizontale Dachfläche und auf die vertikale Fläche der Südfassade wurde mittels zweier Pyranometer erfasst. Mithilfe eines nachführbaren Pyrheliometers auf dem Dach des Prüfstands war es zusätzlich möglich, die Direkt- und Diffusanteile der Strahlung aufzunehmen. Weitere Wetterparameter wurden von einer auf dem Gebäudedach montierten Wetterstation geliefert. Zum Messen der visuellen und der thermischen Bedingungen in jedem Testraum kamen jeweils vier Beleuchtungsstärkemessköpfe auf der Arbeitsflächenhöhe, verteilt über die Raumtiefe auf der Raum-Längsachse, Thermoelemente auf jeder Raumumschließungsfläche und in Raummitte sowie ein Feuchtesensor in Raummitte zum Einsatz. Die Außen- und Innenoberflächentemperaturen der Verglasungen wurden zeitgleich erfasst. Neben jeder Verglasung wurde darüber hinaus ein Außenbeleuchtungsstärkesensor platziert, der eine Erkennung von Verschattungseffekten auf der jeweiligen Verglasungsfläche ermöglichte. An ausgewählten Tagen wurden zusätzlich ein mobiler Innenpyranometer zur Erfassung der durch die Verglasung innen ankommenden Strahlungsleistung und eine Leuchtdichtekamera zur Blendungsdetektierung eingesetzt. Abbildung 4-2 zeigt schematisch die fest verbaute messtechnische Ausstattung des Prüfstands.



Abbildung 4-1: Südfassade des Fassadenprüfstands mit eingebauter TN-Verglasung des Typs 2 / i^3 im Testraum 0.1 (sowie TN-Verglasung Typ 1 im Raum 0.2, elektrochrome Verglasungen in Räumen 1.1 und 1.2, statische Zweifach-Referenzverglasung in der Technikzone 0.3 und 1.3). Phot.: G. Metzger | ILEK.

4 Testumgebung

Bauteil		U-Wert [W/m ² K] (EN ISO 6946)
Außenwand	Von außen nach innen: Hinterlüftete Holzlattung, Fassadenbahn, 120 mm Holzrahmenkonstruktion mit 120 mm Holzfaser- Gefachdämmung, Dampfbremse, OSB-Beplankung Flächenheizung (Kapillarrohrmatten) Textilverkleidung	0,30
Innenwand	Textilverkleidung Flächenheizung (Kapillarrohrmatten) 176 mm Holzrahmenkonstruktion mit 60 mm Holzfaser- Gefachdämmung und beidseitiger OSB-Beplankung Ggf. Flächenheizung (Kapillarrohrmatten) Ggf. Textilverkleidung	0,48
Dach	Von oben nach unten: PVC-Dichtungsbahn ca. 140 mm Gefälledämmung Bitumenbahn OSB-Platte 120 mm Brettschichtholzdecke	0,19
Geschossdecke	Von oben nach unten: OSB-Platte 50 mm Leitungsführung im Hohlboden 200 mm Holzrahmenkonstruktion mit 60 mm Holzfaser- Gefachdämmung und beidseitiger OSB-Beplankung	0,49
Bodenplatte aufgeständert (160 mm über Geländeoberkante)	Von oben nach unten: OSB-Platte 50 mm Leitungsführung im Hohlboden Dampfbremse OSB-Platte 200 mm Holzrahmenkonstruktion mit 200 mm Holzfaser- Gefachdämmung Unterspannbahn OSB-Platte	0,21

Tabelle 4-1: Wand- und Deckenaufbauten des Fassadentestgebäudes mit zugehörigen U-Werten (U-Wert-Berechnung: Herstellerangaben RubnerHaus AG – S.p.A)

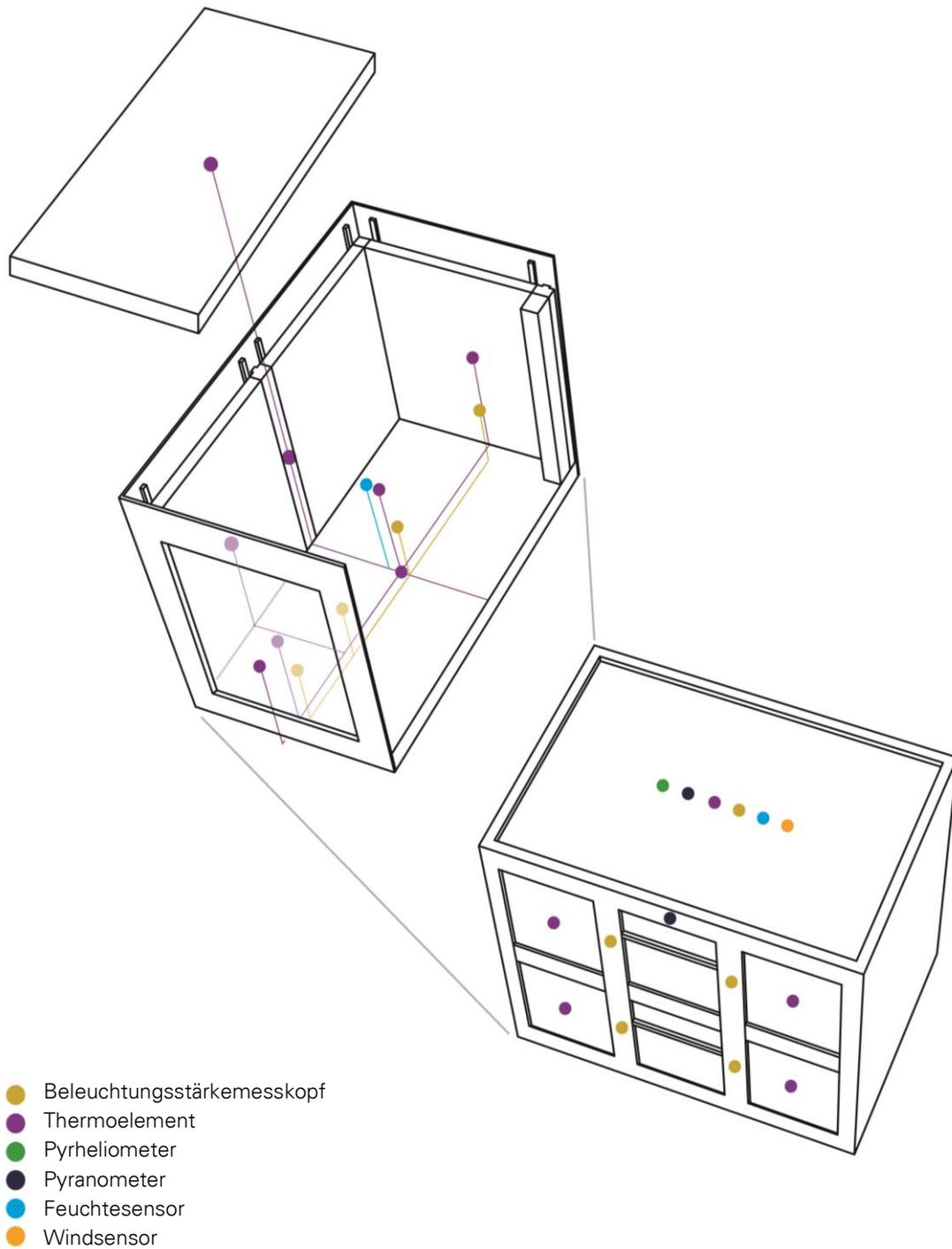


Abbildung 4-2: Messtechnische Ausstattung des Fassadentestgebäudes. Testraum 0.1. Schematische Darstellung.

5. Numerische Simulationen

Nachfolgend findet sich eine Vorstellung der Werkzeuge und Rahmenbedingungen für gekoppelte thermische und lichttechnische Simulationen, die Aufschlüsse über den Einfluss der Verglasungsadaptivität (s. Kapitel 6) und der vorgeschlagenen Ansteuerungskonzepte (s. Kapitel 7 – 8) auf den Innenraumkomfort und den Raumenergiebedarf geben werden.

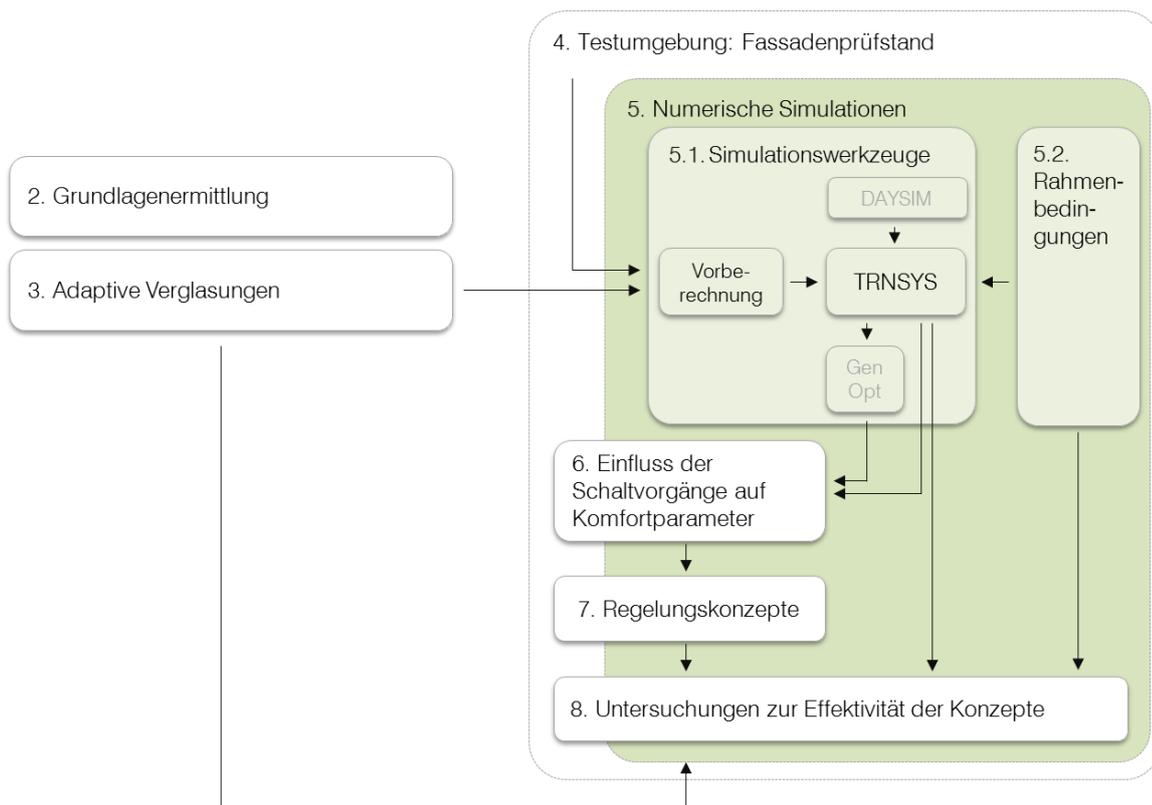


Abbildung 5-1: Inhaltsübersicht – Kapitel 5

5.1 Simulationswerkzeuge

Für die Simulation einer TN-Verglasung, deren Steuerung und der Umgebung wurde eine Kombination mehrerer Computerprogramme verwendet. Die Simulationswerkzeuge mussten dazu geeignet sein, sowohl die Adaptivität des Systems als auch die visuellen und die thermischen Auswirkungen dieser Adaptivität auf die Umgebung abzubilden. Diese Anforderungen überschreiten die Möglichkeiten einzelner Simulationsprogramme.

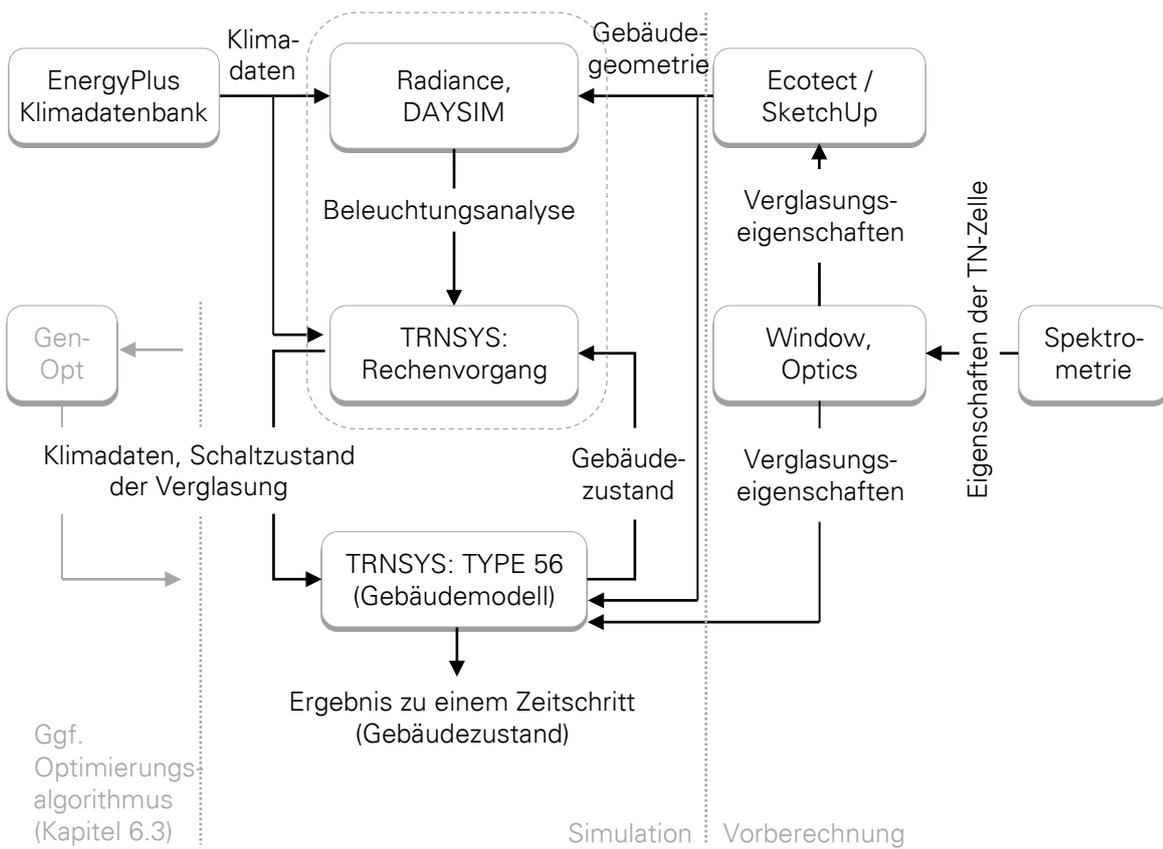
Zur Interpretation des Adaptationsprozesses wurde das Simulationsprogramm TRNSYS (Transient System Simulation Program) [123] ausgewählt. Es ist eins der wenigen Programme auf dem Markt, die die Simulation der Anpassungsfähigkeit von Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung ermöglicht. TRNSYS wurde ursprünglich in den 1970er Jahren von Klein, Duffie und Beckmann für Simulationen von Solaranlagen entwickelt [124], seitdem findet eine ständige Weiterentwicklung statt. Der modulare Aufbau der Software ermöglicht die Beschreibung einzelner Komponenten als autonome Module, die vom Nutzer aus der Programmbibliothek importiert beziehungsweise selbstständig programmiert und verknüpft werden können. Die Module werden im TRNSYS „Types“ genannt. Eines dieser Module, „Type 56“, repräsentiert ein dreidimensionales Gebäudemodell, welches zuvor in einer 3D-Modellierungssoftware erstellt wurde (SketchUp 2015, alternativ Autodesk Ecotect Analysis). Es wird zur Abbildung des im Kapitel 4 dargestellten zu simulierenden Raums im Fassadentestgebäude verwendet.

Die Verglasung der Südfassade des Testraums wurde nach spektrometrischer Erfassung der optischen Eigenschaften mithilfe des LBNL-Softwarepakets Optics 5.0 und Window 7.4 [125] modelliert (s. Kapitel 3.2) und anschließend in das TRNSYS-Gebäudemodell integriert. Um das Blendungsrisiko in Räumen zu berechnen, wurde ein weiteres Programm, DAYSIM [126] herangezogen. Es nutzt Berechnungsverfahren von Radiance, einem vom Lawrence Berkeley National Laboratory entwickelten Raytracing-Programm, um Tageslichtprofile im Jahresverlauf unter Berücksichtigung der Klimaverhältnisse und der Sonnenposition zu erstellen und die Wahrscheinlichkeit der Blendung durch Tageslicht mithilfe des DGP-Werts (s. Kapitel 2.3.2.3) zu ermitteln. Bis Oktober 2017 konnten ebenfalls die Beleuchtungsstärkeverteilung und der Energiebedarf für künstliche Beleuchtung zu jeder Jahresstunde nur mit DAYSIM berechnet werden. Sie wurden anschließend in die energetischen Simulationen mit TRNSYS 17 eingebunden. Seit dem Erscheinen der Programmversion TRNSYS 18 sind die DAYSIM-Rechenvorgänge zur Ermittlung der Helligkeitsverteilung und des Beleuchtungsenergiebedarfs bereits in TRNSYS integriert.

Die benötigten Klimadaten (im Kapitel 5.2.1 detailliert betrachtet) wurden in den meisten Fällen aus der öffentlich verfügbaren EnergyPlus Klimadatenbank importiert. Bei Bedarf eines direkten Vergleichs der Simulationsergebnisse mit Versuchsergebnissen aus dem Fassadentestgebäude konnte die Wetterdatei für die Testtage entsprechend modifiziert werden.

Die Adaptivität der Verglasung wurde mithilfe einer variablen Verglasungsnummer (Verglasungs-ID) dargestellt. Die Zuweisung jeweils einer Verglasungs-ID zu jedem Abdunklungszustand und ggf. die Änderung der Zuordnung während der Simulation ermöglicht die Variation der Verglasungseigenschaften. Obwohl die TN-Technologie eine stufenlose Änderung der Transmission zulässt, ist bei der verwendeten Simulationssoftware eine Diskretisierung der Schaltzustände notwendig. Demnach wurde der Schalhub zwischen dem Zustand der minimalen und der maximalen Transparenz des Systems in Abdunklungsstufen 0 bis 10 unterteilt (vgl. Kapitel 3.2.2.6 und 3.2.1.3).

Bei der Untersuchung der Gewichtungsmöglichkeiten der Komfortparameter im Kapitel 6.3 fand ein zusätzliches Programm GenOpt Verwendung. Durch seine Schnittstelle zu TRNSYS konnte der in GenOpt verankerte Optimierungsalgorithmus in der oben beschriebenen TRNSYS-Simulationsumgebung ausgeführt werden. Eine genaue Beschreibung des verwendeten Algorithmus findet sich im Kapitel 6.3. Der Simulationsaufbau ist in Abbildung 5-2 schematisch dargestellt.



----- : alternativ TRNSYS 18

Abbildung 5-2: Simulationsstrategie mit Verknüpfung lichttechnischer und energetischer Simulationen

5.2 Rahmenbedingungen

5.2.1 Klimatische Bedingungen

Klimatische Randbedingungen stellen einen der wichtigsten Einflussfaktoren auf die Fassadenplanung dar. Als Schnittstelle zwischen dem Innen- und dem Außenraum ist die Fassade den vom Klima abhängigen, externen Beanspruchungen ausgesetzt. Die Ausführung der Fassade kann je nach der geografischen Lage eines Gebäudes stark variieren. Die so genannten Klimafaktoren, zu denen z.B. die geografischen Koordinaten gehören, beeinflussen die Klimatelemente - die Eigenschaften eines Klimasystems. Die Elemente mit einem direkten Einfluss auf die Fassadengestaltung werden nach Hegger [4] wie folgt bezeichnet: Sonnenstrahlung (direkt und diffus), Lufttemperatur und ihre tages- bzw. jahreszeitliche Schwankung, Luftdruck, Luftfeuchtigkeit, Wind, Niederschlag, Verdunstung. Die Temperatur und die Solarstrahlung sind maßgeblich für die Auslegung und Ansteuerung der untersuchten adaptiven Verglasung, für die Wärmegewinne und die Beleuchtungssituation im Raum. Sonstige Klimatelemente spielen bei der Gebäudeplanung eine Rolle, haben aber einen marginalen Einfluss auf die Auslegung der adaptiven Verglasung.

Der Standort des Fassadentestgebäudes, Stuttgart, ist repräsentativ für die mittleren Breiten mit ausgeprägten jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur und der Solarstrahlung. Für Jahressimulationen der Verglasungspotentiale wurden drei zusätzliche Standorte mit unterschiedlichen klimatischen Charakteristiken ausgewählt. Hierfür erfolgte die Unterscheidung repräsentativer Klimagebiete, zunächst über die Unterteilung der Erde in Beleuchtungsklimazonen [127]. Diese ergeben sich aus den geographischen Breiten und dem daraus resultierenden Einstrahlungswinkel der Sonne, sodass eine Zone jeweils ein Gebiet ähnlicher solarer Einstrahlung repräsentiert (s. auch [128]). Um sowohl den Einfluss der Einstrahlung als auch der Temperatur zu berücksichtigen, wurde zusätzlich die Einteilung der physischen Klimazonen betrachtet. In der differenzierteren Einteilung nach Köppen und Geiger [129], der am häufigsten verwendete Methode der effektiven Klimaklassifikation, finden sich Übereinstimmungen mit der Verteilung der Solarstrahlung wieder. Durch die Überlagerung der vorgestellten Klassifikationen wurden die in Abbildung 5-3 und Tabelle 5-1 aufgeführten repräsentativen Standorte identifiziert.

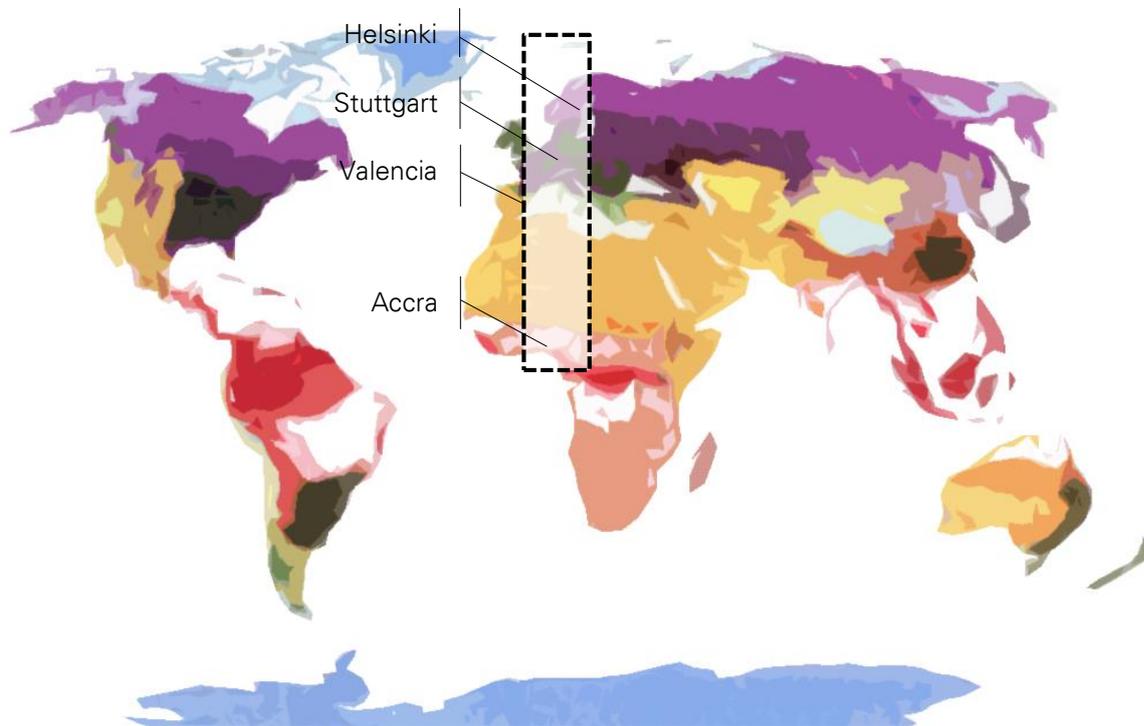


Abbildung 5-3: Lage der gewählten repräsentativen Orte im Bezug auf Köppen-Geiger-Klimazonen (nach [129], überarbeitet)

	Stadt	Land	Breitengrad	Längengrad	Beleuchtungs- klimazone	Köppen- Geiger 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 5-1: Übersicht und 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. Die Daten liegen in einer öffentlich verfügbaren EnergyPlus-Klimadatenbank [130] vor. Zur Analyse des Einflusses des Schaltvorgangs auf die Temperatur und die Beleuchtungsstärke im Testraum wurden anhand der statistischen Wetterdatei des TMY-Referenzjahres [130] repräsentative, sowohl sonnige als auch bewölkte Tage des Jahres ausgewählt. Für die Analyse unter stationären Bedingungen wurden die Wetterbedingungen zur Mittagszeit der jeweiligen Tage als konstant angenommen und auf die gesamte Simulationszeit (1 Jahr) übertragen. Der stationäre Zustand des simulierten Modells wurde bei einem Simulationszeitschritt von 1 Stunde nach ca. 400 Stunden erreicht. Die hierfür ausgewählten repräsentativen Wetterbedingungen für Stuttgart sind in Tabelle 5-2 aufgeführt.

Datum	Uhrzeit	Wetter- charakteristik	T _{out}	Bew.	I _{glob_H}	I _{glob_S}	I _{dir_S}
09. April	12:00	sonniger Frühlingstag	14	0	719	712	505
07. April	12:00	bewölkter Frühlingstag	16	100	291	175	9
26. Juni	12:00	sonniger	20	0	899	540	346
03. Juli	13:00	Sommertag	24	0	872	550	322
07. Juli	13:00	bewölkter Sommertag	18	95	583	358	84
12. Dezember	11:00	sonniger Wintertag	3	0	197	640	515
27. Dezember	12:00	bewölkter Wintertag	-3	100	27	14	0
T _{out}	Außentemperatur [°C]						
Bew.	Bewölkungsgrad [%]						
I _{glob_H}	Globalstrahlung auf die Horizontale [W/m ²]						
I _{glob_S}	Globalstrahlung auf die Südfassade [W/m ²]						
I _{dir_S}	Direktstrahlung auf die Südfassade [W/m ²]						

Tabelle 5-2: Repräsentative Wetterbedingungen für Stuttgart (TMY-Referenzjahr)

5.2.2 Nutzungsszenario

Aufgrund der im Kapitel 4 erwähnten hohen Anforderungen an das Innenraumklima in Bürogebäuden und der Potentiale zur Integration adaptiver Fassadensysteme in diesem Gebäudetyp wurden vor allem bürospezifische Rahmenbedingungen als Grundlage der lichttechnischen und energetischen Modellierung verwendet. Hierfür wurde das Testgebäude numerisch modelliert. Ausgabedaten aus den Simulationen wurden hauptsächlich für den Raum 0.1 (s. Abbildung 4-1) mit der in die Südfassade integrierten schaltbaren Verglasung des Typs i³ ausgelesen. Für Simulationszwecke wurden Büroarbeitszeiten von Montag bis Freitag zwischen 8:00 Uhr und 17:00 Uhr als Zeiten der Nutzeranwesenheit angenommen. Die Position des Raumnutzers wurde jeweils 1 m von den Seitenwänden und 1,20 m von der Fassade entfernt definiert, mit Blickrichtung senkrecht zur verglasten Fassade und einer Augenhöhe von 1,20 m über dem Fußboden. Der sich zwischen dem Nutzer und der Verglasung befindliche Bereich wurde als Arbeitsfläche interpretiert, die durch den im Testgebäude installierten Sensor auf der Höhe von 75 cm über dem Fußboden, 1 m von der Fassade entfernt (E_{wp}), repräsentiert wird¹⁹. Die im Simulationsmodell abgebildeten relevanten Sensorpunkte (vgl. messtechnische Ausstattung des Testraums, Abbildung 4-2) im Bezug auf die Nutzerposition sind in Abbildung 5-4 dargestellt.

Solche Anordnung der Arbeitsfläche ermöglichte eine direkte Evaluierung der Verglasungsauswirkungen auf den visuellen Nutzerkomfort. Die Einflüsse der Raumbooberflächen wurden somit minimiert. Reale Anwendungen in Büroräumen sehen häufig eine dominierende Blickrichtung der Nutzer parallel zur Fassade sowie eine variable Nutzerposition vor. Die aus beiden Blickrichtungen resultierenden Unterschiede hinsichtlich des visuellen Komforts (geringeres Blendungsrisiko, aber größerer Einfluss der Raumbooberflächeneigenschaften) wurden im Forschungsvorhaben „Adaptive Verglasungssysteme“ untersucht und im Forschungsbericht [41] beschrieben.

¹⁹ Im Rahmen der lichttechnischen Simulationen wurde im gesamten Raum ein Analyseraster mit Maschenweite von 0,5 m x 0,5 m angelegt. Die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche wurde als Mittelwert der vier Sensorwerte rund um den Punkt E_{wp} berechnet.

5 Numerische Simulationen

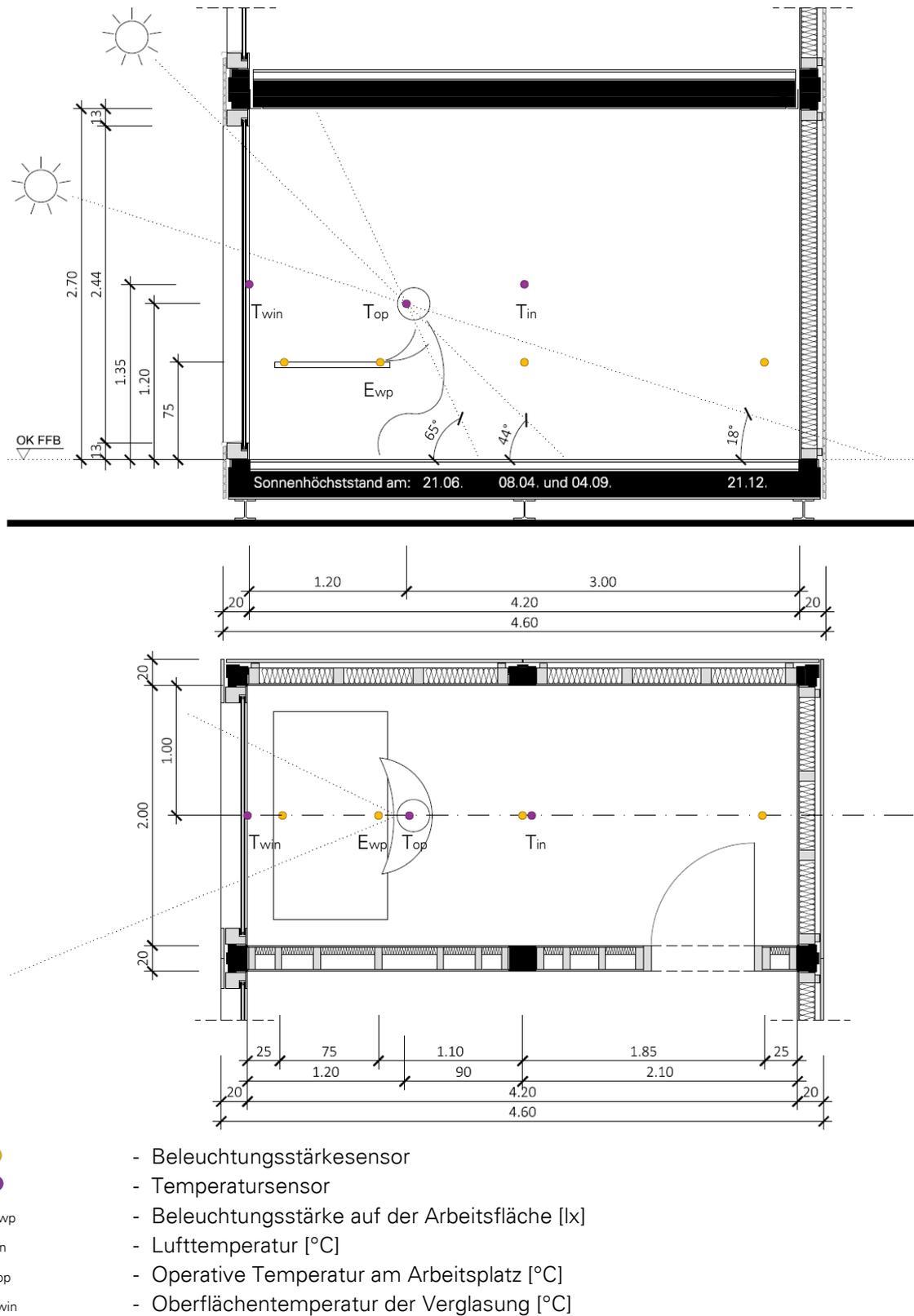


Abbildung 5-4: Darstellung relevanter Sensorpunkte des Testraums im Simulationsmodell im Bezug auf die Nutzerposition. Oben: Längsschnitt, unten: Grundriss.

Beim direkten Sichtbezug des Nutzers zum Außenraum ist die Sonnenposition besonders ausschlaggebend für das Risiko direkter Blendung. Aus Abbildung 5-4 (Längsschnitt) ist ersichtlich, dass am Standort Stuttgart, für die gegebene Raumgeometrie, Fassadenorientierung und Nutzerposition, zwischen Mitte April und Anfang September kein Blickkontakt des Nutzers zur Sonnenscheibe besteht und somit das Risiko der direkten Blendung verringert wird²⁰. Diese Erkenntnis spiegelt sich hauptsächlich in den Jahresanalysen der Blendungshäufigkeiten (Kapitel 8.4.2) wider. Inwiefern die Blendungseffekte von der direkten Einstrahlung durch die Veränderung der Verglasungstransmission unterbunden werden können, wird im Kapitel 6.2.3 detailliert untersucht.

5.2.3 Simulierte Verglasungssysteme

Im Rahmen der Simulationen wurde die schaltbare TN-Verglasung (Typ i³) mit konventionellen Zweifach- und Dreifachverglasungen, mit und ohne außenliegende Sonnenschutzvorrichtung, verglichen. Für den nachfolgenden Vergleich findet die in Abbildung 5-5 aufgeführte Benennung der Aufbauten von A bis E Verwendung.

²⁰ Eine Sonnenstandsberechnung wurde für alle ausgewählten Standorte durchgeführt, um standortbedingtes Blendungspotential zu ermitteln. Demnach kann in Accra für mehr als die Hälfte des Jahres (zwischen Mitte März und Ende September) eine direkte Blendung durch die im Gesichtsfeld sichtbare Sonne ausgeschlossen werden, in Helsinki hingegen ist dieser Zeitraum am kürzesten (Mitte Mai bis Ende Juli) (vgl. [41]).

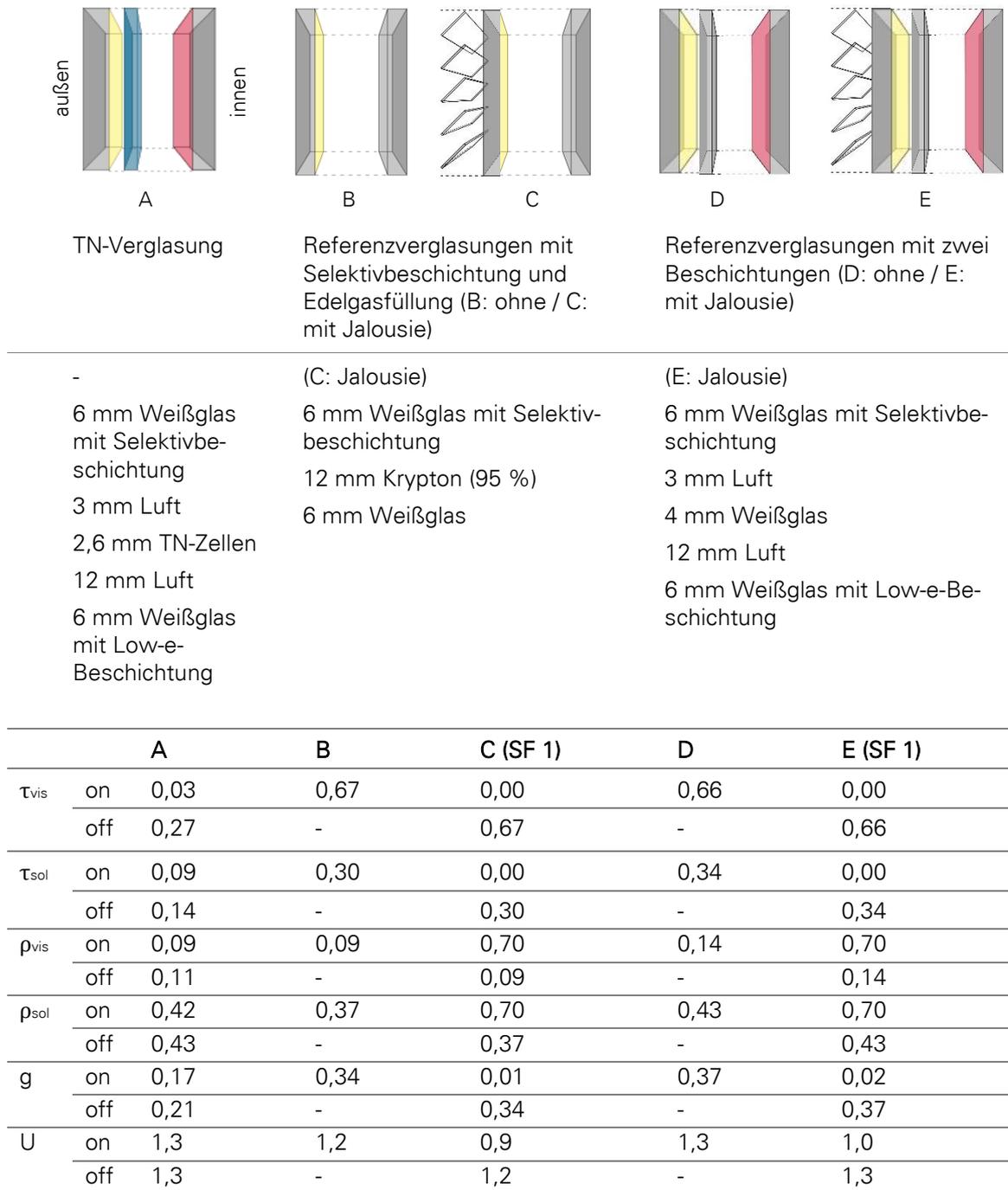


Abbildung 5-5: Verglasungen für den Vergleich der Raumenergiebedarfe. Aufbau jeweils von außen nach innen. Die Eigenschaften der TN-Verglasung aufgetragen für den maximal abgedunkelten (on) und den maximal aufgehellten (off) Zustand, die Eigenschaften der Referenzverglasungen mit Jalousie – für Jalousie vollständig geschlossen (Shading Factor / SF 1) („on“) und Jalousie hochgefahren („off“), berechnet mit Window 7, NFRC-Randbedingungen.

6. Einfluss der Schaltvorgänge auf Komfortparameter

Durch die entsprechende Ansteuerung der schaltbaren Fassadenverglasung sollen sowohl der thermische als auch der visuelle Komfort so weit wie möglich optimiert werden. Zu welchem Grad diese beiden Komfortarten durch die Veränderung der Verglasungstransmission beeinflusst werden können, bleibt zu untersuchen. Hierfür werden die im Kapitel 2.3 aufgeführten Komfortparameter bei den einzelnen Schaltzuständen der Verglasung detailliert betrachtet. Die Ermittlung der Grenzen der Wirksamkeit der Schaltvorgänge ermöglicht vor allem eine anschließende Auslegung der Regelung innerhalb dieser Einflussgrenzen²¹. Darüber hinaus können Ziele für die weitere Produktentwicklung formuliert werden, die eine höhere Wirksamkeit des Systems zur Folge hätten.

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss der Schaltvorgänge der Verglasung zunächst auf thermische (vgl. Kapitel 2.3.1) und anschließend auf visuelle Kriterien (vgl. Kapitel 2.3.2) analysiert. Da eine gleichzeitige Verbesserung des thermischen Komforts und des visuellen Komforts zwei, insbesondere während der Kühleisaison, schwer vereinbare Ziele darstellt, wird darüber hinaus ein Optimierungsproblem formuliert, dessen Lösung einen Aufschluss über die beste erreichbare Komfortverbesserung unter sowohl thermischen als auch visuellen Gesichtspunkten geben sollte. Ein Überblick über die im Kapitel 6 behandelten Themenstellungen ist in Abbildung 6-1 gegeben.

²¹ Bei den im Kapitel 7 vorgestellten Regelungsstrategien variieren die Schaltzustände der Verglasung im Tagesverlauf, wodurch die Änderungen in Umgebungsbedingungen nicht nur von den Verglasungseigenschaften, sondern auch von zeitabhängigen Faktoren wie der Dauer der jeweiligen Schaltzustände abhängig sind. Durch die vorgezogene Analyse konstant bleibender Schaltzustände im Kapitel 6 ist eine eindeutige Rückführung der Komfortänderungen auf ihre Auslöser möglich. Somit können maximale Einflussmöglichkeiten der TN-Verglasung auf die Komfortbedingungen ermittelt werden.

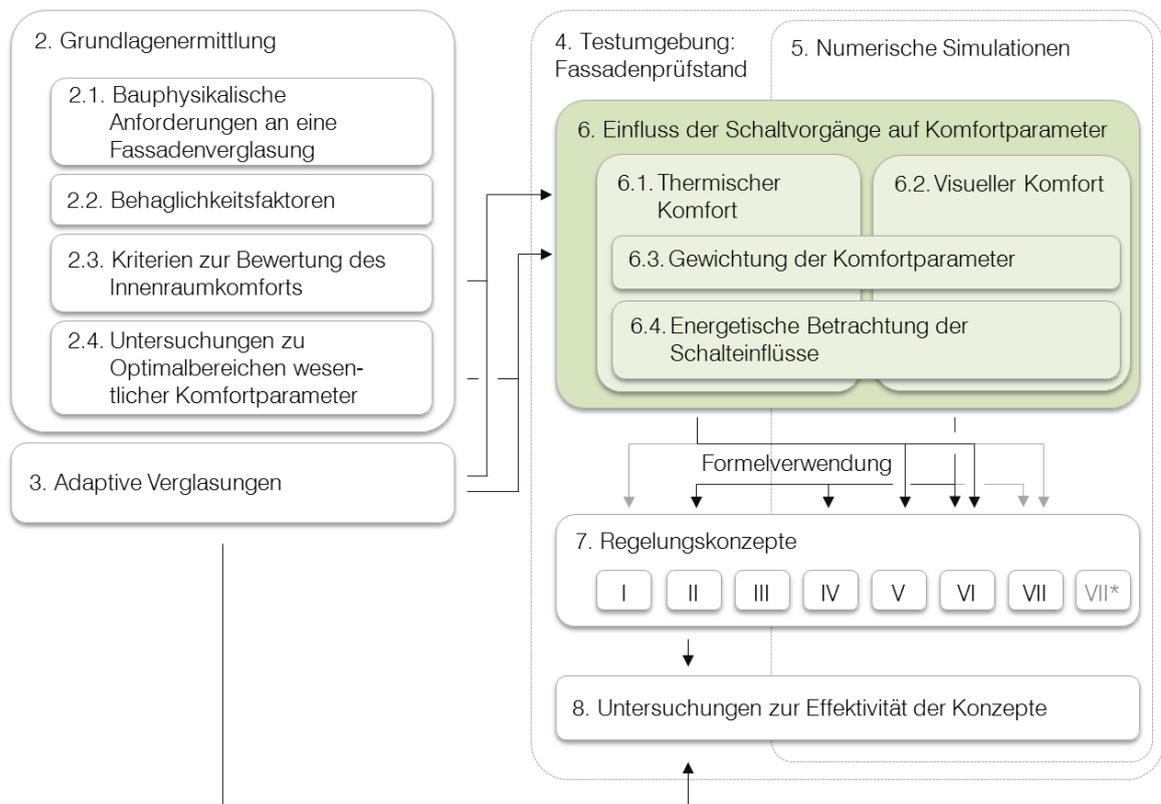


Abbildung 6-1: Inhaltsübersicht – Kapitel 6

6.1 Thermischer Komfort

6.1.1 Einfluss des Schaltvorgangs auf die Änderung der Innentemperatur

Die Änderung der Innentemperatur ist abhängig von der Wärmebilanz für den Raum. Der Einfluss der Verglasungseigenschaften auf die mögliche Temperaturänderung wird daher aus einer Wärmestrombilanzierung hergeleitet. Diese erfolgt zunächst für einen stationären Zustand (gleichbleibende Temperaturen auf Innen- und Außenseiten der jeweiligen Bauteile). Die resultierenden Erkenntnisse werden anschließend auf instationäre Bedingungen übertragen.

Nach dem Ansatz einer thermischen Raumbilanzierung im stationären Zustand gleicht die Summe der in den Raum (nach innen) gerichteten Wärmeströme der Summe der aus dem Raum (nach außen) gerichteten Wärmeströme [131, 132]. Für einen stationären Zustand kann unter der Voraussetzung, dass keine Lüftung stattfindet und keine internen Wärmequellen im Raum vorhanden sind, die thermische Bilanzierung vereinfacht auf folgende Wärmeströme beschränkt werden (dargestellt für einen Raum mit einer Verglasung und $n-1$ opaken Umschließungsflächen):

$$\sum_{j=1}^n \Phi_{T,j} = \Phi_r \quad (6-1)$$

$$\Phi_{T,j} = U_j (T_{in} - T_{e,j}) A_j \quad (6-2) \text{ nach [131, 133]}$$

$$\Phi_r = I g A_{Verglasung} \quad (6-3) \text{ nach [131]}$$

j	- Laufende Nummer des betrachteten Bauteils [-]
n	- Gesamtanzahl der betrachteten Bauteile (Raumumschließungsflächen) [-]
$\Phi_{T,j}$	- Transmissionswärmestrom durch Bauteil j aufgrund einer Temperaturdifferenz (positiver Wert für Wärmestromrichtung von innen nach außen) [W]
Φ_r	- Wärmestrom durch die Verglasung aufgrund solarer Einstrahlung (positiver Wert für Wärmestromrichtung von außen nach innen) [W]
U_j	- Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils j [W/m ² K]
T_{in}	- Lufttemperatur auf der Innenseite des Bauteils j (Innentemperatur des betrachteten Raums) [K]
$T_{e,j}$	- Lufttemperatur auf der Außenseite des Bauteils j [K]
A_j	- Fläche des Bauteils j [m ²]
I	- Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsoberfläche [W/m ²]
g	- Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung [-]
$A_{Verglasung}$	- Fläche der Verglasung [m ²]

Für den betrachteten Testraum im Erdgeschoss des Fassadentestgebäudes mit der zu ca. 80 % verglasten Südfassade und einer aufgeständerten Bodenplatte (vier opake Außenbauteile, eine Verglasung, zwei opake Innenbauteile (vgl. Anhang 1)) ergibt sich aus dem Zusammenführen der Formeln (6-1) bis (6-3):

$$\sum_{j=1}^4 (U_j(T_{in}-T_{out})A_j) + \sum_{k=1}^2 (U_k(T_{in}-T_{e,k})A_k) = I g A_{Verglasung} \quad (6-4)$$

j	- Laufende Nummer des Außenbauteils (mit Kontakt zum Außenraum) [-]
k	- Laufende Nummer des Innenbauteils (mit Kontakt zu einem Innenraum) [-]
T_{in}	- Innentemperatur des betrachteten Raums [K]
T_{out}	- Außentemperatur [K]
$T_{e,k}$	- Lufttemperatur auf der Außenseite des Bauteils k [K]
U_j	- Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils j [W/m^2K]
U_k	- Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils k [W/m^2K]
A_j	- Fläche des Bauteils j [m^2]
A_k	- Fläche des Bauteils k [m^2]
I	- Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsfläche [W/m^2]
g	- Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung [-]
$A_{Verglasung}$	- Fläche der Verglasung [m^2]

Unter der Annahme gleicher Innenraumtemperaturen in allen Räumen des Testgebäudes $T_{e,k} = T_{in}$ gilt:

$$T_{in} = T_{out} + \frac{I g A_{Verglasung}}{\sum_{j=1}^4 (U_j A_j)} \quad (6-5)$$

Ein Schaltvorgang der Verglasung manifestiert sich in der Änderung des g-Werts (vgl. Tabelle 3-3). Wird der Unterschied der Innenraumtemperaturen aufgrund der Verglasungsschaltung zwischen Schaltstufe x und Schaltstufe y gesucht, so ergibt sich nach Formel (6-5) die folgende Temperaturdifferenz für stationäre Bedingungen (beim konstanten Wärmedurchgangskoeffizienten):

$$T_{in,x} - T_{in,y} = (g_x - g_y) \frac{I A_{Verglasung}}{\sum_{j=1}^4 (U_j A_j)} \quad (6-6)$$

$T_{in,x}$	- Innenraumtemperatur beim Schaltzustand x [K]
$T_{in,y}$	- Innenraumtemperatur beim Schaltzustand y [K]
g_x	- Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung im Schaltzustand x [-]
g_y	- Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung im Schaltzustand y [-]

I	- Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsfläche [W/m ²]
A _{Verglasung}	- Fläche der Verglasung [m ²]
j	- Laufende Nummer des Außenbauteils [-]
U _j	- Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils j [W/m ² K]
A _j	- Fläche des Bauteils j [m ²]

Es ist ersichtlich, dass der aus der Schaltstufenveränderung resultierende Temperaturgradient weniger von der Außentemperatur als von der auf die Fassade auftreffenden Solarstrahlung abhängig ist. Darüber hinaus ist er für jedes Gebäude mit bestimmten bauphysikalischen Bauteileigenschaften individuell²². Dabei ist die erreichbare Differenz des g-Werts einer schaltbaren Verglasung entscheidend für den erreichbaren Temperaturunterschied. Bei einer Verglasung mit einem höheren g-Wert-Hub als bei der betrachteten TN-Verglasung (dieser beträgt 0,04, vgl. Tabelle 3-3) wäre ein größerer Einfluss auf die Raumtemperatur möglich (s. Kapitel 6.1.1.2).

Die erwartete Temperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs ist proportional zum Globalstrahlungswert. Der Proportionalitätsfaktor P ergibt sich nach Gleichung (6-7). Sein Wert steht in einer Korrelation mit den bauphysikalischen Eigenschaften der Raumumschließungselemente und beträgt bei den genannten Annahmen:

$$\frac{\sum_{j=1}^4 (U_j A_j)}{A_{\text{Verglasung}}} = P_{\text{stat}} \quad (6-7)$$

Nach Formel (6-6):

$$T_{\text{in},x} - T_{\text{in},y} = \Delta T = (g_x - g_y) \frac{I}{P_{\text{stat}}} \quad (6-8)$$

P _{stat}	- Proportionalitätsfaktor [W/m ² K]
I	- Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsfläche [W/m ²]
T _{in,x}	- Innenraumtemperatur beim Schaltzustand x [K]
T _{in,y}	- Innenraumtemperatur beim Schaltzustand y [K]
ΔT	- Temperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs (Schaltstufe x zu Schaltstufe y) [K]
g _x	- Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung im Schaltzustand x [-]

²² Simulationsergebnisse eines hypothetischen, vergleichbaren Testgebäudes in Massivbauweise, dessen Außenwände und Decken ca. zweimal höhere U-Werte aufweisen, haben bewiesen, dass für diesen Fall die durch die Verglasungsschaltung erreichbare Raumtemperaturdifferenz ca. 50 % geringer wäre.

g_y	- Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung im Schaltzustand y [-]
$A_{\text{Verglasung}}$	- Fläche der Verglasung [m^2]
j	- Laufende Nummer des Außenbauteils [-]
U_j	- Wärmedurchgangskoeffizient des Bauteils j [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]
A_j	- Fläche des Bauteils j [m^2]

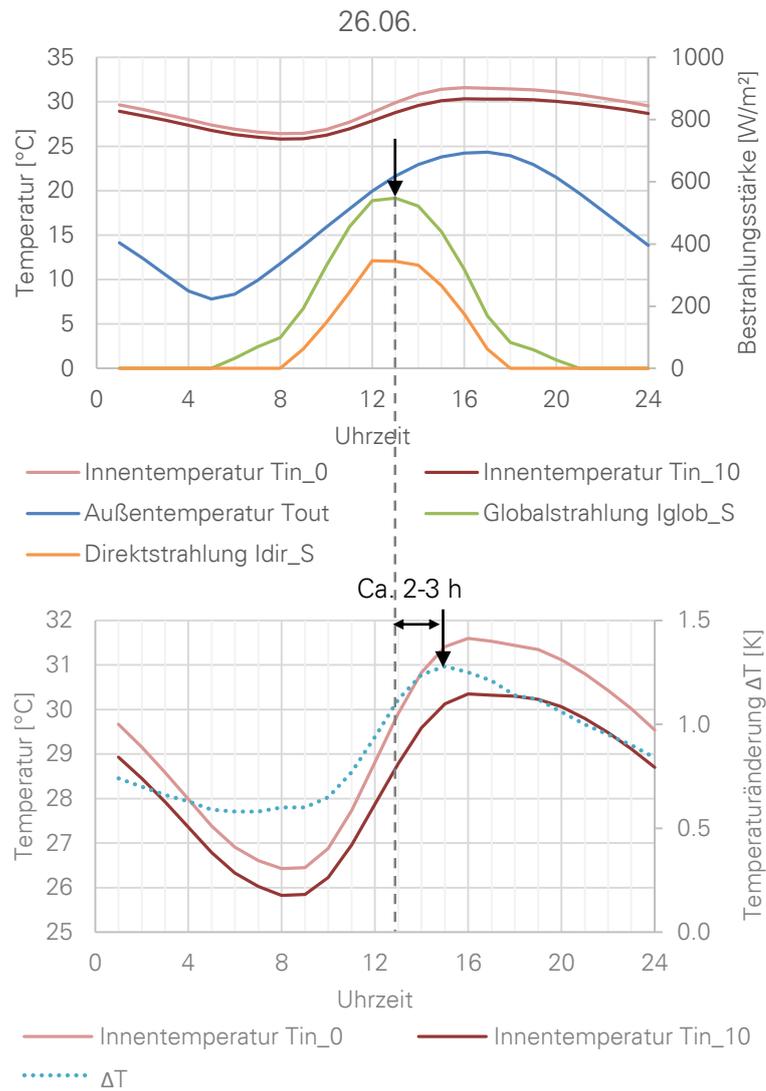
Unter stationären Bedingungen und unter der Voraussetzung gleicher Innenraumtemperaturen in allen Testräumen, wäre eine theoretische Innentemperaturänderung durch den Schaltvorgang (bei maximalem Schaltheub) von bis zu ca. 9 K an sonnigen Tagen in Stuttgart erzielbar (bei $P_{\text{stat}} = \text{ca. } 3 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$). Bei wechselnden Wetterbedingungen tritt jedoch ein stationärer Zustand nicht auf. Die Änderungen der Raumtemperatur sind von vielen zusätzlichen Faktoren abhängig, wie der Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile. Diese hängt von der Rohdichte und somit von der Masse und der spezifischen Wärmekapazität der speichernden Materialien ab (schwere Konstruktionen weisen grundsätzlich höhere Wärmespeicherfähigkeiten als leichte Bauweisen auf). Je größer die Speicherfähigkeit, desto langsamer erfolgt die Temperaturänderung im Bauteil und im Raum bei einer Veränderung der thermischen Belastung (auch als s.g. thermische Trägheit der Bauteile bezeichnet). Die genaue Berechnung der thermischen Trägheit ist nur mit einem erheblichen mathematischen Aufwand möglich (s. DIN EN ISO 13786). „Es bedarf [...] der Lösung der instationären Wärmeleitungsgleichung für eine gewisse Periode im eingeschwungenen Zustand“ [134]. Stark vereinfacht stellt die Temperaturschwankung²³ eine Sinuskurve dar (Annahme bei der Berechnung nach DIN EN ISO 13786). Die Temperaturamplituden (die täglichen Schwankungsbreiten) sind dabei grundsätzlich bei leichten Konstruktionen höher als bei schweren Konstruktionen. Darüber hinaus schwankt die Temperatur auf der Bauteilinnenseite phasenverschoben im Bezug auf die Schwankung der Solareinstrahlung und der Außentemperatur. Die Phasenverschiebung ist bei unterschiedlichen Konstruktionsarten unterschiedlich ausgeprägt und hängt von der Wärmespeicherfähigkeit des jeweiligen Bauteils ab [132, 135]. Dementsprechend stellt sich auch die Raumlufttemperatur mit einer Phasenverschiebung ein.

Auf der Basis dynamischer Computersimulationen (s. Kapitel 5) wurde die Phasenverschiebung der Innentemperatur für den betrachteten Modellraum ermittelt. Sie beträgt ca. zwei bis drei Stunden im Bezug auf den Solarstrahlungsverlauf auf die verglaste Südfassade. Dieser Zusammenhang wird in der nachfolgenden Abbildung 6-2 für einen sonnigen Sommertag dargestellt. Während die Solarstrahlung um 13:00 Uhr das Tagesmaximum erreicht, nimmt die Raumtemperatur erst zwischen 15:00 Uhr und ca. 19:00 Uhr die

²³ „Die im eingeschwungenen Zustand auftretenden Temperaturen schwanken um eine Mitteltemperatur mit einer Schwankungsbreite, die während des gesamten Einschwingvorgangs annähernd gleich bleibt“ [132].

höchsten Tageswerte an. Wird die Innentemperaturänderung für verschiedene Schaltstufen der Verglasung analysiert, so kann festgestellt werden, dass die relative Temperaturänderung in Abhängigkeit der Schaltstufe um ca. 15:00 Uhr ihr Tagesmaximum erreicht. Der größte Einfluss auf die Raumtemperatur wird somit ca. zwei Stunden nach dem Strahlungsmaximum sichtbar. Der Einfluss des Schaltvorgangs auf die Raumtemperatur ist, wie unter stationären Bedingungen, weiterhin gegeben, jedoch nicht mehr konstant. Der Wert der maximalen erreichbaren Temperaturänderung infolge des Schaltvorgangs ist, außer der Speicherfähigkeit und der thermischen Trägheit der Raumumschließungsflächen, von der Höhe der Solarstrahlung ca. zwei Stunden zuvor abhängig.

Um die mögliche maximale Temperaturänderung ΔT an einem beliebigen Tag prognostizieren zu können, wurde in Anlehnung an Formeln (6-7) und (6-8) auch für instationäre Bedingungen annäherungsweise ein Proportionalitätsfaktor errechnet. Es handelt sich dabei um eine stark vereinfachte Berechnung zur Einschätzung thermischer Effekte, bei der ein möglichst kleiner rechnerischer Aufwand erwünscht war, denn solcher ist für die im Kapitel 7 folgende Entwicklung „vorausschauender“ Regelungskonzepte vonnöten.



T_{in_0}	Innenraumtemp. bei maximal aufgehellter Verglasung (Schaltstufe 0) [°C]
T_{in_10}	Innenraumtemp. bei maximal abgedunkelter Verglasung (Schaltstufe 10) [°C]
T_{out}	Außentemperatur [°C]
ΔT	Innenraumtemperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs ($T_{in_0} - T_{in_10}$) [K]
I_{glob_S}	Globalstrahlung auf die Südfassade [W/m ²]
I_{dir_S}	Direktstrahlung auf die Südfassade [W/m ²]

Abbildung 6-2: Vergleich der Strahlungscharakteristik und der Temperaturentwicklung für zwei Extremzustände der TN-Verglasung an einem warmen, sonnigen Sommertag (Simulation unter TMY-Wetterbedingungen)

Im Fall der instationären Bedingungen wurde ein Ansatz der Herleitung des Proportionalitätsfaktors P_{instat} aus simulierten Temperaturänderungen in Anlehnung an Formel (6-8) verfolgt, wie mit Formel (6-9) ausgedrückt.

$$P_{\text{instat}} = (g_0 - g_{10}) \frac{I_{\text{glob_S}}(\text{ca. } 13:00 \text{ Uhr})}{\Delta T_{0-10}(\text{ca. } 15:00 \text{ Uhr})} \quad (6-9)$$

P_{instat}	- Proportionalitätsfaktor bei instationären Bedingungen, empirisch ermittelt [W/m ² K]
$I_{\text{glob_S}}$	- Globalstrahlung auf die Südfassade [W/m ²]
ΔT_{0-10}	- Temperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs zwischen zwei extremen Schaltzuständen [K]
g_0	- Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung im Zustand maximaler Transmission (maximaler Gesamtenergiedurchlassgrad) [-]
g_{10}	- Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung im Zustand minimaler Transmission (minimaler Gesamtenergiedurchlassgrad) [-]

Außer dem Zusammenhang zwischen der Innentemperaturänderung und dem maximalen Tageswert der solaren Einstrahlung kommt insbesondere an wechselhaften Tagen eine Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs der Innentemperatur vom zeitlichen Verlauf der Einstrahlung zur Geltung. Aus diesem Grund wurde zur Bestimmung des Proportionalitätsfaktors der Mittelwert aus drei Stundenwerten der Strahlung verwendet. Da das nachmittägliche ΔT_{in} -Maximum nicht jeden Tag zum gleichen Zeitpunkt stattfindet, wurde zur Bestimmung des Proportionalitätsfaktors analog der Mittelwert aus drei aufeinanderfolgenden Stundenwerten gebildet. Berechnet anhand von statistischen TMY-Wetterdatensätzen für den Testraum im Fassadenprüfstand in Stuttgart mit verglaster Südfassade nach Formel (6-9), beträgt der Proportionalitätsfaktor $P_{\text{instat}} = \text{ca. } 14 \text{ W/m}^2\text{K}$ (13,7 W/m²K berechnet für alle Jahrestage bzw. 13,8 W/m²K für Sommermonate von Juni bis September, bei jeweils gleichbleibenden Schaltzuständen der Verglasung während des Jahres). Ist der Proportionalitätsfaktor bekannt, so kann rückwirkend für einen beliebigen Tag mit gegebener Strahlungs- und Außentemperaturcharakteristik die zu erwartende Änderung der Innentemperatur aufgrund des Schaltvorgangs der TN-Verglasung zwischen beliebigen Schaltstufen x und y ermittelt werden. Die zu erwartende erreichbare Temperaturänderung wird wie folgt berechnet:

$$\Delta T(t) = (g_x - g_y) \frac{I_{\text{glob_S}}(t-2)}{P_{\text{instat}}} \quad (6-10)$$

P_{instat}	- Proportionalitätsfaktor [W/m ² K]
$I_{\text{glob_S}}$	- Globalstrahlung auf die Südfassade zum Zeitpunkt (t - 2 Stunden) [W/m ²]
ΔT	- Temperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs zwischen dem Schaltzustand x und dem Schaltzustand y zum Zeitpunkt t [K]

- g_x - Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung im Schaltzustand x [-]
 g_y - Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasung im Schaltzustand y [-]

Diese Formel findet in den im Kapitel 7 vorgestellten Regelungsstrategien V und VI Verwendung (nach Bedarf kann sie auch als Vorsteuerung in den Reglerentwurf VII einfließen).

Wie im nachfolgenden Diagramm in Abbildung 6-3 auf der Basis der Simulationsdaten²⁴ aufgezeigt wird, ist die mögliche erreichbare Beeinflussung der Innenraumtemperatur im Jahresverlauf unter instationären Bedingungen relativ gering. Befindet sich die Verglasung jeweils das ganze Jahr im Zustand minimaler oder maximaler Transmission, so beträgt die maximale erreichbare Temperaturänderung 2,7 K. Der Jahresmittelwert ΔT , berechnet für die Arbeitszeiten 8:00 Uhr – 18:00 Uhr, beträgt 0,8 K. Der Einfluss der vorangegangenen Stunden spielt dabei ebenfalls eine Rolle. Befindet sich die Verglasung über einen kürzeren Zeitraum im Zustand minimaler Transmission, so ist die erreichbare Temperaturdifferenz noch geringer, wie in Abbildung 6-4 beispielhaft für den bereits in Abbildung 6-2 analysierten sonnigen Sommertag, für vier unterschiedliche Schaltzeiträume dargestellt. Die Berechnung nach Formel (6-10) und die in Abbildung 6-3 dargestellten Maximalwerte beziehen sich auf die maximale mögliche Temperaturänderung bei konstanten Schaltzuständen im Jahresverlauf. Aus Abbildung 6-4 ist ersichtlich, dass die in der Realität bei zeitlich variierenden Schaltzuständen tatsächlich erreichbare Temperaturdifferenz geringer sein wird. Eine höhere Genauigkeit der Berechnung ist nicht notwendig, da sie leicht z.B. durch vergleichsweise hohe Schwankungen der Außen- und Innentemperatur gestört werden könnte.

²⁴ Die im Sommer 2017 in Stuttgart gemessenen Werte der Globalstrahlung auf die Südfassade entsprachen den im TMY-Wetterdatensatz hinterlegten Werten. Die Mittelwerte der simulierten und der gemessenen Globalstrahlung für den Zeitraum Juni bis September unterschieden sich um weniger als 5 %.

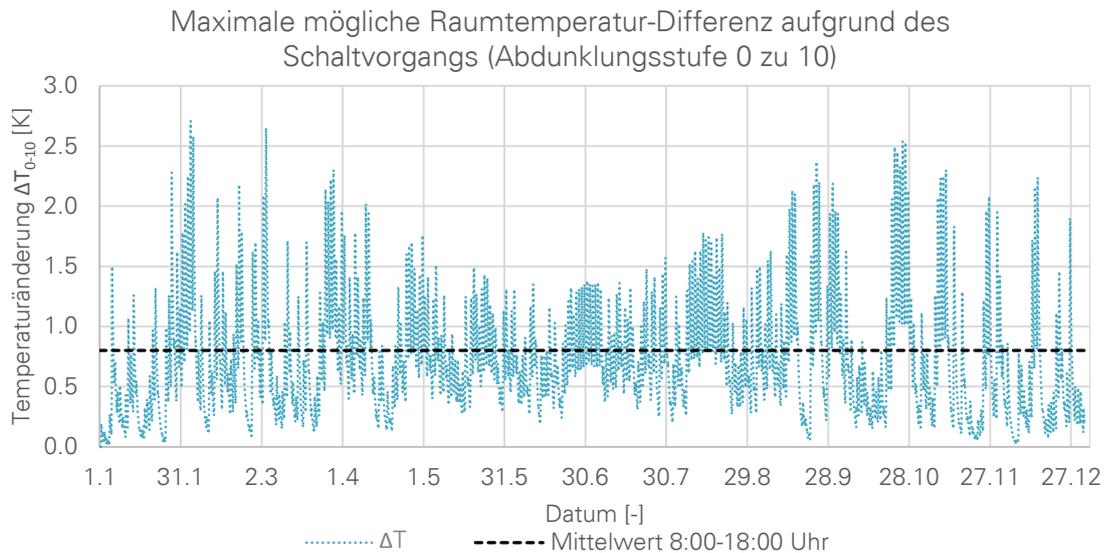
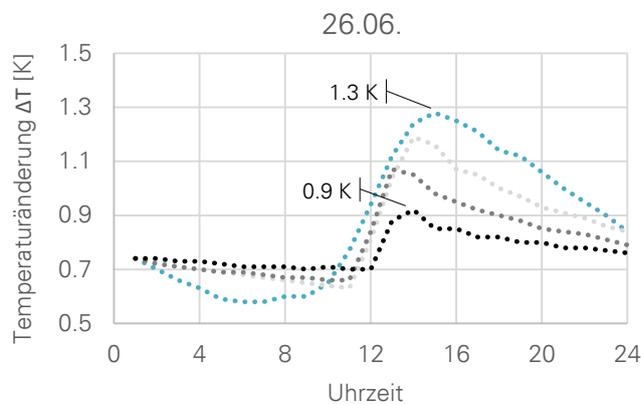


Abbildung 6-3: Jahresanalyse der möglichen Innenraumtemperaturänderung ΔT aufgrund des Schaltvorgangs der TN-Verglasung zwischen Abdunklungsstufen 0 und 10. Stundenwerte der Temperaturdifferenz, simuliert unter instationären Bedingungen in Stuttgart (TMY-Wetterdaten).



- Verglasung das ganze Jahr in einem Zustand (Temperaturdifferenz Stufe 10 zu Stufe 0)
- 12:00 Uhr - 15:00 Uhr Abdunklungsstufe 10, Rest des Tages Stufe 0 (Differenz zu konst. Stufe 0)
- 12:00 Uhr - 14:00 Uhr Abdunklungsstufe 10, Rest des Tages Stufe 0 (Differenz zu konst. Stufe 0)
- 12:00 Uhr - 13:00 Uhr Abdunklungsstufe 10, Rest des Tages Stufe 0 (Differenz zu konst. Stufe 0)

Abbildung 6-4: Mögliche Innenraumtemperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs der TN-Verglasung an einem sonnigen Sommertag 26.06. in Abhängigkeit von der Schalt-dauer der Verglasung, simuliert unter instationären Bedingungen in Stuttgart (TMY-Wetterdaten)

6.1.1.1 Experimentelle Validierung: Tests im Fassadenprüfstand

Das mit TMY-Wetterdatensätzen und der Software TRNSYS erstellte thermische Modell wurde im Fassadenprüfstand in Stuttgart experimentell validiert. Hierfür wurde an ausgewählten Tagen im Mai und im Juni 2018 die in die Südfassade des Testraums eingesetzte Verglasung in den Zustand maximaler Transmission, an anderen Tagen in den Zustand minimaler Transmission versetzt. Das Heiz-/ Kühlsystem des Fassadenprüfstands war ausgeschaltet. Zur Evaluierung des Einflusses der Schaltvorgänge auf das thermische Verhalten des Testraums wurden Tage mit möglichst ähnlichen Außenbedingungen und unterschiedlichen Schaltstufen der Verglasung ausgewählt.

Am warmen und sonnigen Tag 30.05.2018 und am Tag davor befand sich die Verglasung im Zustand maximaler Transmission (Abdunklungsstufe 0, maximaler g-Wert). Am 06.06.2018 und am Tag davor war die Verglasung maximal abgedunkelt (Abdunklungsstufe 10, minimaler g-Wert). Die strahlungstechnischen und die thermischen Charakteristika dieser Tage sind in Abbildung 6-5 dargestellt. Im unteren Teil der Abbildung finden sich zum Vergleich die entsprechenden simulierten Temperaturverläufe. Für diese Simulation wurde die Wetterdatei für beide Tage und jeweils zwei Tage zuvor entsprechend den tatsächlichen Wetterbedingungen in Stuttgart modifiziert.

Sowohl die Außen- als auch die Innentemperaturen in den frühen Morgenstunden sind stark abhängig von den Wettersituationen an den jeweils vorangegangenen Tagen. Um den Einfluss dieser Ausgangsbedingungen auf die Berechnungsergebnisse zu verringern, wurden die Temperaturwerte an jeweiligen Tagen normiert und relative Temperaturanstiege im Bezug auf die Tagestiefstwerte der Innentemperatur, die jeweils um ca. 9:00 Uhr auftraten, berechnet. Die relativen Temperaturanstiege während der Messtage sind in Abbildung 6-6 aufgetragen. Durch den Vergleich der relativen Temperaturanstiege bei der maximal aufgehellten und der maximal abgedunkelten Verglasung kann der Einfluss des Schaltvorgangs beobachtet werden. Die resultierende Temperaturdifferenz (ΔT) am Nachmittag (ca. 15:00 Uhr – 16:00 Uhr) beträgt ca. 0,8 K und entspricht dem simulierten Jahresmittelwert der erreichbaren Temperaturdifferenzen aufgrund des Schaltvorgangs zwischen zwei extremen Schaltstufen (vgl. Abbildung 6-3)^{25, 26}.

²⁵ Im August 2017 konnten anhand von Messdaten ΔT -Werte von ca. 1,1 K festgestellt werden.

²⁶ Eine genauere Aussage wäre unter Laborbedingungen ohne Schwankungen der Außentemperatur und der Bestrahlungsstärke möglich (solche Bedingungen wären jedoch weniger praxisrelevant).

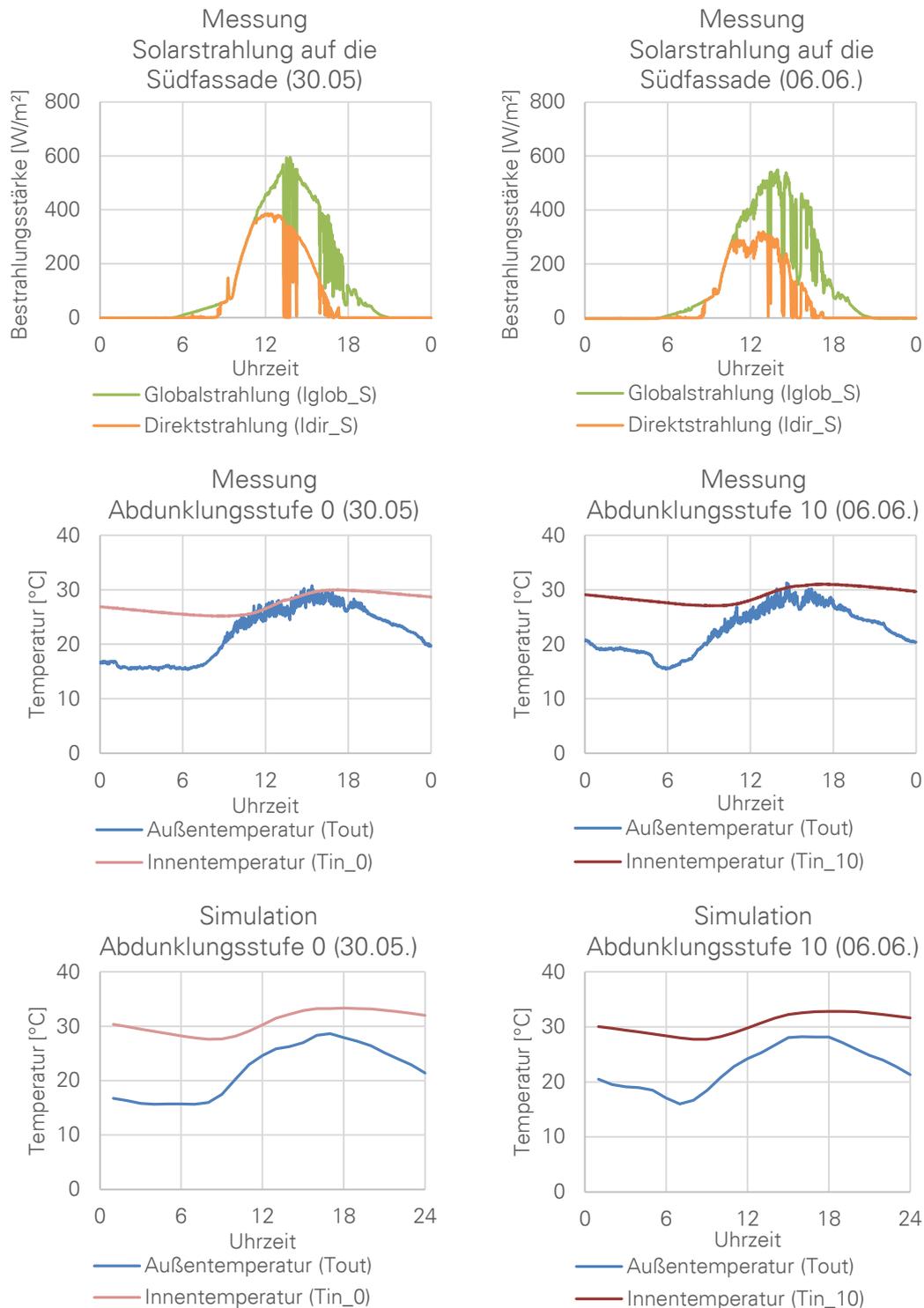


Abbildung 6-5: Strahlungscharakteristika sowie gemessene und simulierte Temperaturverläufe an überwiegend sonnigen Tagen 30.05.2018 (TN-Verglasung im Zustand maximaler Transmission) und 06.06.2018 (TN-Verglasung im Zustand minimaler Transmission)

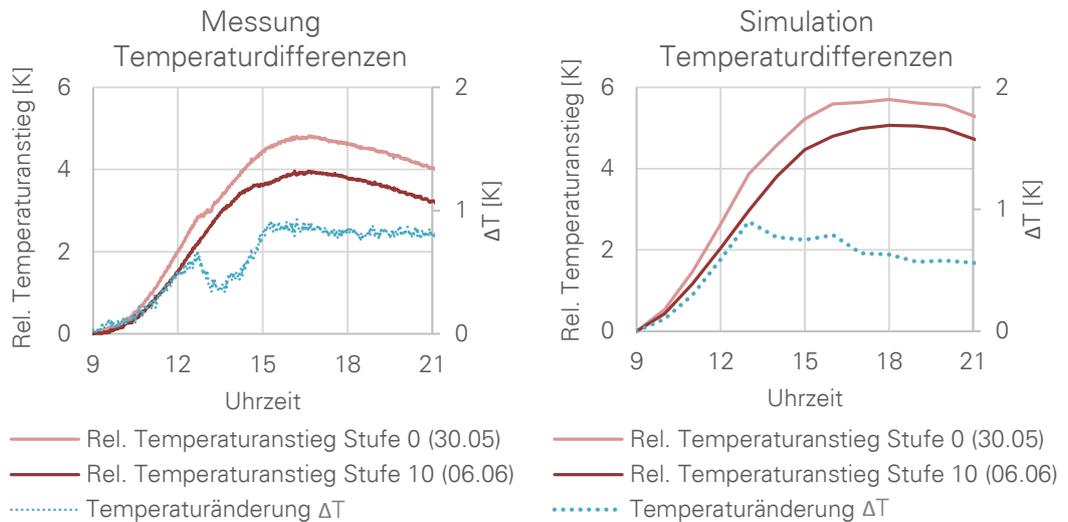


Abbildung 6-6: Relativer Innentemperaturanstieg im Tagesverlauf im Bezug auf 9:00 Uhr und berechnete Temperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs (ΔT). Links: Messung, rechts: Simulation.

Wie aus dem normierten Temperaturgraf für die Innenraumtemperatur in Abbildung 6-6 ersichtlich ist, ergibt sich aus der Simulation und der Messung ein maximaler Innentemperaturunterschied von ca. 2 K. Somit konnte nachgewiesen werden, dass durch die Schaltung der Verglasung eine Veränderung der Innenraumtemperatur möglich ist.

Das erstellte thermische Modell (sowohl der berechnete Proportionalitätsfaktor als auch die zeitliche Verschiebung der Temperaturspitzen) ist stark von den Gebäudeeigenschaften und dem Einsatzort abhängig. Das Modell zur Berechnung der möglichen Temperaturänderung durch die Schaltprozesse der Verglasung kann nach der vorgestellten Methode auf andere Projektbedingungen angepasst werden.

6.1.1.2 Ergänzende thermische Untersuchung: Anregung für die Weiterentwicklung der TN-Verglasung

Am Beispiel einer auf dem Markt befindlichen elektrochromen Verglasung²⁷ wird die mögliche Temperaturänderung bei einem 6,5 Mal höheren g-Wert-Schalhub [136, 137] zu ca. 6 K im Jahresmittel berechnet (jeweils für die Zeiten 8:00 Uhr – 18:00 Uhr in Stuttgart, s.

²⁷ Die genannte elektrochrome Verglasung wurde im Testraum 1.1 eingebaut (s. Abbildung 4-1). Sie ist schaltbar zwischen $g_{\max} = 0,33$ und $g_{\min} = 0,07$. Der g-Wert-Schalhub beträgt somit $g_{\max} - g_{\min} = 0,26$ (Der g-Wert-Schalhub der in der Arbeit analysierten TN-Verglasung beträgt 0,04, vgl. Tabelle 3-3).

Abbildung 6-7). Mit einer Erhöhung des Schalthubs im nicht sichtbaren Wellenlängenbereich des Solarspektrums im Verlauf weiterer Produktentwicklung der TN-Verglasung könnte die Raumtemperatur durch die Schaltvorgänge zu einem wesentlich höheren Grad beeinflusst werden.

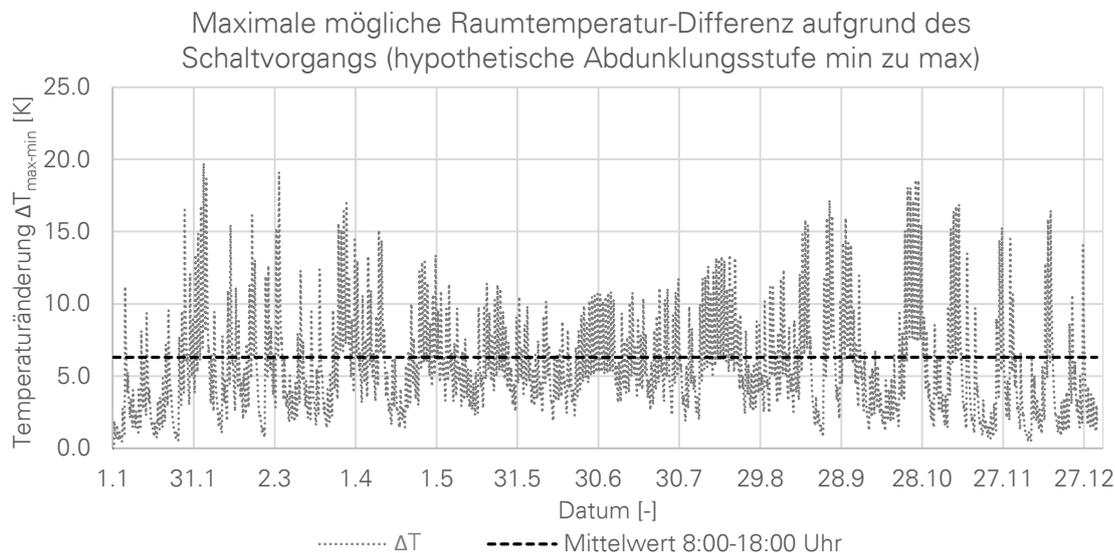


Abbildung 6-7: Jahresanalyse der möglichen Innenraumtemperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs bei einem hohen g-Wert-Schalhub, simuliert unter instationären Bedingungen in Stuttgart (TMY-Wetterdaten) am Beispiel einer elektrochromen Verglasung mit g-Wert-Schalhub = 0,26 (bei $g_{\text{max}} = 0,33$ und $g_{\text{min}} = 0,07$)

6.1.2 Strahlungsasymmetrie

Im betrachteten Anwendungsszenario treten Abweichungen der operativen Temperatur T_{op} am Arbeitsplatz (1,20 m hinter der Fassade) von der Lufttemperatur T_{in} in der Raummitte (2,10 m hinter der Fassade) von ca. 0,4 K (für Nutzeranwesenheitszeiten berechneter Jahresmittelwert) auf. Die geringen Temperaturdifferenzen rechtfertigen die Verwendung der Annahme nach Bernard [12] $T_{\text{op}} \approx T_{\text{in}}$ (vgl. Kapitel 2.3.1.1) im Hinblick auf die spätere Umsetzung in realen Gebäuden. Die Lufttemperatur kann mit einem wesentlich geringeren messtechnischen Aufwand erfasst werden als die operative Temperatur. Jedoch obwohl die Übereinstimmung des thermischen Empfindens mit den Lufttemperaturwerten während der meisten Zeit des Jahres hoch ist, könnten abweichende Strahlungstemperaturen der Verglasung unter extremen Wetterbedingungen zur Unbehaglichkeit führen. Daher sollte insbesondere bei hohen Fensterflächenanteilen die Gefahr lokaler thermischer Unbehaglichkeit aufgrund der Strahlungsasymmetrie ausgeschlossen werden.

Zum Ausschluss lokaler Unbehaglichkeit aufgrund der Strahlungsasymmetrie wurden die Temperaturdifferenzen zwischen der Strahlungstemperatur des Fensters und der gegenüberliegenden Wand im Jahresverlauf analysiert. Für eine maximal abgedunkelte Verglasung (die größte Aufheizung der Verglasung) beträgt die asymmetrische Strahlungstemperatur bis zu 5 K. Nach DIN EN ISO 7730, Tabelle A.1 gelten für Gebäude mit hohen und normalen Anforderungen an das Innenraumklima (Kategorie A und B) wesentlich höhere Strahlungsasymmetrien als nicht störend: 23 K bei einer warmen Verglasung [5]. Eine Unbehaglichkeit aufgrund von zu hohen Verglasungstemperaturen ist somit nicht gegeben ($PD_{warm} = 0\%$ nach Formel (2-1)). Die niedrigen Temperaturdifferenzen zwischen der Verglasung und den verbleibenden Raumumschließungsflächen konnten messtechnisch bestätigt werden.

6.1.3 Direkte Bestrahlung von Personen

Zum Schutz vor lokaler Unbehaglichkeit aufgrund der direkten Solarstrahlung wird hauptsächlich eine partielle Abdunklung der TN-Verglasung vorgesehen. Wie in Abbildung 6-8 gezeigt, ist für einen senkrechten Strahlungseinfall bereits ab ca. 80 % Abdunklung ein hoher Schutz vor Direktstrahlung nach DIN EN 14501 [16] (vgl. Tabelle 2-1 im Kapitel 2.3.1.3) gegeben. Im Sommer, wenn eine besonders hohe Gefahr lokaler Unbehaglichkeit aufgrund der direkten Solarstrahlung besteht, liegen Strahlungseinfallswinkel auf die Südfassade in Stuttgart im Bereich von ca. 50° - 90° bezogen auf die Flächennormale. In diesem Bereich ist ein hoher bis sehr hoher Schutz vor lokaler Überhitzung mit den meisten Abdunklungszuständen gegeben.

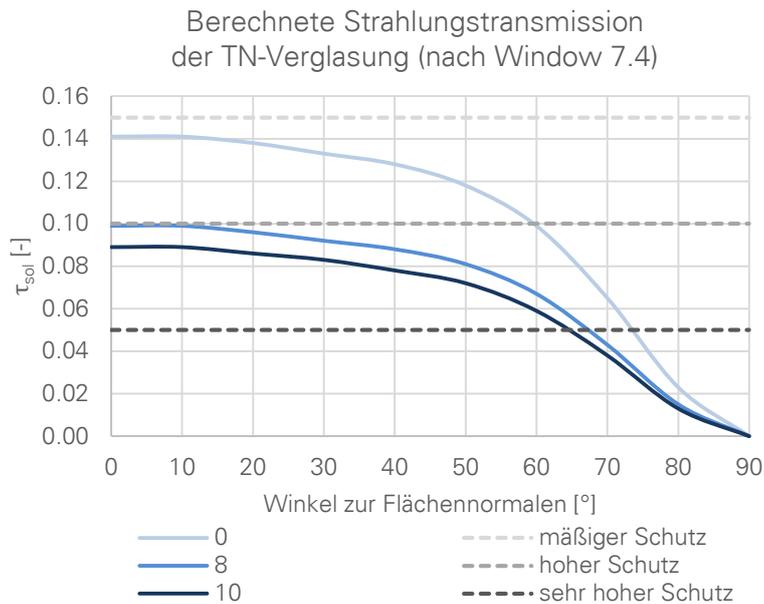


Abbildung 6-8: Analyse des Schutzpotentials der TN-Verglasung hinsichtlich der lokalen thermischen Unbehaglichkeit aufgrund direkter Solarstrahlung auf der Grundlage der Strahlungstransmission τ_{sol} nach DIN EN 14501 [16] (zulässige maximale Strahlungstransmissionswerte für sehr hohen, hohen und mäßigen Schutz gestrichelt aufgetragen). Die Strahlungstransmissionswerte der TN-Verglasung beispielhaft für drei Schaltzustände dargestellt: max. Transmission (0), min. Transmission (10) und Schaltstufe 8 (Verglasung zu 80 % abgedunkelt) (8).

6.1.4 PMV-Werte

Im Kapitel 6.1.1 wurden Untersuchungsergebnisse vorgestellt, die belegen, dass die optimale Temperatur im analysierten Innenraum mit einer großflächig verglasten Fassade ausschließlich durch die Schaltvorgänge der TN-Verglasung nicht vollständig gewährleistet werden kann. Die nachfolgende Analyse der thermischen Komfortindizes PMV im Jahresverlauf zeigt jedoch, dass beim Einsatz der TN-Verglasung die vorausgesagte Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung höher ist als beim Einsatz einer Dreifachreferenzverglasung. Darüber hinaus wird die Eignung des gewählten Konditionierungskonzepts bestätigt.

In Abbildung 6-9 sind zunächst die PMV-Werte im Jahresverlauf, während der Arbeitszeiten, für den Testraum in Stuttgart ohne den Einsatz des Heiz- und Kühlsystems aufgezeichnet. Zwei Extremzustände der Verglasung wurden dabei berücksichtigt: A 0 (maximale Transmission) und A 10 (minimale Transmission). Der in DIN EN ISO 7730 [4, 5] empfohlene PMV-Wertebereich zwischen -0,5 und 0,5 für Räume der Kategorie B (normales Anforderungsniveau) ist gestrichelt dargestellt. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass eine Änderung des Schaltzustands der Verglasung nur eine relativ geringe Änderung des PMV-Profils ermöglicht. Eine Raumkonditionierung außerhalb des Temperaturbereichs von 20 °C – 26 °C (s. Abbildung 6-10) unterbindet hohe PMV-Werte in der Kühltisaison. In der Heizsaison wird nach dem hinterlegten PMV-Modell (Bekleidungsisolationsniveau 1 clo, Energieumsatz 1 met) die Temperatur von 20 °C als „etwas kühl“ bis „kühl“ [5] empfunden, es wird jedoch vorausgesetzt, dass der Nutzer seinen Bekleidungsgrad variieren kann (Diese niedrigen PMV-Werte treten unabhängig vom Schaltzustand der Verglasung auf). Wird in der Kühltisaison die Kühlung erst ab 28 °C eingeschaltet, so ergeben sich für beide Extremzustände der Verglasung leicht erhöhte PMV-Werte bis zu +1 („etwas warm“). Laut Simulationsergebnissen können diese jedoch durch die Veränderung der Bekleidungsisolationsniveau von 1 clo auf 0,5 clo (leichte Kleidung) reduziert werden, sodass die in DIN EN ISO 7730 definierten Komfortbereiche eingehalten werden (dargestellt beispielhaft für den Zustand minimaler Transmission in Abbildung 6-11).

Ein Vergleich der PMV-Werte der TN-Verglasung mit der Referenzverglasung D während der Sommermonate ist in Abbildung 6-12 gegeben. Beim Einsatz der Referenzverglasung können um bis zu 0,5 K höhere Ausschläge der zu warmen Empfindungen beobachtet werden.

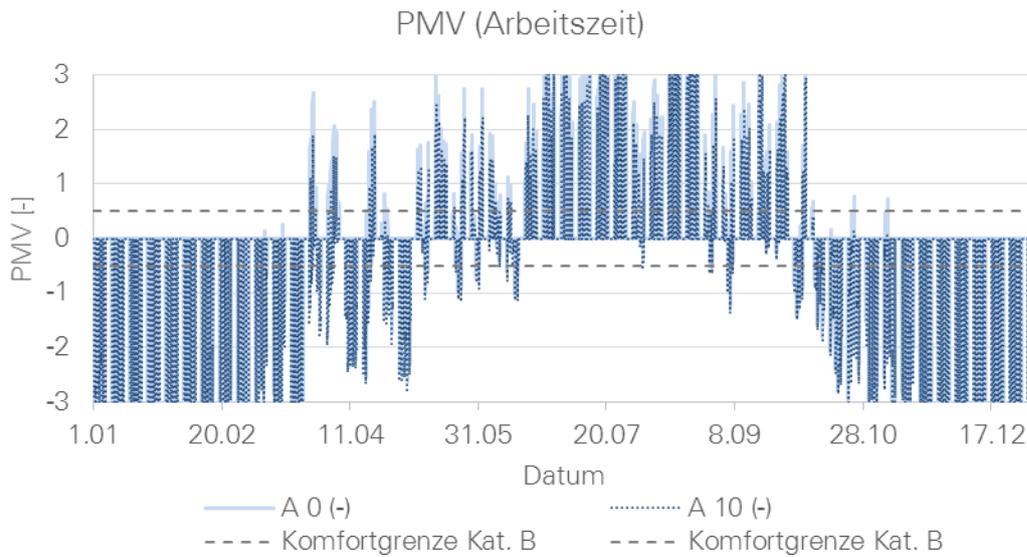


Abbildung 6-9: Simulationsbasierte Analyse der PVM-Werte während der Arbeitszeiten im Jahresverlauf in Stuttgart für Extremzustände der TN-Verglasung: A 0 – Zustand maximaler Transmission, A 10 – Zustand minimaler Transmission, ohne Unterstützung durch das Konditionierungssystem

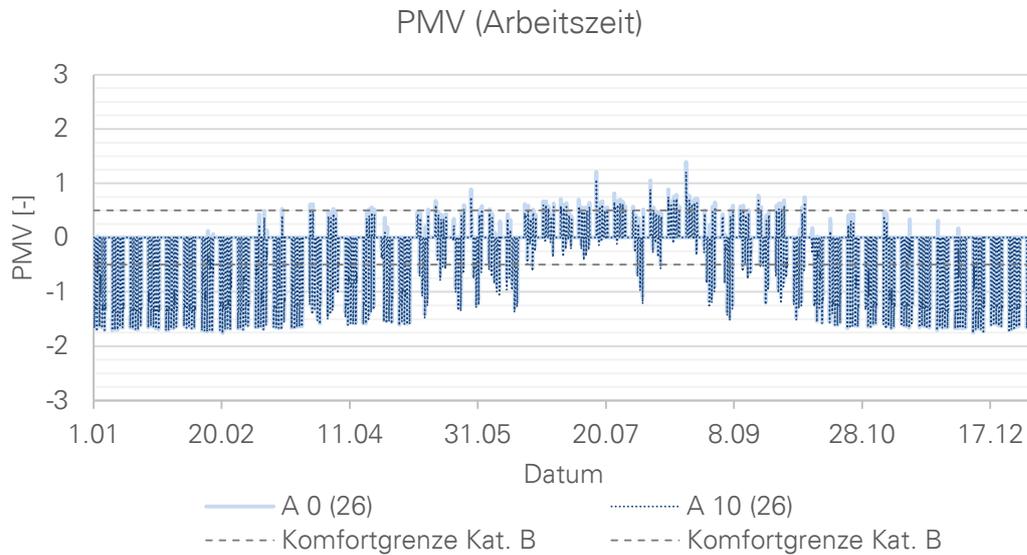


Abbildung 6-10: Simulationsbasierte Analyse der PVM-Werte während der Arbeitszeiten im Jahresverlauf in Stuttgart für Extremzustände der TN-Verglasung: A 0 – Zustand maximaler Transmission, A 10 – Zustand minimaler Transmission. Heizsollwert: 20 °C, Kühlsollwert: 26 °C.

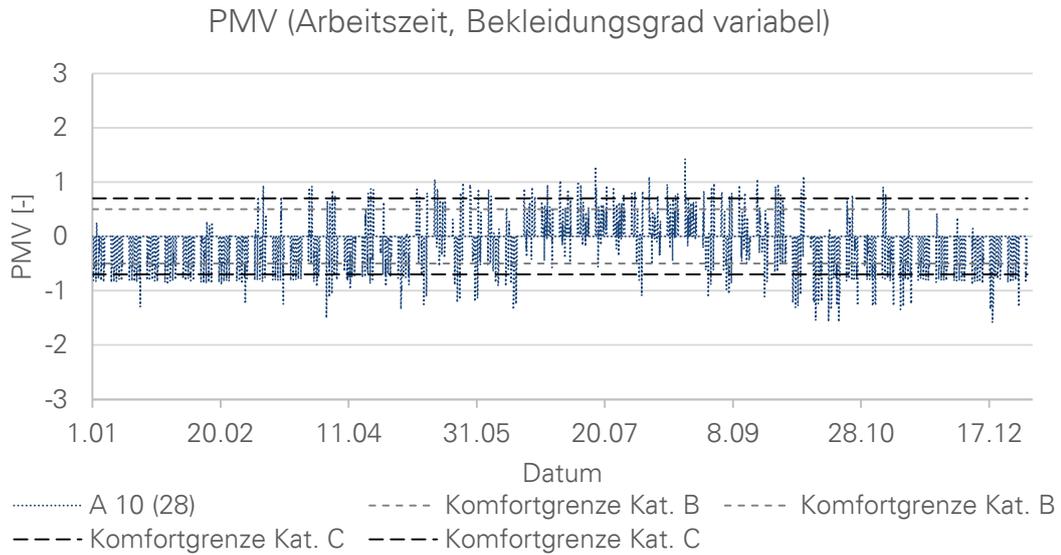


Abbildung 6-11: Simulationsbasierte Analyse der PVM-Werte während der Arbeitszeiten im Jahresverlauf in Stuttgart, TN-Verglasung im Zustand minimaler Transmission (A 10), Bekleidungsgrad variabel ($1 \text{ clo} \pm 0,5 \text{ clo}$)²⁸

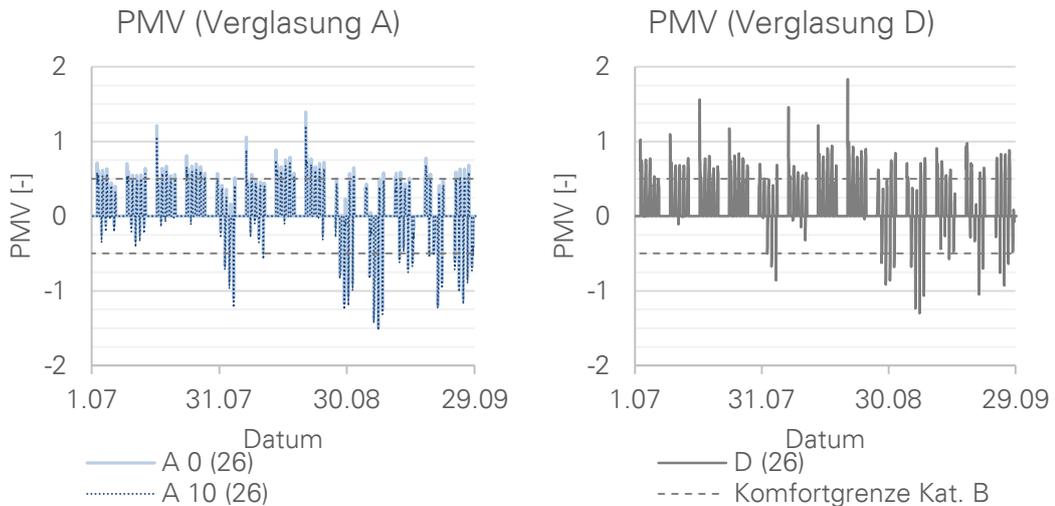


Abbildung 6-12: Simulationsbasierter Vergleich sommerlicher PVM-Werte während der Arbeitszeiten in Stuttgart für Extremzustände der TN-Verglasung: A 0 – Zustand maximaler Transmission, A 10 – Zustand minimaler Transmission und der Dreifachreferenzverglasung D. Heizsollwert: 20 °C, Kühlsollwert: 26 °C.

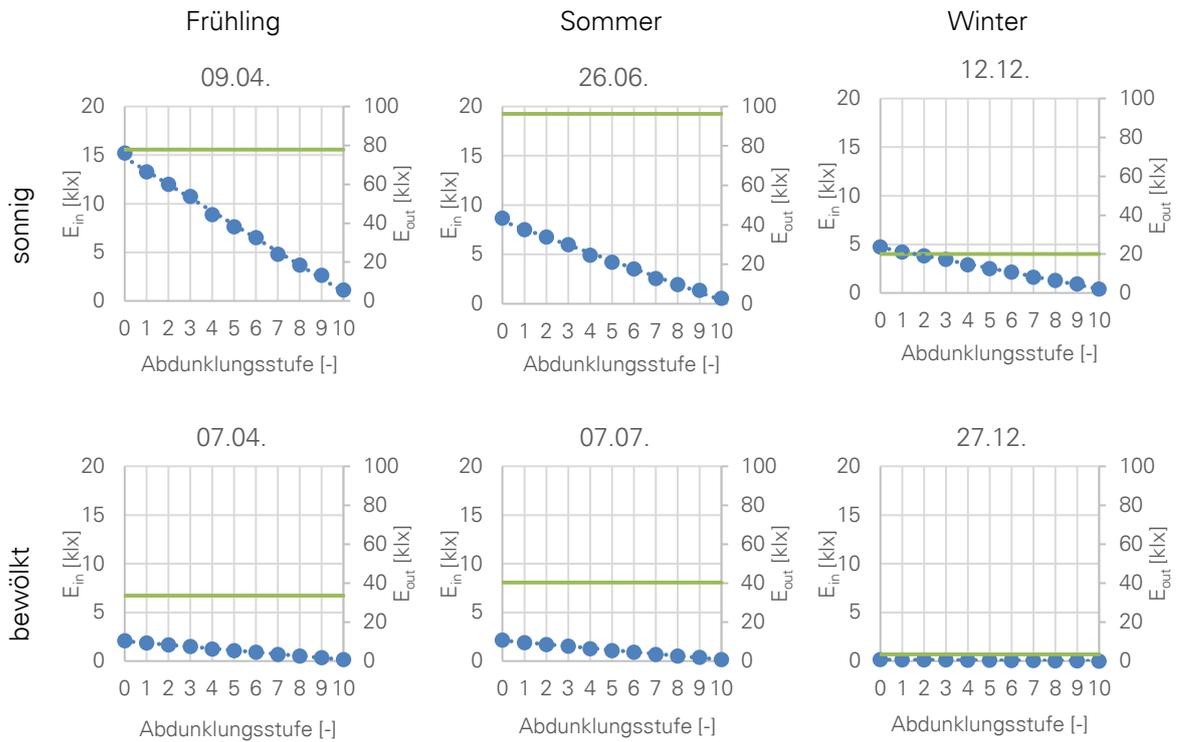
²⁸ Bei Außentemperaturen unter 10 °C wird der Bekleidungsgrad um 0,5 clo erhöht, bei Außentemperaturen über 20 °C im Sommer (Juni bis September) um 0,5 clo reduziert

6.2 Visueller Komfort

6.2.1 Einfluss des Schaltvorgangs auf die Änderung der Beleuchtungsstärke

Da der Schaltvorgang der untersuchten TN-Verglasung nur wenige Millisekunden dauert, erfolgt die Änderung der Innenraumhelligkeit unmittelbar nach dem Schaltimpuls. Daher kann im Gegensatz zu thermischen Analysen der Unterschied zwischen stationären und instationären Wetterbedingungen vernachlässigt werden. Der Einfluss der Schaltvorgänge auf die Änderung der Beleuchtungsstärke im Raum wurde simulativ unter instationären Wetterbedingungen untersucht. Anschließend wurden die Ergebnisse dieser Untersuchung an ausgewählten Tagen im Fassadenprüfstand validiert.

Simulierte Beleuchtungsstärken am fassadennahen Arbeitsplatz im Innenraum (vgl. Abbildung 5-4), in Abhängigkeit von der Schaltstufe und Außenbeleuchtungsstärke für repräsentative Tage des Jahres nach Tabelle 5-2 sind in nachfolgender Abbildung 6-13 dargestellt.



- Simulierte Innenbeleuchtungsstärke (E_{in})
- Außenbeleuchtungsstärke (E_{out}) nach TMY-Wetterdatensatz

Abbildung 6-13: Simulierte Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche in Abhängigkeit von der Außenbeleuchtungsstärke und dem Schaltzustand der Verglasung, Simulationsbedingungen nach Tabelle 5-2

Die Beleuchtungsstärke im Innenraum wird maßgeblich vom Sonnenhöhenwinkel und dem Azimutwinkel zur jeweiligen Jahres- und Tageszeit beeinflusst, neben zusätzlichen Faktoren wie Schattenwurf, Reflexionseffekte im Außenraum (u. A. Albedo des Bodens) und im Innenraum. Für einen gegebenen Strahlungseinfallswinkel (s. Abbildung 3-8) zu einem Zeitpunkt kann die zu erwartende Innenbeleuchtungsstärke in Fassadennähe²⁹ annähernd mithilfe folgender Formel berechnet werden:

$$E_{wp}(s) \approx \tau_{vis}(s, \gamma) * E_{out} \quad (6-11)$$

E_{wp} - Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche im fassadennahen Bereich für jeweiligen Schaltzustand [lx]

²⁹ In steigender Raumtiefe nimmt die Beleuchtungsstärke ab.

τ_{vis}	- Lichttransmissionsgrad der Verglasung [-]
s	- aktuelle Schaltstufe der Verglasung [-]
γ	- Strahlungseinfallswinkel [rad]
E_{out}	- Außenbeleuchtungsstärke auf die Horizontale [lx]

Die Formel (6-11) fließt in die im Kapitel 7 vorgestellten Regelungsstrategien IV, VI und VII ein.

6.2.1.1 Experimentelle Validierung: Tests im Fassadenprüfstand

Messungen der Beleuchtungsstärkeverteilung im Innenraum beim Einsatz der jeweiligen Schaltstufen der Verglasung wurden im Oktober 2017 durchgeführt. In Abbildung 6-14 sind die Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsfläche (1 m hinter der Verglasung, auf einer Höhe von 75 cm, vgl. Abbildung 5-4) für 13:00 Uhr des überwiegend sonnigen Messtags im Vergleich mit simulierten Werten (die Wetterdatei wurde angepasst, um die tatsächlichen Bedingungen zum Messzeitpunkt abzubilden) dargestellt. Für die während des Versuchs (Abbildung 6-14 links) schwankende Außenbeleuchtungsstärke E_{out} wurde zudem ein Mittelwert gebildet ($E_{out_normiert}$) und die nach diesem normierten Innenhelligkeitswerte berechnet ($E_{wp_normiert}$). Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Mess- und Simulationsdaten.

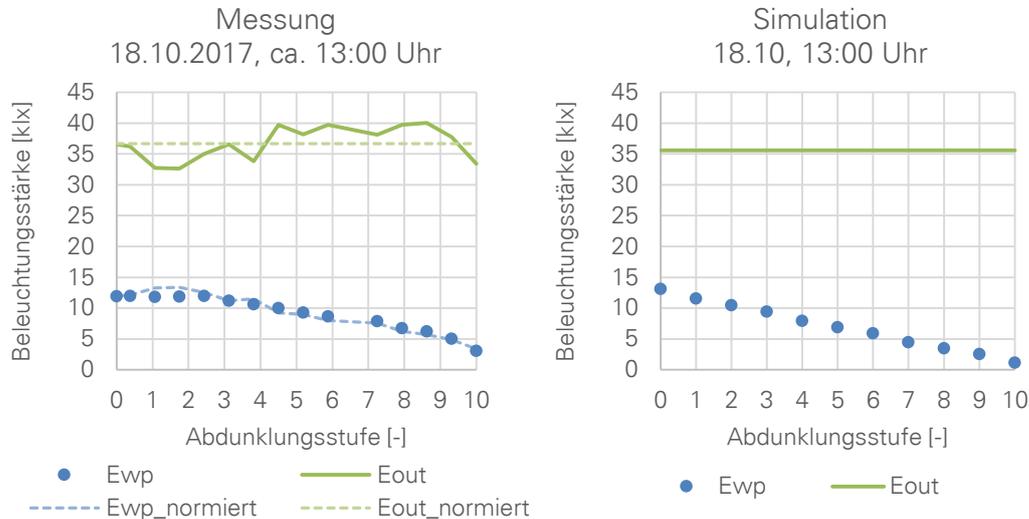


Abbildung 6-14: Gemessene (links) und simulierte (rechts) Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche E_{wp} in Abhängigkeit vom Schaltzustand der Verglasung, am überwiegend sonnigen Tag 18.10.2017.

6.2.2 Tageslichtversorgung

Die Tageslichtversorgung eines Raums wird für die Dauer eines Jahres beurteilt. Für den gegebenen Testraum wird diese Analyse anhand der Tageslichtautonomie (DA) und der nutzbaren Tageslichtbeleuchtungsstärke (UDI) (s. Kapitel 2.3.2.2) durchgeführt. In Abbildung 6-15 ist ein Vergleich dieser Größen für die TN-Verglasung A und die Referenzverglasung D ($\tau_{\text{vis}} = 0,66$) in für Stuttgart dargestellt. Zwei Extremzustände der TN-Verglasung werden aufgezeigt: der Zustand maximaler Transmission (A 0 mit $\tau_{\text{vis}} = 0,27$) und der Zustand minimaler Transmission (A 10 mit $\tau_{\text{vis}} = 0,03$). Das niedrige Grundniveau der Lichttransmission der TN-Verglasung im Vergleich zur Referenzverglasung D wirkt sich auf die Tageslichtversorgung der tieferen Raumbereiche entscheidend aus. Dennoch kann mit entsprechend aufgehellter TN-Verglasung der empfohlene Mindestwert der Tageslichtautonomie von 30 % [138] bis zu einer Raumtiefe von ca. 3 m gewährleistet werden. In fassadennahen Raumbereichen zeigt sich die hohe Lichttransmission der Referenzverglasung nachteilig hinsichtlich der möglichen Blendungseffekte aufgrund zu hoher Beleuchtungsstärken (UDI niedriger als bei der Verglasung A). Inwiefern sich diese Qualitäten bei einer im Jahresverlauf variierenden Verglasungstransmission widerspiegeln, wird im Kapitel 8.4.1 untersucht.

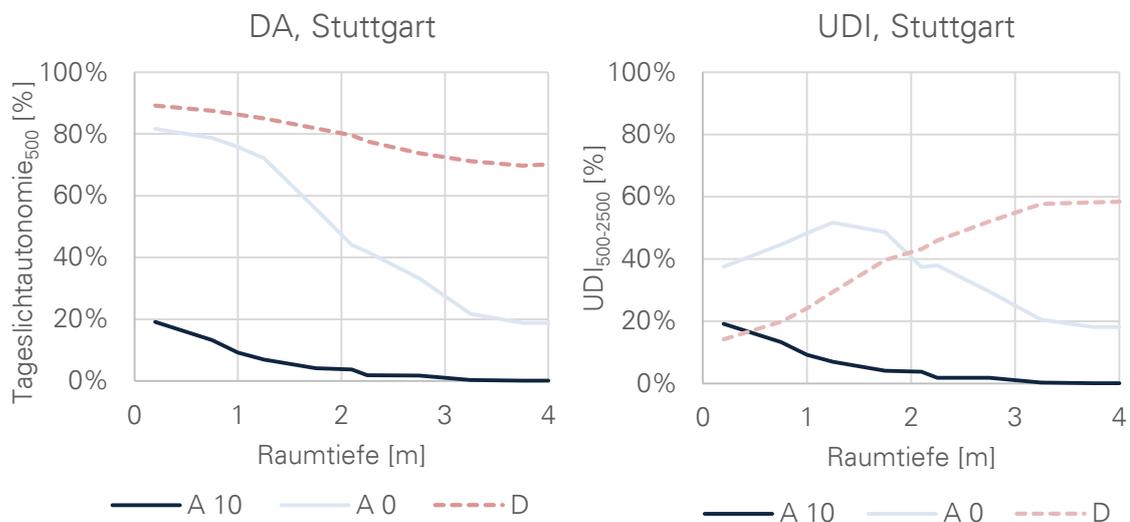


Abbildung 6-15: Links: Tageslichtautonomie DA, rechts: Nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke UDI, Grenzwerte der Beleuchtungsstärke $E_{\text{min}} = 500 \text{ lx}$, $E_{\text{max}} = 2500 \text{ lx}$. Vergleich der TN-Verglasung A in extremen Schaltzuständen (maximale Abdunklung A 10, minimale Abdunklung A 0) mit der Dreifachreferenzverglasung D.

6.2.3 Blendung

Für das Fassadentestgebäude in Stuttgart wurde an sonnigen Frühlingstagen (30.03. – 06.04.2018) eine messtechnische Blendungsanalyse jeweils für die TN-Verglasung (Typ i³) im Raum 0.1 und für die Referenzverglasung B im Raum 1.3 des Testgebäudes durchgeführt. Auf der Basis fotografischer Aufnahmen mit einer entsprechend kalibrierten Kamera Canon EOS 80D (LMK mobile air 80D) wurden mit der zugehörigen Software LMK Laboratory Software 4 Leuchtdichtebilder erstellt und ausgewertet. Die Auswertung resultierte in einer Analyse der auftretenden Leuchtdichtekontraste und der DGP-Werte (vgl. Kapitel 2.3.2.3).

Eine Analyse der Leuchtdichtekontraste im Gesichtsfeld des Raumnutzers ermöglicht die Einschätzung eventueller visueller Störungen durch Helligkeitskontraste. Hierfür wurden einfache Leuchtdichtekontraste gemäß Formel (2-5) für die in Simulationen betrachtete Arbeitsplatzkonfiguration a (vgl. Kapitel 5.2.2) und zum Vergleich für zwei weitere, für Büroräume typische Arbeitsplatzkonfigurationen b und c (jeweils in Grau) ermittelt. Die Konfigurationen und die für die Analyse ausgewählten Helligkeitsbereiche sind in Abbildung 6-16 und Abbildung 6-17 dargestellt. Untersucht wurden dabei die Referenzverglasung B, die TN-Verglasung im Zustand maximaler Transmission (Stufe 0) sowie im Zustand minimaler Transmission (Stufe 10). Darüber hinaus wurden unterschiedliche Muster für eine partielle Abdunklung der TN-Verglasungsfläche angewendet (Bild 3a, Bild 4, Bild 5, ...), um eine situationsbedingte Verschattung ausgewählter Raumbereiche zu erzeugen. Die Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse folgt in Tabelle 6-1.



Konfiguration a:

Blickpunkt 1,2 m hinter der Fassade,
Blickrichtung Süden,
Sonne im Blickfeld

Konfiguration b:

Blickpunkt 2,2 m hinter der Fassade,
Blickrichtung Süden,
Sonne nicht im Blickfeld

Konfiguration c:

Blickpunkt 1,0 m hinter der Fassade,
Blickrichtung Westen,
Sonne nicht im Blickfeld

Abbildung 6-16: Arbeitsplatzkonfigurationen mit Zuordnung der Helligkeitsbereiche zur Analyse der Leuchtdichtekontraste: Konfiguration a entsprechend dem im Kapitel 5.2.2 vorgestellten Nutzungsszenario, zzgl. zwei weiterer für Büroräume typischer Konfigurationen b und c.

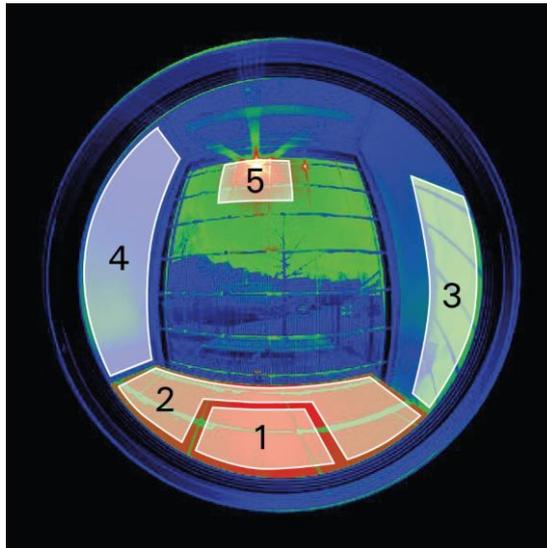


Abbildung 6-17: Schematische Darstellung der Helligkeitsbereiche 1 – 5 für die Berechnung der Leuchtdichtekontraste am Beispiel der Arbeitsplatzkonfiguration a (Auswahl der Bereiche gem. Kapitel 2.3.2.3)

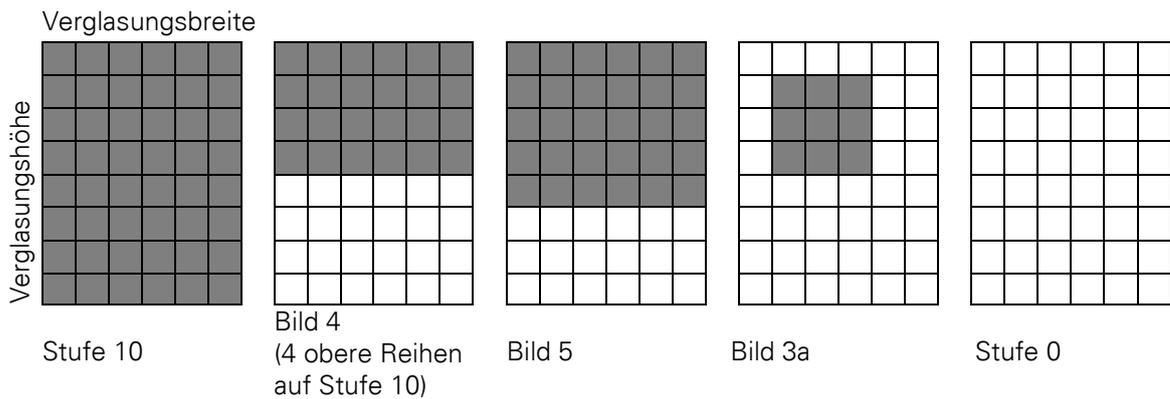


Abbildung 6-18: Angewendete Verschattungsmuster zur situationsbedingten Verschattung der Arbeitsaufgabe (schematische Darstellung)

Bereich	Kontrastwert												
	empfohlen	Referenz		TN: Stufe 0			TN: Stufe 10			TN: Bild 4		TN: Bild 5	
		a	b	a	b	c	a	b	c	a	a	c	c
1 Infeld (Arbeitsaufgabe)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2 näheres Umfeld (Arbeitsplatz)	≤ 3	12	1	1	3	1	1	3	1	2	1	2	2
3 fernes Umfeld (Arbeitsumgebung, besont) (vertikale Flächen)	≤ 10	5	13	4	4	3	4	5	4	3	4	3	2
(reflektierende horiz. Flächen)	≤ 10		43		7			7					
4 fernes Umfeld (Arbeitsumgebung, verschattet)	≤ 10	19	3	12	1	17	13	1	21	8	10	18	12
5 Fenster	≤ 40	5	35	4	6	3	6	5	4	5	6	3	2

Tabelle 6-1: Leuchtdichtekontraste nach Formel (2-5). Konfiguration a: Blickpunkt 1,2 m hinter der Fassade, Blickrichtung Süden (Sonnenscheibe im Blickfeld). Konfiguration b: Blickpunkt 2,2 m hinter der Fassade, Blickrichtung Süden (Sonnenscheibe nicht im Blickfeld). Konfiguration c: Blickpunkt 1,0 m hinter der Fassade, Blickrichtung Westen (Sonnenscheibe nicht im Blickfeld).

Aus Tabelle 6-1 ist erkennbar, dass die Helligkeitskontraste zwischen dem Infeld (Bereich 1) und dem Umfeld (Bereiche 2 – 4) oder der Verglasung (Bereich 5), die häufig beim Einsatz der Referenzverglasung auftreten, bereits durch die relativ niedrige Grundtransmission der TN-Verglasung entscheidend reduziert werden können. Eine Schaltung der TN-Verglasung zwischen der Abdunklungsstufen 0 und 10 bewirkt eine vergleichsweise geringe weitere Kontraständerung. Bei der TN-Verglasung liegen bei allen untersuchten Arbeitsplatzkonfigurationen die Kontrastverhältnisse im komfortablen Bereich, mit der Ausnahme der Kontraste zwischen einer hellen Arbeitsaufgabe (weiße, reflektierende Arbeitsfläche, Bereich 1) und der sich im Schatten befindlichen Bereiche des fernen Umfelds (Bereich 4). Eine Reduktion dieser Kontraste kann durch eine gezielte partielle Abdunklung der Verglasung erfolgen. Mit Verschattungsmustern (Bild 3a – 5) wurde die Arbeitsfläche verschattet und gleichzeitig eine Ausleuchtung verbleibender Raumbereiche ermöglicht, was eine Verbesserung der Leuchtdichtekontraste im Vergleich sowohl zur vollflächig aufgehellten als auch zur vollflächig abgedunkelten Verglasung zur Folge hatte. Eine schematische Darstellung der für die Leuchtdichteanalyse verwendeten Verschattungsmuster 3a, 4 und 5, jeweils für die Verglasungsfläche mit 6 x 9 TN-Modulen, findet sich in Abbildung 6-18 (weitere Verschattungsmuster sind im Anhang 2 dokumentiert).

Die fotografische Analyse ermöglichte darüber hinaus die Berechnung der Blendungswahrscheinlichkeiten DGP nach Formel (2-7). Bei der Arbeitsflächenkonfiguration a ist aufgrund der Blickrichtung des Nutzers senkrecht zur Verglasung und seiner Nähe zur Fassade mit der höchsten Blendungsgefahr zu rechnen, insbesondere zu Zeiten der Sichtbarkeit der Sonnenscheibe von der Nutzerposition (vgl. Kapitel 5.2.2). Daher wurde für diesen Extremfall jeweils für die Mittagszeit (ca. 12:30 Uhr) an sonnigen Frühlingstagen 30.03.2018 und 06.04.2018 eine DGP-Berechnung für 11 Abdunklungszustände (0 – 10) der vollflächig geschalteten TN-Verglasung sowie für ausgewählte Verschattungsmuster durchgeführt. Die fotografische Dokumentation der jeweiligen Abdunklungszustände (0 – 10) und Verschattungsmustern (Bild 2a – 5b) ist im Anhang 2 gegeben. Die zugehörigen DGP-Werte können der Abbildung 6-19 entnommen werden.

Werden die DGP-Werte betrachtet, so ist bereits bei maximal aufgehellter TN-Verglasung, ähnlich wie im Fall der Leuchtdichtenbetrachtung, eine deutliche Reduktion der Indizes im Vergleich zur Referenzverglasung B festzustellen. Eine Abdunklung der Verglasungsfläche bewirkt eine weitere Verminderung des DGP-Werts. Für die meisten Schaltzustände der TN-Verglasung (ab der Schaltstufe 3 ($\tau_{vis} = 0,20$) bei vollflächiger Abdunklung) tritt keine „unerträgliche“ Blendung (vgl. Tabelle 2-2) auf. Ab dem Lichttransmissionsgrad von ca. 8 % (Schaltstufe 8) kann auch die „störende“ Blendung (vgl. Tabelle 2-2) ausgeschlossen werden.

Dennoch besteht die Besonderheit der betrachteten Verglasung in einer flexiblen Transmissionsanpassung in ausgewählten Verglasungsbereichen. Wie in Abbildung 6-19 unten dargestellt, ist bereits durch die maximale Abdunklung des Bereichs der sichtbaren Sonnenscheibe beim Beibehalten maximaler Transparenz des verbleibenden Verglasungsbereichs („GP“) eine Blendungswahrscheinlichkeit erreichbar, die einer vollflächigen Transmissionsminderung um ca. 30 % entspricht (Abbildung 6-19 oben, Stufe 3). Eine Vergrößerung des dunklen Blendschutzbereichs gemäß entsprechenden Schaltmustern ermöglicht eine Reduktion der Blendungswahrscheinlichkeit unter den angenommenen Grenzwert von $DGP = 0,4$ bei ungestörter Sichtverbindung zum Außenraum und einer verbesserten Tageslichtversorgung des Raums durch helle Verglasungsbereiche.

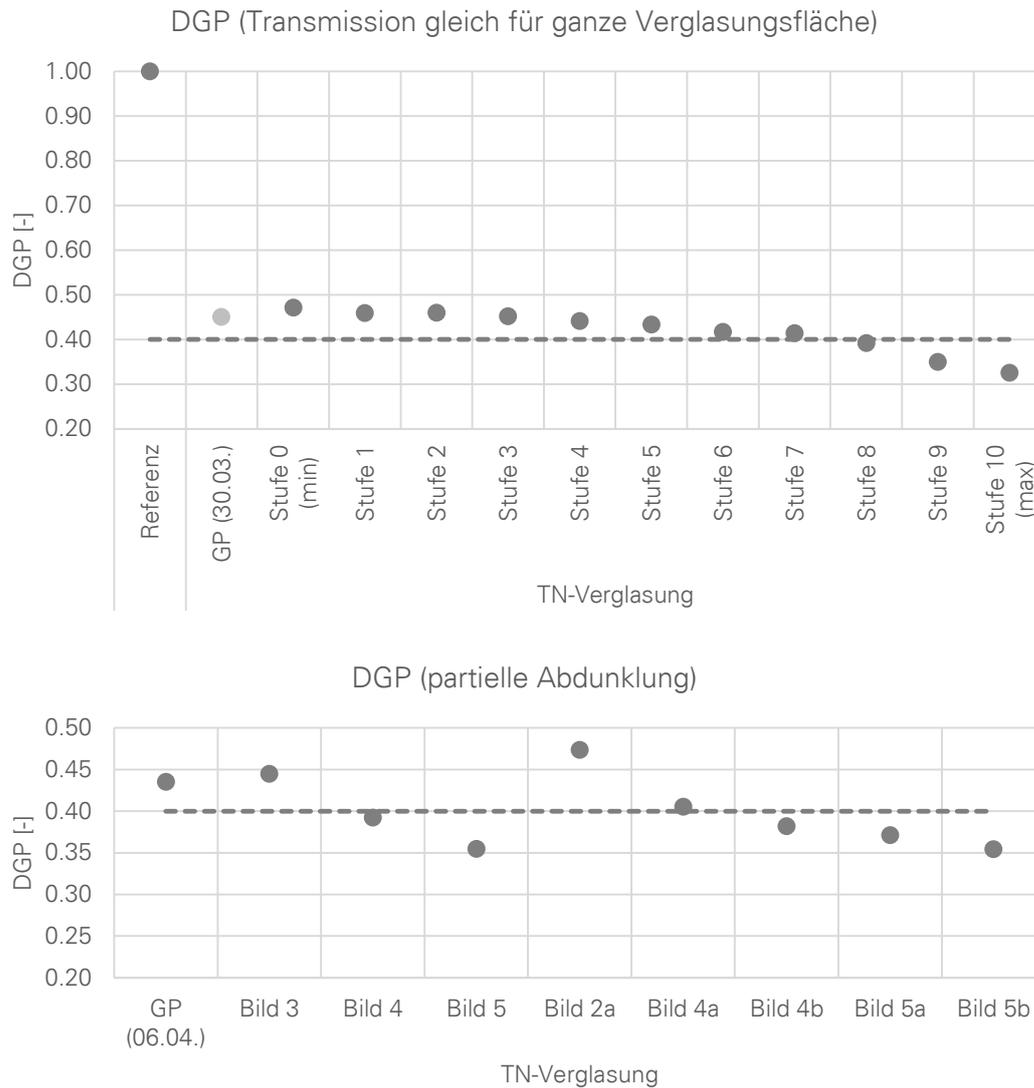


Abbildung 6-19: Ergebnisse der DGP-Berechnung für die Referenzverglasung B im Raum 1.3 und für die die TN-Verglasung im Raum 0.1 bei unterschiedlichen Schalteinstellungen, Arbeitsplatzkonfiguration a. Oben: TN-Verglasung vollflächig abgedunkelt, Messung am 30.03.2018. Unten: TN-Verglasung bereichsweise abgedunkelt, Messung am 06.04.2018, jeweils um 12:30 Uhr (Muster „GP“ wurde an beiden Messtagen vermessen). Gestrichelt wurde jeweils der DGP-Grenzwert von 0,4 dargestellt (hohe Wahrscheinlichkeit störender Blendung). Dokumentation der Verschattungsmuster s. Anhang 2.

6.2.4 Sichtverbindung nach außen

Da die vorgestellte TN-Verglasung auch in Zuständen niedriger Transmission nicht opak wird, sondern transparent bleibt, ist eine Sichtverbindung zum Außenraum gegeben. Bei sehr niedrigen Transmissionswerten kann sie zwar als nicht ausreichend empfunden werden, was jedoch von den Helligkeitsbedingungen im Innen- und im Außenraum sowie von der subjektiven Empfindung des Beobachters abhängig ist. In der vorliegenden Arbeit wird die Beurteilung der Sichtverbindung anhand der im Kapitel 2.3.2.4 aufgeführten Kriterien vorgenommen: Erkennbarkeit von Gegenständen oder Personen, die sich im Abstand von 5 m zur Fassade befinden [16], Vorhandensein einer klaren Durchsicht, Homogenität der Durchsicht sowie Qualität der Farbwiedergabe. Eine qualitative Zusammenfassung des Erfüllungsgrads dieser Kriterien jeweils für zwei extreme Schalt-, bzw. Bedienzustände der TN-Verglasung, einer Referenzverglasung mit einem herkömmlichen außenliegenden, beweglichen Sonnenschutz (Jalousie, s. Kapitel 5.2.3) und zwei auf dem Markt verfügbare adaptive Verglasungen (elektrochrom und PDLC, s. Kapitel 3.1) ist in Tabelle 6-2 gegeben.

		Vorhandensein klarer Durchsicht	Erkennbarkeit von Gegenständen	Homogenität der Durchsicht	Farbwiedergabe
TN-Verglasung	hell	++	++	++	++
	dunkel	+ ¹	+ ¹	- ¹	++
Isolierverglasung mit außenliegender Jalousie	off	++	++	++	++
	on	-	-	--	+ ⁴
Elektrochrome Verglasung [136, 139]	hell	++	++	++	- ²
	dunkel	++	++	++	-- ²
PDLC-Verglasung [92]	on	- ³	+	+	++
	off	-- ³	-- ³	- ³	++

++ sehr gut

+ gut, ggf. mit Einschränkungen

- weniger gut

-- nicht gegeben

¹ beeinträchtigt durch die Unterteilung in Pixel und Pixelzwischenräume (blickwinkelabhängig)

² bläuliche Färbung in allen Schaltzuständen (zunehmend mit sinkender Transmission)

³ leichte Trübung in allen Schaltzuständen, im ausgeschalteten Zustand vollständige Trübung

⁴ abhängig von der Farbe der Jalousie

Tabelle 6-2: Vergleichende Analyse der mit repräsentativen Verglasungssystemen erreichbaren Sichtverbindung

Die TN-Verglasung erfüllt als einzige alle vier Kriterien, mit Ausnahme der Homogenität der Durchsicht im eingeschalteten Zustand. Diese wird bei der substrukturierten Verglasung durch die Unterteilung in ansteuerbare Pixel und nicht ansteuerbare Pixelzwischenräume gestört. Ein Ziel der weiteren Produktentwicklung ist daher die Reduktion der nicht ansteuerbaren Fläche und die Optimierung der Pixelgrößen, um die genannten Störeffekte zu minimieren. Dabei muss erwähnt werden, dass sowohl die Erkennbarkeit des Pixellayouts als auch die niedrigen Transmissionswerte, die die Durchsicht vermindern, für große Blickwinkel weniger ausgeprägt sind. Der Grund dafür ist die Winkelabhängigkeit der TN-Zellen (s. Kapitel 3.2.1.3). In Abbildung 6-20 ist dieser Effekt am Beispiel einer maximal abgedunkelten TN-Verglasung an einem sonnigen Frühlingstag (Nahaufnahme vom Innenraum des Testgebäudes, 20 cm hinter der Verglasung) visualisiert.



Abbildung 6-20: Nahaufnahme einer maximal abgedunkelten TN-Verglasung (ⁱ³) zur Darstellung der winkelabhängigen Transparenz (Zunahme der Durchsicht in Randbereichen)

Leider ist die hohe Winkelabhängigkeit (neben den nicht ansteuerbaren Pixelzwischenräumen) einer der Gründe für die unvollständige Blendungsvermeidung bei hoch stehender, sich dennoch im Sichtfeld befindlicher Sonne. Laut mehreren Studien (z.B. [78]) ist jedoch für die meisten Nutzer die Toleranz gegenüber Blendung bei Tageslicht wesentlich höher als bei Kunstlicht und ein Sichtkontakt im Außenraum wichtiger als die Einhaltung eines bestimmten Helligkeitswerts. Daher kann die TN-Verglasung trotz der beschriebenen Probleme als Alternative zu herkömmlichen Sonnen- und Blendschutzsystemen betrachtet werden.

6.3 Gewichtung der Komfortparameter: Optimierungsalgorithmus für repräsentative Wetterbedingungen

Für die behandelte Problemstellung sind zwei Fragen von essentieller Bedeutung: ist ein thermischer und visueller Komfort durch eine entsprechende Schaltung der TN-Verglasung erreichbar (vorausgesetzt, dass die Luftfeuchtigkeit, -geschwindigkeit, -druck sowie akustische, physiologische und intermediäre Komfortparameter im akzeptablen Bereich liegen) und welcher Schaltzustand der Verglasung unter welchen Außenbedingungen ermöglicht die maximale Komfortverbesserung. Die erste Frage wurde eingehend in Kapiteln 6.1 - 6.2 behandelt. Um die zweite Frage zu beantworten, wurde ein multikriterielles Optimierungsproblem³⁰ formuliert, dessen Lösung einen Aufschluss über die beste erreichbare Verbesserung sowohl der thermischen als auch der visuellen Komfortparameter geben sollte. Zur Lösung des Optimierungsproblems fand ein Optimierungsalgorithmus unter stationären Bedingungen Anwendung. Hierfür wurde ein Programm GenOpt ausgewählt, in dem eine Berechnung der Schaltstufe für die Optimierungsparameter Innentemperatur und Beleuchtungsstärke für vorab definierte Außenbedingungen möglich war.

6.3.1 Definition des Optimierungsproblems

Die allgemeine Darstellung eines Optimierungsproblems ist wie folgt gegeben:

Minimiere:

$$f(x), x \in \mathbb{R}^n \quad (6-12)$$

ggf. unter Berücksichtigung auferlegter Restriktionen:

$$c(x) = 0, c \in \mathbb{R}^m \quad (6-13)$$

$$h(x) \leq 0, h \in \mathbb{R}^q \quad (6-14)$$

³⁰ Pareto-Optimierung, genannt auch mehrkriterielle Optimierung, multikriterielle Optimierung oder Vektoroptimierung [140]

wobei $f(x)$ die zu minimierende Gütefunktion (Zielfunktion) darstellt und der Vektor $x \in \mathbb{R}^n$ die Optimierungsvariablen beinhaltet. Gleichungsnebenbedingungen wurden mit Formel (6-13) und Ungleichungsnebenbedingungen mit Formel (6-14) dargestellt.

Im betrachteten Fall wurden zwei zu minimierende Zielfunktionen definiert: die Abweichung vom thermischen Komfort und die Abweichung vom visuellen Komfort. Eine Nutzwertfunktion (Ersatzzielfunktion) $U(s)$ wurde definiert, die alle zu optimierenden Parameter (Zielfunktionen) beinhaltet. Da ein thermisches und ein visuelles Optimum meistens nicht gleichzeitig erreicht werden können, wurde die Methode der Skalarisierung (Gewichtung der einzelnen Zielfunktionen) verwendet, um die bestmöglichen Lösungen zu finden. Die Nutzwertfunktion $U(s)$ wurde wie folgt gegeben:

$$U(s) = f_1(s) \cdot w_1 + f_2(s) \cdot w_2 + h_1(s) + h_2(s) \quad (6-15)$$

wobei:

s	- Schaltstufe der Verglasung (Optimierungsvariable) [-]
f_1	- Zielfunktion 1, Optimierung des thermischen Komforts [-]
f_2	- Zielfunktion 2, Optimierung des visuellen Komforts [-]
w_1	- Gewichtungsfaktor für die thermische Komponente [-]
w_2	- Gewichtungsfaktor für die visuelle Komponente [-]
h_1	- thermische Nebenbedingungen [-]
h_2	- visuelle Nebenbedingungen [-]

Mithilfe der Zielfunktionen f_1 und f_2 sollten die Abweichungen von jeweils als optimal definierten Werten der visuellen und thermischen Komfortparameter minimiert werden. Repräsentativ für den visuellen Komfort wurde die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche ausgewählt. Als thermischer Komfortparameter fand die Raumlufttemperatur Verwendung. Die Optimalwerte der visuellen und der thermischen Komponente wurden in Anlehnung an die Ergebnisse der Literaturrecherche (s. Kapitel 2.4) als 1200 lx und 24 °C angenommen. Durch die Quadratur der absoluten Abweichungen von jeweiligen Optimalwerten können nicht negative, differenzierbare, zu minimierende Zielfunktionen f_1 und f_2 formuliert werden.

Die Wertebereiche der einzelnen Komponenten der Zielfunktion weichen voneinander wesentlich ab. Wie im Kapitel 2.4.2 erläutert, werden in Aufenthaltsräumen Beleuchtungsstärken von mindestens 300 lx gefordert und bis zu ca. 2500 lx akzeptiert. Für die thermische Komponente wurden die Grenzwerte von 20 °C und 26 °C angenommen. Um beide Zielfunktionen in eine Nutzwertfunktion in vergleichbaren Wertebereichen einzuführen, wurde eine Normierung („Maßstabsanpassung“) der Summanden vorgenommen.

$$Wb_1: 26 \text{ °C} - 20 \text{ °C} = 6 \text{ °C} \quad (6-16)$$

$$Wb_2: 2500 \text{ lx} - 300 \text{ lx} = 2200 \text{ lx} \quad (6-17)$$

$$f_1(s) = ((24 - T_{in}(s)) / Wb_1)^2 \quad (6-18)$$

$$f_2(s) = ((1200 - E_{wp}(s)) / Wb_2)^2 \quad (6-19)$$

Wb_1	- zulässiger Wertebereich der Innentemperatur [°C]
Wb_2	- zulässiger Wertebereich der Beleuchtungsstärke [lx]
s	- Schaltstufe der Verglasung (Optimierungsvariable) [-]
f_1	- Zielfunktion 1 (Optimierung des thermischen Komforts) [-]
f_2	- Zielfunktion 2 (Optimierung des visuellen Komforts) [-]
T_{in}	- aktuelle Innentemperatur [°C]
E_{wp}	- aktuelle Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche [lx]

Zur Eingrenzung der akzeptablen Komfortbereiche dienen die auf die Zielfunktion auferlegten Nebenbedingungen, die mithilfe von Straffunktionen definiert wurden. Sobald der Wert der thermischen oder der visuellen Variable den maximalen zulässigen Wert überschreitet oder den minimalen zulässigen Wert unterschreitet, steigt der Wert der Straffunktion (die Verletzung der zulässigen Grenzen wird „bestraft“) [140] (s. Abbildung 6-21). Die Straffunktionen für die visuelle und die thermische Optimierungsvariable wurden in Anlehnung an Wetter [141] wie folgt formuliert:

$$h_1(s) = i * ((\max(0, j_1))^2 + (\max(0, j_2))^2) \quad (6-20)$$

$$j_1 = 20 - T_{in}(s) \quad (6-21)$$

$$j_2 = T_{in}(s) - 26 \quad (6-22)$$

$$h_2(s) = i * ((\max(0, k_1))^2 + (\max(0, k_2))^2) \quad (6-23)$$

$$k_1 = 300 - E_{wp}(s) \quad (6-24)$$

$$k_2 = E_{wp}(s) - 2500 \quad (6-25)$$

- s - Schaltstufe der Verglasung (Optimierungsvariable) [-]
- h_1 - Straffunktion der thermischen Variablen (thermische Nebenbedingungen)
- h_2 - Straffunktion der visuellen Variablen (visuelle Nebenbedingungen)
- i - Strafparameter: Nummer der Iterationsschleife im Optimierungsprogramm [-]
- j_1, j_2 - Hilfsfunktionen für die Definition der Grenzwerte der Temperatur
- T_{in} - aktuelle Innentemperatur [°C]
- k_1, k_2 - Hilfsfunktionen für die Definition der Grenzwerte der Beleuchtungsstärke
- E_{wp} - aktuelle Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche [lx]

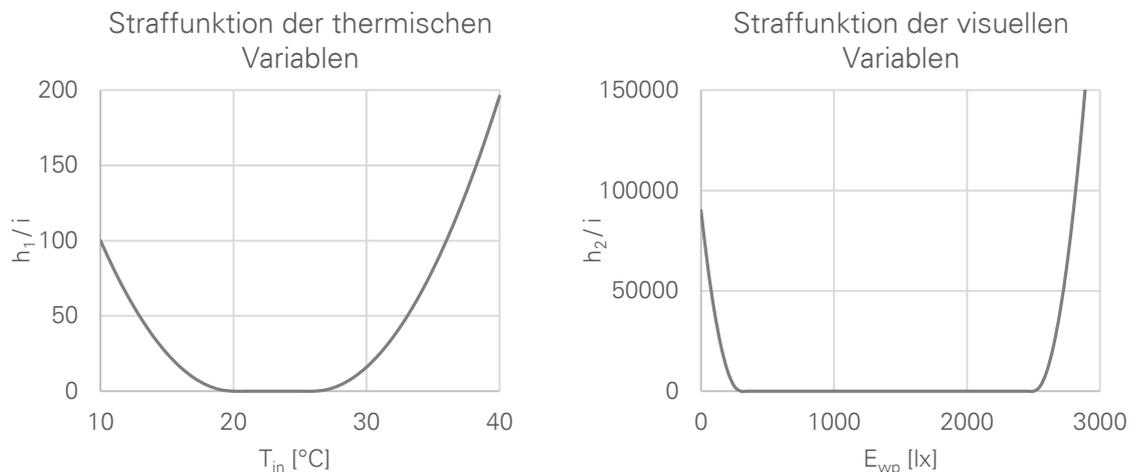


Abbildung 6-21: Visualisierung der Straffunktionen zur Bestimmung der visuellen und der thermischen Nebenbedingungen (Darstellung ohne die Multiplikation mit dem mit jeder Iteration steigenden Strafparameter i)

Zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren w_1 und w_2 wurden zunächst die Erkenntnisse aus der im Kapitel 2.4.4 vorgestellten Literaturrecherche herangezogen, nach denen die visuelle und die thermische Komponente der Zielfunktion ähnlich stark (ca. 1:1) gewichtet werden sollten. Eine Parameterstudie mit diversen weiteren Gewichtungskonfigurationen hat gezeigt, dass eine feinere Abstufung der Faktoren keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Optimierung hätte. Bevor die Ergebnisse dieser Parameterstudie im Kapitel 6.3.3 aufgeführt werden, wird im Kapitel 6.3.2 eine Pareto-Analyse der Zielfunktionen f_1 und f_2 dargestellt, die zur Plausibilisierung dieser Ergebnisse für beispielhafte Tage durchgeführt wurde und eine anschauliche Visualisierung der Zusammenhänge zwischen den beiden Zielfunktionen ermöglicht.

6.3.2 Pareto-Analyse

Um die Potentiale der Schaltvorgänge zu visualisieren, wird zunächst eine Analyse der Zielfunktionen f_1 und f_2 ohne Berücksichtigung der Gewichtungsfaktoren aufgeführt. Dies erfolgt durch die Evaluierung der Pareto-Mengen (Pareto-Optima) für drei beispielhafte Tage im Jahr.

Eine Lösung a gehört zur Pareto-optimalen Lösungsmenge P dann, wenn sie von keiner anderen Lösung dominiert wird, bzw. wenn das Erreichen eines niedrigeren Werts einer zu minimierenden Teilgütefunktion (f_1 oder f_2) am Punkt a nur durch die Erhöhung der Werte anderer Teilgütefunktionen erkauft werden kann [142]. Durch die Menge der Punkte im Zielfunktionsdiagramm, die die Pareto-optimalen Lösungen repräsentieren, wird die Pareto-Front, wie in Abbildung 6-22 dargestellt, gebildet.

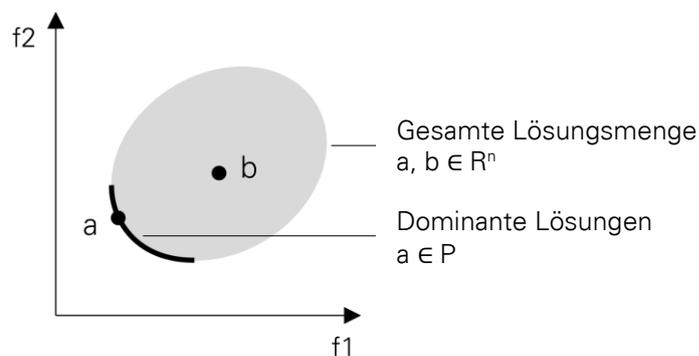


Abbildung 6-22: Das Prinzip der Pareto-Dominanz für ein Minimierungsproblem mit zwei Zielfunktionen f_1 und f_2 . Lösung a dominiert Lösung b , Pareto-Front P , bestehend aus dominanten Lösungen der gesamten Lösungsmenge, wurde durch Linienstärke hervorgehoben.

Für die konkurrierenden Zielfunktionen f_1 (Optimierung des thermischen Komforts) und f_2 (Optimierung des visuellen Komforts) ergeben sich für jede Tages- und Jahreszeit unterschiedliche Pareto-optimale Lösungsmengen. Die Zusammenhänge zwischen der Schaltstufe der Verglasung, der Raumtemperatur und der Beleuchtungsstärke sind dabei nahezu linear, stark abhängig von der Jahres- und Tageszeit sowie von den Wetterbedingungen. In der nachfolgenden Abbildung 6-23 sind die Zusammenhänge zwischen der Raumtemperatur T_{in} und der Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche E_{wp} an drei Tagen, jeweils um 12:00 Uhr, 14:00 Uhr und 16:00 Uhr dargestellt: am 07.04. (bewölkter Frühlingstag), am 26.06. (sonniger Sommertag) und am 12.12. (sonniger Wintertag). Die Daten wurden mittels Simulation mit der Software TRNSYS 18 ermittelt, für das Modell des Fassadentestgebäudes in Stuttgart mit deaktiviertem Heiz-/ Kühlsystem, auf der Basis von TMY-Wetterdaten. Die einzelnen Punkte in den Diagrammen stellen jeweils 11 Abdunklungsstufen (0-10) der Verglasung dar. Der durch Nebenbedingungen eingegrenzte Entwurfsraum wurde grau hinterlegt. Wegen des Verzichts auf den Einsatz des Heiz- und Kühlsystems befindet er sich im Sommer und im Winter außerhalb des Diagrammbereichs.

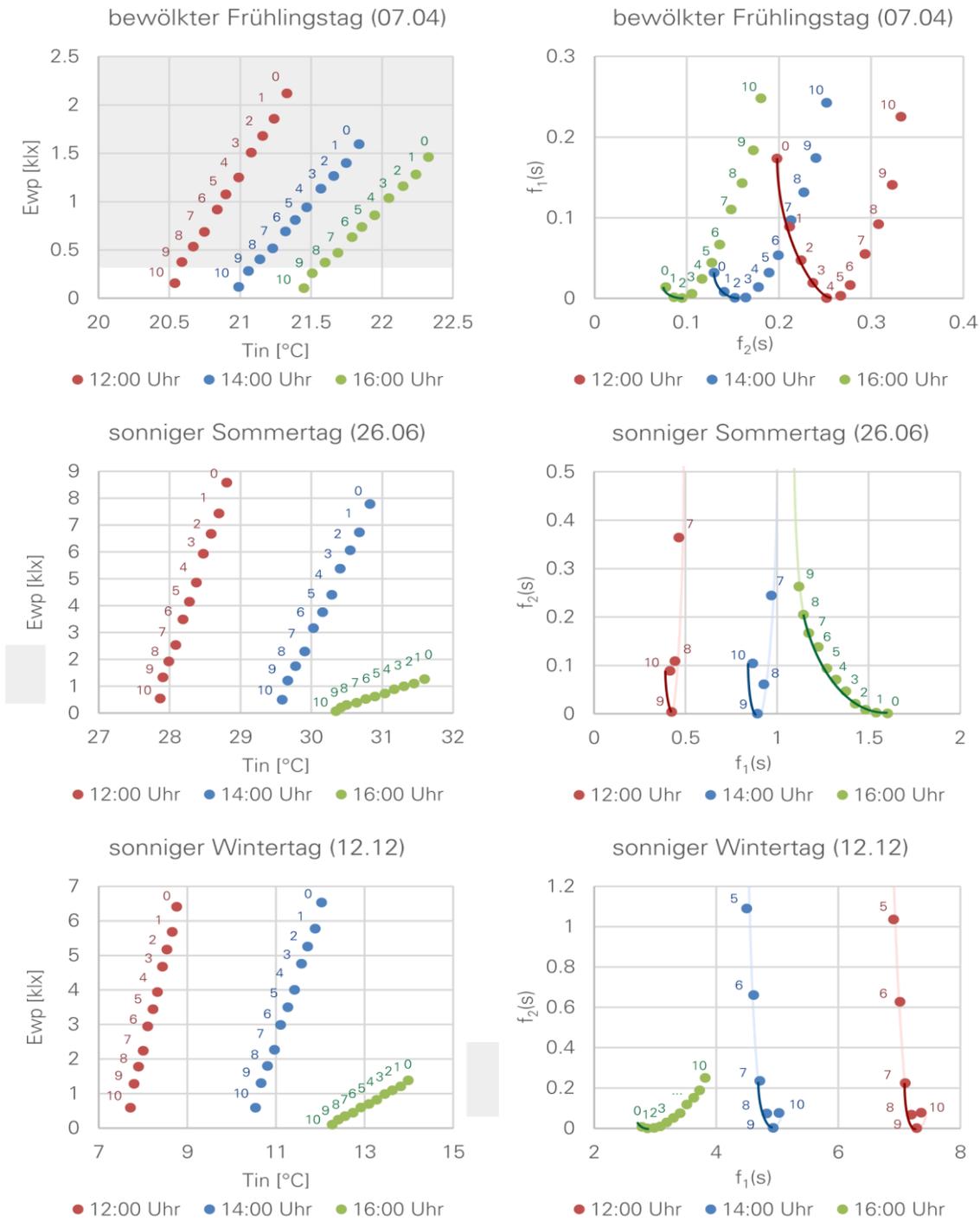


Abbildung 6-23: Links: Raumtemperatur T_{in} und Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche E_{wp} an drei beispielhaften Tagen jeweils für 12:00 Uhr, 14:00 Uhr und 16 Uhr. Die einzelnen Punkte stellen jeweils den diskretisierten Entwurfsraum dar (Entwurfsvariablen: Menge von 11 Abdunklungsstufen 0 - 10). Rechts: Zielfunktionsdiagramme für die ausgewählten Tage, Pareto-Fronten mit Lösungen, die visuelle Nebenbedingungen erfüllen, wurden durch Linienstärke hervorgehoben.

Aus Abbildung 6-23 (links) ist ersichtlich, dass ohne ein unterstützendes Heiz- und Kühlsystem die Nebenbedingungen für den untersuchten Testraum nicht immer eingehalten werden können. Beispielsweise kann durch die Ansteuerung der Verglasung der Anstieg der Innentemperatur im Juni über $T_{\max} = 26 \text{ °C}$ nicht verhindert werden. Am 12.12. wird die Innentemperatur den Wert von $T_{\min} = 20 \text{ °C}$ nicht erreicht, unabhängig von der Schaltstufe der Verglasung. Der Einfluss der Schaltstufe auf das Beleuchtungsstärkeniveau im Raum ist wesentlich größer; die Einhaltung der Helligkeitsnebenbedingungen ist meistens durch die entsprechende Schaltung der Verglasung möglich. In Abbildung 6-23 (rechts) sind die Pareto-Lösungen der Zielfunktionen f_1 und f_2 jeweils mit einer dunklen Kontourlinie hervorgehoben. Zum besseren Verständnis wurden nur die Lösungen dunkel hervorgehoben, die die Nebenbedingungen der Zielfunktion f_2 ($0,3 \text{ klx} \leq E_{wp} \leq 2,5 \text{ klx}$) erfüllen.

Für die aufgeführten repräsentativen Tage konnten Pareto-Lösungen des Optimierungsproblems identifiziert werden. An sonnigen Tagen 26.06. und 12.12. sind am Mittag und am frühen Nachmittag grundsätzlich wenige, sehr dunkle Verglasungszustände optimal, jedoch bereits um 16:00 Uhr bilden helle Verglasungszustände die Pareto-Front. Im Winter, an Tagen mit niedrigeren Außenbeleuchtungsstärken, sind dies sehr wenige Zustände, während sich an Sommertagen bis zu 9 von 11 Abdunklungszuständen Pareto-optimal erweisen. Diese hohe Toleranz bezüglich der Schaltung spiegelt sich am Mittag des bewölkten Tags 07.04. wider. An noch wärmeren bewölkten Tagen (T_{in} näher am Optimalwert) wären zur Einhaltung des bestmöglichen Innenraumkomforts noch mehr Schaltzustände möglich. Die Auswahl einer bevorzugten Pareto-Lösung kann durch eine Gewichtung der einzelnen Zielfunktionen erfolgen.

Eine detaillierte Untersuchung unterschiedlicher Gewichtungsvarianten wurde mit der Optimierungssoftware GenOpt in Kombination mit TRNSYS 17 und DAYSIM 3.0 unter stationären Außenbedingungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Parameterstudie werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt. Da es sich im Gegensatz zu oben vorgestellter Analyse um einen stationären Modellzustand handelt, können die absoluten Temperaturwerte von den Temperaturen des instationären Zustands abweichen.

6.3.3 Optimierung mit GenOpt

Die Lösung eines Optimierungsproblems in der TRNSYS-Simulationsumgebung wird durch die Software GenOpt ermöglicht. GenOpt (Generic Optimization Program) ist ein plattformunabhängiges Optimierungsprogramm zur Minimierung von Zielfunktionen, die in externen Simulationsprogrammen wie beispielsweise TRNSYS, EnergyPlus, IDA-ICE oder DOE-2 definiert werden [141]. GenOpt wurde hauptsächlich zur Lösung von Problemen entwickelt, die nichtlineare, nicht differenzierbare oder unstetige Zielfunktionen beinhalten, welche in Gebäudesimulationen häufig vorkommen [141, 143, 144]. Dementsprechend wurde dort eine Bibliothek diverser Optimierungsalgorithmen implementiert. In der vorliegenden Arbeit wurde der in der GenOpt-Bibliothek vorhandene Hooke-Jeeves-

Algorithmus verwendet. Es gehört zu der Gruppe der GPS (Generalized pattern search)-Algorithmen. Es sind ableitungsfreie Verfahren, die in mehreren Iterationen, ausgehend von einem Startpunkt, den Wert der Zielfunktion im bestimmten Bereich der Lösungsmenge untersuchen, um so das Minimum der Zielfunktion zu finden. In jedem Optimierungsschritt wird eine bestimmte Menge von Suchrichtungen definiert. Ausgehend vom Startpunkt wird in jede dieser Richtungen ein Schritt mit einer festgelegten Schrittweite durchgeführt. Die Suchrichtung mit dem kleinsten somit erhaltenen Wert der Zielfunktion wird für den weiteren Iterationsschritt ausgewählt und der Startpunkt in diese Suchrichtung verschoben. Sollte kein kleinerer Wert als am Startpunkt gefunden werden, wird die Schrittweite verringert und der Vorgang wiederholt [142, 145].

Ein Vergleich der sich aus den jeweiligen Optimierungsvorgängen ergebenden optimalen Schaltstufen der Verglasung s , der Innentemperaturen T_{in} (ohne Einsatz des Heiz- und Kühlsystems) sowie der Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsfläche E_{wp} , für Gewichtungsvarianten ($w_1:w_2 = 1:0$ („ThermOpti“) und ($w_1:w_2 = 0:1$ („VisOpti“)) kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

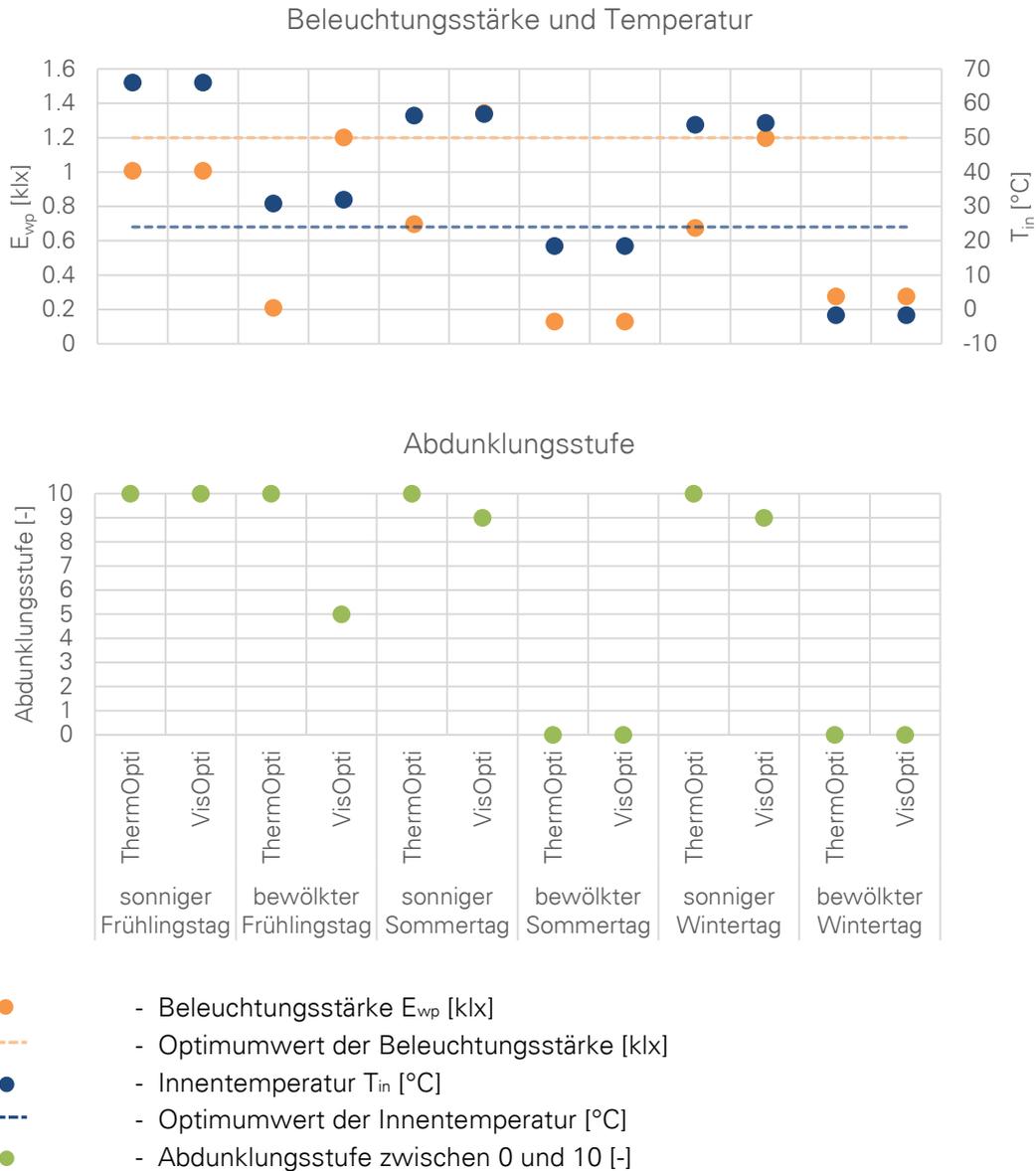


Abbildung 6-24: Ergebnisse der Optimierung für repräsentative Wetterbedingungen. Stationärer Zustand, keine Heizung / Kühlung.

Durch das Erreichen eines stationären Zustands (nach ca. 400 Stunden) war eine Nachtabkühlung ausgeschlossen, wodurch sich an sonnigen Tagen ohne Einsatz des Kühlsystems hohe, in Wirklichkeit in Stuttgart im Tagesverlauf nicht erreichbare Innentemperaturen ergaben. Jedoch auch an bewölkten Sommer- und Frühlingstagen mit geringen solaren Wärmeeinträgen, an den sogar unter stationären Bedingungen Innentemperaturen im akzeptablen Bereich möglich waren, resultierte die thermische Optimierung immer in extremen Schaltzuständen. Dies weist auf die bereits genannte geringe Beeinflussung der Innentemperatur durch die Schaltung der Verglasung innerhalb des gegebenen Schaltheubs hin.

Für die meisten repräsentativen Wetterbedingungen ergaben sich für beide Optimierungsziele relativ geringe Unterschiede der errechneten optimalen Schaltstufen, was mit den Erkenntnissen aus der Pareto-Analyse übereinstimmt. Für den bewölkten Frühlingstag wiesen die Optimierungsergebnisse den größten Unterschied in Abhängigkeit von der Zielgewichtungen auf. Für diesen Tag sind in der nachfolgenden Abbildung 6-25 die Optimierungsergebnisse für alle untersuchten Kombinationen der Gewichtungsfaktoren nach Formel (6-26) dargestellt:

$$w_1 : w_2 = \left\{ \begin{array}{l} 1 : 0 \text{ (nur thermische Optimierung)} \\ 0 : 1 \text{ (nur visuelle Optimierung)} \\ 1 : 1 \\ 10 : 1 \\ 100 : 1 \\ 1\,000 : 1 \\ 100\,000 : 1 \\ 1\,000\,000 : 1 \\ 1 : 10 \\ 1 : 100 \\ 1 : 1\,000 \\ 1 : 100\,000 \end{array} \right. \quad (6-26)$$

- w_1 - Gewichtungsfaktor für die thermische Komponente [-]
- w_2 - Gewichtungsfaktor für die visuelle Komponente [-]

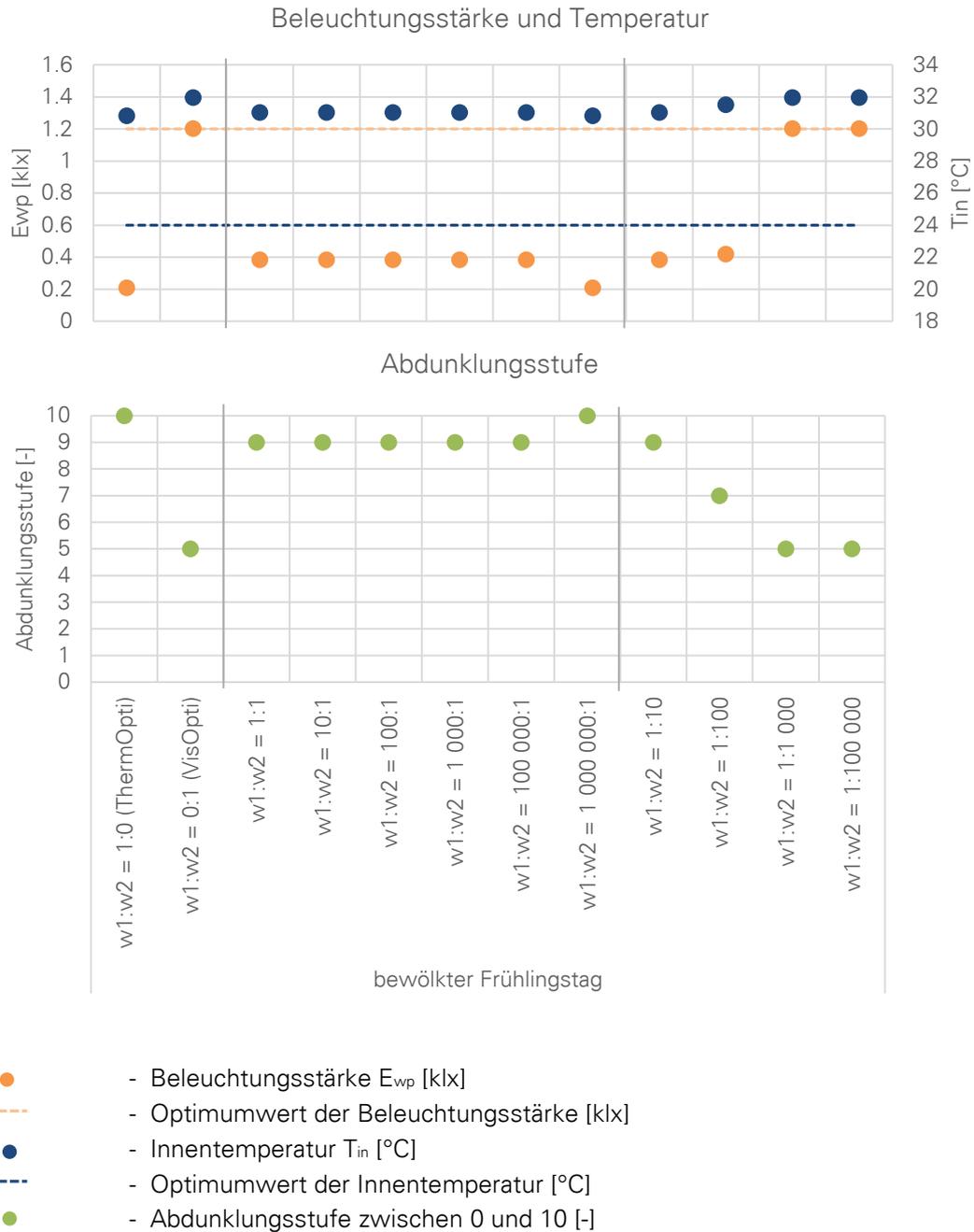


Abbildung 6-25: Ergebnisse der Multiparameteroptimierung für Wetterbedingungen des bewölkten Frühlingstags. Keine Heizung / Kühlung.

In Abbildung 6-25 kommt die Diskrepanz zwischen der Beeinflussbarkeit der Helligkeit und der Temperatur noch deutlicher zur Geltung. Durch die ausschließlich thermische Optimierung kann im Vergleich zur ausschließlich visuellen Optimierung die Innenraumtemperatur um maximal 1,1 K näher an den Komfortbereich gebracht werden. Die Beleuchtungsstärke kann dagegen durch eine visuelle Optimierung um ca. 1 klx erhöht werden, wodurch das Helligkeitsoptimum erreicht wird. Sollte bei einer Zielgewichtung $w_1:w_2 =$

1:1 die zweitdunkelste Schaltstufe optimal sein, so ergibt eine Erhöhung des thermischen Gewichtungsfaktors w_1 um den Faktor 10, 100, 1 000 bis 100 000 keine Veränderung der Schaltstufe. Diese tritt erst bei einer Gewichtsänderung um den Faktor 1 000 000 auf. Eine Veränderung der Gewichtung in Richtung des visuellen Komforts zeichnet eine höhere Sensitivität aus. Bereits ab einer Veränderung des Gewichtungsfaktors w_2 um den Faktor 100 wird eine andere Schaltstufe als bei gleichwertiger Gewichtung $w_1:w_2$ optimal. Diese Erkenntnis spiegelt sich in unterschiedlichen Steigungen der Zielfunktionen f_1 und f_2 auch unter instationären Bedingungen wider (s. Kapitel 6.3.2).

Dies führt zu zwei Schlussfolgerungen: Die geringen im Kapitel 2.4.4 aufgeführten Unterschiede in der Gewichtung des thermischen und des visuellen Komforts kommen in den durchgeführten Optimierungsanalysen nicht zum Tragen; wirksam werden erst wesentlich höhere Differenzen der Gewichtungsfaktoren. Darüber hinaus ist die Beeinflussung der Raumhelligkeit durch die Ansteuerung der Verglasung ausschlaggebend. Eine gleichzeitige Verbesserung des visuellen und des thermischen Komforts ist zwar an Tagen mit extremen Wetterbedingungen, wenn Zielfunktionen f_1 und f_2 komplementär sind, möglich. Jedoch sobald eine Kompromisslösung benötigt wird, kann eine zu hohe Gewichtung der thermischen Komponente ggf. zur Übersteuerung der sehr „sensiblen“ visuellen Komponente führen und somit das Erreichen sowohl des thermischen als auch des visuellen Optimums verhindern.

Die Ergebnisse der Optimierung lassen folgern, dass die Ansteuerung der analysierten TN-Verglasung hauptsächlich der Verbesserung des visuellen Innenraumkomforts dienen sollte ($w_1:w_2 = 0:1$). Ob das Ziel der Verbesserung der thermischen Raumbedingungen bei der Auslegung der Ansteuerungsstrategien gänzlich vernachlässigt werden kann, bleibt dennoch zu hinterfragen. Denn sogar eine sehr geringe Änderung der Innenraumtemperatur kann Auswirkungen auf den Raumenergiebedarf haben. Daher wird nachfolgend eine vergleichende Analyse der Einflüsse von Temperatur- und Helligkeitsänderungen auf die energetische Raumbilanzierung durchgeführt.

6.4 Energetische Betrachtung der Schalteinflüsse

Während der Heizsaison führt die Erhöhung der Verglasungstransmission zur Erhöhung solarer Energiegewinne und des Lichteintrags und somit zur erwünschten Minderung des Heizenergiebedarfs und des Beleuchtungsenergiebedarfs. In der Kühlsaison jedoch hat eine Abdunklung der Verglasung eine geringe Reduktion der Raumtemperaturen und somit des Kühlenergiebedarfs zur Folge, aber auch eine in vielen Fällen unerwünschte Reduktion der Beleuchtungsstärke (Anstieg des Beleuchtungsenergiebedarfs). Dieser Zielkonflikt führt zur Formulierung der Frage nach einer Gegenüberstellung der beiden Energiebedarfsunterschiede. Um festzustellen, ob eine Abdunklung der Verglasung zwecks Kühlenergiebedarfsreduzierung aus energetischer Sicht sinnvoller ist als ihre Aufhellung zwecks Beleuchtungsenergiebedarfsreduzierung, wurden:

- a. sich durch einen langfristig veränderten Verglasungszustand ergebende Energiebedarfsunterschiede an einem beispielhaften Tag analysiert,
- b. folgende Größen gegenübergestellt, um auch bei kurzfristigen Schaltvorgängen deren Auswirkungen auf die Energiebilanzierung einschätzen zu können:
 - Endenergie des Kühlaggregats [kW], die notwendig ist, um die Raumtemperatur um 1 K zu senken
 - und Endenergie der Leuchtmittel [kW], die notwendig ist, um die Beleuchtungsstärke im Raum um 100 lx zu erhöhen.

Analyse a.

Am Beispiel eines sonnigen Frühlingstags 28.03. in Stuttgart (Simulation des Prüfstandsmodells in Stuttgart mit TMY-Wetterbedingungen) konnte die Auswirkung des Verglasungszustands auf alle drei Energiebedarfsarten visualisiert werden. In den nachfolgenden Diagrammen ist der Energiebedarf des 8,4 m² großen Raums in Holzbauweise mit verglaster Südfassade dargestellt, wobei die Verglasung sich jeweils den ganzen Tag und mehrere Tage davor im Zustand minimaler Transmission (Schaltstufe 10, in dunklen Farben dargestellt) oder maximaler Transmission (Schaltstufe 0, in hellen Farben dargestellt) befindet. In Abbildung 6-26 wurden die Außentemperatur (T_{out}) sowie Innentemperatur (T_{in}) und Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche (E_{wp}) am analysierten Tag bei extremen Schaltzuständen der Verglasung aufgetragen, jeweils ohne Heiz- und Kühlsystem (ohne Kond.) und mit eingeschalteter Heizung / Kühlung (mit Kond., Heizsollwert: 20 °C, Kühlsollwert: 26 °C). Aus Abbildung 6-27 sind die entsprechenden Raumenergiebedarfe ablesbar: für Heizung (Q_{heat}), Kühlung (Q_{cool}), Beleuchtung (Q_{light}) und TN-Verglasung (Q_{TN}) für beide Schaltzustände der Verglasung (0 und 10). Das linke Diagramm stellt dabei den jeweiligen Bedarf an bereitgestellter Energie dar, aus dem rechten Diagramm sind die Strombedarfe der Konditionierungsanlage am Beispiel einer reversiblen Wärmepumpe sowie der Beleuchtung und der TN-Verglasung ablesbar.

Abhängig von der eingesetzten Wärme- und Kälteanlage unterscheidet sich die zur Bereitstellung der genannten Endenergie eingesetzte elektrische Leistung. Diese wird durch die Leistungszahlen der entsprechenden Anlagen definiert. Beispielsweise für mechanische Wärmepumpen wird zur Beschreibung der Wärmeleistung eine Heizzahl definiert (Coefficient of Performance COP) und für mechanische Kälteanlagen eine Leistungszahl (Energy Efficiency Ratio EER). Eine Leistungs- / Heizzahl ist das Verhältnis der in den Kreislauf abgegebenen Kälte- bzw. Wärmeleistung zur eingesetzten elektrischen Leistung [146]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_H}{P_{el}} \quad (6-27)$$

$$\text{EER} = \frac{\dot{Q}_O}{P_{el}} \quad (6-28)$$

COP	- Heizzahl (Leistungszahl von Wärmepumpen) [-]
EER	- Leistungszahl von Kälteanlagen [-]
\dot{Q}_H	- Heizleistung [W]
\dot{Q}_O	- Kühlleistung [W]
P_{el}	- Eingesetzte elektrische Leistung [W]

Die jeweiligen Heiz-/Leistungszahlen sind von mehreren Faktoren abhängig, wie der Vorlauftemperatur, der Umgebungstemperatur, der verbauten Kompressortechnik oder der Größe des Wärmetauschers [147]. Annäherungsweise ist die Heizzahl einer Wärmepumpe um ca. eins höher als die Leistungszahl im Kühlbetrieb. Bei der im Fassadentestgebäude eingesetzten reversiblen Luft-Wasser-Wärmepumpe gilt laut Herstellerangaben: COP = 4,76, EER = 3,66 [148]³¹.

Der Energiebedarf für künstliche Beleuchtung ist zum großen Teil von der Art der Leuchtmittel abhängig. Die sog. Aufwandszahl des Beleuchtungssystems (das Verhältnis der eingesetzten elektrischen Leistung zur Nutzleistung) dient der Einschätzung seiner Energieeffizienz. Bei veralteten Beleuchtungssystemen sind die Aufwandszahlen zwar hoch (> 6), da jedoch die im Testgebäude eingesetzte LED-Technologie mit der Aufwandszahl von 2,5 [151–153] den für Neubauten angestrebten Stand der Technik darstellt, wird diese Aufwandszahl als repräsentativ angenommen.

³¹ Der tatsächlich über das Jahr erreichbare Leistungswert mit Berücksichtigung von Verlusten und Nebenantrieben, die sog. Jahresarbeitszahl, JAZ einer Wärmepumpe ist in der Regel niedriger. Für moderne Wärmepumpen sind Jahresarbeitszahlen im Bereich von 2,5 bis 4,0 üblich [122]. Die Effizienz einer Kühlanlage wird mit Berücksichtigung des Teillastbetriebs unter wechselnden klimatischen Bedingungen dagegen höher als EER. Der sich für das gesamte Jahr ergebende EREER-Wert (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) liegt beim im Fassadenprüfstand eingesetzten Fabrikat im Bereich zwischen ca. 4,4 und 6,1, je nach Austrittstemperatur des Kühlmittels [149, 150].

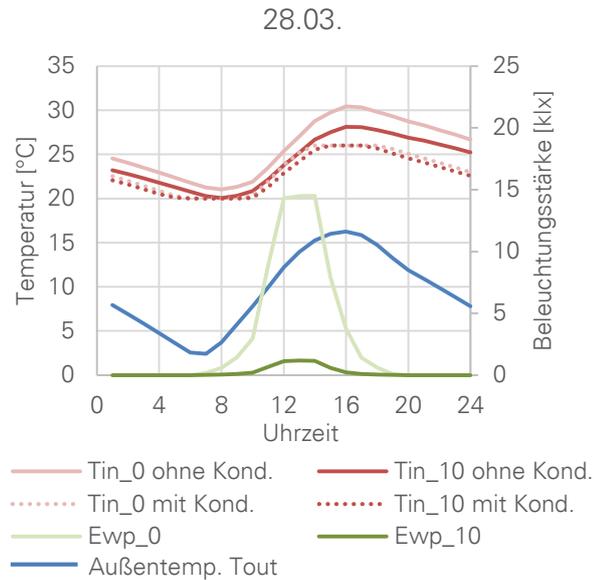


Abbildung 6-26: Außentemperatur (T_{out}) sowie simulierte Innentemperatur (T_{in}) und Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche (E_{wp}) am 28.03 (TMY-Wetterbedingungen für Stuttgart) beim Zustand maximaler Transmission der Verglasung (Stufe 0) und beim Zustand minimaler Transmission der Verglasung (Stufe 10). Innentemperaturverläufe jeweils ohne Konditionierungssystem (ohne Kond.) und mit eingeschalteter Heizung / Kühlung (mit Kond.), Heizsollwert: 20 °C, Kühlsollwert: 26 °C.

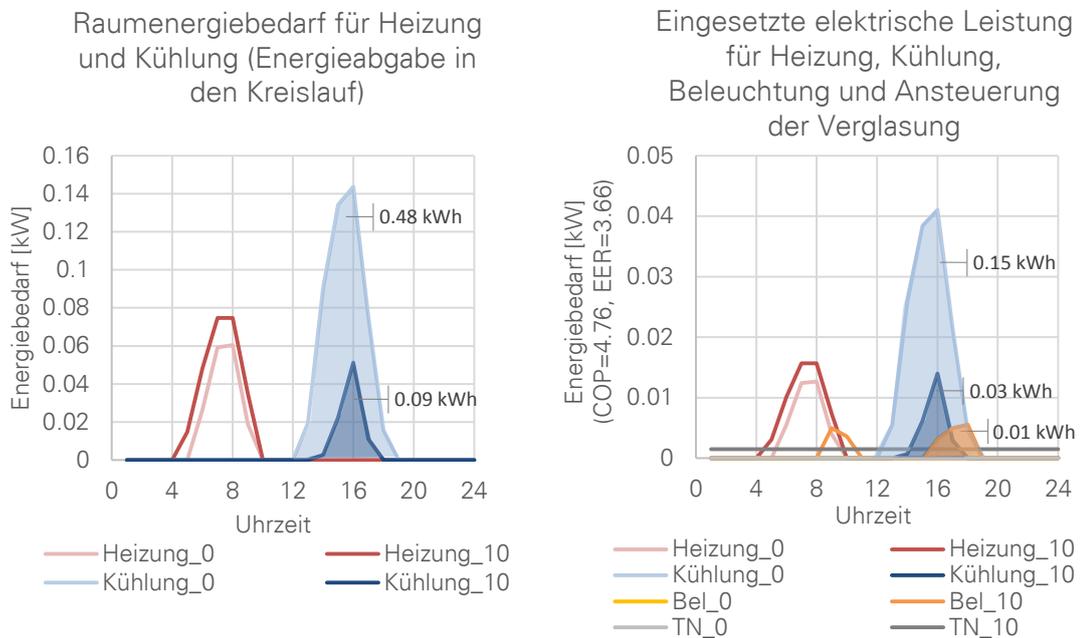


Abbildung 6-27: Links: Energiebedarf des Testraums für Heizung, Kühlung und Beleuchtung für beide Extremschaltzustände der Verglasung (0 und 10) am 28.03. Rechts: Strombedarf der Konditionierungsanlagen (Heizung, Kühlung) am Beispiel einer reversiblen Wärmepumpe mit COP = 4,76, EER = 3,66, LED-Beleuchtung (Bel.) und TN-Verglasung (TN) am 28.03.

Der Heizenergiebedarf tritt am 28.03. morgens auf. Durch die Zulassung solarer Wärmegewinne an diesem Morgen und an Tagen davor durch die helle Schaltung der Verglasung kann dieser um 0,08 kWh vermindert werden. Die sich aus dem dauerhaft hellen Schaltzustand ergebende Erhöhung des nachmittäglichen Kühlenergiebedarfs ist jedoch wesentlich größer und beträgt für diesen Tag 0,39 kWh. Die zur Bereitstellung dieser Energie notwendige elektrische Leistung ist ebenfalls größer als die Leistungsaufnahme der beim dunklen Zustand eingesetzten LED-Beleuchtung. Eine Zusammenfassung der notwendigen elektrischen Leistung für die jeweiligen Systeme am 28.03. ist in Tabelle 6-3 gegeben. Die Energieeinsparung bei dunklen Schaltzuständen der Verglasung ist deutlich.

	Maximale Leistungsaufnahme [kW]		Tagesbedarf an elektrischer Energie [kWh/m ²]	
	Verglasung off (Abdunkl. 0)	Verglasung on (Abdunkl. 10)	Verglasung off (Abdunkl. 0)	Verglasung on (Abdunkl. 10)
Heizung (Q_{heat})	0,013	0,017	0,04	0,05
Kühlung (Q_{cool})	0,041	0,014	0,15	0,02
Beleuchtung (Q_{light})	0	0,005	0	0,02
Zwischensumme:	-	-	0,19	0,09
Verglasung (Q_{TN})	0	0,001	0	0,03

Tabelle 6-3: Vergleich der Leistungsaufnahme und der Tagesenergiebedarfe des simulierten Testraums an einem sonnigen Frühlingstag 28.03. (TMY-Wetterbedingungen für Stuttgart) bei der Annahme: COP = 4,76, EER = 3,66, LED-Beleuchtung³²

Analyse b.

Bereits das vormittägliche Temperaturprofil des Raums ohne aktivierte Kühlung weist grundsätzlich höhere Werte auf im Vergleich zum nach Bedarf gekühlten Raum. Um für den direkten Vergleich des Kühlbedarfs am Nachmittag den Einfluss der vorangegangenen Aufheizung zu nivellieren, wurden alle in Abbildung 6-26 behandelten Innentemperaturprofile nach dem Ausgangswert um 12:00 Uhr normiert und in Abbildung 6-28 rechts

³² Die Leistungsaufnahme der TN-Verglasung beträgt bis zu ca. 1,5 W/m² Raumfläche im maximal abgedunkelten Zustand (und 0 W/m² im maximal aufgehellten Zustand) und wäre somit wesentlich geringer als die Leistungsaufnahmen der künstlichen Beleuchtung und des Konditionierungssystems. Der sich beim obigen Vergleich für den durchgehend abgedunkelten Zustand ergebende Tagesenergiebedarf von 0,03 kWh/m² ist für weitere Analysen weniger relevant, da z.B. eine Abdunklung während der Nacht nicht vorgesehen ist (die Unterschiede in Energiebedarfen für Heizung, Kühlung und Beleuchtung resultieren aus den Abdunklungsvorgängen während der Tages-, nicht der Nachtstunden).

aufgetragen. Die Betrachtung normierter Temperaturwerte bei beiden Verglasungszuständen, mit und ohne Kühlung, ermöglicht die Ableitung der aufgebrachten Kühlleistung pro 1 K Temperaturänderung. Folgende Zusammenhänge werden ersichtlich:

- Im Zustand minimaler Transmission: Nach Abbildung 6-27 bedarf die Raumabkühlung um 1,2 K einer Kühlleistung von ca. 50 W, was einer zugeführten Stromleistung für die gewählte Wärmepumpe von ca. 11 W pro 1 K entspricht.
- Für den Zustand maximaler Transmission beträgt die benötigte Kühlleistung um 16:00 Uhr 140 W pro 2,3 K, was einer zugeführten Stromleistung für die gewählte Wärmepumpe von ca. 14 W pro 1 K entspricht.

Durch die Abdunklung der Verglasung kann also nicht nur der Temperaturanstieg begrenzt werden, sondern auch, bei entsprechend vorausschauender Schaltung, der relative Kühlenergiebedarf pro 1 K reduziert werden.

Ein Nachteil dunkler Schaltzustände ist die niedrige Beleuchtungsstärke im Raum und der ggf. resultierende Beleuchtungsenergiebedarf. Wie aus Abbildung 6-29 ersichtlich ist, beträgt die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche am beispielhaften Frühlingstag bei maximaler Abdunklung der Verglasung erst ab 16:00 Uhr weniger als 500 lx. Die resultierende Beleuchtungsleistung (s. Abbildung 6-27) von ca. 0,1 W – 1 W pro 100 lx ist geringer als der bei minimaler Abdunklung auftretende Kühlenergiebedarf^{33, 34}.

Die durchgeführten energetischen Analysen haben gezeigt, dass bei der Auslegung von energetisch effektiven Regelungsstrategien der TN-Verglasung sowohl visuelle als auch thermische Komfortaspekte berücksichtigt werden sollten. Obwohl der Einfluss der Schaltvorgänge auf die Raumtemperatur geringer ist als auf die Raumhelligkeit, so hat die resultierende Temperaturänderung dennoch eine größere Auswirkung auf den Raumenergiebedarf als die Helligkeitsänderung.

³³ Für einen warmen Sommertag 26.06 (TMY-Wetterbedingungen für Stuttgart, Prüfstandsmodell) wurden die entsprechenden Leistungsunterschiede analog zu: ca. 80 W Kühlleistung pro Abkühlung um 1 K und ca. 1,2 W Beleuchtungsleistung pro 100 lx berechnet.

³⁴ Eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke ist meistens erst in späten Nachmittagsstunden gefragt. Zu dieser Zeit ist der Einfluss der Solarstrahlung auf die Innentemperatur und die resultierende Kühlleistung bereits gering, sodass eine Abdunklung der Verglasung mittags und eine Aufhellung der Verglasung am späten Nachmittag die nicht nur komforttechnisch, sondern auch energetisch wirksamste Vorgehensweise an sonnigen Tagen wäre. Sie wird im Rahmen der Regelungsstrategien überprüft.

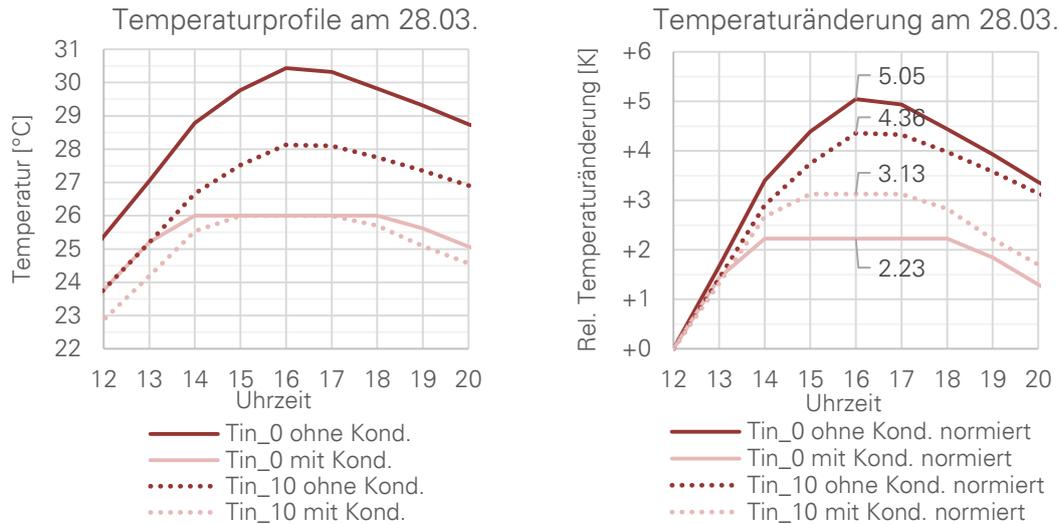


Abbildung 6-28: Simulierter Temperaturverlauf am Nachmittag des 28.03 (TMY-Wetterbedingungen für Stuttgart) in vier Fällen: Verglasung im Zustand maximaler Transmission (Stufe 0, Tin_0), im Zustand minimaler Transmission (Stufe 10, Tin_10), jeweils mit eingeschalteter Konditionierung (Kühlung) (mit Kond.) und ohne Kühlung (ohne Kond.). Links: Absolutwerte, rechts: Relative Temperaturänderung im Bezug auf die Temperatur um 12:00 Uhr.

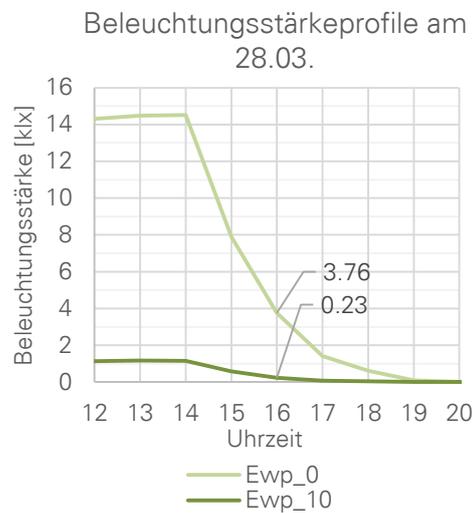


Abbildung 6-29: Simulierte Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche am Nachmittag des 28.03 (TMY-Wetterbedingungen für Stuttgart) beim Zustand maximaler Transmission (Stufe 0, Ewp_0) und beim Zustand minimaler Transmission (Stufe 10, Ewp_10) der Verglasung

7. Regelungskonzepte

Auf der Basis einer Literaturrecherche werden Regelungs- und Steuerungskonzepte aus diversen Bereichen ermittelt, wie Steuerung / Regelung von herkömmlichen Sonnenschutzsystemen oder künstlicher Beleuchtung (Kapitel 7.1). Diese Konzepte gründen auf der Verwendung verschiedener Parameter, wie Temperatur oder Solarstrahlung, als Steuer- oder Regelgrößen. Die Übertragbarkeit dieser Vorgehensweise und der Parameter auf die Ansteuerung der TN-Verglasungen wird untersucht. Durch die Auswahl geeigneter Parameter und deren Schwellenwerte, mit Einbeziehung der Erkenntnisse aus den Kapiteln 2 bis 6, können nachfolgend Regelungskonzepte für das TN-System entwickelt werden (Kapitel 7.2). Sie werden anschließend im Kapitel 8 hinsichtlich ihrer Potentiale zur Komfortverbesserung und zum Einfluss auf den Raumenergiebedarf evaluiert. Eine Übersicht der Inhalte und Wechselwirkungen zwischen dem Kapitel 7 und den anderen Kapiteln ist in Abbildung 7-1 schematisch dargestellt.

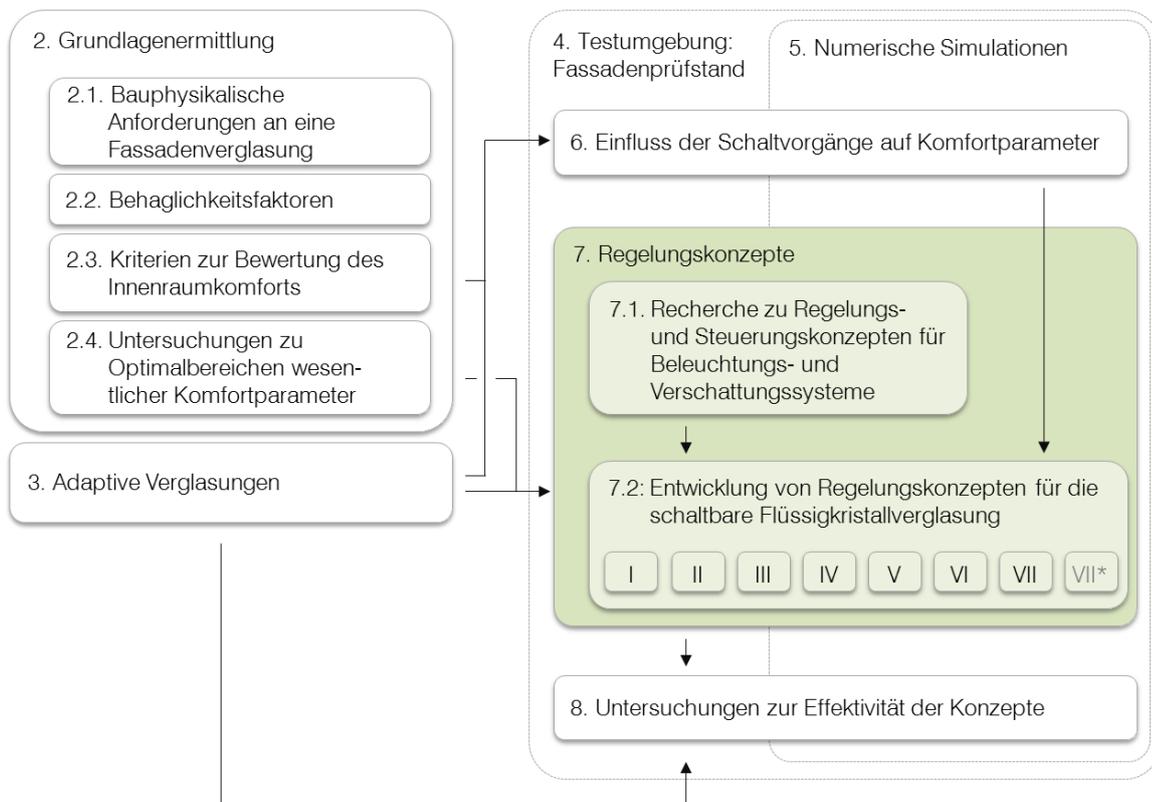


Abbildung 7-1: Inhaltsübersicht – Kapitel 7

7.1 Recherche zu Regelungs- und Steuerungskonzepten für Beleuchtungs- und Verschattungssysteme

7.1.1 Künstliche Beleuchtung

Die Komplexität der auf den Anforderungen basierenden Steuerungs- / Regelungsstrategien der künstlichen Beleuchtung erstreckt sich von der einfachsten manuellen Schaltung bis zu einer Integration des Beleuchtungssystems in das Gebäudeleitsystem. Das in der Baupraxis meist angewendete Konzept zur Ansteuerung der künstlichen Beleuchtung basiert auf der **Anwesenheit** der Raumnutzer. Hierzu gehören folgende Strategien:

- Steuerung einer Beleuchtungsanlage nach prognostizierter Raumbelugung (Predicted Occupancy Control Strategy, POCS), auch genannt „Time Scheduling Control Strategy“ (Regelung nach Zeitplan), richtet sich nach den Nutzungszeiten des Gebäudes. Für typische Bürogebäude beispielsweise wird die Beleuchtung abends und am Wochenende ausgeschaltet.
- Regelung nach tatsächlicher Raumbelugung (Real Occupancy Control Strategy, ROCS) reagiert auf die Signale der Bewegungsmelder und schaltet die Beleuchtung dann ein, wenn eine Bewegung im Raum festgestellt wurde. Diese Strategie wird insbesondere in Gebäuden oder Räumen umgesetzt, die nicht regelmäßig und unvorhersehbar belegt werden [154–156].

Für die Umsetzung der Regelung nach Helligkeit, auch als Regelung nach **Beleuchtungsstärke** (Constant Illuminance Control Strategy, CICS) bzw. Regelung nach **Tageslicht** (Daylight Harvesting Control Strategy, DHCS) bezeichnet, ist eine sensorische Ausstattung mit Helligkeitssensoren notwendig. Sollte die geforderte Beleuchtungsstärke am Messpunkt im Raum durch Tageslicht gewährleistet sein, wird die künstliche Beleuchtung ausgeschaltet, andernfalls wird sie in der benötigten Intensität eingeschaltet.

Effektivitätsvergleich der Regelungs- und Steuerungskonzepte für künstliche Beleuchtung

Ein Vergleich der Effektivität der Konzepte unter dem Kriterium des Energiebedarfs für die Beleuchtung wurde u.a. von Halonen et al. [154] veröffentlicht. Diese Untersuchungen beziehen sich auf beispielhafte Bürobauten, für die die einzelnen Regelungskonzepte mit einer manuellen Steuerung durch die Nutzer verglichen wurden. Die manuelle Steuerung wird als wenig energieeffizient bewertet. Sie hängt stark von den Verhaltensweisen der Nutzer und der Ausprägung ihres ökologischen Bewusstseins ab. Durch eine Kopplung der Lichtregelung mit den Heiz-, Kühl- und Lüftungssystemen kann hingegen ein globales Gebäudeenergiekonzept verfolgt werden (vgl. Halonen et al. [154]). In den betrachteten Musterbüros wurden mithilfe der Steuerung nach prognostizierter Raumbelugung (POCS) 10 % Energieersparnisse erzielt und ca. 20 % mit der Regelung nach tatsächlicher Raumbelugung (ROCS) in Kombination mit Bewegungsmeldern. Die Forscher wiesen dabei auf

eine Abhängigkeit des Einsparpotentials der tageslichtbasierten Regelung (DHCS) von der Klimazone hin. Je nach Gebäudelage wurde mit dieser Strategie eine Reduzierung des Energiebedarfs um 30 % (Paris) bis 40 % (Nizza) erreicht. Durch eine Kombination verschiedener Strategien, beispielsweise ROCS und DHCS errechneten Halonen et al. [154] bis zu 50 % Energieersparnis im Vergleich zur manuellen Betätigung der Lichtschalter. Diese Einsparpotentiale sind von mehreren Faktoren abhängig. Von Bedeutung sind u.a. die Raumgröße, die Anzahl verglasungsferner Arbeitsplätze, der Fensterflächenanteil, die Gebäudeorientierung und die Lage der Sensoren sowie die Qualität der Leuchtmittel [154].

7.1.2 Sonnenschutzvorrichtungen

Die meist in der Literatur erwähnten Parameter für die Steuerung oder Regelung von Sonnenschutzvorrichtungen sind die Strahlungsintensität und die Beleuchtungsstärke. Es besteht jedoch eine große Diskrepanz der angesetzten unteren und oberen Parameterwerte (weiter auch als Schwellenwerte bezeichnet). Sie unterscheiden sich hauptsächlich in Abhängigkeit der zu erfüllenden Funktion der Vorrichtung. Herkömmliche bewegliche Sonnenschutzvorrichtungen müssen häufig nicht nur eine Sonnenschutzfunktion, sondern auch eine Blendschutzfunktion erfüllen. Daher rühren die am häufigsten beobachtbaren manuellen Eingriffe in die Jalousiesteuerung. Wie Auswertungen mehrerer Analysen des Nutzerverhaltens [157] beweisen, werden Sonnenschutzvorrichtungen in Bürogebäuden meistens dann aktiviert, wenn **direkte Sonnenstrahlung** den Arbeitsplatz erreicht. Eine ähnliche Steuerungsstrategie für die Jalousienaktivierung ist in der DIN 5034 verankert: Sonnenschutz wird dann aktiviert, wenn eine Direktbesonnung auf der Fassade vorhanden ist. Nach Reinhart und Wienold [158] entsprechen die Aktionen der meisten Nutzer dem Zustand, wenn die direkte Bestrahlungsstärke auf die Fassade ca. 50 W/m^2 erreicht („active user“ [158]).

Verfügt ein Gebäude über getrennte Sonnen- und Blendschutzvorrichtungen, so werden insbesondere in Mehrbenutzerbüros oder Großraumbüros unterschiedliche Regelungsstrategien bevorzugt. Voss [50] weist auf die energetischen Vorteile von lokal aktivierbarem Blendschutz gegenüber einem für die gesamte Fassadenfront wirksamen hin. Somit kann jeder Nutzer sein lokales Blendschutzelement aktivieren ohne den visuellen Komfort anderer Raumnutzer zu beeinträchtigen. Die zusätzliche Sonnenschutzvorrichtung kann in diesem Fall thermisch motiviert aktiviert werden. Für eine thermisch motivierte Aktivie-

nung des Sonnenschutzes nennt Lichtmeß [157] **Globalstrahlungswerte** auf die Fensterfläche von 150 W/m² bis 200 W/m² als übliche Einschaltkriterien in der Kühlsaison³⁵. In EN ISO 13790 [159] wird eine automatische Jalousienschließung ab einer Bestrahlungsstärke auf der Fassade von 300 W/m² vorausgesetzt.

Ein anderer häufig beobachteter Aspekt der Jalousienbetätigung ist eine Hysterese im Nutzerverhalten. Van den Wymelenberg [160] berichtet von einer Studie (Reinhart und Voss [161]) in Deutschland, in der die Nutzer ab einer Beleuchtungsstärke auf der Fassade von mehr als 50 000 lx eine Schließung und erst bei einer Beleuchtungsstärke unter 25 000 lx die Wiederöffnung der Jalousien anstrebten. In einer weiteren Studie in Frankreich (Sutter et al. [162], zit. nach [160]) betragen die Schwellenwerte 41 000 lx für die Schließung und 13 000 lx für die Öffnung der Jalousien.

Bei außenliegenden Jalousien mit drehbaren Lamellen wird die Blendschutzfunktion von der Sonnenschutzfunktion mithilfe eines kennlinienbasierten Kontrollalgorithmus getrennt. Für das jeweilige System wird eine Cut-off-Kennlinie von den Herstellern bereitgestellt, die eine Lamellennachführung nach Sonnenstand ermöglicht, sodass der Neigungswinkel der Lamellen immer die direkte Strahlung reflektiert (vgl. de Boer [29]).

7.1.3 Elektrochrome Verglasungen

Die in den Kapiteln 7.1.1 und 7.1.2 genannten Steuerungs- und Regelungskonzepte wie manuelle Steuerung, Regelung / Steuerung nach Anwesenheit oder nach der Intensität der Solarstrahlung spiegeln sich in den Schaltkonzepten elektrochromer Verglasungen wider. Die Mehrzahl dieser Konzepte befindet sich derzeit in der Simulationsphase, wurde im Hinblick auf die Energiebedarfsermittlung ausgewertet, aber noch nicht validiert.

Entsprechend dem für die künstliche Beleuchtung bewährten Regelungskonzept nach **Tageslicht** (DHCS) wird eine elektrochrome Verglasung abgedunkelt, sobald die an einem Punkt im Raum gemessene Beleuchtungsstärke einen definierten Grenzwert übersteigt und wieder aufgehellt, sobald sie unter diesem Wert liegt [163]. Nach dem Ansatz von Lee et al. [164] wird dabei ein Zielbereich der mittleren Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche definiert (540 - 600 lx), der eine Hysterese der Verglasungsregelung ermöglicht.

³⁵ Ein Vergleich der Zeitanteile nach DIN 18599 der manuellen Regulierung des Sonnenschutzes mit der o.g. automatischen Grenzwertsteuerung bestätigt eine hohe Übereinstimmung

Die **anwesenheitsbasierten Strategien** POCS (Predicted Occupancy Control Strategy) und ROCS (Real Occupancy Control Strategy) wurden ebenfalls für elektrochrome Verglasungen vorgeschlagen [163, 165]. Energetisch motivierte Strategien genannt „Space Load Control“ (Regelung nach **Kühllasten**)³⁶ [166] oder „Energy Optimization“ (energetische Optimierung / **Energieeinsparung**)³⁷ [165] sollen zur simulationsbasierten Ermittlung der Grenzwerte der Energieeffizienz einer schaltbaren Verglasung dienen.

Eine Steuerung nach **Solarstrahlung** hat ihren Ursprung in den Konzepten konventioneller Sonnenschutzvorrichtungen. Im Fall der elektrochromen Verglasungen konnten drei Varianten dieser Strategie recherchiert werden. Bei Jonsson und Ross [167] sollte der senkrechte Anteil der durch die Verglasung transmittierten Solarstrahlung durch die Transmissionsänderung möglichst nah am Wert 200 W/m^2 gehalten werden. Bei anderen Forschern wurde ein Grenzwert der zur Verglasungsebene senkrechten Komponente der Solarstrahlung definiert. Sobald dieser überschritten wird, wird die Verglasung abgedunkelt und in diesem Zustand gehalten, bis die Bestrahlungsstärke unter den Grenzwert sinkt (vgl. [163]). Die Definition dieser Grenzwerte ist je nach Studie unterschiedlich (z.B. bei Assimakopoulos et al. [163] beträgt der Grenzwert der auf die Fassade auftreffenden Globalstrahlung 350 W/m^2). In der dritten Variante der Strategie werden zwei Grenzwerte der Bestrahlungsstärke definiert. Im Bereich zwischen den beiden Grenzwerten wird der Schaltzustand der Verglasung linear verändert. Außerhalb dieses Bereichs wird die Verglasung entsprechend hell oder dunkel geschaltet.

Eine weitere Steuerungsstrategie nach **Außentemperatur** wurde erstmals vom Forschungsteam Sullivan et al. [168] untersucht. Karlsson et al. [169] bemerkten jedoch die Unzuverlässigkeit dieser Strategie, da die Temperaturen auch beim bedeckten Himmel sehr hoch sein können.

Eine manuelle Schaltung der Verglasung wurde von Assimakopoulos et al. [163] in einer ca. 1,5-jährigen Feldstudie untersucht. Die durch die Nutzer initiierten Schaltvorgänge wurden für eine energetische Evaluierung mithilfe eines Lernalgorithmus nachgebildet („**Fuzzy controller**“ [163]). Energetisch hat sich diese Strategie als ähnlich der Regelung/Steuerung nach Tageslicht und Solarstrahlung erwiesen [163]. Ein umfassender Effektivitätsvergleich der Strategien ist nachfolgend gegeben.

³⁶ Sollten in der jeweils zurückliegenden Stunde Kühllasten im Raum vorhanden sein, wird die Verglasung in den Zustand der minimalen Transparenz geschaltet, beim Ausbleiben der Kühllasten wird ein heller Zustand angestrebt.

³⁷ Die elektrochrome Verglasung wird beim Kühlbedarf in dunklen Zustand geschaltet, beim Heizbedarf - in hellen Zustand

Effektivitätsvergleich der Regelungs- und Steuerungskonzepte für elektrochrome Verglasungen

Das ausschlaggebende Kriterium zur Beurteilung der Wirksamkeit einer Strategie war in den meisten recherchierten Fällen der resultierende Raum- oder Gebäudeenergiebedarf. Die Autoren Gugliermetti und Bisegna [170], Lee und DiBartolomeo [55] unternahmen zusätzlich Versuche der Quantifizierung des visuellen Komforts im Innenraum, wobei jedoch keine eindeutige Aussage über die Wirksamkeit der Regelung getroffen wurde. Es ist zu beachten, dass die meisten Autoren die auf eine maximale Energieeinsparung ausgelegte Regelung trotzdem als inakzeptabel für Aufenthaltsräume bewerteten. Sie würde, insbesondere in sonnenreichen Regionen, eine vollständige Verdunklung der Verglasungen über die meiste Zeit bedeuten. Die Energieeinsparungsstrategie wurde jedoch als Vergleichsstrategie zur Evaluierung der Effektivität anderer Strategien untersucht (vgl. Jonsson und Ross [165]).

Unter dem Kriterium der Energiebedarfsminimierung wurden die simulativ untersuchte Regelung nach Kühllasten und eine Variante der anwesenheitsabhängigen Strategien favorisiert. Die einem ROCS-Konzept (vgl. Kapitel 7.1.1) entsprechende Strategie setzt die Umsetzung einer solarstrahlungs-basierten Strategie bei der Anwesenheit des Nutzers und der „Energieeinsparung“ („Energy Optimization“)-Strategie in der restlichen Zeit voraus. Sie wurde von Assimakopoulos [163], Jonsson und Roos [165] für relativ schwach frequentierte Büroräume konzipiert und ist stark vom Gebäudetyp abhängig. Bei stark frequentierten Gebäuden wird die Energieeinsparung erwartungsgemäß wesentlich geringer sein. Die Studienergebnisse von Assimakopoulos et al. [163], die auf eine gute energetische Wirksamkeit der Strategien: „Fuzzy controller“, Steuerung nach Solarstrahlung und Regelung nach Tageslicht hindeuten, sollten, wie die Autoren selbst bemerken, verifiziert werden. Die Unterschiede des Energiebedarfs waren zwischen allen Regelungskonzepten sehr gering. Den Grund dafür sahen die Autoren im relativ geringen Schaltniveau der für die Studie verwendeten elektrochromen Verglasung [163]. Eine tabellarische Zusammenfassung des Forschungsstands ist im Institutsbericht [171] gegeben.

Die Recherche der Regelungsstrategien für elektrochrome Systeme hat ergeben, dass in diesem Bereich weiterhin ein großer Forschungsbedarf besteht. Vor allem sollten weitere Bewertungskriterien eingeführt werden. Für andere adaptive Systeme, wie die analysierten flüssigkristallbasierten Verglasungen, liegen derzeit keine Forschungsergebnisse vor. Die Übertragbarkeit der Konzepte für elektrochrome Verglasungen auf diese sollte untersucht werden.

7.1.4 Erkenntnisse für die Ansteuerung von TN-Verglasungen

In den meisten Literaturquellen wird auf die Notwendigkeit hingewiesen, Regelungskonzepte für Fassadenkomponenten mit variablen Eigenschaften nach Nutzeranwesenheit- und -abwesenheitszeiten zu differenzieren. Mehrere Regelungsparameter sollten in Betracht gezogen werden. Häufig wird eine Regelung nach Tageslicht für das Ziel der Energieeinsparung für die künstliche Beleuchtung und nach Kühllasten oder Solarstrahlung für die Minimierung des Gesamtenergiebedarfs als effektivste Strategien für die Ansteuerung des mechanischen Sonnenschutzes oder der elektrochromen Verglasungen definiert. Bei der Betrachtung der Effektivität der Ansteuerungsstrategien mangelt es bisher jedoch an umfassenden Analysen des Innenraumkomforts. In der vorliegenden Arbeit wurden Ansteuerungskonzepte für TN-Verglasungen ausgearbeitet, die zur Steigerung des visuellen und thermischen Komforts in Innenräumen beitragen. Hierfür wurden zuerst die Möglichkeiten der Übertragung der recherchierten Konzepte untersucht.

Die Schaltkonzepte für elektrochrome Systeme können aufgrund der unterschiedlichen Systemcharakteristika der Verglasungen, inklusive Schaltzeiten und erreichbarer Transparenzniveaus, auf die Flüssigkristallsysteme nicht direkt übertragen werden. Dennoch wurden auf der Basis der Literaturrecherche geeignete Parameter für die Entwicklung von Regelungskonzepten für die schaltbaren TN-Verglasungen identifiziert. Weitere Parameter wie die Innenraumtemperatur und die Blendung wurden hinzugefügt. Die anschließend erstellten Kombinationen mehrerer Parameter werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

7.2 Entwicklung von Regelungskonzepten für eine schaltbare Flüssigkristallverglasung

7.2.1 Leitidee: Trennung der Blendschutzfunktion von der Sonnenschutz- und Lichtversorgungsfunktion

Die untersuchte schaltbare Verglasung soll auf eine Weise angesteuert werden, die das Erreichen eines möglichst großen thermischen und visuellen Komforts im Innenraum ermöglicht. Während der Kühleisaison treten daher die Schutzfunktion der Verglasung vor übermäßiger Solarstrahlung sowie die Blendschutzfunktion in den Vordergrund. Während der Heizsaison soll ein effektiver Blendschutz gewährleistet werden, häufig bei gleichzeitiger Nutzung solarer Gewinne.

Die Unterteilung der TN-Verglasungen in einzeln ansteuerbare Pixel ermöglicht die Trennung der Blendschutzfunktion von der Sonnenschutzfunktion der Verglasung, sodass alle genannten Anforderungen möglichst effektiv erfüllt werden können. Die Blendschutzfunk-

tion wird von einem kleinen Blendschutzbereich (Glare Protection (GP) Zone) der Verglasung übernommen, dessen Größe und Position innerhalb der Verglasung von der Sonnenposition sowie von der Anzahl und der Position der Gebäudenutzer abhängig ist. Um den / die Nutzer vor direkter Blendung zu schützen, wird der Blendschutzbereich an der Schnittstelle zwischen dem Nutzerauge und der von ihm gesehenen Sonne platziert (vgl. Kapitel 5.2.2)³⁸. Der restliche Verglasungsbereich, als Tageslichtversorgungsbereich (Daylight Provision (DP) Zone) bezeichnet, wird nach ausgewählten Parametern angesteuert. Sollte die Sonnenscheibe für den Nutzer nicht sichtbar sein, beispielsweise aufgrund eines hohen Bewölkungsgrads oder einer großen Sonnenhöhe, wird die gesamte Verglasungsfläche als Tageslichtversorgungsbereich genutzt. Die konzeptionelle Unterteilung der Verglasungsfläche in zwei Bereiche ist in Abbildung 7-2 dargestellt. In Abbildung 7-3 sind Aufnahmen einer Umsetzung dieser Unterteilung im Fassadenprüfstand gegeben. Um die Blendschutzfläche für einen Raumnutzer maximal zu reduzieren, wurde eine Kreisform mit dem Durchmesser von 50 cm gewählt. Soll die Arbeitsfläche ebenfalls verschattet werden oder steigt die Anzahl der Raumnutzer an, so kann ein anderes Muster (z.B. horizontale, rechteckige Unterteilung der Verglasungsfläche) geeignet sein.

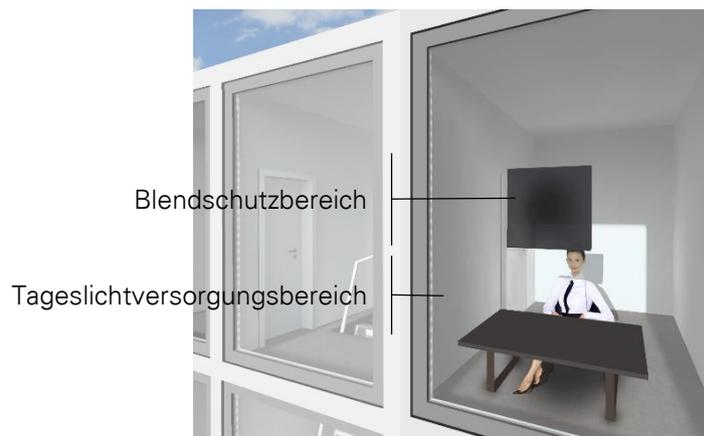


Abbildung 7-2: Unterteilung der Verglasungsfläche in zwei Funktionsbereiche. Rendering: V. Kalydzhieva, ILEK, überarbeitet.

³⁸ Für Simulationszwecke wurde die im Kapitel 5.2.2 beschriebene, konstante Nutzerposition angenommen. Die in der Realität übliche, variable Nutzerposition kann mithilfe einer verfügbaren Technologie (z.B. aus dem Videospielekonsolen-Bereich) erfasst werden (vgl. [99]).



Abbildung 7-3: Unterteilung der Verglasungsfläche in zwei Funktionsbereiche. Aufnahmen aus dem Innenraum des Fassadentestgebäudes im Tagesverlauf. Phot.: G. Metzger, ILEK.

7.2.2 Transmissionsregelung nach ausgewählten Parametern

Aus dem Konzept der partiellen Verdunklung ergeben sich weiterführende Möglichkeiten der Parameterdefinition für die Regelungsstrategien der TN-Verglasung. Um den thermischen Komfort zu beeinflussen, wird der Tageslichtversorgungsbereich der Verglasung nach den Parametern Temperatur und Solarstrahlung angesteuert. Die Temperatur wird mittels der Messgröße Innentemperatur, die Solarstrahlung mittels der Diffusstrahlungsstärke (als Differenz der Global- und der Direktstrahlungsstärke) in der Fassadenebene erfasst. Für die Gewährleistung des visuellen Komforts ist für die Ansteuerung des Tageslichtversorgungsbereichs die Verfügbarkeit des Tageslichts ausschlaggebend, erfasst mittels der Messgröße Beleuchtungsstärke. Der Blendschutzbereich wird aufgrund der Blendungsgefahr (Messgrößen: neben der Sonnen- und Nutzerposition, Direktstrahlung auf die Südfassade) angesteuert. Der Zeitplan wird als übergeordnet betrachtet. Abhängig von der Nutzeranwesenheit im Raum werden entweder die auf den genannten Parametern

basierten Regelungsstrategien zur Komfortverbesserung eingesetzt (Nutzer anwesend) oder es wird das Ziel einer Energiebedarfsminimierung verfolgt (Nutzer abwesend)³⁹.

Für die jeweiligen Messgrößen wurden Schwellenwerte definiert, denen die Zustände maximaler und minimaler Transmission der Verglasung zugeordnet sind. Wie im Kapitel 7.1.3 erläutert, sind dabei zwei Vorgehensweisen möglich. Entweder wird eine Schwellengröße verwendet, um das System in einen Zustand maximaler Transparenz oder minimaler Transparenz zu versetzen (Abbildung 7-4 a.), oder es werden zwei Schwellengrößen eingeführt (Abbildung 7-4 b.). In diesem Fall kann die Transparenz der Verglasung zwischen den beiden Grenzwerten stufenlos oder mit einer voreingestellten Stufenanzahl variiert werden. Für den Tageslichtversorgungsbereich der Verglasung wird die Ansteuerungsvariante mit zwei Schwellengrößen verwendet, um das volle Potential des Systems auszunutzen. Im Blendschutzbereich ist für einen effektiven Blendschutz ein Lichttransmissionswert von $\tau_{vis} < 7\%$ [172] (optimal $\tau_{vis} < 2\%$ [173]), also der Zustand minimaler Transparenz notwendig, daher wird dieser bei Blendungsgefahr für den Blendschutzbereich eingestellt (eine Schwellengröße verwendet, s. Abbildung 7-4 a.)⁴⁰.

Die Definition der Schwellenwerte kann nach unterschiedlichen Methoden erfolgen. Für die Temperatur und die Beleuchtungsstärke wurden die im Kapitel 2.4 vorgestellten Ergebnisse der Literaturrecherche und der Untersuchungen zum Einfluss der Schaltvorgänge auf die Komfortparameter herangezogen. Für den Messwert Bestrahlungsstärke wurde am ILEK eine Parameterstudie [174] zur energetisch effektivsten Schwellenwerteneinstellung durchgeführt.

³⁹ Für in-situ-Anwendungen wird eine Möglichkeit zur Überschreibung der vorprogrammierten Ansteuerung der Verglasung durch den Raumnutzer vorgesehen. Im Rahmen des Forschungsprojekts „i³ - intelligente, interaktive, integrative Fassadenverglasung für Sonnenschutzanwendungen“ wurde hierfür eine Interaktionsschnittstelle entwickelt [99].

⁴⁰ Der Blendschutzbereich wird in den Zustand minimaler Transmission versetzt, wenn die Direktstrahlung auf die Südfassade mindestens 50 W/m^2 beträgt (nach Reinhardt und Wienold [158], empirisch validiert; der Wert entspricht einer hohen Wahrscheinlichkeit direkter Blendung beim gegebenen Nutzungsszenario). Andernfalls befindet er sich im gleichen Schaltzustand wie der Tageslichtversorgungsbereich der Verglasung.

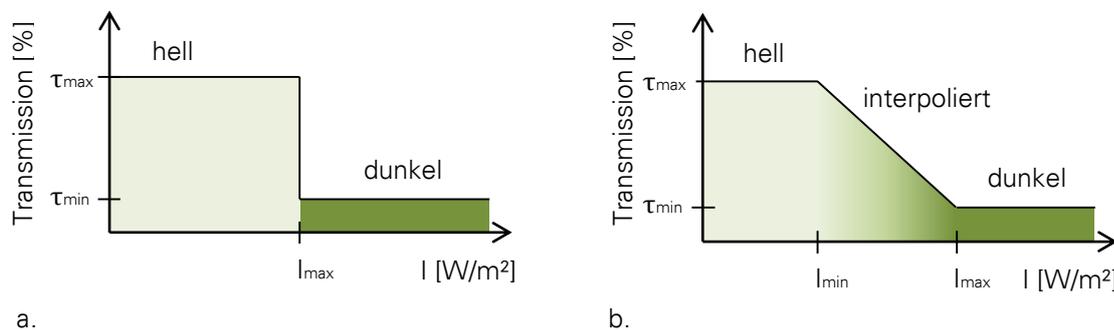


Abbildung 7-4: Steuerung der Schaltvorgänge nach Bestrahlungsstärke. Links (a.): mit einem Schwellenwert der Bestrahlungsstärke. Rechts (b.): mit zwei Schwellenwerten. τ_{max} : Lichttransmission der Verglasung im hellen Zustand, τ_{min} : Lichttransmission im vollständig verdunkelten Zustand. I_{gmin} und I_{gmax} : Schwellenwerte der Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsoberfläche.

Die genannten Parameter in jeweils unterschiedlichen Konfigurationen wurden als Basis für die Ansteuerung der Verglasung verwendet. Folgende Ansteuerungskonzepte wurden dabei verfolgt: iterative Regelungs- / Steuerungsstrategien I – VI sowie ein aus der Leittechnik bekannter P-Regler. Während bei der iterativen Strategien die Reaktion auf eine Zustandsveränderung jeweils zum nächsten Zeitschritt (eine Stunde) erfolgt, sind mit in der Leittechnik verankerten Reglermodellen kürzere Reaktionszeiten erreichbar. Eine Übersicht der untersuchten Strategien ist in Abbildung 7-7 gegeben.

Der Begriff der Regelung wird dabei wie folgt definiert: „Vorgang, bei dem fortlaufend eine variable Größe, die Regelgröße, erfasst, mit einer anderen variablen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. [...] Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungsablauf“ [175]. Dazu wird die Führungsgröße („Sollwert“) mit der gemessenen Regelgröße („Istwert“) verglichen. Die sich ergebende Differenz der beiden Größen wird als Regelabweichung (Regeldifferenz) bezeichnet. Durch die Bestimmung einer Stellgröße soll die Regelstrecke so beeinflusst werden, dass die Regelabweichung ihr Minimum erreicht. Diese Zusammenhänge sind in einem schematischen Wirkungsplan in Abbildung 7-5 dargestellt. Bei einem Steuerungsvorgang werden die Ausgangsgrößen (gesteuerte Größen) nicht durch einen Vergleich mit den Führungsgrößen beeinflusst (i.d.R. offener Wirkungsablauf). Ein schematischer Wirkungsplan eines Steuerungssystems ist in Abbildung 7-6 dargestellt.

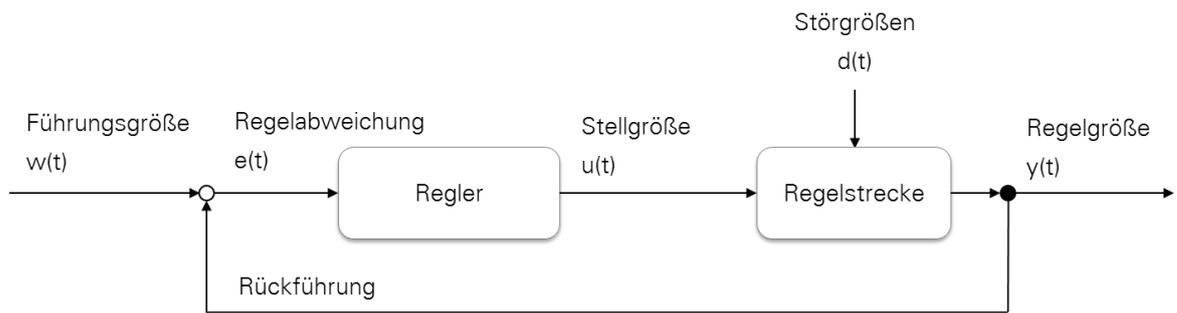


Abbildung 7-5: Wirkungsplan mit typischen Elementen eines elementaren Regelungssystems (in Anlehnung an DIN IEC 60050-351 [175])

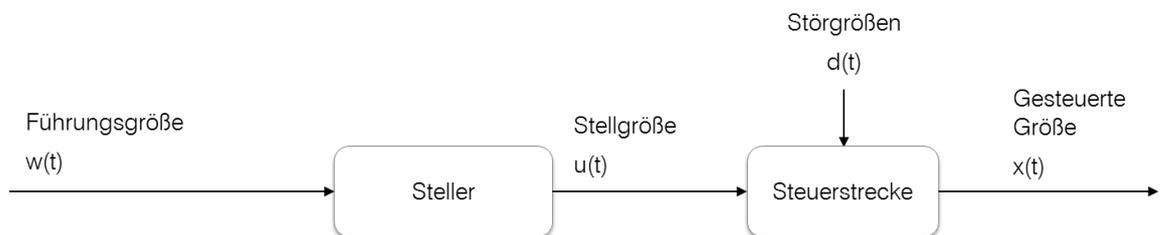
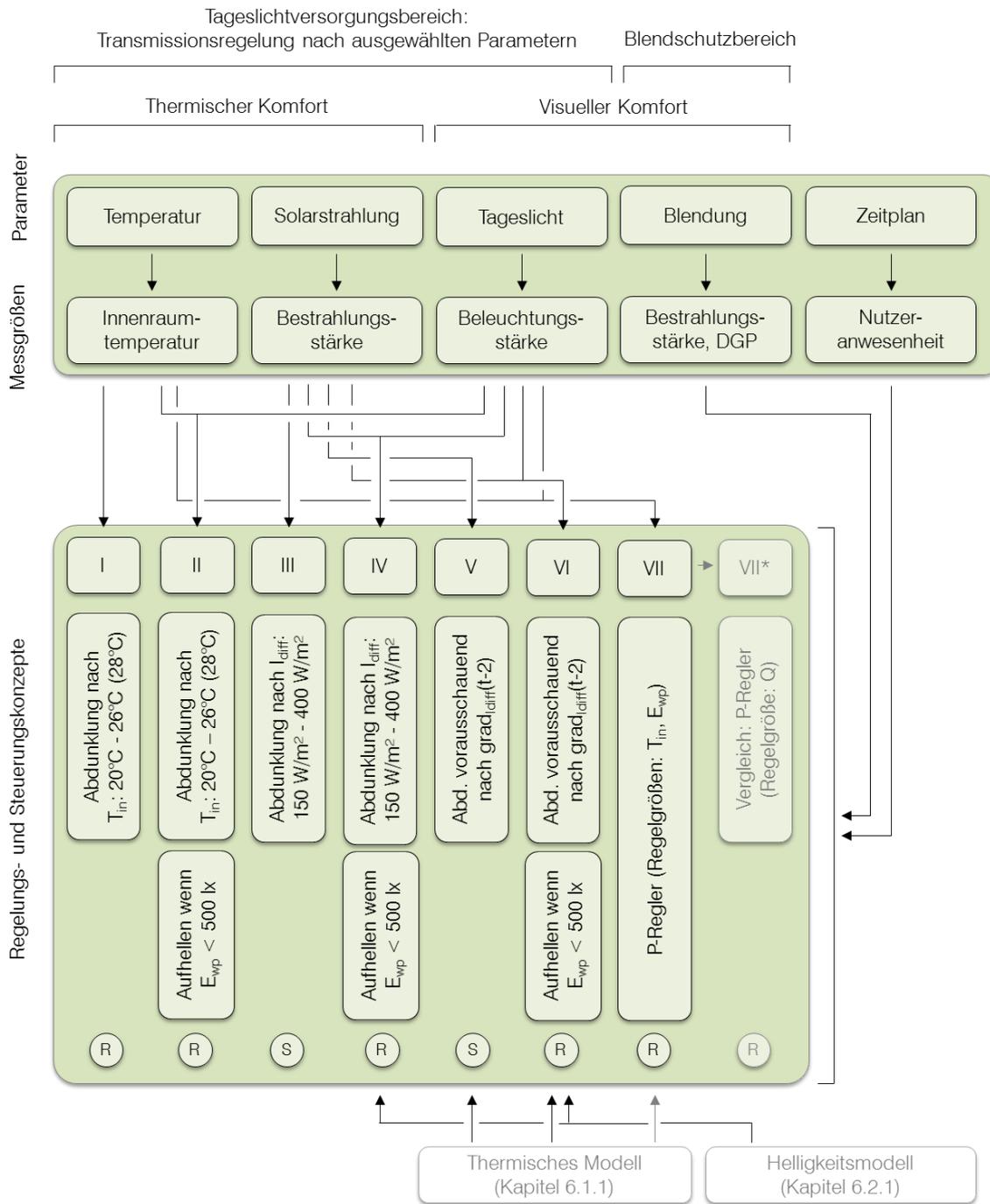


Abbildung 7-6: Wirkungsplan mit typischen Elementen eines elementaren Steuerungssystems (in Anlehnung an DIN IEC 60050-351 [175])



- T_{in} - Innenraumtemperatur [°C]
- E_{wp} - Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche [lx]
- I_{diff} - Diffusstrahlungsstärke auf die verglaste Fassade [W/m²]
- Q - Raumenergiebedarf [W]

Abbildung 7-7: Übersicht der entwickelten Ansteuerungsstrategien (R – Regelung, S – Steuerung)

7.2.3 Iterative Regelungs- und Steuerungsstrategien I - VI

Iterative Ansteuerungsstrategien ermöglichen insbesondere unter realen Testbedingungen eine genaue und nachvollziehbare Analyse des Raumverhaltens. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden sechs Ansteuerungsvarianten ausgearbeitet, gemäß dem im Kapitel 5 vorgestellten Simulationsaufbau numerisch simuliert und im Fassadentestgebäude in Stuttgart getestet. Nachfolgend werden die untersuchten Strategien I bis VI vorgestellt. Deren grafische Darstellung in Form von Flussdiagrammen ist im Anhang 3 gegeben.

Die **Regelungsstrategie I** wurde wie folgt definiert: Der Tageslichtversorgungsbereich wird entsprechend der Raumtemperatur angesteuert. Der Abdunklungsgrad der Verglasung soll bei einer Raumtemperatur zwischen 20 und 26 °C variiert werden, wie in Abbildung 7-8 dargestellt. Durch eine Abdunklung der Scheibe werden solare Gewinne minimiert, wodurch der Kühlenergiebedarf reduziert werden kann. Durch die Erhöhung der Verglasungstransmission bei niedrigen Temperaturen kann eine Reduktion des Heizenergiebedarfs erzielt werden. Außerhalb des genannten Temperaturbereichs wird das Kühl- und Heizsystem eingesetzt. In Anlehnung an adaptive Komfortmodelle wurde eine zweite Variante der Strategie untersucht, bei der die Kühlung erst ab einer Temperatur von 28 °C eingeschaltet wurde.

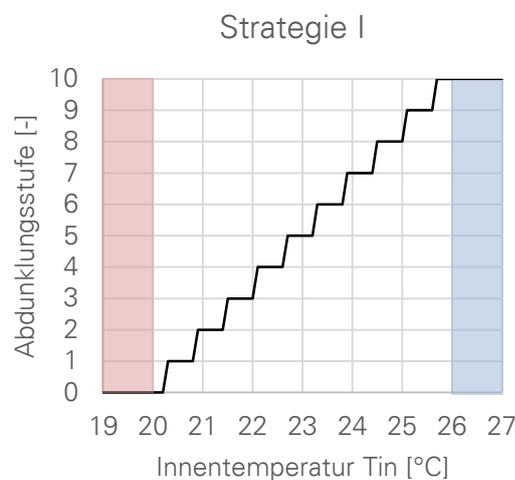


Abbildung 7-8: Temperaturbasierte Abdunklung bei Unterteilung des Schaltbereichs in 10 Stufen, bei $T_{min} = 20$ °C, $T_{max} = 26$ °C (rot: Heizungsbereich, blau: Kühlbereich)

Durch die temperaturmotivierte Abdunklung der Verglasung bei Strategie 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 sicherzustellen⁴¹. Aus diesem Grund wurde die **Strategie II** 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.

Des Weiteren wurde eine Steuerung nach der Bestrahlungsstärke untersucht (**Strategie III**), da die solare Strahlungsleistung eine Ursache für die Raumerwärmung ist. Eine direkte Reaktion auf diese dient somit der Vorbeugung der sommerlichen Überhitzung. Die Ansteuerungsstrategie III wurde nach dem gleichen Prinzip aufgebaut wie die Strategie I. Innerhalb des Bereichs zwischen der unteren und der oberen Schwelle der Bestrahlungsstärke auf die Südfassade (I_{\min} und I_{\max}) wurde die Verglasung stufenweise abgedunkelt (s. Abbildung 7-9).

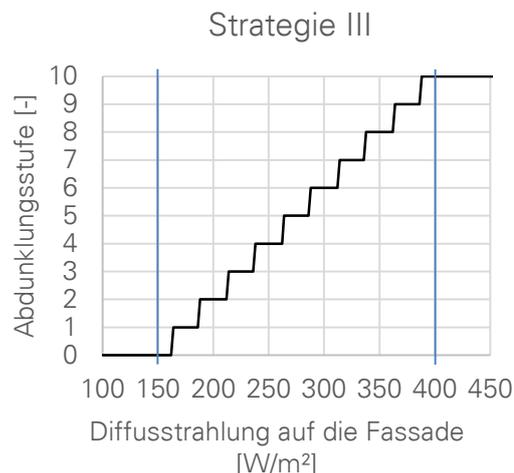


Abbildung 7-9: Bestrahlungsstärkebasierte stufenweise Abdunklung bei Unterteilung des Schaltbereichs in 10 Stufen, bei $I_{\min} = 150 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$

Wie Voruntersuchungen [41, 174] zeigten, entspricht der diffuse Anteil der Solarstrahlung den Anforderungen an einen geeigneten Parameter für die Regelung der Verglasung am besten. Im Gegensatz zu den beiden anderen Strahlungsarten, Direkt- und Globalstrahlung, weist der Jahresverlauf der Diffusstrahlung durch niedrige Intensitäten in Heizperioden und hohe Intensitäten in Kühlperioden eine Korrelation zum erwünschten Abdunklungsverlauf der Verglasung auf. Diese Korrelation ist bei der verglasten Südfassade

⁴¹ Für Empfehlungswerte für verschiedene Nutzungsarten s. Zwischenbericht II zum Forschungsvorhaben „Adaptive Verglasungssysteme“ [71]

besonders gut erkennbar und wird in Abbildung 7-10 veranschaulicht (diese Korrelation findet sich auch bei West-, Nord- und Ostfassaden).

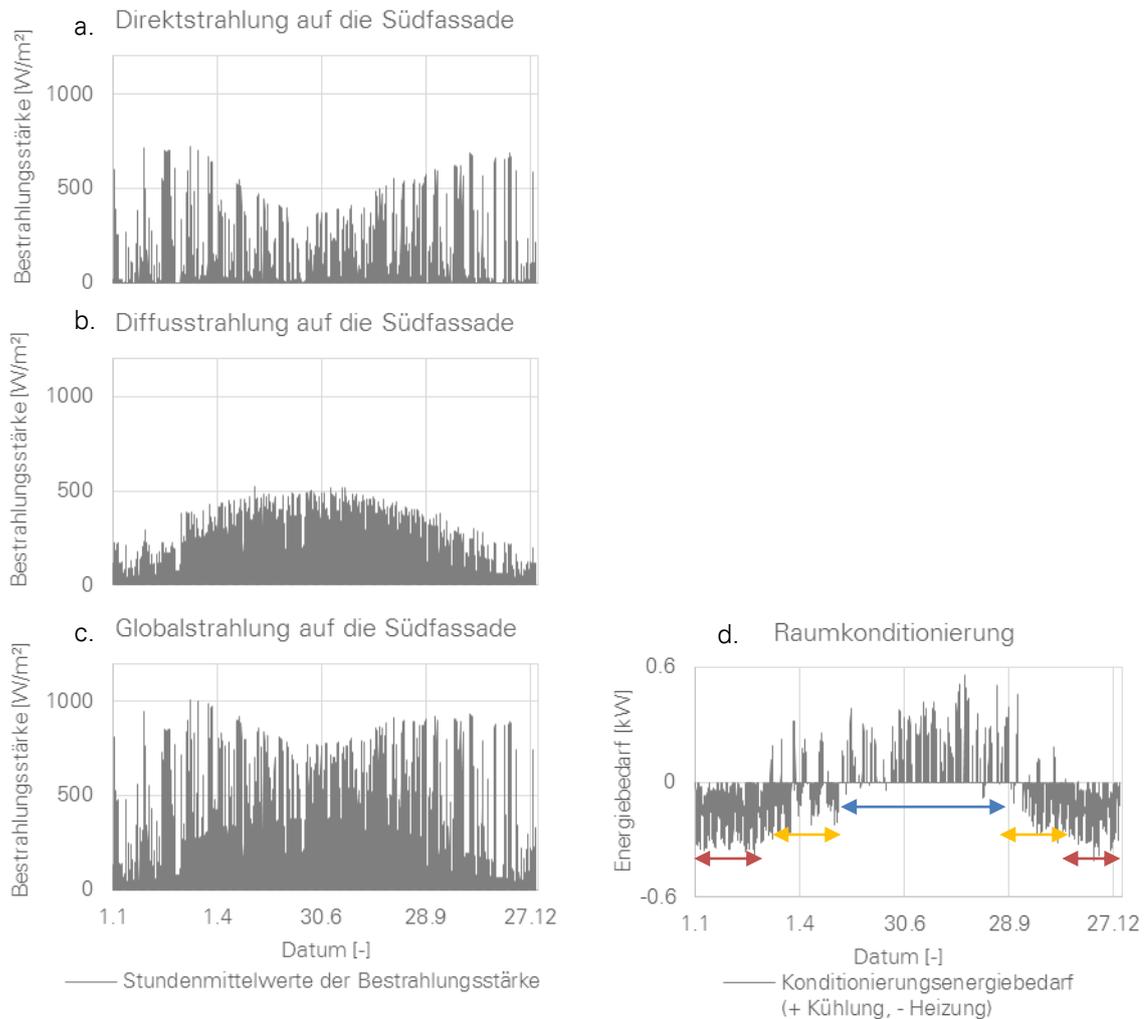


Abbildung 7-10: Links: Jahresverläufe der Direkt- (a.), Diffus- (b.) und Globalstrahlung (c.) auf die Südfassade in Stuttgart nach TMY-Wetterbedingungen. Rechts (d.): Konditionierungsenergiebedarf des simulierten Testraums im Jahresverlauf (Fassadenprüfstand Stuttgart, Verglasung im Zustand maximaler Transmission).

Während der Heizperiode (in (d.) rot markiert) ist ein Heizenergiebedarf zu erwarten, daher sollte eine Verglasung zu dieser Zeit hohe Transmissionswerte aufweisen. Während der Kühlperiode (blau) sollte der hohe Kühlenergiebedarf durch niedrige Transmissionswerte der Verglasung reduziert werden. In der Übergangszeit (gelb) sollten die Verglasungseigenschaften variabel sein. Das Jahresprofil des Raumkonditionierungsbedarfs entspricht dem Jahresprofil der diffusen Strahlungsanteile (b.).

Die Definition des unteren und des oberen Schwellenwerts der Diffusstrahlung ist stark abhängig von der Gebäudeorientierung und dem Einsatzort. Im Allgemeinen führen niedrige Schwellenwerte zur Erhöhung des Heizenergiebedarfs und des Beleuchtungsenergiebedarfs (und somit zur Verschlechterung des visuellen Komforts) sowie zur Reduktion des Kühlenergiebedarfs. Hohe Schwellenwerte führen zur Erhöhung des Kühlenergiebedarfs (die Gewährleistung des thermischen Komforts durch Schaltvorgänge der Verglasung wird erschwert). Für die Südfassade in Stuttgart zeigte sich die Kombination: $I_{\min} = 150 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$ als am besten⁴² geeignet [41, 174].

In der **Strategie IV** wurde das zuvor vorgestellte Regelungskonzept III um die Komponente Beleuchtungsstärke im Innenraum erweitert. Somit konnte bei ausreichendem Tageslichtangebot die notwendige Helligkeit auf der Arbeitsfläche gewährleistet werden. Diese Strategie ist in Abbildung 12-4 im Anhang 3 dargestellt.

Der **Strategie V** lag ebenfalls der Parameter Bestrahlungsstärke zugrunde, welcher jedoch um eine „vorausschauende“ Komponente ergänzt wurde, auf der Basis der Erkenntnisse aus dem Kapitel 6.1.1. Da die Innentemperatur an den meisten Tagen ihr Tagesmaximum etwa zwei bis drei Stunden nach dem Tagesmaximum der Solareinstrahlung auf die Südfassade erreicht, wurde in der Strategie V der Gradient der Diffusstrahlung ermittelt, um die erwartete Innenraumtemperatur in darauffolgenden Stunden zu berechnen. Zum Zeitpunkt t des Tages tritt dabei einer von drei Fällen auf:

- Ist der Strahlungsgradient zum Zeitpunkt $(t-1)$ positiv (Fall 1, Abbildung 7-11 a.), so wird eine Temperaturerhöhung im weiteren Tagesverlauf erwartet. Abhängig von der aktuellen Temperatur sollten solare Gewinne ggf. begrenzt werden, um einer übermäßigen Aufheizung des Innenraums vorzubeugen.
- Ist der Strahlungsgradient zum Zeitpunkt $(t-1)$ gleich 0 (Fall 2, Abbildung 7-11 b.) (und es handelt sich nicht um Nacht), so wird die Temperatur ihr Tagesmaximum zum

⁴² In Anlehnung an vorangegangene Parameterstudien [174] wurden drei verschiedene Kombinationen detailliert untersucht: ($I_{\min} = 30 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$), ($I_{\min} = 30 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 150 \text{ W/m}^2$) und ($I_{\min} = 150 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$). Energetisch betrachtet, waren am Standort Stuttgart die Unterschiede zwischen diesen drei Varianten gering. Die Kombination ($I_{\min} = 30 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$) resultierte dabei im niedrigsten Gesamtenergiebedarf, jedoch einem hohen Bedarf an künstlicher Beleuchtung, wogegen die Kombination ($I_{\min} = 150 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$) den besten visuellen Komfort ermöglichte. Am Standort Accra waren die Unterschiede gravierender. Die Verwendung hoher Schwellenwerte (in Anlehnung an ein hohes Solarstrahlungsangebot an diesem Standort) führte zwar zu besonders niedrigen Beleuchtungsenergiebedarf, aber auch zu einem sehr hohen Kühlenergiebedarf. Niedrige Schwellenwerte ($I_{\min} = 30 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 150 \text{ W/m}^2$) ermöglichten zwar Einsparungen beim Kühlenergiebedarf, verursachten jedoch eine intensive Nutzung der künstlichen Beleuchtung, die bei einem Standort mit besonders hohem Tageslichtangebot zu hinterfragen ist [41].

- Zeitpunkt (t+1) bis (t+2) erreichen. Solare Gewinne sollten begrenzt werden, um einer übermäßigen Aufheizung des Innenraums vorzubeugen.
- Ist der Strahlungsgradient zum Zeitpunkt (t-1) negativ (Fall 3, Abbildung 7-11 c.), so handelt es sich um einen Nachmittag. Die notwendige Abdunklung der Verglasung wurde voraussichtlich bereits eingeleitet und das Temperaturmaximum erreicht. Durch die Phasenverschiebung ist es nicht mehr möglich, einen Temperaturanstieg wirksam zu verhindern.

Die Berechnung der notwendigen Abdunklung erfolgt auf der Basis der vorhergesagten Innentemperaturerhöhung mithilfe des im Kapitel 6.1.1 ermittelten Proportionalitätsfaktors.

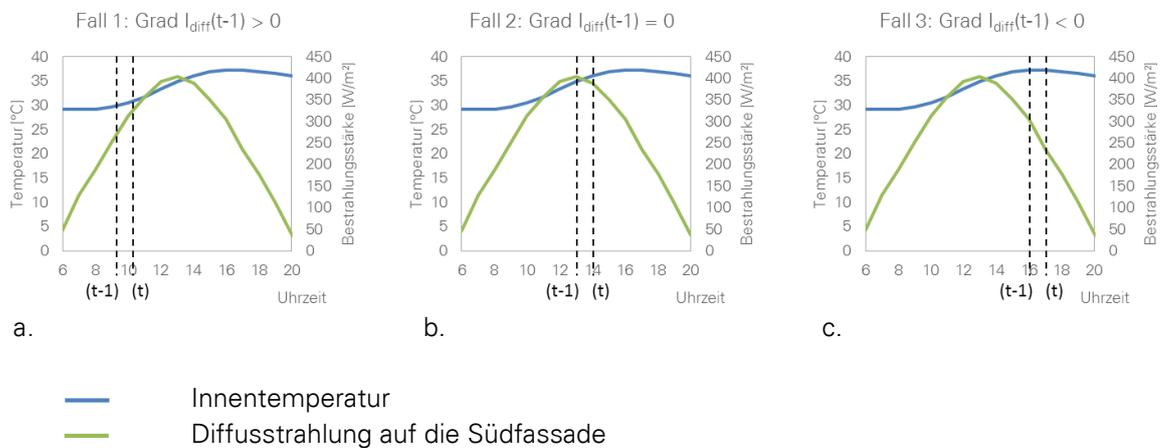


Abbildung 7-11: Regelungskonzept V, schematische Darstellung der betrachteten Fälle in Abhängigkeit vom Gradienten der Diffusstrahlungsstärke auf die Fassadenoberfläche ($\text{Grad } I_{\text{diff}}$)

Die Strategie V wurde anschließend um die minimale erforderliche Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche ergänzt, analog zur Strategie IV, um auch die visuellen Bedingungen im Raum zu berücksichtigen. Für die Berechnung der helligkeitsbedingt notwendigen Schaltstufe fand Formel (6-11) Verwendung. Ein Flussdiagramm der resultierenden **Strategie VI** ist in Abbildung 12-6 im Anhang 3 dargestellt.

7.2.4 Strategie VII: P-Regler

Der einfachste Reglertyp ist der Proportionalregler (P-Regler). Bei Regelstrecken mit Proportionalverhalten ändert sich die Regelgröße y (also auch die Regelabweichung e , vgl. Abbildung 7-5) proportional zur Stellgröße u . Der Proportionalitätsfaktor (Verstärkungsfaktor) wird als K_p bezeichnet und das Verhalten des Reglers wie folgt beschrieben [176]:

$$u(t) = K_p * e(t) \quad (7-1)$$

Der Wirkungsplan für das verwendete Simulationsmodell ist in Abbildung 7-12 abgebildet.

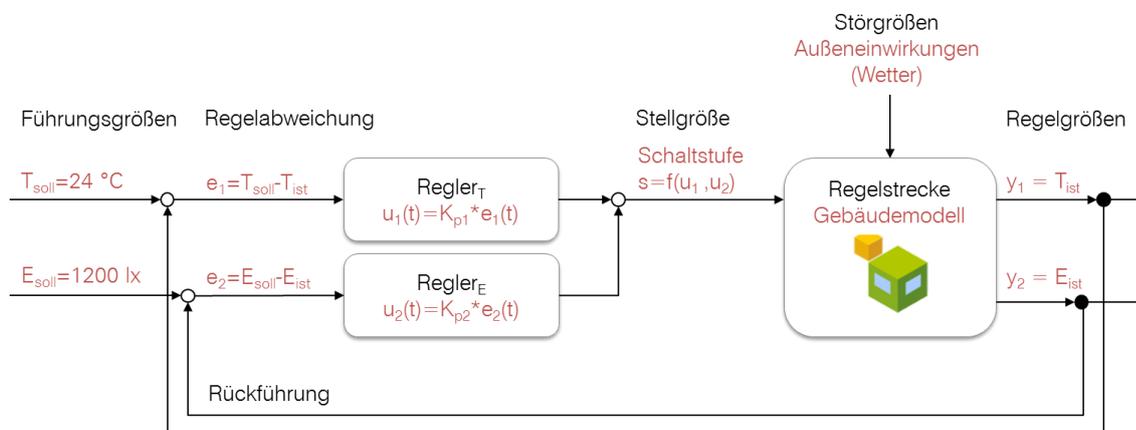


Abbildung 7-12: Wirkungsplan des erstellten Modells mit zwei Regelgrößen

Im erstellten Simulationsmodell wird die Regelstrecke durch das Gebäudemodul Type 56 repräsentiert und mit Störgrößen (Außeneinwirkungen) belastet. Die Schaltstufe der TN-Verglasung wird als Stellgröße verwendet, deren Änderung in einer Veränderung der Regelgrößen: Raumtemperatur und Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche resultiert⁴³.

⁴³ Zu Zeiten der Nutzerabwesenheit wurden die beiden Regelgrößen durch eine Regelgröße: Energiebedarf des Raums ersetzt, um komfortmotivierte Regelvorgänge außerhalb der Arbeitszeiten einzuschränken.

Zum Vergleich der Simulationsergebnisse (s. Kapitel 8) wurde außerdem ein Reglermodell herangezogen, das an allen Stunden des Jahres, unabhängig von der Nutzeranwesenheit nur eine Regelgröße: Energiebedarf verwendet (bezeichnet als Strategie VII*).

Auf der Grundlage der im Kapitel 2.4 aufgeführten Literaturrecherche wurden folgende Führungsgrößen definiert: $T_{\text{soll}} = 24 \text{ °C}$, $E_{\text{soll}} = 1200 \text{ lx}$. Die jeweiligen Proportionalitätsfaktoren wurden empirisch bestimmt. Erfahrungswerte und empirische Methoden gehören zu den in der Praxis meist verwendeten Methoden zur Bestimmung von Proportionalitätsfaktoren [176]. Grundsätzlich führen große K_p -Werte zu einem erwünschten, stärkeren Regeleingriff, zu große Werte erhöhen jedoch die Schwingungsneigung des Regelkreises. Als Ausgangsbasis für die Bestimmung der Proportionalitätsfaktoren wurden Annahmen getroffen, die die Akzeptanzgrenzen der Komfortparameter berücksichtigten. Bei einer erwünschten Temperatur von $T_{\text{soll}} = 24 \text{ °C}$ wurde in der ersten Phase der K_p -Ermittlung ein komforttechnisch zulässiger Temperaturbereich zwischen 20 °C und 28 °C angenommen. Vorausgesetzt, dass bei $T_{\text{in}} = 24 \text{ °C}$ die optimale Temperatur erreicht ist, ergo keine weitere Abdunklung oder Aufhellung erwünscht ist, sollte im Bereich $T_{\text{in}} = [20 \text{ °C}, 24 \text{ °C}]$ die Verglasung um maximal 10 Stufen aufgehellt werden und im Bereich $T_{\text{in}} = [24 \text{ °C}, 28 \text{ °C}]$ um maximal 10 Stufen abgedunkelt werden („relativer“ Bereich der Abdunklungsänderung $[-10, 10]$ entspricht dem Temperaturbereich $[20\text{°C}, 28\text{°C}]$). Analog wurde der helligkeitsmotivierte „relative“ Schaltstufenbereich definiert. Den Beleuchtungsstärkewerten zwischen 0 lx (maximale Aufhellung der Verglasung erwünscht) und 2500 lx (maximale Abdunklung der Verglasung erwünscht) wurde der „relative“ Stufenbereich $[-10, 10]$ zugeordnet. Demnach ergibt sich beispielhaft bei $T_{\text{ist}} = 28 \text{ °C}$ eine Regelabweichung von $e_1 = T_{\text{soll}} - T_{\text{ist}} = -4 \text{ K}$ und eine thermische Stellgröße $u_1 = +10$. Da nach Formel (7-1) $u = K_p * e$, so ergibt sich $K_{p1, \text{initial}} = 10 / (-4) = -2,5$. Analog: $K_{p2, \text{initial}} = 10 / (1250 - 2500) = -0,008$. Die Stellgröße s wird wie folgt bestimmt:

$$s(t) = \text{truncate}(w_1 * u_1(t) + w_2 * u_2(t)) \quad (7-2)$$

s	- aktuelle Schaltstufe der Verglasung (Stellgröße) [-]
u_1	- thermische Komponente der Stellgröße [-]
u_2	- visuelle Komponente der Stellgröße [-]
w_1	- Gewichtungsfaktor für die thermische Komponente [-]
w_2	- Gewichtungsfaktor für die visuelle Komponente [-]
truncate	- Begrenzung der Schaltstufe auf den Bereich $[0, 10]$

Bei einer Gewichtung von $w_1:w_2 = 1:1$ ergibt sich:

$$s(t) = \text{truncate}(0,5 * u_1(t) + 0,5 * u_2(t)) \quad (7-3)$$

Empirische Analysen haben ergeben, dass die ermittelten Proportionalitätsfaktoren häufig zu starken Oszillationen des Systems führten. Demnach wurden sie in Anlehnung an die

Ziegler-Nichols-Methode gegebenenfalls angepasst^{44,45}. Wie im Kapitel 6.3.3 erläutert, verbirgt die gleichwertige Gewichtung beider Komponenten die Gefahr einer Übersteuerung der empfindlicheren visuellen Komponente. Diese kann meistens nicht durch die Veränderung der Gewichtungsfaktoren behoben werden (nur sehr hohe Gewichtungsunterschiede wären wirksam, diese führen jedoch meistens zur Übersteuerung einer der Komponenten, s. Kapitel 6.3.3). Dieser Effekt zeigte sich auch beim Einsatz des P-Reglers an einigen Jahresstunden mit besonders hoher thermischer Belastung. Um an allen Tagen die erwünschte Mindestbeleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche sicherzustellen, wurde dem Regler eine zusätzliche Funktion in Anlehnung an die Formel (6-11) hinzugefügt (Nachsteuerung im Fall zu niedriger Beleuchtungsstärken).

Eine Plausibilitätsanalyse des Reglermodells unter stationären Simulationsbedingungen zeigte eine gute Übereinstimmung der Regelvorgänge und der Optimierung mit GenOpt (vgl. Kapitel 6.3.3) (das Ziel des Regelvorgangs, wie auch des Optimierungsalgorithmus, ist die Minimierung der Abweichungen der Komfortparameter von ihren Optimalbereichen). Ein Vergleich der Ergebnisse der für repräsentative Außenbedingungen durchgeführten TRNSYS-Simulationen ohne Einsatz des Heiz- und Kühlsystems ist in der nachfolgenden Abbildung 7-13 gegeben. Somit konnte das Reglermodell auf instationäre Bedingungen übertragen werden, die wärme- und tageslichttechnische Jahressimulationen ermöglichten. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

⁴⁴ Nach Ziegler-Nichols wird K_p solange vergrößert, bis harmonische Schwingungen der Regelgröße zu erkennen sind. Der zuletzt eingestellte Proportionalitätsfaktor, s.g. kritischer Proportionalbeiwert $K_{p,krit}$, wird im Fall eines P-Reglers mit dem Faktor 0,5 multipliziert, um den zu verwendenden K_p -Wert zu berechnen [176].

⁴⁵ Die Gewichtung der Stellgrößenkomponenten wurde ggf. durch die Anpassung der Gewichtungsfaktoren (w_1, w_2) erhalten. Beispielsweise ergaben sich für den Regelvorgang unter stationären Bedingungen $K_{p1}=-2,5$, $K_{p2}=-0,0004$. Die Abminderung eines Proportionalitätsfaktors wurde durch die Erhöhung des zugehörigen Gewichtungsfaktors kompensiert, um Schwingungen des Systems zu vermeiden, aber die erwünschte Gewichtung der Stellgrößen beizubehalten.

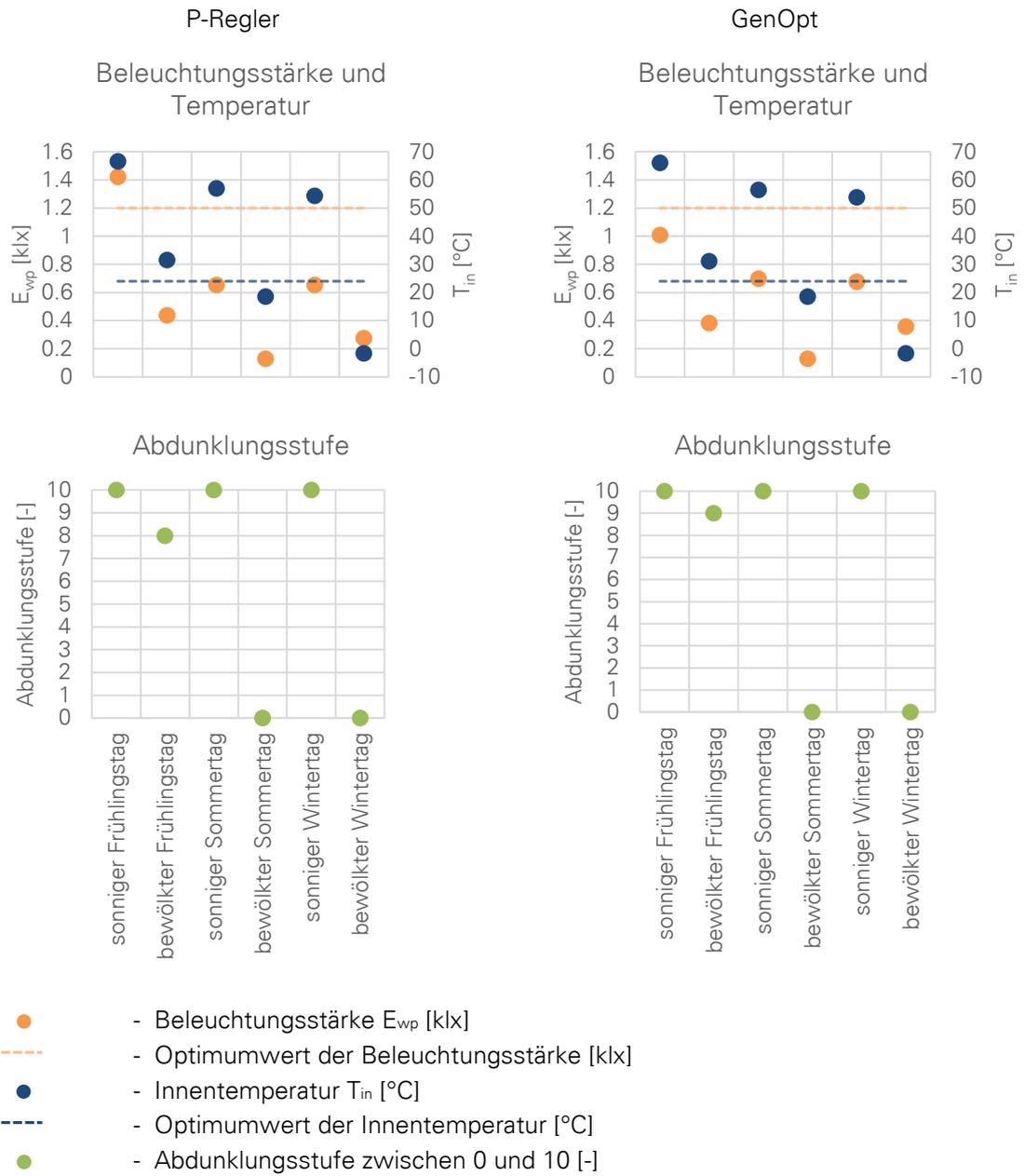


Abbildung 7-13: Plausibilitätsanalyse des Reglerentwurfs: Vergleich der Simulationsergebnisse für repräsentative Außenbedingungen beim Einsatz des P-Reglers (links, $K_{p1}=-2,5$, $K_{p2}=-0,0004$, Gewichtung 1 : 1) und des Optimierungsalgorithmus (rechts, Gewichtung 1 : 1). Simulation ohne Heizung und Kühlung, $T_{soll} = 24$ °C, $E_{soll} = 1200$ lx.

8. Untersuchungen zur Effektivität der Regelungskonzepte

8.1 Analyse der Adaptationsvorgänge an repräsentativen Tagen

8.1.1 Simulationsergebnisse

Eine Analyse der Abdunklungsvorgänge zu jeder Tagesstunde an repräsentativen Tagen gibt einen Einblick in die Funktionsweise der im Kapitel 7.2 erläuterten Regelungsstrategien sowie der resultierenden thermischen und lichttechnischen Raumcharakteristika. Diese sind in den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 8-1 bis Abbildung 8-5) für einen sonnigen Sommertag, für den Standort Stuttgart umfassend visualisiert. Anschließend folgt die Analyse ausgewählter Strategien unter anderen Wetterbedingungen (Abbildung 8-6 und Abbildung 8-7). Die Untersuchungen resultieren in vier Erkenntnissen a. bis d., die im Kapitel 8.1.2 messtechnisch belegt werden.

Für die Diagramme gilt die folgende Nomenklatur:

Tout	- Außentemperatur [°C]
Tin	- Innentemperatur (Raumlufttemperatur) [°C]
Ewp	- Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche [klx]
Heizung	- Nutzenergiebedarf Heizung [kW] (in Kreislauf zuzuführende Energie)
Beleuchtung	- Nutzenergiebedarf künstliche Beleuchtung [kW]
Kühlung	- Nutzenergiebedarf Kühlung [kW]
Abdunkl_DP	- Abdunklungsstufe des Tageslichtversorgungsbereichs der Verglasung (zwischen 0 und 10) [-]
Abdunkl_GP	- Abdunklungsstufe des Blendschutzbereichs der Verglasung (zwischen 0 und 10) [-]
Abdunkl_Regler	- Abdunklungsstufe des Tageslichtversorgungsbereichs aufgrund des Reglereingriffs (zwischen 0 und 10) [-]
Abdunkl_Emin	- Hypothetische Abdunklungsstufe des Tageslichtversorgungsbereichs nach dem Parameter Beleuchtungsstärke (zwischen 0 und 10) [-]
Abdunkl_T	- Abdunklungsstufe des Tageslichtversorgungsbereichs nach dem Parameter Innentemperatur (zwischen 0 und 10) [-]
Abdunkl_I	- Abdunklungsstufe des Tageslichtversorgungsbereichs nach dem Parameter Bestrahlungsstärke (zwischen 0 und 10) [-]
Abdunkl_T_gradl	- Abdunklungsstufe des Tageslichtversorgungsbereichs nach den Parametern Temperatur und Strahlungsgradient (zwischen 0 und 10) [-]

Der Abdunklungszustand der Tageslichtversorgungszone der Verglasung ist im Bereich von 0 (Zustand maximaler Transmission) bis 10 (Zustand minimaler Transmission) definiert. Der Blendschutzbereich der Verglasung (GP-Zone) wird während der Sommermonate in Stuttgart aufgrund des hohen Sonnenstands (vgl. Kapitel 5.2.2) nicht aktiviert. Für die auf mehreren Parametern gründenden Strategien II, IV, VI und VII wurden die Abdunklungsvorgänge detailliert analysiert. Dargestellt wurden sowohl hypothetische Abdunklungsstufen nach jedem der verwendeten Parameter (gestrichelte Linien) als auch die aus der Kombination beider Parameter resultierende Stufe (durchgezogene Linie).

Abdunklungsstufe 0 (Regler aus)

Abdunklungsstufe 10 (Regler aus)

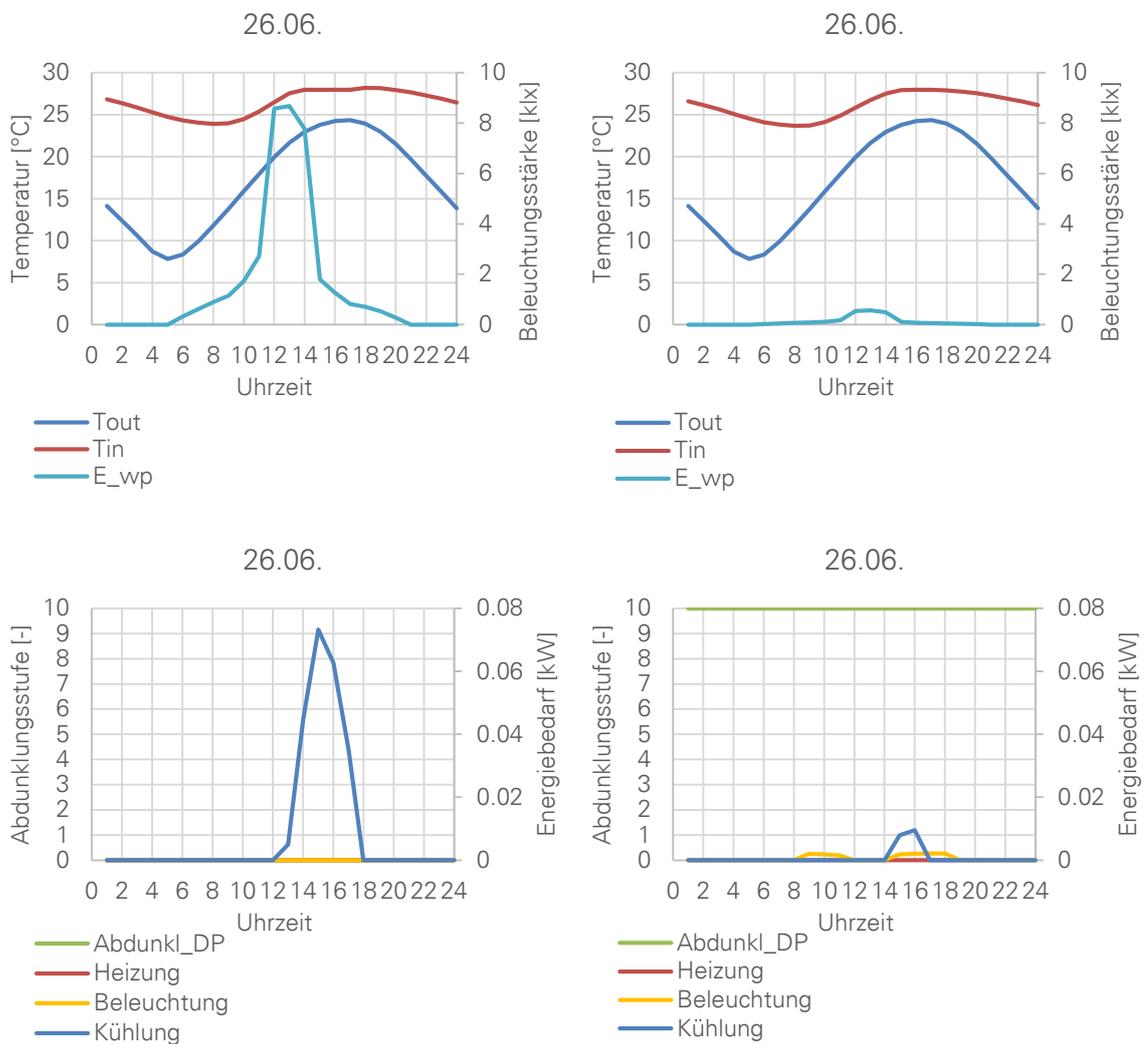
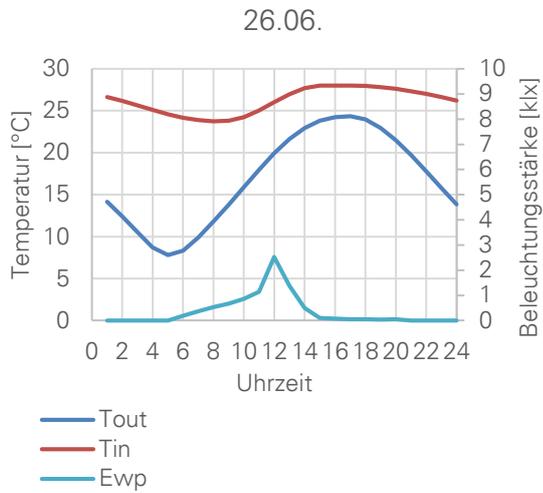


Abbildung 8-1: Tagesanalyse sonniger Sommertag, konstante Abdunklung

Strategie I



Strategie II

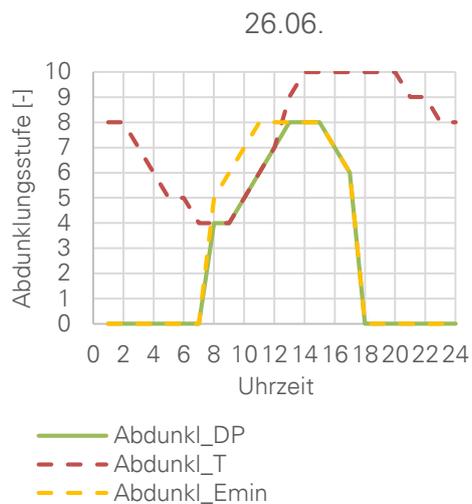
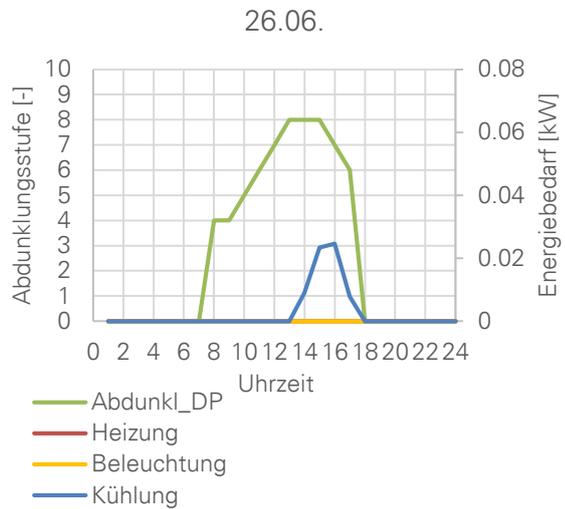
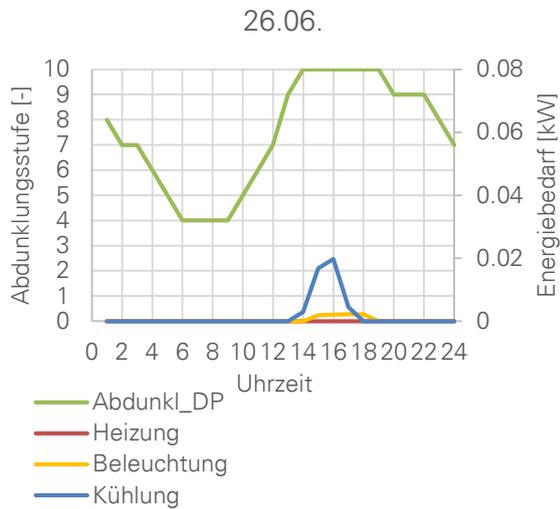
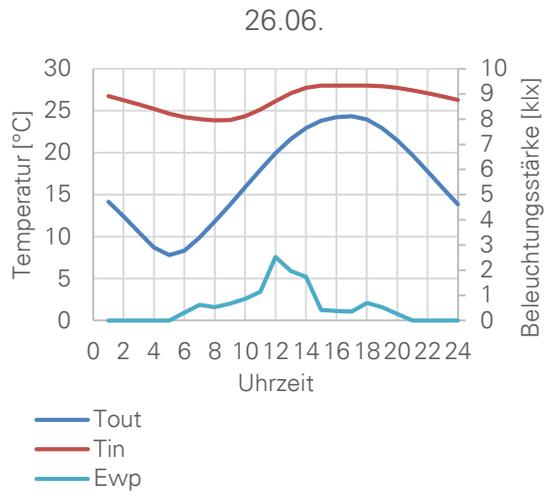
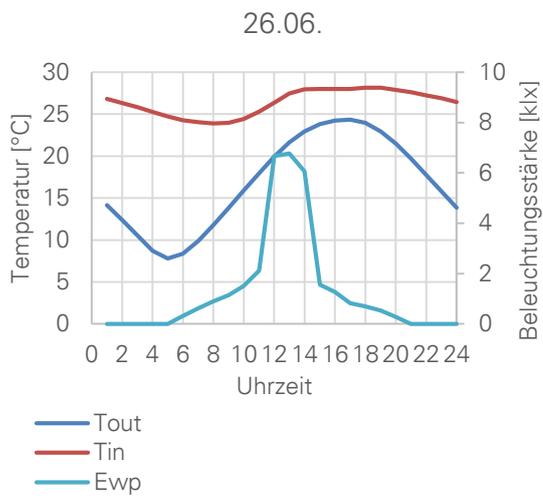


Abbildung 8-2: Tagesanalyse sonniger Sommertag, Strategien I (links) und II (rechts)

Strategie III



Strategie IV

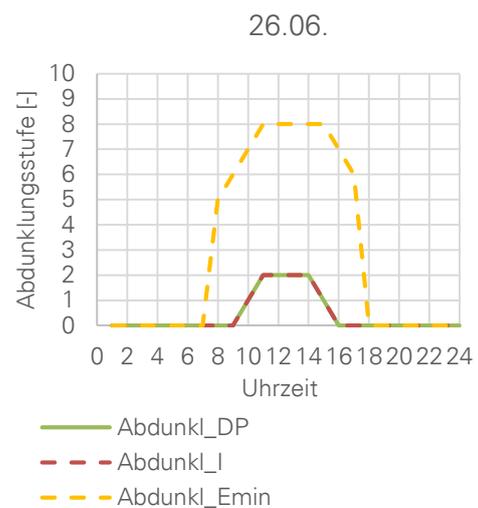
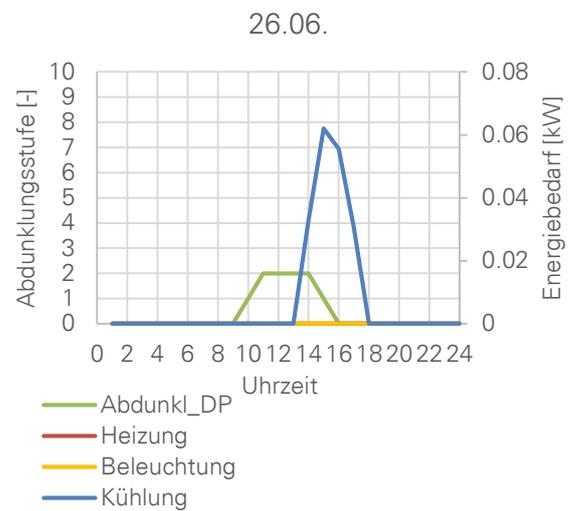
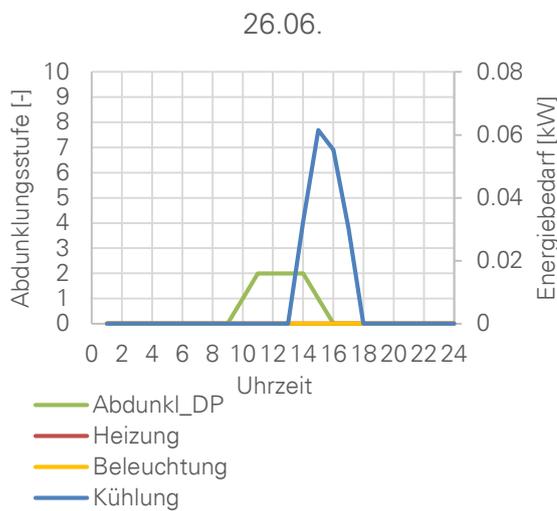
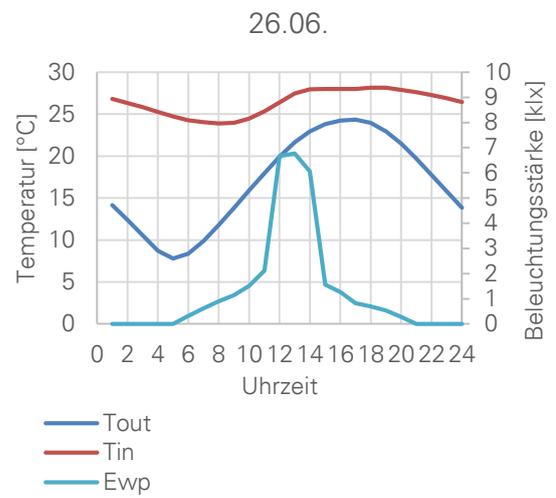
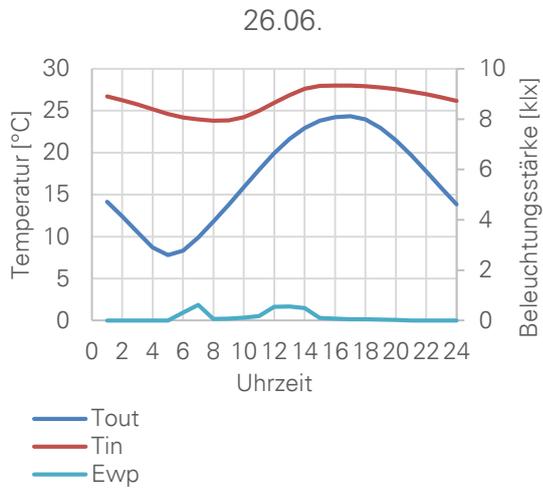


Abbildung 8-3: Tagesanalyse sonniger Sommertag, Strategien III (links) und IV (rechts)

Strategie V



Strategie VI

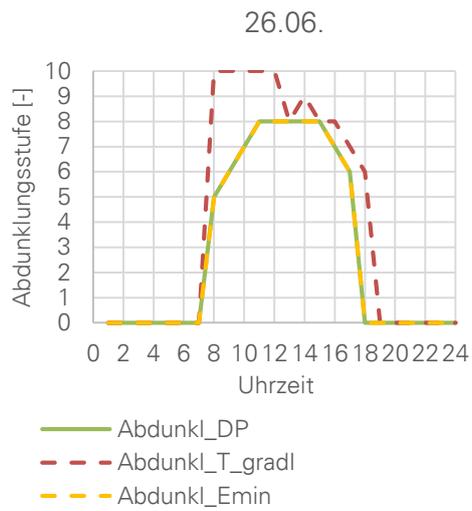
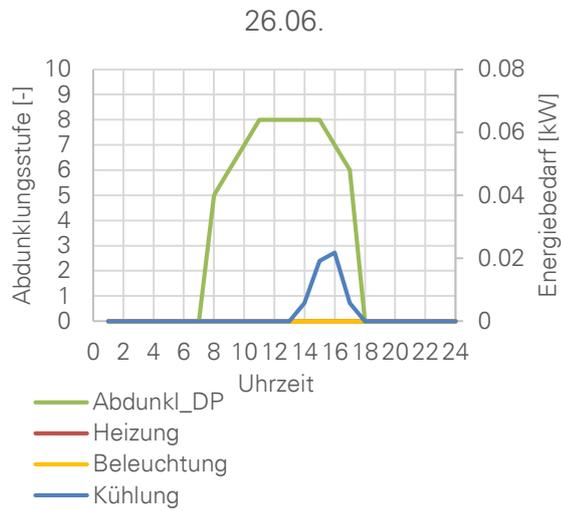
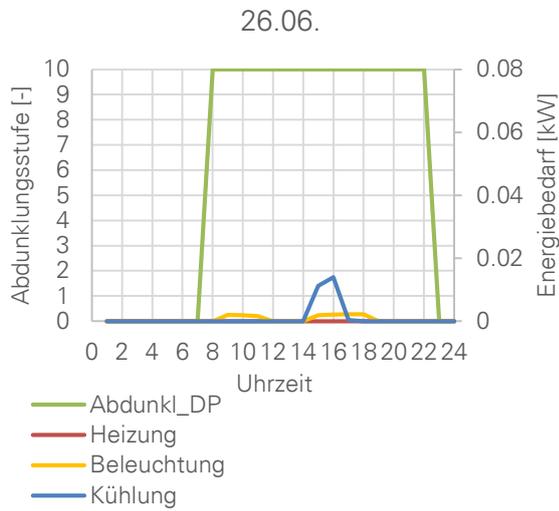
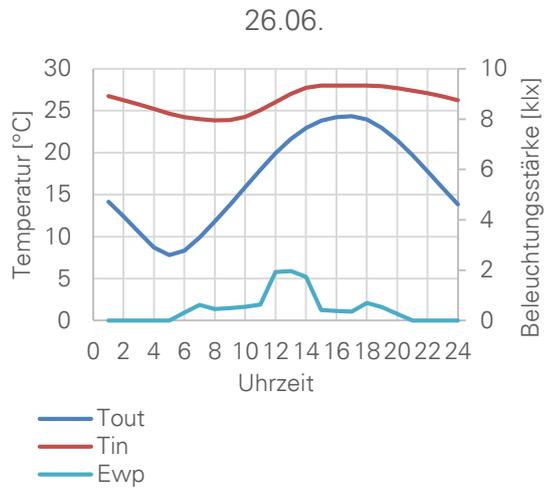
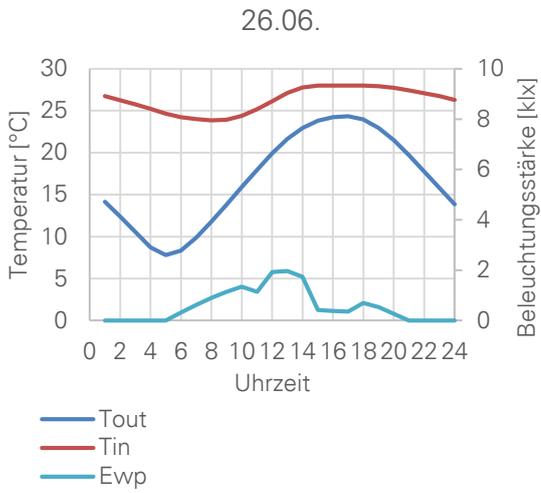


Abbildung 8-4: Tagesanalyse sonniger Sommertag, Strategien V (links) und VI (rechts)

Strategie VII



Strategie VII*

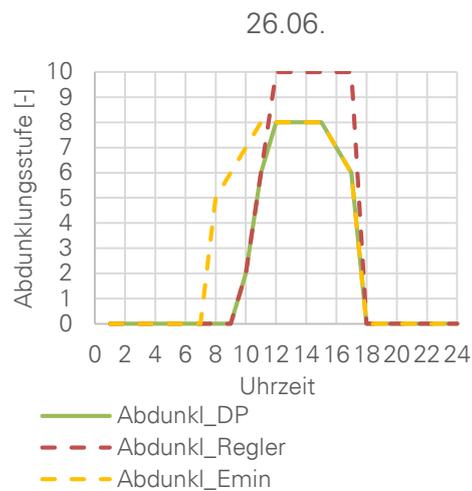
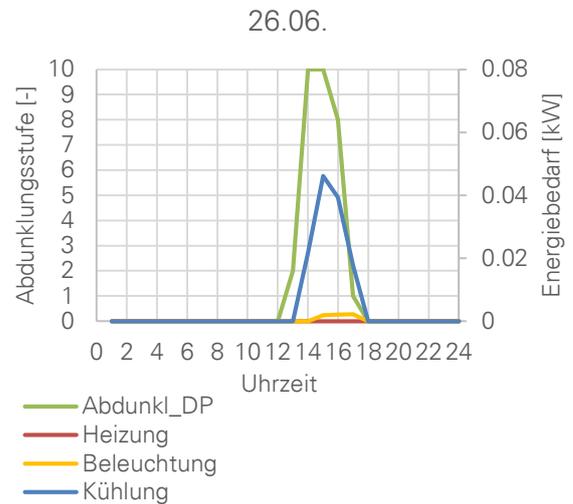
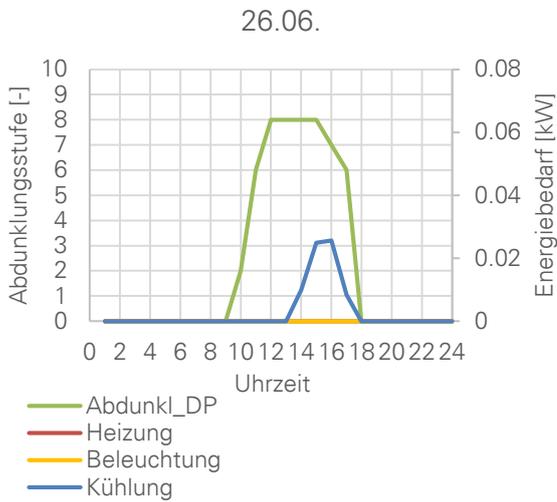
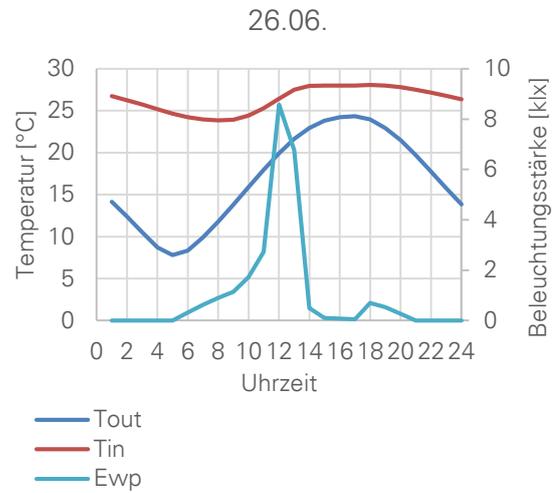


Abbildung 8-5: Tagesanalyse sonniger Sommertag, Strategien VII (links) und VII* (rechts)

Erkenntnis a.

Aus Abbildung 8-2 bis Abbildung 8-4 ist ersichtlich, dass die temperatur- und strahlungsbasierten Strategien I und V (aber auch, in Abhängigkeit der gewählten Strahlungsgrenzen, die Strategie III) zu besonders dunklen Schaltzuständen der Südfassade während des ganzen Nachmittags führen, sodass die Einschaltung der künstlichen Beleuchtung zur Gewährleistung einer ausreichenden Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene notwendig ist. Mit den Strategien II, IV, VI, VII, die den Parameter Helligkeit berücksichtigen, kann durch die weniger intensive Abdunklung des Tageslichtversorgungsbereichs eine ausreichende Beleuchtungsstärke auf der gesamten Arbeitsebene gesichert werden.

Dieser Ansatz führt unter Umständen zum Anstieg des Kühlenergiebedarfs, der dennoch vergleichbar ist mit dem andernfalls auftretenden Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung. Im Vergleich zum maximal transparenten Zustand der Verglasung wird sogar bei den helligkeitsbasierten Strategien (II, VI, VII) eine Reduktion des Kühlenergiebedarfs um ca. 60 % verzeichnet.

Erkenntnis b.

Am sonnigen Sommertag 26.06. ist die hohe Sensitivität der Strategien III und IV auf die definierten Strahlungsgrenzwerte deutlich erkennbar. Während die ausgewählten Grenzwerte im Jahresmittel (und an den anderen in Abbildung 8-6 und Abbildung 8-7 dargestellten Tagen) zu einer guten Wirksamkeit der Strategie führen, erscheinen sie für sehr warme Sommertage zu hoch. Der Kühlenergiebedarf ist wesentlich höher als beim Einsatz der anderen Strategien. Dies spricht für die Notwendigkeit einer sehr genauen Anpassung der Grenzwerte an die Projektgegebenheiten in der Praxis und, wenn möglich, eine jahreszeitabhängige Variation der Grenzwerte. Eine detaillierte Analyse der Auswirkungen der gewählten Schwellenwerte auf die Heiz- und Kühlenergiebedarfe finden sich in begleitenden Arbeiten des ILEK [41, 174].

Erkenntnis c.

Am Beispiel des wechselhaften Frühlingstags in Abbildung 8-6 können die Potentiale der TN-Verglasung bei moderaten Außentemperaturen erkannt werden. An solchen Tagen ist es schon mit einer einfachen Strategie, wie die Ansteuerungsstrategie III (Abdunklung der DP-Zone (grün) als Reaktion auf die variierende Bestrahlungsstärke auf die Fassade, vgl. Abbildung 13-1 im Anhang 4) möglich, die Innenraumtemperatur T_{in} (rot) den ganzen Tag im Komfortbereich beizubehalten, ohne die Notwendigkeit einer zusätzlichen Kühlung.

Strategie III

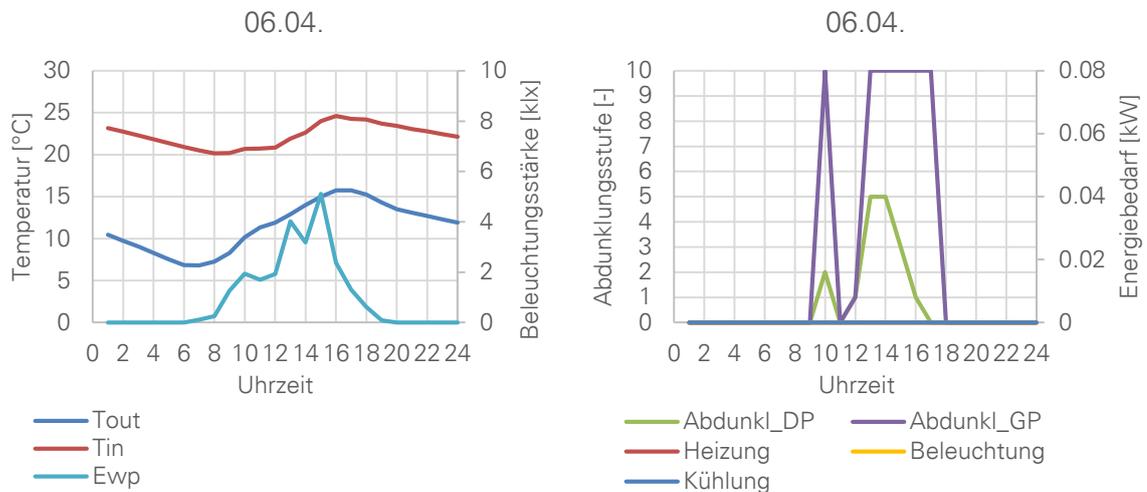
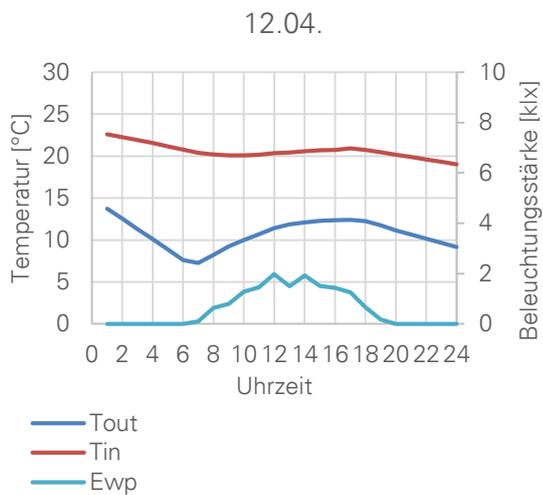


Abbildung 8-6: Tagesanalyse wechselhafter Frühlingstag, dargestellt für Strategie III. Die GP-Zone (lila) wird durch die direkte Einstrahlung auf die Fassade aktiviert und bietet einen zusätzlichen Blendschutz an der Nutzerposition.

Erkenntnis d.

Während an sonnigen und wechselhaften Tagen (Abbildung 8-1 bis Abbildung 8-6) das Tageslichtangebot ausreichend für die Gewährleistung komfortabler Innenhelligkeiten (türkisfarbig) bei einer entsprechenden Ansteuerung der Verglasung ist, kann es an bewölkten Tagen vielerorts zu gering sein, unabhängig von der gewählten Ansteuerungsstrategie. Für bewölkte Tage mit niedrigen bis moderaten Außentemperaturen, wie den in Abbildung 8-7 dargestellten bewölkten Frühlingstag, ergeben sich bei jeder Strategie sehr helle Zustände der Verglasung (erkennbar am Beispiel der Strategien III und VI). Aufgrund der niedrigen verfügbaren Außenhelligkeiten an bewölkten Tagen sind nur im fassadennahen Bereich (bis zu ca. 2 m – 3 m, s. Abbildung 8-7 (unten)) komfortable Helligkeitsniveaus erreichbar. Die abnehmende Tageslichtversorgung in tiefen Raumbereichen kann durch die Schaltung der Verglasung nicht positiv beeinflusst werden (s. auch Tageslichtversorgungsanalyse im Kapitel 8.4.1).

Strategie III



Strategie VI

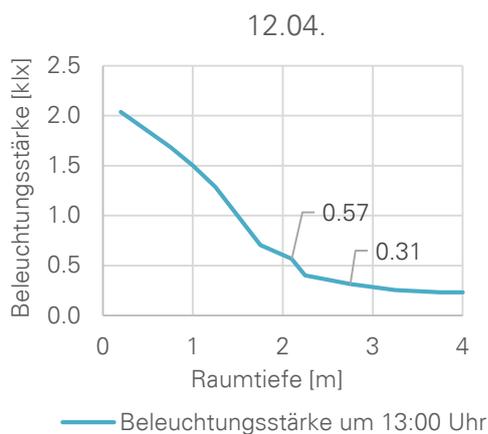
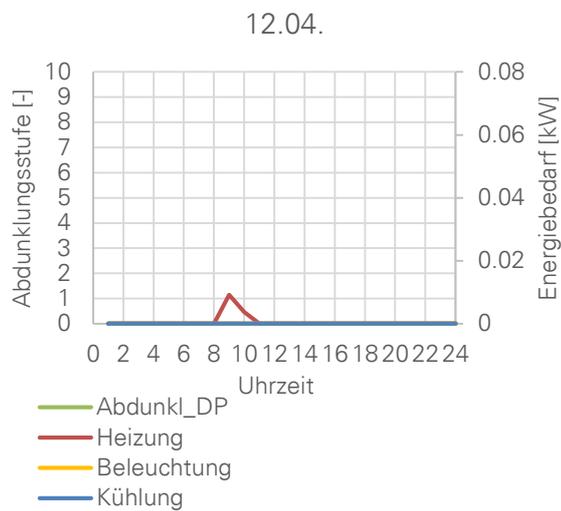
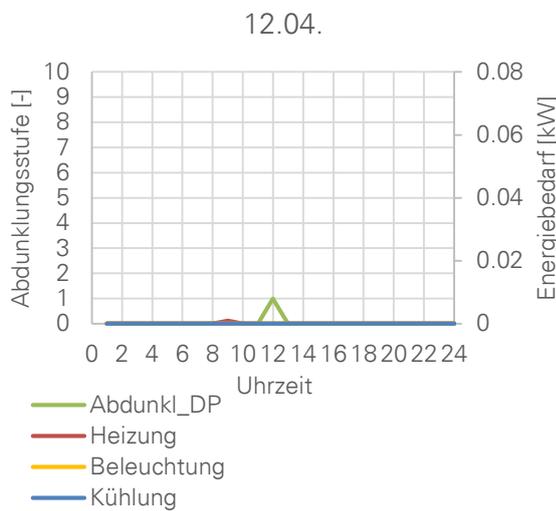
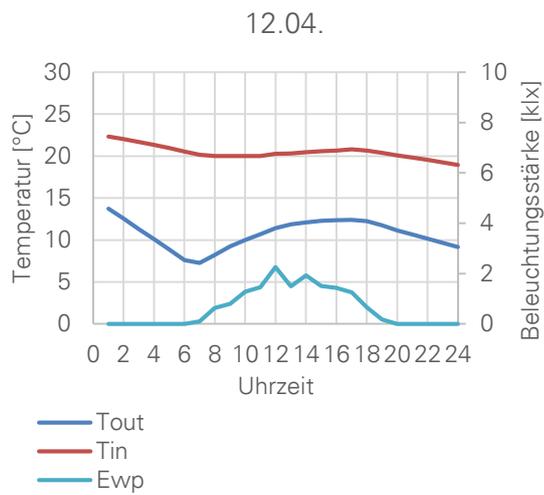


Abbildung 8-7: Tagesanalyse bewölkter Frühlingstag, dargestellt beispielhaft für Strategie III (links) und Strategie VI (rechts). Beleuchtungsstärkeverlauf um 13:00 Uhr in Abhängigkeit von der Raumtiefe (unten) identisch für beide Strategien.

8.1.2 Messtechnische Untersuchungen

Nachfolgend werden die im Kapitel 8.1.1 gewonnenen Erkenntnisse a. bis d. anhand von Messdatenanalysen für ausgewählte Tage validiert. Die TN-Verglasung im Fassadenprüfstand wurde jeweils den ganzen Tag nach der entsprechenden Strategie angesteuert.

Erkenntnis a: Der Parameter Helligkeit sollte bei der Ansteuerungsstrategie berücksichtigt werden, um eine ausreichende Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche zu gewährleisten.

Im Vergleich von zwei sonnigen Wintertagen: 24.01.2018 (Verglasung angesteuert nach Strategie III) und 06.02.2018 (Verglasung angesteuert nach Strategie IV) in Abbildung 8-8 zeigt sich die Reaktionsfähigkeit der strahlungs- und beleuchtungsstärkebasierten Strategie IV (rechts) auf das Helligkeitsniveau im Raum. Im Vergleich zur Ansteuerung nach Strategie III (links) wird die Verglasung weniger intensiv abgedunkelt, wodurch die Mindestanforderungen an die Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz erfüllt werden können.

Überwiegend sonniger Wintertag
24.01.2018, Strategie III

Überwiegend sonniger Wintertag
06.02.2018, Strategie IV

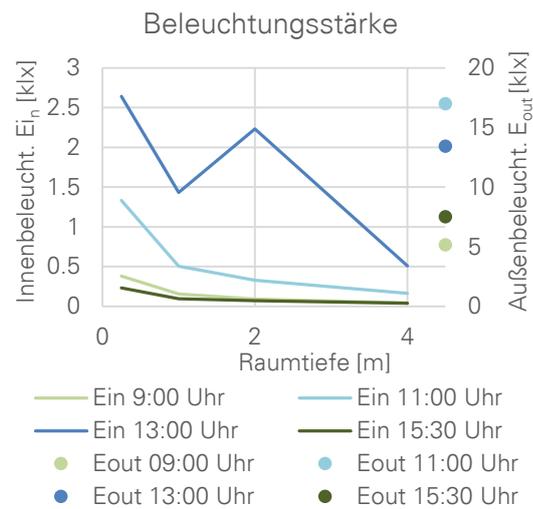
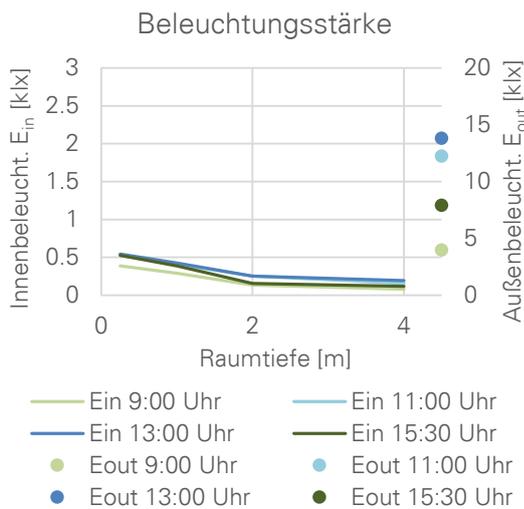
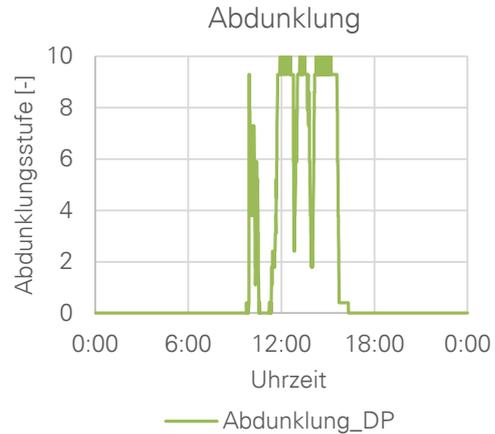
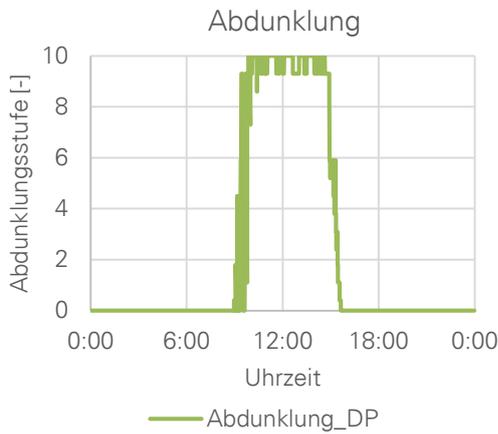
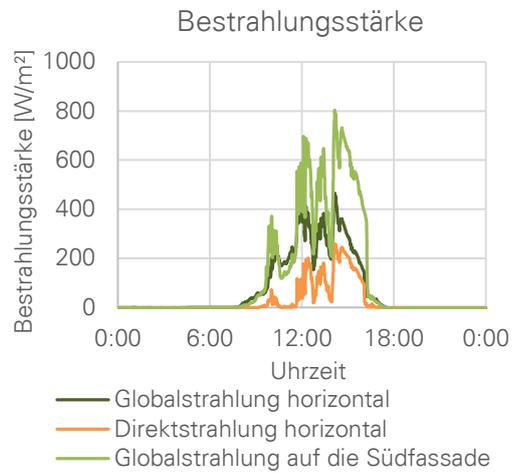
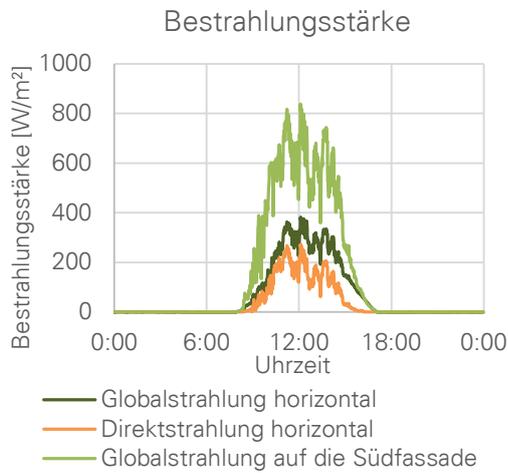


Abbildung 8-8: Messtechnische Tagesanalyse sonnige Wintertage, dargestellt für Strategie III (links) und Strategie IV (rechts)

Erkenntnis b.: Die Festlegung der Strahlungsgrenzwerte ist entscheidend für die Wirksamkeit strahlungsbasierter Ansteuerungsstrategien, wodurch sich die Notwendigkeit einer genauen Anpassung der Grenzwerte an die Projektgegebenheiten und ggf. deren jahreszeitabhängigen Variation ergibt.

Am Beispiel des bereits in Abbildung 8-8 dargestellten sonnigen Wintertags 24.01.2018 wird die gute Eignung der gewählten Strahlungsgrenzwerte gezeigt. Aus dem in Abbildung 8-9 aufgetragenen Temperaturverlauf im Testraum an diesem Tag ist ersichtlich, dass nur bis ca. 7:00 Uhr am Morgen Heizvorgänge notwendig sind. Während des ganzen Tages wird die Temperatur nur durch die Ansteuerung der Verglasung im komfortablen Bereich zwischen 20 °C und 26 °C gehalten.

Überwiegend sonniger Wintertag
24.01.18, Strategie III

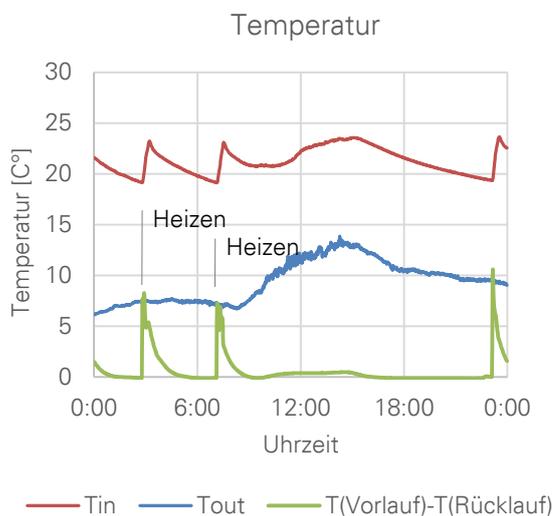


Abbildung 8-9: Messtechnische Tagesanalyse sonniger Wintertag. Temperaturverlauf beim Einsatz der Strategie III (vgl. auch Abbildung 8-8 links). In Grün wurde die Differenz zwischen der Vorlauf- und der Rücklauftemperatur der Kapillarrohrrmatten aufgetragen (erhöhte Temperaturdifferenzen bedeuten Heizvorgänge).

Erkenntnis c.: An Tagen mit moderaten Außentemperaturen kann mit den meisten Ansteuerungsstrategien der Verglasung die Innenraumtemperatur im Komfortbereich gehalten werden, ohne die Notwendigkeit einer zusätzlichen Konditionierung.

Die Erkenntnis c. wird bereits durch die Strategie III am 24.01.2018 (Abbildung 8-9) belegt. Eine thermische Analyse beim Einsatz der Strategie I an einem sonnigen Herbsttag ist in Abbildung 8-10 dargestellt. Auch mit dieser Strategie bleibt bei Außentemperaturen von bis zu 20 °C und Solarstrahlungswerten (auf die Horizontale) von bis zu 600 W/m² die Innentemperatur den ganzen Tag im Komfortbereich.

Sonniger Herbsttag 05.10.2017, Strategie I

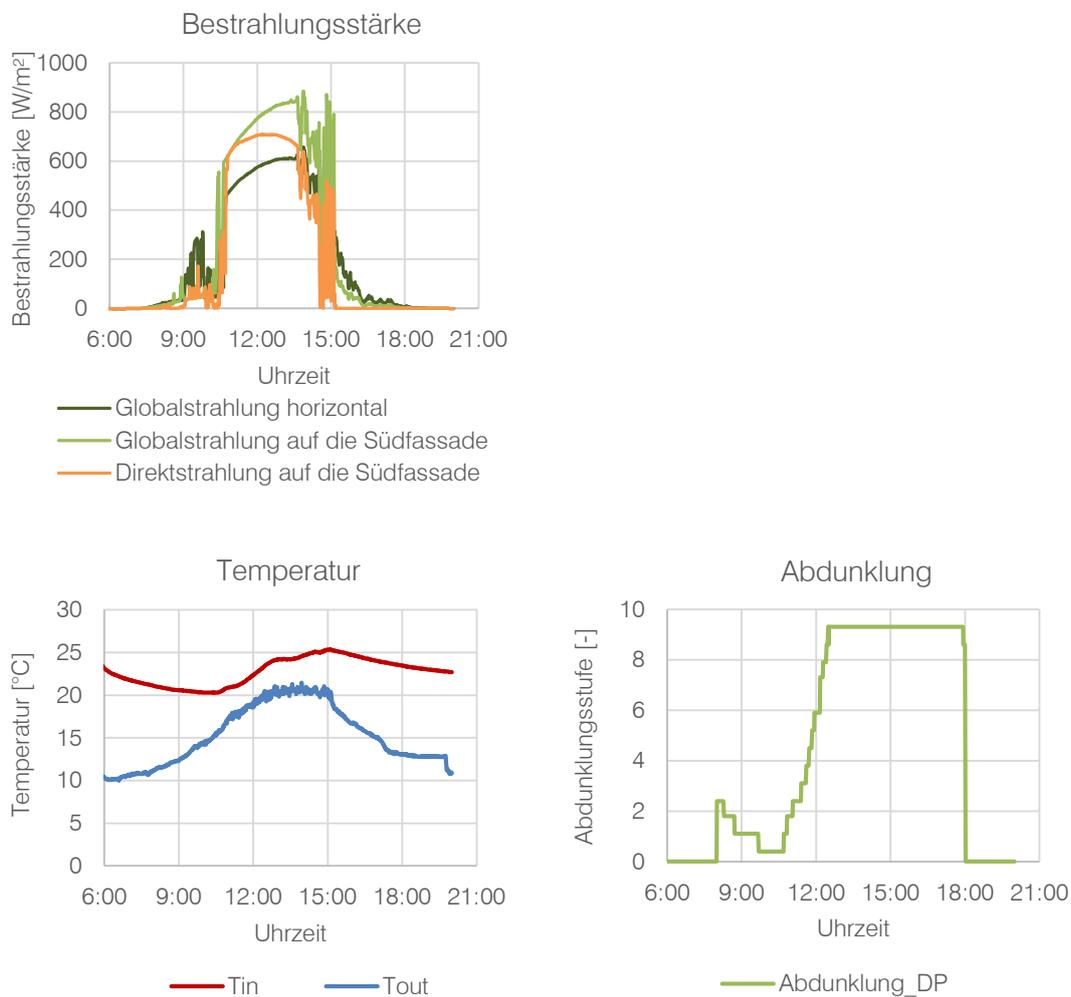
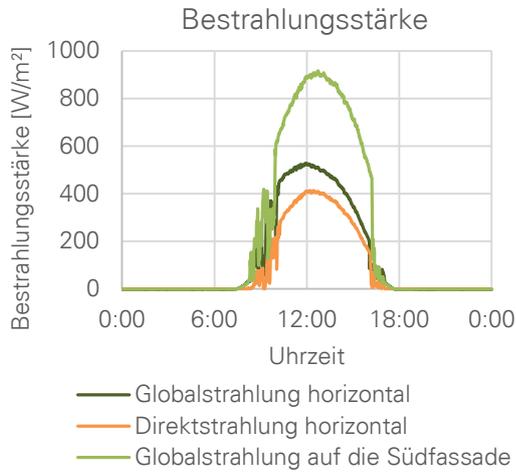


Abbildung 8-10: Messtechnische Tagesanalyse sonniger Herbsttag. Strahlungscharakteristik, Abdunklungs- und Temperaturverläufe beim Einsatz der Strategie I.

Erkenntnis d.: Während an überwiegend sonnigen Tagen das Tageslichtangebot ausreichend für die Gewährleistung komfortabler Innenhelligkeiten bei einer entsprechenden Ansteuerung der Verglasung ist, ist es an vielen bewölkten Tagen nur in fassadennahen Raumbereichen ausreichend, unabhängig von der Ansteuerungsstrategie.

Zur Visualisierung der Erkenntnis d. sind in Abbildung 8-11 zwei aufeinander folgende Wintertage mit unterschiedlichen Bewölkungsgraden dargestellt, an den die TN-Verglasung jeweils nach der Strategie IV angesteuert wurde. Am sonnigen 14.02.2018 war trotz einer intensiven Abdunklung der Verglasung eine Beleuchtungsstärke von mindestens ca. 300 lx bis zu einer Raumtiefe von ca. 2 m - 3 m während des ganzen Tages gegeben. Am bewölkten 15.02.2018 war sie nur bis zu einer Raumtiefe von ca. 1,50 m in der Mittagszeit gegeben, obwohl die Verglasung sich im Zustand maximaler Transmission befand.

Sonniger Wintertag 14.02.2018,
Strategie IV



Bewölkter Wintertag 15.02.2018,
Strategie IV

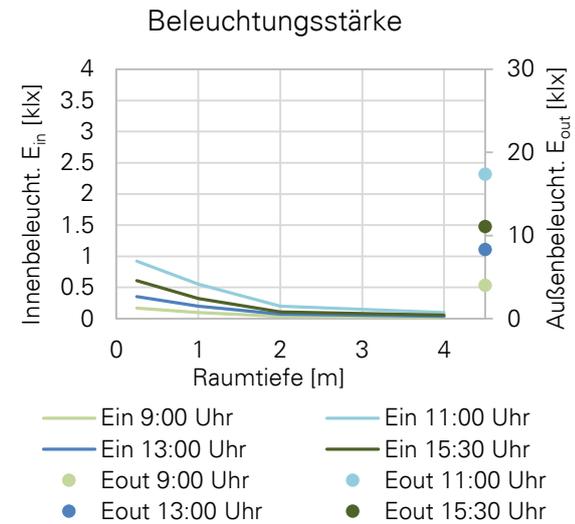
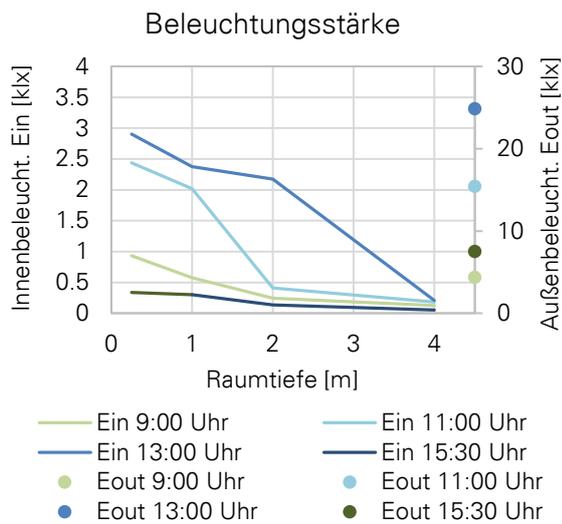
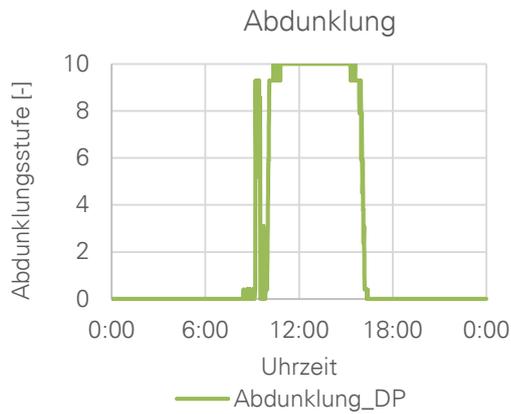


Abbildung 8-11: Messtechnische Tagesanalyse sonniger Wintertag (links) und bewölkter Wintertag (rechts). Strahlungscharakteristik, Abdunklungs- und Tageslichtbeleuchtungsstärkeverläufe beim Einsatz der Strategie IV.

8.2 Analyse der Abdunklungshäufigkeiten im Jahresverlauf

Eine detaillierte Betrachtung der Häufigkeiten des Auftretens der jeweiligen Schaltzustände gibt einen Aufschluss über die möglichen Auswirkungen der einzelnen Ansteuerungsstrategien auf die Komfortbedingungen und die Raumenergiebedarfe im Jahresverlauf und ermöglicht deren Nachvollziehbarkeit. In den folgenden Diagrammen sind die berechneten Häufigkeiten der einzelnen Abdunklungsstufen während der Büroarbeitszeiten für vier untersuchte Standorte dargestellt. Der Wert oberhalb der jeweiligen Diagrammsäulen stellt die Summe der visuellen Transmission der Abdunklungsstufen gewichtet nach ihrer Häufigkeit dar (durchschnittlicher Lichttransmissionsgrad bei den gegebenen Randbedingungen).

Bei der innentemperaturbasierten Ansteuerung (anhand der Strategie I, dargestellt in Abbildung 8-12) ist folgende Auswirkung des Standorts auf die Häufigkeit der einzelnen Abdunklungsstufen deutlich: Für die Häufigkeit der Abdunklungsstufe 0 (Zustand maximaler Transmission) ergibt sich ein ausgeprägtes Gefälle je weiter südlich der Standort liegt. Die Häufigkeiten der Abdunklungsstufe 10 (Zustand minimaler Transmission) dagegen steigen in Nord-Süd-Richtung der Standorte an, sodass in heißen Klimazonen (s. Accra) sogar ein dauerhaft abgedunkelter Zustand der Verglasung auftritt. Die Adaptivität der Verglasung wird am Standort Accra nicht ausgenutzt. Die strahlungs- und helligkeitsbasierten Strategien, dargestellt am Beispiel der Strategie IV in Abbildung 8-13 a., ermöglichen ein mehr ausgeglichenes Schaltprofil im Jahresverlauf. An allen Standorten kommen alle Schaltstufen zum Einsatz⁴⁶. Durch die bessere Ausnutzung des Schalthebs aufgrund einer Regelung/Steuerung nach zwei Parametern ist die Voraussetzung für eine bessere Tageslichtversorgung gegeben (vgl. durchschnittliche Lichttransmissionsgrade oberhalb der Diagrammsäulen), die sich aber in erhöhten Kühlenergiebedarfen spiegeln kann. Die Auswirkungen auf den Raumenergiebedarf werden in nachfolgenden Kapiteln evaluiert.

⁴⁶ Die Anpassung der Schaltschwellenwerte an das Strahlungsangebot am jeweiligen Standort kann eine noch bessere Ausnutzung der Variabilität der Verglasungstransmission ermöglichen. Am Beispiel des Standorts Valencia, wo mit der Strategie IV mit den gegebenen Strahlungsgrenzwerten von $I_{\min} = 150 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$ hauptsächlich sehr helle Verglasungszustände angesteuert werden (Abbildung 8-13 a.), wird die Empfindlichkeit von gewählten Schwellenwerten visualisiert. Mit einer größeren Bandbreite „wirksamer“ Bestrahlungsstärken zwischen $I_{\min} = 50 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$ kann an diesem Standort das Schaltpotential der TN-Verglasung besser ausgenutzt werden (Abbildung 8-13 b.).

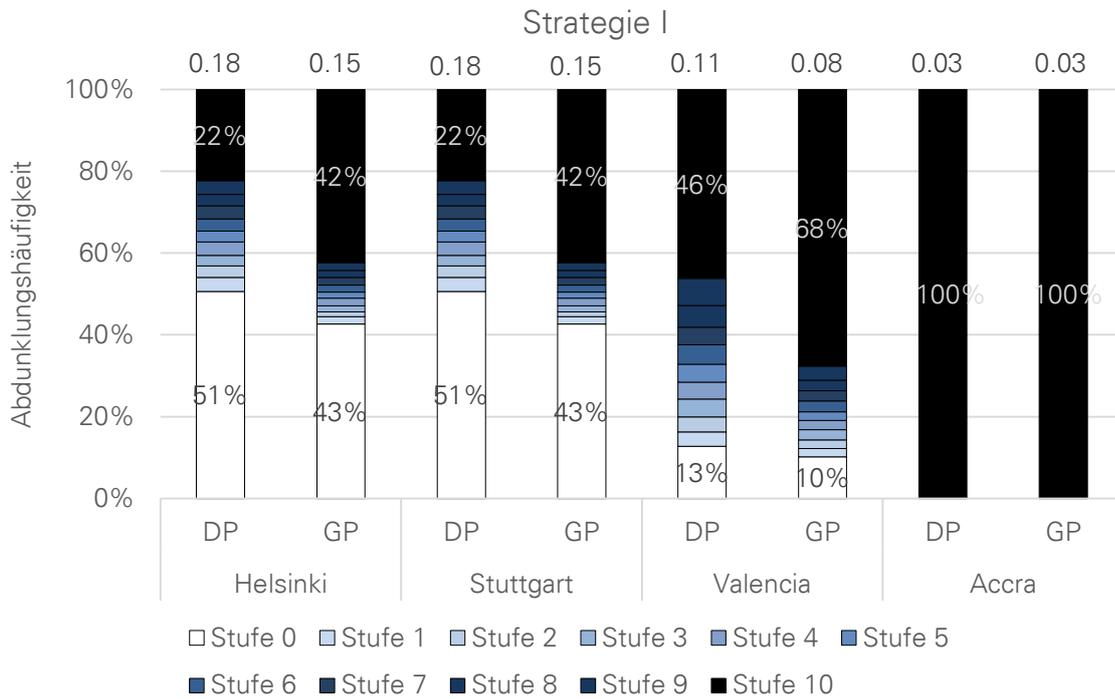


Abbildung 8-12: Abdunklungshäufigkeiten des Tageslichtversorgungs- (DP) und des Blendschutzbereichs (GP) der Verglasung während der Büroarbeitszeiten im Jahr, Strategie I

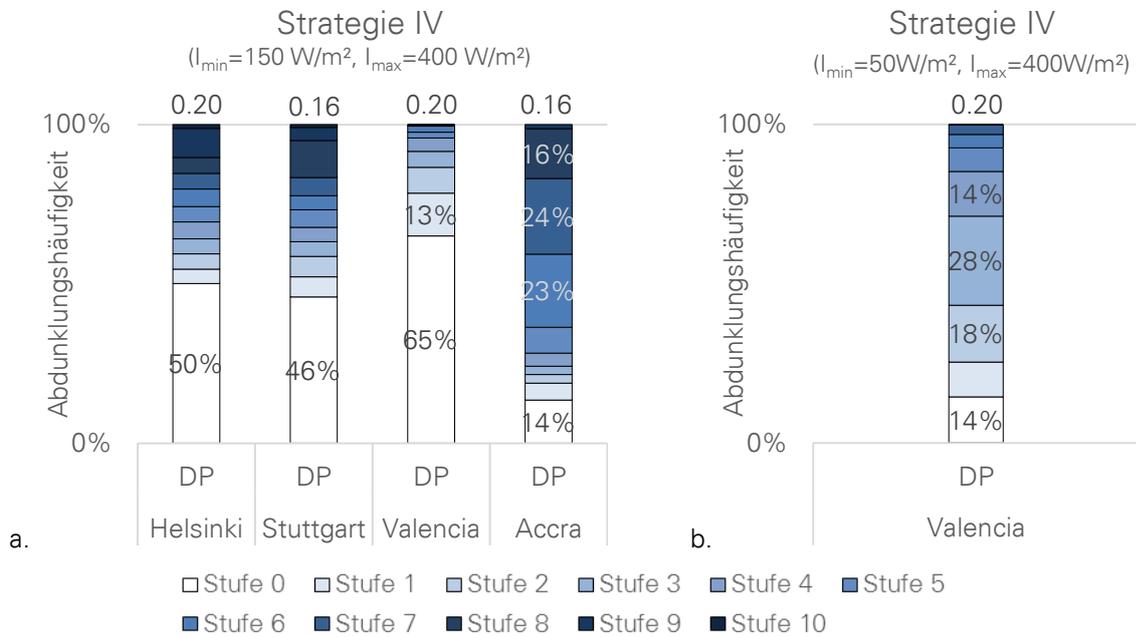


Abbildung 8-13: Links (a.): Abdunklungshäufigkeiten des Tageslichtversorgungsbereichs (DP) während der Büroarbeitszeiten im Jahr, Strategie IV (I_{min} = 150 W/m², I_{max} = 400 W/m²). Rechts (b.): Visualisierung der starken Abhängigkeit der Abdunklungshäufigkeiten von Strahlungsgrenzwerten am Beispiel von Valencia, Abdunklungshäufigkeiten bei veränderten Strahlungsgrenzwerten (I_{min} = 50 W/m², I_{max} = 400 W/m²).

8.3 Thermischer Komfort im Jahresverlauf

Werden solche Komfortparameter analysiert wie Temperaturänderungen oder Strahlungsasymmetrien, so resultiert der Einsatz von Regelungsstrategien im Jahresverlauf größtenteils in Werten der entsprechenden Parameter, die zwischen den bei Extremschaltzuständen der TN-Verglasung auftretenden Werten liegen (vgl. Kapitel 0). Dennoch kann durch eine frühzeitige Reaktion auf Wetterveränderungen unter Umständen eine geringfügige Verbesserung des thermischen Komforts erzielt werden. Diese drückt sich in der Erhöhung der Gesamtzahl der Jahresstunden mit sehr guten PMV-Werten im Vergleich sowohl zu Referenzverglasungen als auch zu beiden Extremzuständen der TN-Verglasung aus. Beispielsweise für die Strategie IV beträgt diese Komfortverbesserung ca. 1 % - 2 % im Vergleich mit durchgehend maximal abgedunkelter TN-Verglasung und ca. 2 % - 5 % im Vergleich mit maximal aufgehellter TN-Verglasung, in Abhängigkeit des angenommenen Kühlsollwerts⁴⁷. Im Vergleich zu Dreifachreferenzverglasungen D und E beträgt die PMV-Verbesserung ca. 7 % - 22 %. In Tabelle 8-1 ist dieser Vergleich beispielhaft für den Kühlsollwert von 26 °C aufgetragen.

	Anzahl der Jahresarbeitsstunden mit $-0,5 \leq \text{PMV} \leq 0,5$	Erhöhung der Anzahl „behaglicher“ Jahresarbeitsstunden durch Vergl. A, Strategie IV
Verglasung D	727	16 %
Verglasung E	694	22 %
A (Max. Transmission)	807	5 %
A (Min. Transmission)	826	2 %
A (Strategie IV)	843	-

Tabelle 8-1: Links: Gesamtzahl der Jahresstunden mit sehr guten PMV-Werten, berechnet für Arbeitszeiten, für Referenzverglasungen D und E und drei Ansteuerungsvarianten der TN-Verglasung. Heizung aktiv bei $T_{\text{in}} \leq 20 \text{ °C}$, Kühlung aktiv bei $T_{\text{in}} \geq 26 \text{ °C}$, Jalousie E angesteuert nach Solarstrahlung ($I_{\text{min}}=150 \text{ W/m}^2$, $I_{\text{max}}=400 \text{ W/m}^2$), perfekt schließend. Rechts: prozentuelle Erhöhung dieser Stundenanzahl durch den Einsatz der nach der Strategie IV angesteuerten TN-Verglasung.

⁴⁷ Wie im Kapitel 0 erläutert, kann der größte Einfluss auf den PMV (und somit auch PPD) nicht durch die Regelung der Verglasung, sondern durch die Veränderung der Heiz- und Kühlsollwerte oder der intermediären Bedingungen (z.B. des Bekleidungsgrads) erzielt werden.

8.4 Visueller Komfort im Jahresverlauf

8.4.1 Tageslichtversorgung

Die Analyse der Tageslichtversorgung wird anhand der Parameter Tageslichtautonomie (DA) und nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke (UDI), wie bereits für die extremen Schaltzustände der TN-Verglasung im Kapitel 6.2.2, vorgenommen. Die Anwendung der vorgestellten Regelungsstrategien resultiert in DA-Werten zwischen denen der beiden Extremzustände. Beispielhaft wurden die DA-Verläufe für die Strategien I, II, IV und VII in Abbildung 8-14 aufgetragen. Unabhängig von der gewählten Regelungsstrategie wird der DA-Wert von mindestens 30 % bis zu einer Raumtiefe von ca. 2,2 m – 3 m (je nach Interpretation der komfortablen Helligkeitswerte, vgl. Kapitel 2.4.2) eingehalten. Die Regelungs- und Steuerungsstrategien mit Berücksichtigung der Beleuchtungsstärke (A II, A IV, A VII) weisen dabei wesentlich höhere Tageslichtautonomien auf als die Strategien, die diesen Parameter nicht berücksichtigen (A I).

Mit dem Parameter Tageslichtautonomie ist nur eine Aussage über die Einhaltung minimaler erforderlicher Beleuchtungsstärken möglich. Die Häufigkeit ggf. zu hoher Beleuchtungsstärken im Raum fließt in den Parameter nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke (UDI) ein. Die nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke ist in Abbildung 8-15 für die Verglasungen A, D und E in Stuttgart aufgetragen. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass die hohen Tageslichtautonomiewerte der Referenzverglasungen in fassadennahen Raumbe-reichen sich nicht immer gleichbedeutend mit einem hohen visuellen Komfort erweisen. An bis zu 75 % der Nutzungsstunden übersteigen dort die Beleuchtungsstärken den Wert von 2500 lx. Die TN-Verglasung ermöglicht bessere „nutzbare“ Raumausleuchtung als bei beiden Referenzverglasungen bis zu Raumtiefen von ca. 2 m – 3,5 m (je nach Interpretation der komfortablen Helligkeitswerte, vgl. Kapitel 2.4.2). Im Arbeitsbereich zeigt die Strategie A IV dabei die beste Wirkung. In Tabelle 8-2 ist die Anzahl der Jahresarbeitsstunden, an den die Tageslichtbeleuchtungsstärke in der Raumtiefe von 1 m (auf der Höhe von 0,75 m) im besonders komfortablen Bereich von 500 lx – 2500 lx liegt, aufgetragen, jeweils für die Referenzverglasungen D und E sowie die TN-Verglasung. Aus dem Vergleich ergibt sich eine deutliche Verbesserung der Arbeitsplatzausleuchtung durch die entsprechende Ansteuerung der TN-Verglasung. Die Anzahl der Stunden mit optimaler Tageslichtbeleuchtung wird durch den Einsatz der nach Strategie IV angesteuerten TN-Verglasung gegenüber der Referenzverglasungen um über 200 % erhöht.

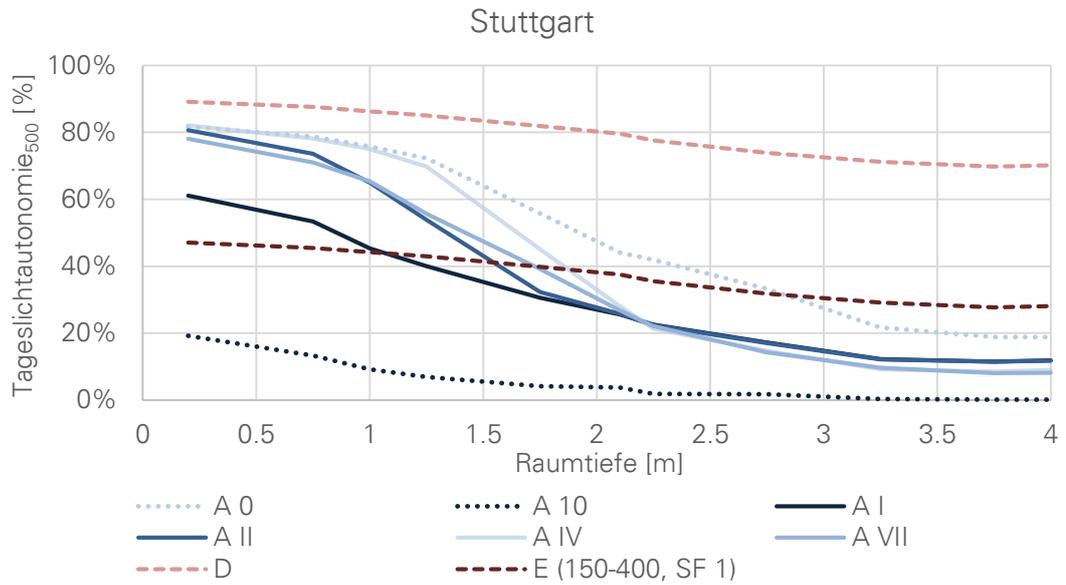


Abbildung 8-14: Helligkeitsanalyse: Tageslichtautonomie (Grenzwert der Beleuchtungsstärke $E_{\min} = 500 \text{ lx}$). Vergleich der TN-Ver­glasung A mit Referenzverglasungen D und E (Jalousie perfekt schließend (SF 1)).

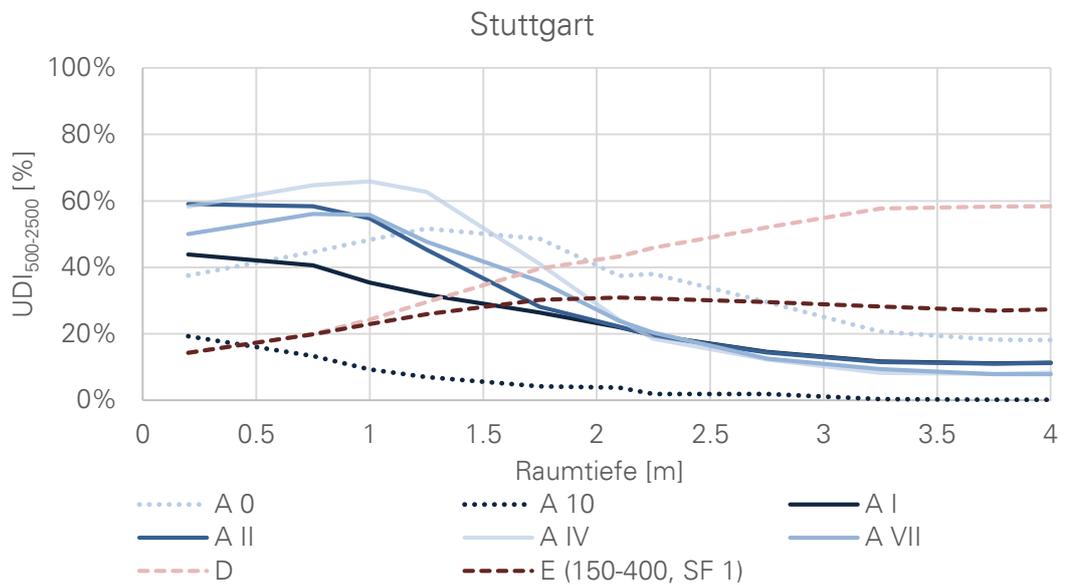


Abbildung 8-15: Helligkeitsanalyse: UDI (Grenzwerte der Beleuchtungsstärke $E_{\min} = 500 \text{ lx}$, $E_{\max} = 2500 \text{ lx}$). Vergleich der TN-Ver­glasung A mit Referenzverglasungen D und E (Jalousie perfekt schließend (SF 1)).

	Anzahl der Jahresarbeitsstunden mit $500 \text{ lx} \leq E_{\text{wp_Tageslicht}} \leq 2500 \text{ lx}$	Erhöhung der Anzahl der Jahresarbeitsstunden mit optimaler Arbeitsplatzausleuchtung durch Strategie IV
Verglasung D	559	223 %
Verglasung E	558	224 %
A (Max. Transmission)	1230	47 %
A (Min. Transmission)	303	496 %
A (Strategie IV)	1806	-

Tabelle 8-2: Gesamtzahl der Jahresstunden mit sehr guter Ausleuchtung der Arbeitsfläche ausschließlich durch das Tageslicht, berechnet für Arbeitszeiten, für Referenzverglasungen D und E und drei Ansteuerungsvarianten der TN-Verglasung. Heizung aktiv bei $T_{\text{in}} \leq 20 \text{ °C}$, Kühlung aktiv bei $T_{\text{in}} \geq 26 \text{ °C}$, Jalousie E angesteuert nach Solarstrahlung ($I_{\text{min}}=150 \text{ W/m}^2$, $I_{\text{max}}=400 \text{ W/m}^2$), perfekt schließend.

8.4.2 Blendung

Die Blendungswahrscheinlichkeiten im Jahresverlauf, während der Nutzeranwesenheitszeiten werden mithilfe des Parameters Daylight Glare Probability, DGP (s. Kapitel 2.3.2.3) im Programm Daysim berechnet. Übersteigt der DGP-Wert 0,4, so ist mit störender Blendung zu rechnen. In Abbildung 8-16 ist ein Vergleich der simulierten Blendungshäufigkeiten an den vier untersuchten Standorten Stuttgart, Helsinki, Valencia und Accra, beim Einsatz der TN-Verglasung (beispielhaft für vier Ansteuerungsstrategien dargestellt) und der Dreifach-Referenzverglasung D gegeben. In Accra ist aufgrund der hohen Sonnenposition während des ganzen Jahres mit der relativ dunklen TN-Verglasung mit einem sehr niedrigen Risiko der Blendung zu rechnen. Dieses kann fast vollständig (bis vollständig) unterbunden werden. An anderen Standorten ist mit der TN-Verglasung im Vergleich zur Referenzverglasung D eine Reduktion der Blendungshäufigkeit um ca. 75 % bis 85 % erzielbar.

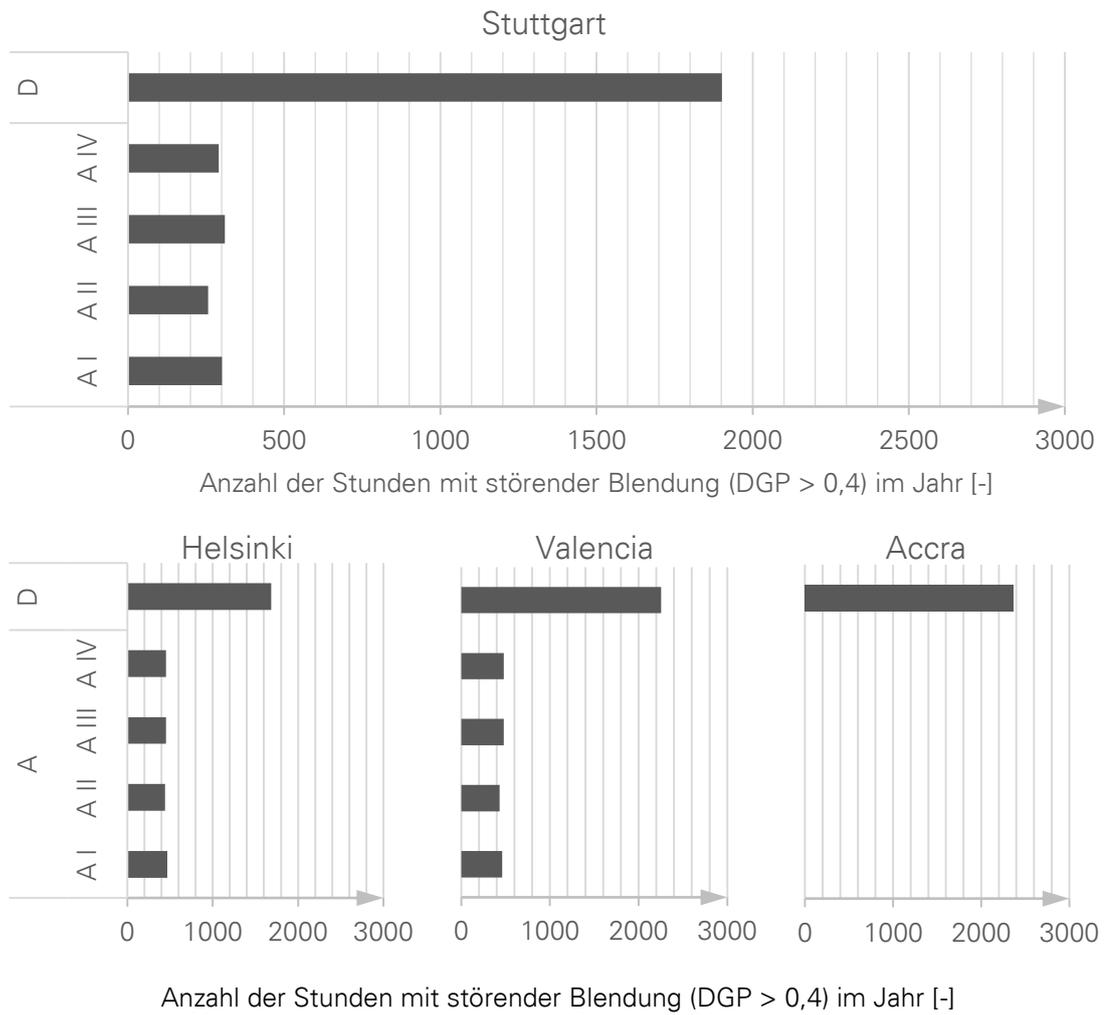


Abbildung 8-16: Anzahl der Jahresbetriebsstunden mit hohen Blendungswahrscheinlichkeiten berechnet für Stuttgart, Helsinki, Valencia und Accra

8.5 Energetische Jahresanalysen der Regelungsstrategien am Beispiel des Standorts Stuttgart

Die Berechnungen der Jahresendenergiebedarfe für Heizung, Kühlung und künstliche Beleuchtung wurden gemäß der im Kapitel 5 vorgestellten Simulationsstrategie, für den Modellraum (s. Kapitel 4) durchgeführt. Die TN-Verglasung (A) wurde dabei nach den entwickelten Strategien angesteuert. Zum Vergleich wurden konventionelle Zweifach- und Dreifachverglasungen, mit und ohne außenliegende Sonnenschutzvorrichtung (B – E), herangezogen. Da die quantitative Analyse der Jahresenergiebedarfe die Abhängigkeiten nicht nur von der Verglasungsschaltung sondern auch von vielen zusätzlichen Simulationsparametern (wie z.B. Einstellungen des Konditionierungssystems) besonders stark widerspiegelt, werden zunächst am Beispiel des Standorts Stuttgart wesentliche Abhängigkeiten detailliert aufgeschlüsselt (Kapitel 8.5.1). Anschließend findet für diesen Standort ein Vergleich aller untersuchten Strategien für ausgewählte Simulationsparameter statt (Kapitel 8.5.2). Ein Vergleich der Jahresenergiebedarfe beim Einsatz der TN-Verglasung und der Referenzverglasungen für weitere Standorte (Helsinki, Valencia und Accra) findet sich im Kapitel 8.6.

8.5.1 Variantenstudie der Simulationsparameter

8.5.1.1 Anlagenwirkungsgrade

Wie im Kapitel 6.4 erläutert, hängt der tatsächliche Energiebedarf der Konditionierungsanlage maßgeblich von ihrer Heiz- / Leistungszahl ab. Nachfolgend werden die Auswirkungen der angenommenen Heiz- / Leistungszahlen auf die energetischen Charakteristika des simulierten Nutzungsszenarios für Stuttgart aufgezeigt, ermittelt für die im Kapitel 6.4 aufgeführten Grenzwerte moderner Wärmepumpen (sowohl für unter einheitlichen Prüfbedingungen ermittelte COP und EER, als auch für durchschnittliche Jahresarbeitszahlen JAZ und EREER). Im Fall des Heizenergiebedarfs kann beim gleichen Bedarf an Wärme, die in den Kreislauf zugeführt werden muss, der Bedarf an elektrischer Energie zum Betrieb einer Wärmepumpe je nach angenommener Heizzahl um bis zu 90 % variieren (s. Abbildung 8-17, Vergleich JAZ = 2,5 zu COP = 4,76). Im Fall des Kühlenergiebedarfs können die Abweichungen bis zu 40 % betragen (Abbildung 8-17, Vergleich EREER = 6,1 zu EER = 3,66). Dies muss bei der Interpretation der Simulationsergebnisse berücksichtigt werden.

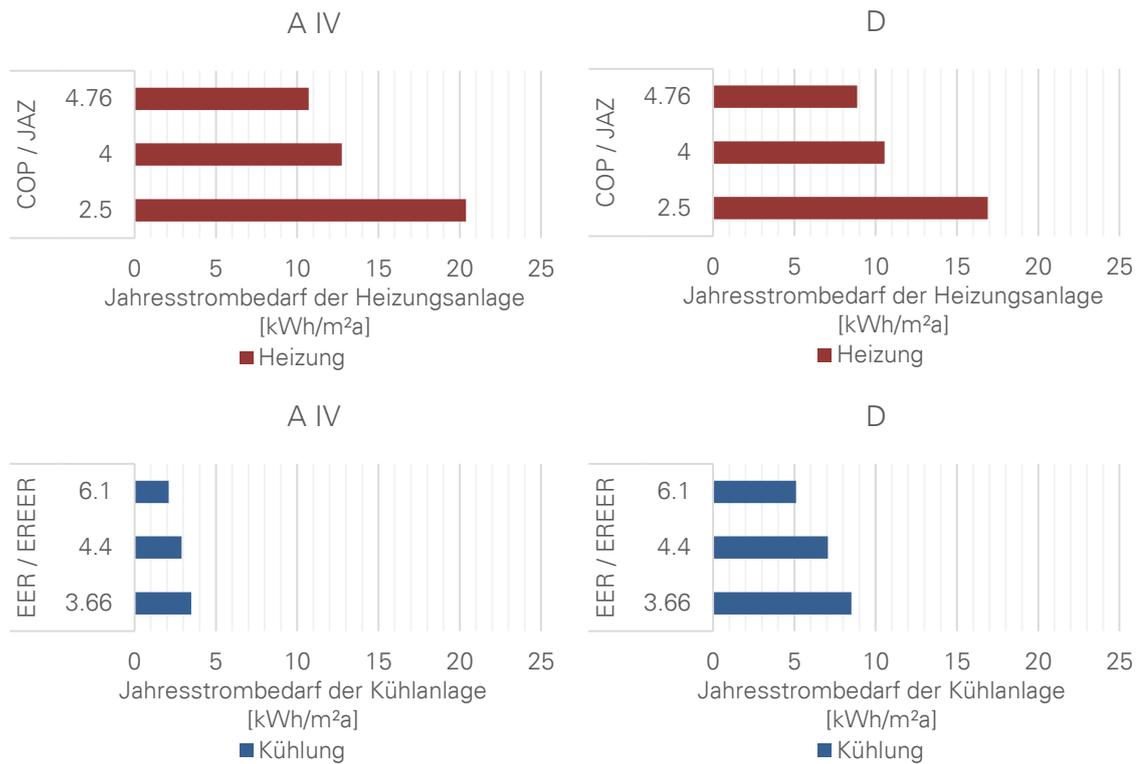


Abbildung 8-17: Vergleich der Strombedarfe der Kühl- und Heizungsanlagen in Abhängigkeit von der jeweiligen Leistungszahl, dargestellt beispielhaft für den Modellraum mit einer nach der Strategie IV angesteuerten TN-Verglasung (A IV) und die Referenzverglasung D, jeweils für den Kühlsollwert von 26 °C, Stuttgart

Weitere Analysen werden nach Angaben des Herstellers der im Testgebäude eingesetzten reversiblen Wärmepumpe [148], COP = 4,76, EER = 3,66 fortgeführt.

Für die künstliche Beleuchtung wird keine Variantenstudie durchgeführt (vgl. Kapitel 6.4). Die Aufwandszahl einer LED-Beleuchtung von 2,5 (Wirkungsgrad von 40 %) wird als repräsentativ angenommen.

8.5.1.2 Jalousieneinstellung

Die außenliegenden Jalousien der Referenzverglasungen C und E wurden nach dem Parameter Bestrahlungsstärke angesteuert. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, entsprachen die Schwellenwerte für die Jalousiesteuerung möglichst⁴⁸ den für die Ansteuerungsstrategie III der TN-Verdglasung verwendeten Werten. Es wurden nur zwei Jalousiestellungen simuliert: Jalousie wird komplett geschlossen, sobald die solare Einstrahlung auf die Fassade 400 W/m² übersteigt und wieder komplett hochgefahren, sobald der Strahlungswert unter 150 W/m² fällt. Somit wurde in die Ansteuerung eine Hysterese (vgl. Kapitel 7.1.2) eingebracht, um häufige Jalousiebewegungen bei kleinen Strahlungsschwankungen zu vermeiden. Die Auswirkung der Strahlungsschwellenwerte auf den Raumenergiebedarf ist beispielhaft für Kombinationen: ($I_{\min} = 50 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 150 \text{ W/m}^2$), ($I_{\min} = I_{\max} = 150 \text{ W/m}^2$), ($I_{\min} = 150 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 200 \text{ W/m}^2$), ($I_{\min} = 150 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$) in Abbildung 8-18 aufgezeigt.

Bei einem perfekt schließenden System wird angenommen, dass der Licht- und Strahlungsdurchgang bei geschlossenen Jalousien komplett unterbunden wird (Shading Factor / SF = 1). Ein nicht perfekt schließendes System würde zur Erhöhung des Raumkühlenergiebedarfs und zur Reduktion des Heiz- und des Beleuchtungsenergiebedarfs im Vergleich zum idealen System führen. Bei der Annahme, dass im geschlossenen Zustand 25 % der Strahlung die Jalousieebene passiert (Shading Factor / SF = 0,75⁴⁹) wird vor allem der Beleuchtungsenergiebedarf wesentlich niedriger (um ca. 80 %) als beim idealen System. Bei der Dreifachverglasung mit einer externen Verschattung (E), die eine sommerliche Überhitzung besonders gut verhindert, kann durch den idealen Schließvorgang der Kühlenergiebedarf unter Umständen vollständig unterbunden werden. In der Heizsaison werden jedoch dadurch wesentlich geringere solare Wärmegevinne zugelassen (der Heizenergiebedarf ist beim SF = 0,75 um bis zu 28 % niedriger). Ein beispielhafter Vergleich unterschiedlicher Verschattungsgrade des externen Sonnenschutzes ist in Abbildung 8-19 gegeben.

⁴⁸ Das interne Berechnungsmodell des Programms TRNSYS richtet sich im Falle einer Verschattungsregelung nicht nach den Diffus-, sondern Globalstrahlungswerten.

⁴⁹ Transmission der Diffusstrahlung von 25 % entspricht annähernd einer 45°-Neigung der Jalousien [126].

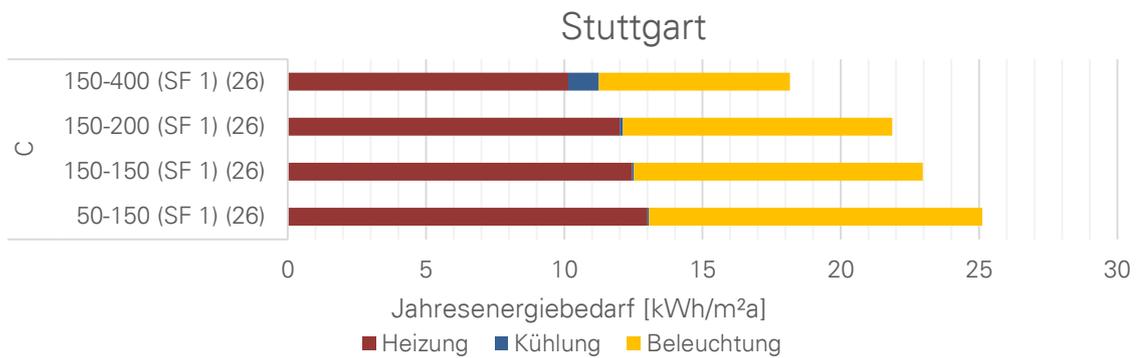


Abbildung 8-18: Vergleich der Raumenergiebedarfe für unterschiedliche Strahlungsgrenzwerte der Jalousiensteuerung ($I_{\min} - I_{\max}$) = (50 - 150), (150 - 150), ... in W/m² am Beispiel der Verglasung C in Stuttgart, Jalousien perfekt schließend (SF 1)

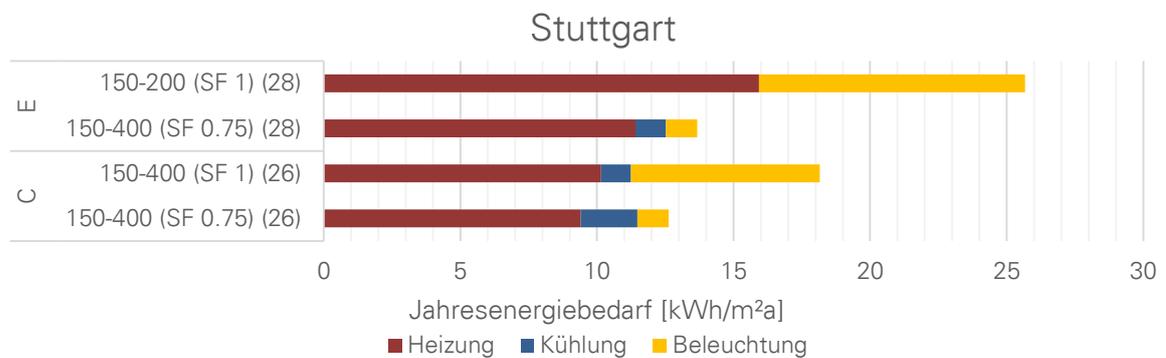


Abbildung 8-19: Vergleich der Raumenergiebedarfe bei unterschiedlichen Verschattungsfaktoren der Jalousie SF (Shading Factor, zwischen 0 und 1) am Beispiel der Verglasungen C und E in Stuttgart

Für weitere Analysen werden Strahlungsschwellenwerte: $I_{\min} = 150 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$ sowie ein Verschattungsfaktor $SF = 1$ verwendet. Ggf. abweichende Annahmen werden in Klammern vermerkt.

8.5.1.3 Kühlsollwert

Zu Zeiten der Nutzerabwesenheit wurde mithilfe des Heizungssystems eine Mindesttemperatur von 18 °C gehalten, das Kühlsystem war inaktiv. Während der Nutzeranwesenheit betrug der Heizsollwert 20 °C. Für den Kühlsollwert wurden zwei Varianten betrachtet: 26 °C und, in Anlehnung an adaptive Komfortmodelle, 28 °C. Wird die TN-Verglasung ab 26 °C in den Zustand minimaler Transmission versetzt (Strategie I, II) und das Kühlsystem erst ab 28 °C eingeschaltet, so kann der Einfluss der Schaltprozesse der Verglasung auf die Raumtemperatur besser beobachtet werden als wenn das Kühlsystem bereits bei niedrigeren Temperaturen eingreift. Im nachfolgenden Diagramm (Abbildung 8-20) wird ein Vergleich der Energiebedarfe bei beiden Kühlsollwerten eingetragen. Im Vergleich zum Jahresenergiebedarf mit Kühlsollwert 26 °C wird durch die Erhöhung des Sollwerts auf 28 °C hauptsächlich eine Kühleregieeinsparung erzeugt, die für Stuttgart ca. 35 % für die TN-Verglasung (berechnet anhand der Strategien I, II, IV) und ca. 15 % - 20 % für Referenzverglasungen beträgt. Die resultierende Gesamtenergieeinsparung beträgt für Stuttgart ca. 5 % - 10 %, sowohl beim Einsatz der TN-Verglasung als auch bei Referenzverglasungen.

Weitere Analysen werden mit beiden Kühlsollwertvarianten (angegeben in Klammern) durchgeführt.

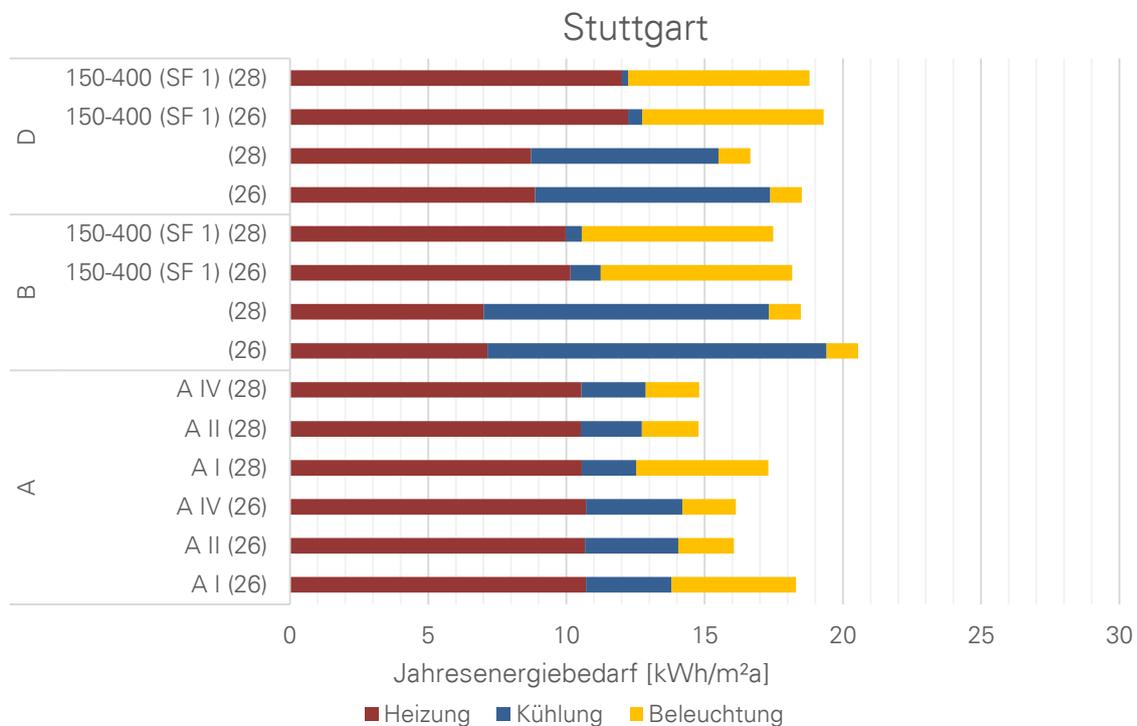


Abbildung 8-20: Vergleich der Raumenergiebedarfe bei Kühlsollwerten (26) °C und (28) °C in Stuttgart

8.5.1.4 Interne Wärmegewinne

Im analysierten Testraum kommen im Testbetrieb vernachlässigbare interne Wärmegewinne zum Tragen. Sie beschränken sich im Wesentlichen auf die Wärmegewinne durch die künstliche Beleuchtung in der Größe von ca. 6 W/m² [151–153]. Wird der Raum als Büro genutzt, so kommen Wärmegewinne von Personen (75 W: eine Person im Raum, mit sitzender Tätigkeit, nach DIN EN 13779) und elektrischen Bürogeräten (7 W/m² nach SIA-Merkblatt 2024) hinzu, die sich auf die energetische Bilanzierung auswirken. Eine Reduktion des Heizenergiebedarfs (um ca. 25 % - 30 % in Stuttgart) tritt auf Kosten eines erhöhten Kühlenergiebedarfs auf (um ca. 30 % bei der Referenzverglasung B ohne Sonnenschutz, ca. 70 % - 90 % bei der TN-Verglasung)⁵⁰. Bei Verglasungen mit Sonnenschutz (konventionell außenliegend oder in Form von TN-Modulen) wird der Gesamtenergiebedarf des Raums durch die Berücksichtigung interner Wärmegewinne leicht (um ca. 10 %) reduziert. In Abbildung 8-21 sind diese Auswirkungen am Beispiel der Verglasungen A, B und C in Stuttgart visualisiert. Die Energiebedarfsprofile ohne zusätzliche Wärmegewinne können für die vorgesehenen Vergleiche als repräsentativ betrachtet werden.

Weitere Analysen werden für das Nutzungsszenario Fassadenprüfstand, ohne zusätzliche Wärmegewinne durchgeführt.

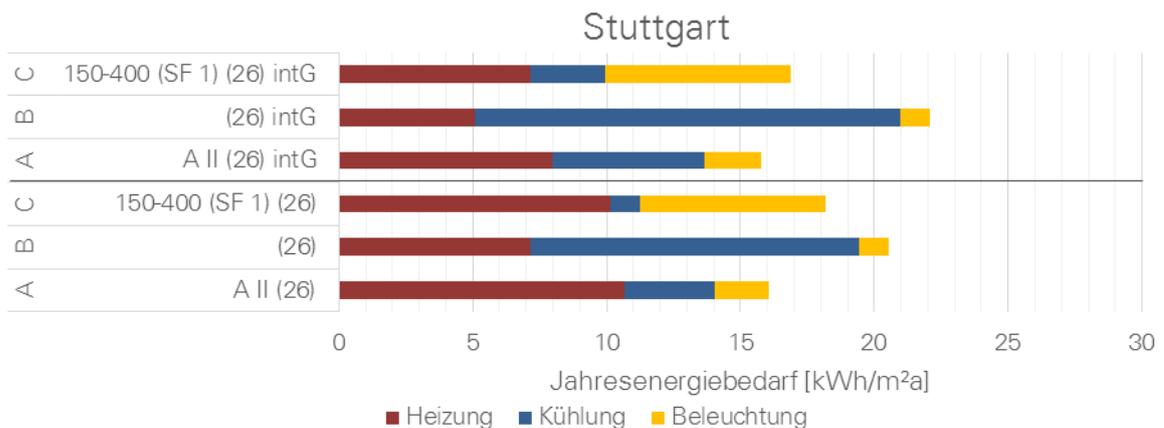


Abbildung 8-21: Vergleich der Raumenergiebedarfe ohne (unten) und mit (oben) internen Wärmegewinnen (intG), dargestellt für die Fassadensysteme: A (angesteuert nach der Strategie II), B, C

⁵⁰ Die erhöhten Kühllasten können unter realen Bedingungen beispielsweise durch eine nächtliche Lüftung reduziert werden.

8.5.2 Energetischer Vergleich der Ansteuerungsstrategien

Ein Vergleich der Raumenergiebedarfe beim Einsatz der jeweiligen Ansteuerungsstrategien sowie der TN-Verglasung in einem maximal transparenten Zustand (Abdunklungsstufe 0) und in einem maximal abgedunkelten Zustand (Abdunklungsstufe 10) ist in Abbildung 8-22 gegeben. Wie es bereits aus den Tagesanalysen ersichtlich war, zeigen alle Regelungsstrategien eine ähnliche energetische Effektivität. Vorausgesetzt, dass nur Ergebnisse mit gleichen Heiz- und Kühlsollwerten (in Klammern) betrachtet werden, ist die Streuung der Energiebedarfe infolge der jeweiligen Strategien gering, mit einer relativen Standardabweichung von 2 % für den Gesamtenergiebedarf sowie 1 % für den Heizenergiebedarf und 5 % für den Kühlenergiebedarf. Lediglich der Beleuchtungsenergiebedarf variiert deutlich mit einer relativen Standardabweichung von 45 %. Dieser ist besonders hoch bei Strategien ohne Berücksichtigung der Beleuchtungsstärke. Der Bedarf an künstlicher Beleuchtung ist ein guter Indikator für die Tageslichtversorgung des Raums.

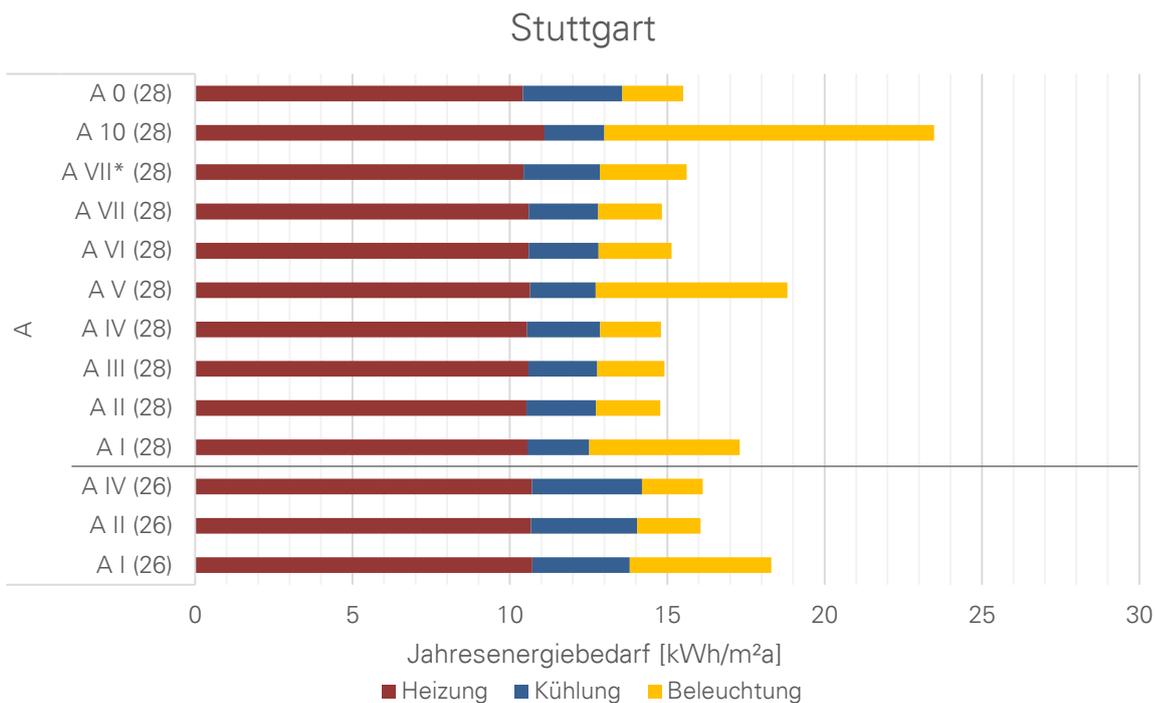


Abbildung 8-22: Energiebedarfsanalyse für den Fassadenprüfstand in Stuttgart. Ansteuerung der TN-Verglasung nach den Strategien I bis VII*, verglichen mit den Zuständen maximaler Transparenz (A 0) und maximaler Abdunklung (A 10). Für Strategien I, II, IV wurden zum Vergleich die Ergebnisse mit zwei unterschiedliche Kühlsollwert-Einstellungen aufgetragen (unten: 26 °C, oben: 28 °C).

Werden zwei statische Verglasungen: eine dauerhaft maximal aufgehellte Verglasung (A 0 in Abbildung 8-22) und eine dauerhaft vollständig abgedunkelte Verglasung (A 10 in Abbildung 8-22) zum Vergleich verwendet, so können die Abweichungen von den minimalen erreichbaren Jahresenergiebedarfen jeweils für Heizung, Kühlung und Beleuchtung beim Einsatz der jeweiligen Regelungsstrategien ermittelt werden. Die niedrigsten Heiz- und Beleuchtungsenergiebedarfe und der höchste Kühlenergiebedarf stellen sich bei der hellen TN-Verglasung A 0 ein, wohingegen der niedrigste Kühlenergiebedarf und die höchsten Heiz- und Beleuchtungsenergiebedarfe bei der maximal dunklen TN-Verglasung A 10 auftreten. Die aus den entwickelten Regelungskonzepten resultierenden Kühl-, Heiz- bzw. Beleuchtungsenergiebedarfe liegen jeweils zwischen diesen Extremwerten, wobei zwischen dem Kühlenergiebedarf und den Heiz- und Beleuchtungsenergiebedarfen eine gegenläufige Abhängigkeit besteht. Die prozentualen Abweichungen der Heiz-, Kühl- und Beleuchtungsenergiebedarfe vom jeweils minimalen erreichbaren Wert sind in Abbildung 8-23 dargestellt.

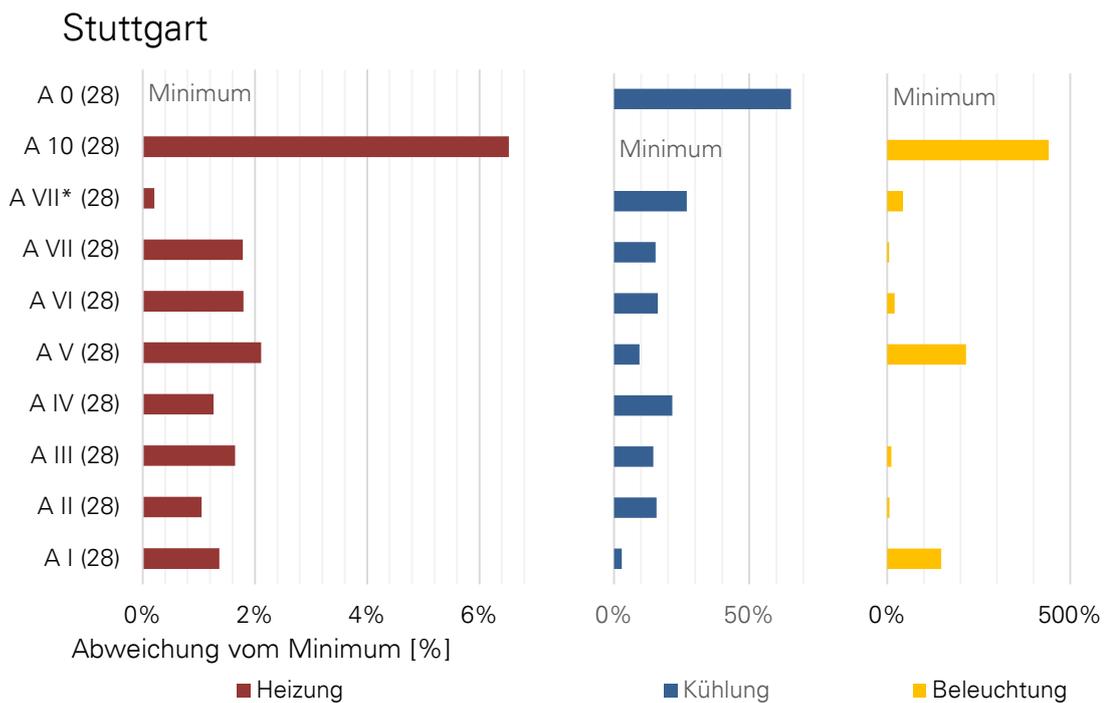


Abbildung 8-23: Prozentuale Abweichungen der Heiz-, Kühl- und Beleuchtungsenergiebedarfe bei den untersuchten Regelungsstrategien vom jeweiligen Minimum

Hinsichtlich des Heizenergiebedarfs ermöglichen alle Regelungskonzepte eine sehr effektive Schaltung. Der niedrigste Heizenergiebedarfswert (beim Einsatz einer maximal aufgehellten Verglasung) wird in jedem Fall um weniger als 2 % überschritten. Alle Strategien mit Berücksichtigung der Innenraumhelligkeit (II, IV, VI, VII) ermöglichen auch die Einhaltung niedriger Beleuchtungsenergiebedarfswerte, die den Minimalwert (beim Einsatz einer maximal aufgehellten Verglasung) nur geringfügig bis gar nicht (Strategie IV) überschreiten. Hinsichtlich des Kühlenergiebedarfs zeigen sich die temperatur- und strahlungsbasierten Strategien I, III, V am effektivsten, wobei die Unterschiede zu beleuchtungstechnisch besseren Strategien sehr gering ausfallen. Erwähnenswert bezüglich des Kühlenergiebedarfs ist die Überlegenheit der meisten Regelungsstrategien gegenüber dem zum Vergleich aufgeführten Regler VII*, der zur jeweiligen Stunde auftretende Energiebedarfe minimieren soll. Aufgrund der Phasenverschiebung der Raumaufheizung und der solaren Einträge ist er im Gegensatz zu einfacheren Regelungs- und Steuerungsmodellen nur beschränkt in der Lage, rechtzeitig einen Kühlenergiebedarf zu verhindern.

Im Vergleich mit Referenzverglasungen zeigt die TN-Verglasung einige Vorteile gegenüber herkömmlichen Systemen. In Abbildung 8-24 ist ein Vergleich der Raumenergiebedarfe für die Ansteuerungsstrategien II und IV der TN-Verglasung sowie die Referenzverglasungen B bis E, jeweils für zwei Kühlsollwerte (26 °C und 28 °C, vgl. Kapitel 8.5.1.3) aufgezeigt. Zusätzlich zu den Raumenergiebedarfen für Heizung (COP = 4,76), Kühlung (EER = 3,66) und Beleuchtung (LED) wurde eine Abschätzung der Energiebedarfe der TN-Verglasung während der Schaltvorgänge (1,1 W/m² - 3 W/m² Verglasungsfläche, vgl. Kapitel 3.2.1.1) und des Jalousiemotors (Leistungsaufnahme bei ca. 25 Nm Zugleistung von ca. 200 W – 240 W [177–179] während des Hochfahrvorgangs und ca. die halbe Leistungsaufnahme während des Schließvorgangs, mit einer Dauer der Vorgänge von ca. 5 min) aufgetragen. Der Energiebedarf im Standby-Modus der elektronischen Verschattungskomponenten wurde nicht berücksichtigt.

Eine deutliche Reduzierung des Kühlenergiebedarfs im Vergleich zu Referenzverglasungen B und D ohne Verschattung und des Beleuchtungsenergiebedarfs im Vergleich zu Referenzverglasungen C und E mit außenliegenden Jalousien⁵¹ tragen dazu bei, dass der Gesamtenergiebedarf beim Einsatz der TN-Verglasung in Stuttgart niedriger ist als bei dargestellten Referenzverglasungen.

⁵¹ In Abbildung 8-24 werden perfekt schließende Jalousien angenommen. In der Realität wird ein Teil des Lichts durch geschlossene Jalousien in den Innenraum gelangen, sodass eine Reduktion des dargestellten Beleuchtungsenergiebedarfs erwartet werden kann. Bei einem Verschattungsfaktor von 0,75 (s. Kapitel 8.5.1.1) wird dieser vergleichbar mit dem Beleuchtungsenergiebedarfs beim Einsatz der TN-Verglasung sein.

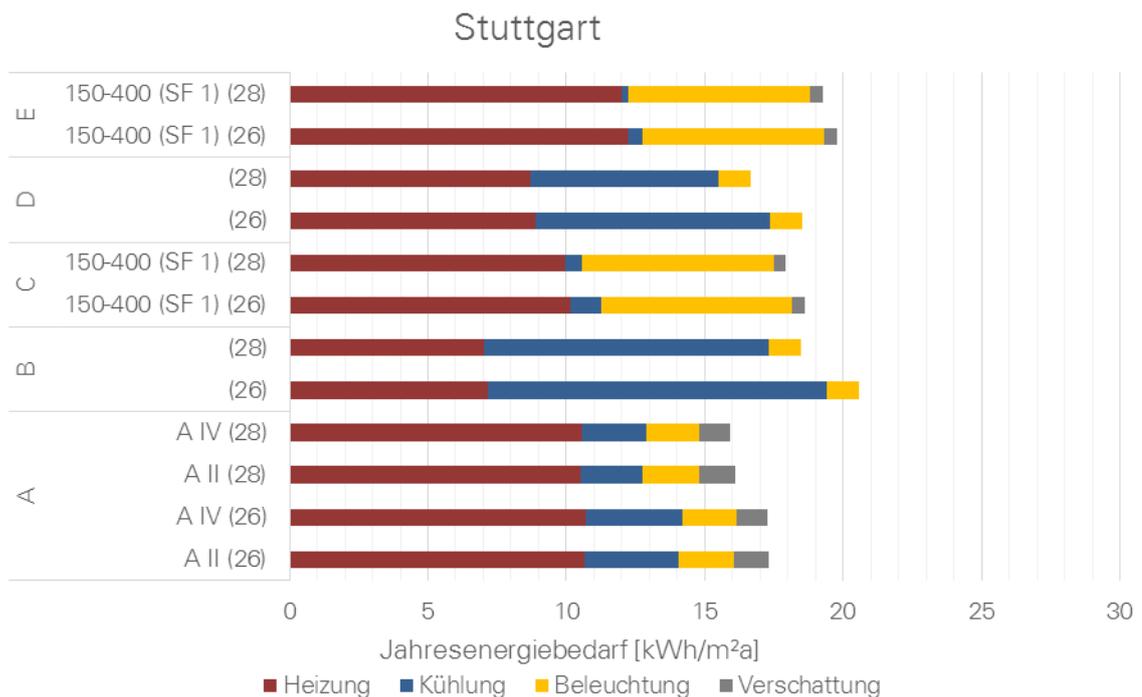


Abbildung 8-24: Energiebedarfsanalyse für den Fassadenprüfstand für Stuttgart

8.5.3 Ergänzende energetische Untersuchung: Anregung für die Weiterentwicklung der TN-Verglasung

Am Beispiel einer auf dem Markt befindlichen, bläulichen elektrochromen Verglasung auf der Basis von Wolframtrioxid mit einem sehr hohen g-Wert-Schalhub (vgl. Kapitel 6.1.1.2) und gleichem U-Wert wie die analysierte TN-Verglasung wird gezeigt, dass durch die Erhöhung der Schaltwirkung im nicht sichtbaren Wellenlängenbereich sowohl der Heizenergie- als auch der Kühlenergiebedarf weiter reduziert werden können. Ein Vergleich der Raumenergiebedarfe für die TN-Verglasung A und die elektrochrome Verglasung EC, jeweils angesteuert nach der Strategie IV, ist in Abbildung 8-25 gegeben. Der sich für die elektrochrome Verglasung ergebende sehr hohe Beleuchtungsenergiebedarf resultiert aus niedrigen Lichttransmissionswerten bei allen derzeit verfügbaren Abdunklungszuständen dieser Verglasung. Nur im Zustand maximaler Transparenz ist ein hoher Lichttransmissionswert von 0,56 gegeben. Sobald die Tönung aktiviert wird, beträgt er 0,01 – 0,16 (berechnet mit Window 7 [137]). Diese geringe Varianz der Lichttransmission bei den meisten Schaltzuständen ist ein Nachteil bezüglich des visuellen Komforts und der Tageslichtversorgung des Raums. Sie bestätigt nochmals das Postulat einer holistischen Betrachtung aller Komfortarten und der sie beeinflussenden Produkteigenschaften. Bei der zukünftigen Produktentwicklung der TN-Verglasung ist eine Erhöhung des g-Wert-Schalhubes erstrebenswert, jedoch nur im Zusammenhang mit einer großen nutzbaren Bandbreite der Lichttransmissionsgrade.

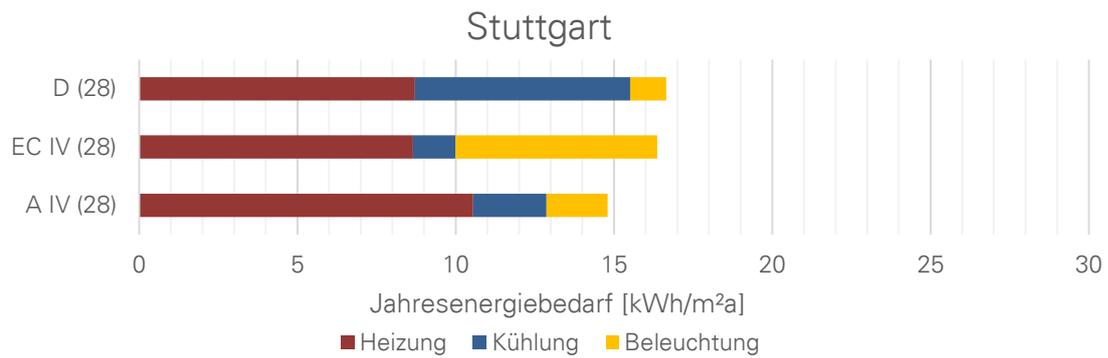


Abbildung 8-25: Vergleich der Jahresenergiebedarfe des Testraums mit der TN-Verglasung A, einer kommerziell verfügbaren elektrochromen Verglasung mit einem hohen g-Wert-Schalhub EC (jeweils angesteuert nach der Strategie IV) und der Referenzverglasung D in Stuttgart.

8.6 Energetische Jahresanalysen für weitere Standorte

Abbildung 8-26 bis Abbildung 8-28 zeigen das energetische Verhalten des Modellraums mit der TN-Verglasung (beispielhaft für Strategien II und IV) im Vergleich mit Referenzverglasungen B, C, D, E für drei weitere Standorte: Helsinki, Valencia und Accra. Wie bereits in Stuttgart, sind die Heizenergiebedarfe beim Einsatz der TN-Verglasung jeweils höher als bei den Referenzverglasungen ohne Jalousien (B und D), aufgrund der grundsätzlich niedrigeren solaren Einträge in den Innenraum. Die relativ niedrigen Transmissionswerte der TN-Verglasung sind auch der Grund für die höheren Beleuchtungsenergiebedarfe im Vergleich zu den Referenzverglasungen B und D. Hinsichtlich des Kühlenergiebedarfs platziert sich die TN-Verglasung zwischen den Referenzverglasungen mit und ohne Jalousien. Gesamtenergetisch betrachtet, erweisen sich die TN-Verglasungen als eine Alternative zu Referenzverglasungen mit externer Verschattung (C und E), die je nach Standort und Jalousieeinstellung in vergleichbaren oder niedrigeren Raumenergiebedarfen resultiert.

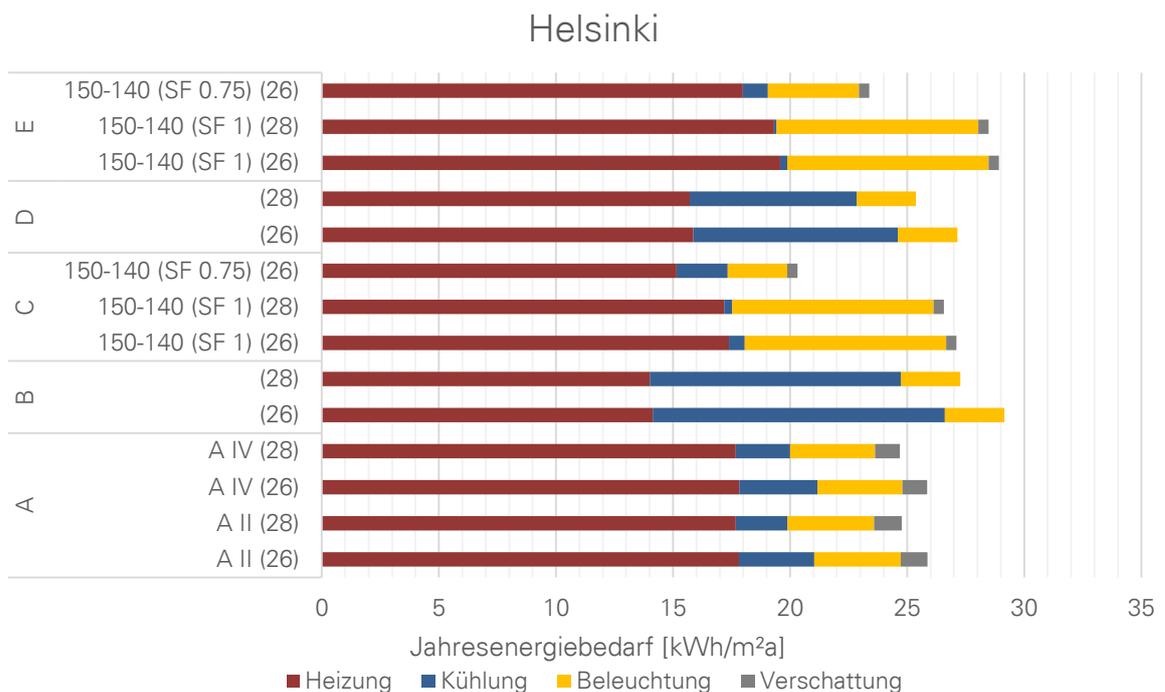


Abbildung 8-26: Energiebedarfsanalyse für den Fassadenprüfstand für Helsinki

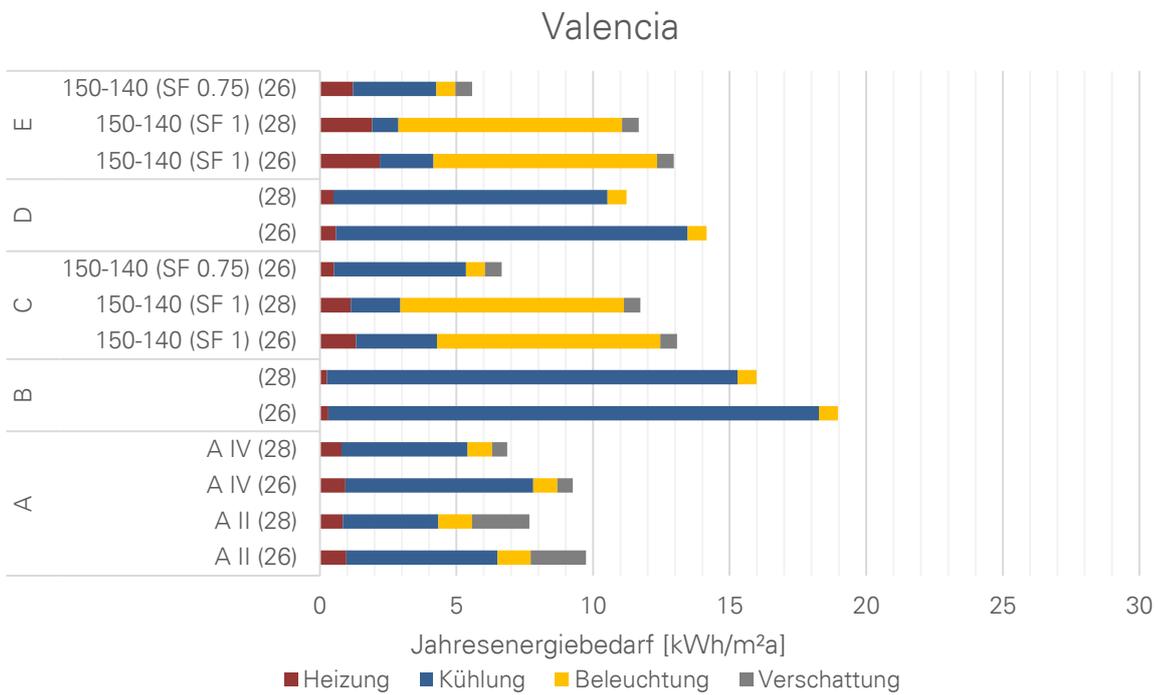


Abbildung 8-27: Energiebedarfsanalyse für den Fassadenprüfstand für Valencia

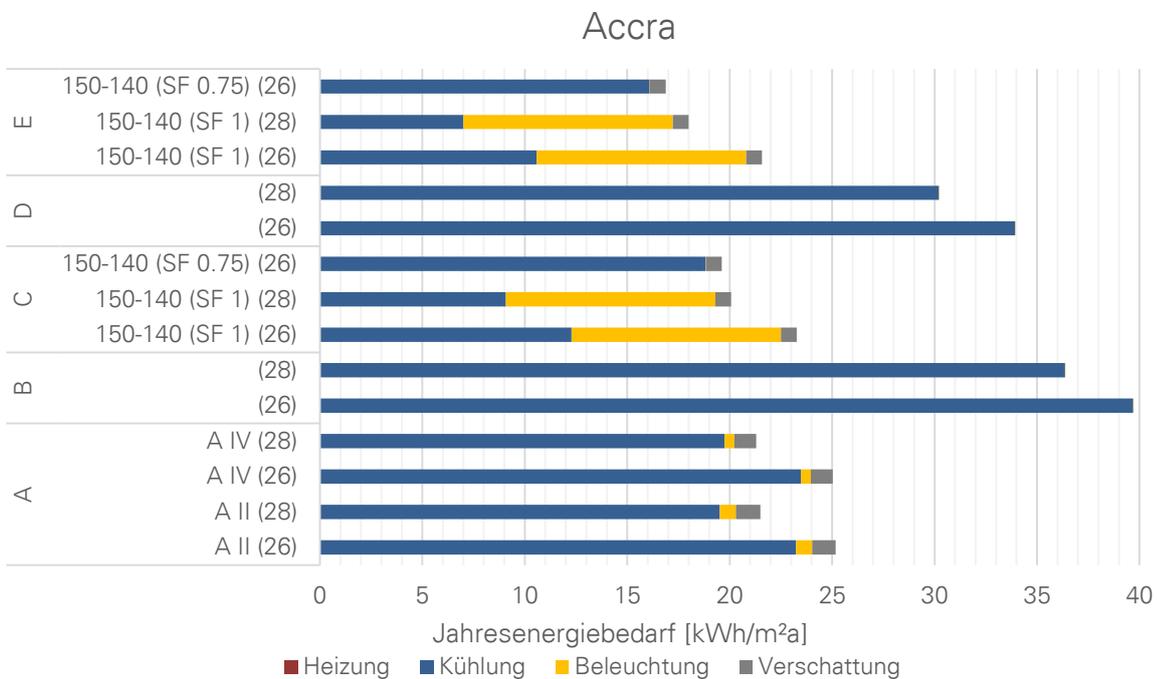


Abbildung 8-28: Energiebedarfsanalyse für den Fassadenprüfstand für Accra

9. Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse

Mit dem Eintritt großflächig verglaster Fassaden in die Architektur gewann die für den Werkstoff Glas besonders relevante Problematik der Licht- und Energietransmission eine essenzielle Bedeutung. Das wachsende ökologische Bewusstsein der Akteure der Bauwirtschaft führte einerseits zu energetisch motivierten Empfehlungen zur Reduktion der Glasflächenanteile, andererseits konnte das Streben nach möglichst großer Transparenz und Tageslichtversorgung dadurch nicht unterbunden werden. Diese Diskrepanz der Zielvorgaben induziert den Bedarf nach flexiblen Fassadenlösungen. Zu solchen gehören adaptive, substrukturierte Verglasungen. Sie zeichnen sich durch die Möglichkeit aus, ihre optischen und strahlungsphysikalischen Eigenschaften bereichsweise zu verändern. Somit besitzen sie das Potential, die notwendige Flexibilität und Multifunktionalität in einem Fassadenelement zu vereinen. Die Möglichkeiten der Ausschöpfung dieses Potentials sind wesentlich von den Ansteuerungskonzepten der schaltbaren Verglasungen abhängig.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss der schaltbaren, substrukturierten Verglasung auf der Basis von Flüssigkristallen (TN-Verglasung) auf den Innenraumkomfort und den Raumenergiebedarf am Beispiel eines Modellraums analysiert, im Hinblick auf eine gleichzeitige Beeinflussung sowohl der visuellen als auch der thermischen Komfortaspekte sowie der Energieeffizienz. Die Grenzen der Beeinflussbarkeit des Innenraumkomforts durch die Schaltvorgänge der Verglasung wurden erörtert. Anschließend wurden Konzepte zur Ansteuerung der Verglasung im Hinblick auf die bestmögliche Komfortverbesserung und Reduzierung des Raumenergiebedarfs entwickelt. Die Validierung repräsentativer Simulationsergebnisse erfolgte in einem Fassadentestgebäude in Stuttgart.

Die Unterteilung der TN-Verglasungen in einzeln ansteuerbare Pixel ermöglicht die Trennung der Blendschutzfunktion von der Sonnenschutzfunktion der Verglasung, sodass sowohl in der Heizsaison als auch in der Kühltisaison eine Unterstützung des Raumkonditionierungssystems durch die Veränderung der Verglasungseigenschaften gegeben ist. In der Kühltisaison werden die Schutzfunktion vor übermäßiger Solarstrahlung sowie die Blendschutzfunktion zunehmend benötigt. Während der Heizsaison tritt die Blendschutzfunktion in den Vordergrund, bei gleichzeitiger Nutzung solarer Gewinne.

Die Untersuchungen ermöglichten eine Antwort auf die Fragestellung, ob und wie durch die Anwendung entsprechender Regelungsstrategien der Innenraumkomfort verbessert

und der Energiebedarf für die Raumkonditionierung minimiert werden kann. Durch die Schaltung der Verglasung können hauptsächlich visuelle Innenraumbedingungen verändert werden. In fassadennahen Raumbereichen ermöglicht die TN-Verglasung bessere nutzbare Raumausleuchtung als bei Referenzverglasungen mit und ohne konventionelle, außenliegende Sonnenschutzsysteme. Insbesondere Regelungsstrategien mit Berücksichtigung der Innenraumhelligkeit führen zur Verbesserung der Tageslichtversorgung im Vergleich zu Referenzverglasungen mit externem Sonnenschutz (welche sich durch einen besonders niedrigen Beleuchtungsenergiebedarf manifestiert). Mit der TN-Verglasung wird jedoch nicht nur eine flexible Raumausleuchtung, sondern auch ein integrierter Blendschutz ermöglicht. Eine deutliche Reduktion des Blendungsrisikos durch eine partielle Abdunklung der Verglasung im Vergleich zu Referenzverglasungen ohne Blendschutzelemente konnte für vier unterschiedliche Standorte nachgewiesen werden. Mit entsprechenden Verschattungsmustern kann eine störende Blendung ausgeschlossen werden.

Hinsichtlich des thermischen Komforts konnten bei einer geeigneten Auslegung des Verglasungssystems trotz ausgeprägter Absorptionseigenschaften der schaltbaren Zellen keine negativen Auswirkungen in Form von strahlungsasymmetriebedingter Unbehaglichkeit festgestellt werden. Obwohl durch die Schaltung der Verglasung eine relativ geringe Änderung der Innenraumtemperatur möglich ist, besitzt diese dennoch eine Auswirkung auf den Konditionierungsenergiebedarf.

Unter der Betrachtung der analysierten Komfortparameter führen hauptsächlich die Regelungs- und Steuerungsstrategien zur Komfortverbesserung und zur Reduktion des Raumenergiebedarfs, die auf mindestens zwei Parametern basieren (Strategie II, IV, VI und VII). Deren Anwendung resultiert in sehr ähnlichen Raumenergiebedarfen. Hinsichtlich des Kühlenergiebedarfs platziert sich die TN-Verglasung zwischen den Referenzverglasungen mit und ohne Jalousien. Gesamtenergetisch betrachtet, stellen die TN-Verglasungen vor allem in mittleren und nördlichen Breiten eine Alternative zu Referenzverglasungen mit externer Verschattung dar. Die Verwendung der Innenraumtemperatur als einen der Regelungsparameter ermöglicht dabei eine relativ einfache Umsetzung der Ansteuerung mit einem geringen sensorischen Aufwand. Die Bestrahlungsstärkebasierenden Strategien bedürfen einer genauen, standortbedingten Festlegung der Schwellenwerte, um ihr volles Potential auszunutzen, sie ermöglichen aber eine frühzeitige Reaktion auf erwartete Innentemperaturänderungen. Die Berücksichtigung der Innenraumhelligkeit als Regelungsparameter ist unabdingbar nicht nur für die Gewährleistung des visuellen Komforts, sondern auch für die Reduktion des Beleuchtungsenergiebedarfs.

Durch die simulationsbasierte Analyse der Raumenergiebedarfe konnte nachgewiesen werden, dass mit den entwickelten Ansteuerungsstrategien sowohl die Potentiale der hellen Verglasungszustände hinsichtlich der Nutzung solarer Energiegewinne in der Heizsaison und der Tageslichtversorgung, als auch die Potentiale der dunklen Verglasungszustände hinsichtlich der dabei ausgeprägten Sonnenschutzfunktion ausgenutzt werden.

Durch deren Kombination in einem Verglasungselement können, unter der Voraussetzung, dass die Innenraumhelligkeit bei der Ansteuerung berücksichtigt wird, sowohl thermisch- energetische als auch visuelle Raumbedingungen positiv beeinflusst werden.

9.2 Anregungen für weiterführende Arbeiten

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen der vorliegenden Arbeit lassen sich zahlreiche weiterführende Forschungsthemen erkennen.

Die weitere Materialentwicklung sollte in einer Erhöhung des erreichbaren Schalthebs im nicht sichtbaren Wellenlängenbereich des Solarspektrums resultieren, mit Beibehaltung einer hohen Bandbreite der veränderbaren Lichttransmission. Somit kann der Einfluss auf den thermischen Innenraumkomfort und den Raumkonditionierungsbedarf erhöht werden. Eine Verbesserung der Auswirkungen auf den visuellen Komfort kann hauptsächlich durch eine Layoutoptimierung innerhalb der schaltbaren Module erfolgen. Eine Reduzierung der nicht ansteuerbaren Pixelzwischenräume würde zu einer weiteren Verbesserung der Blendschutzfunktionalität der Verglasung führen.

Hinsichtlich der zukünftigen architektonischen Anwendung sollte der Herstellungsprozess für großflächige substrukturierte Verglasungen ausgelegt werden. Eine Vergrößerung der schaltbaren Modulfläche würde mit der Reduktion der Anzahl von elektronischen Komponenten und somit der Reduktion des Energiebedarfs für die Ansteuerung der schaltbaren Verglasung einhergehen. Eine Kopplung der schaltbaren Module mit (z.B. in die Fassade integrierten) Photovoltaik-Elementen sollte vorgesehen werden, um ein energetisch autarkes System aufzubauen. Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde diese Möglichkeit evaluiert und bestätigt [99]. Um die bauphysikalischen Eigenschaften der TN-Verglasung zu verbessern, sollte eine Lamination der schaltbaren Module an die Innenseite der Außenscheibe der Isolierverglasung angestrebt werden. Durch entsprechende Voruntersuchungen konnte bereits eine gute Laminationstauglichkeit kleinformatiger Module nachgewiesen werden [103]. Im Hinblick auf eine Markteinführung des Systems sollten die Produktionsvorgänge weiter optimiert werden, um eine Kostenreduktion zu erzielen.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine einfache Einbindung der schaltbaren Verglasung in die Gebäudetechnik untersucht. Eine komplexere Integration der Systeme könnte weitere energetische Vorteile bringen. Am Beispiel der Ansteuerungsstrategien IV und VI der Verglasung wurden ansatzweise die Potentiale einer vorausschauenden Steuerung aufgezeigt. Eine komplexe vorausschauende Regelung des mit der Verglasungsregelung gekoppelten Konditionierungssystems, möglicherweise in Kombination mit einem selbstlernenden Algorithmus, würde eine vollständige Ausnutzung dieser Potentiale ermöglichen. Selbstlernende Algorithmen könnten durch die Erfassung der Präferenzen der jeweiligen Raumnutzer zur weiteren nutzerorientierten Optimierung der Schaltstrategien beitragen. Hierfür wird eine Fortführung der Interaktionsentwicklung „Verglasung-Nutzer“

vorgeschlagen, die in weiterer Flexibilisierung der Blendschutz-, Sonnenschutz- und Ausblick-Bereiche der Fassade resultieren würde. Diese Entwicklung bedarf auch mehrerer Studien zur Nutzerzufriedenheit im Gebäudebetrieb. Die adaptiven Verglasungen sollten dabei in real genutzte Gebäude eingebaut werden, möglichst mit unterschiedlichen Gebäudetypologien, Nutzungsszenarien, Raumbellegungskonzepten und Fassadenorientierungen, um eine umfassende Analyse der Akzeptanzkriterien dieser Technologie und ihrer Ansteuerungsstrategien zu ermöglichen. Die in der vorliegenden Arbeit getroffenen Annahmen auf der Basis der Literaturrecherche könnten somit für den spezifischen Fall der TN-Verglasung validiert werden. Weiterführende simulative Studien zu den differenzierten Nutzungskonzepten stellen ebenfalls ein relevantes Forschungsgebiet dar, welches weitere Aufschlüsse über vielversprechende Einsatzbereiche des Systems geben sollte.

Eine weitere relevante Fragestellung im Hinblick auf eine praktische Anwendung ist eine gesamtheitliche energetische Bewertung. Dabei ist die durch die Adaptivität gewonnene Materialeinsparnis den energetischen Anforderungen während des Betriebs sowie der grauen Energie der zusätzlichen Komponenten gegenüberzustellen.

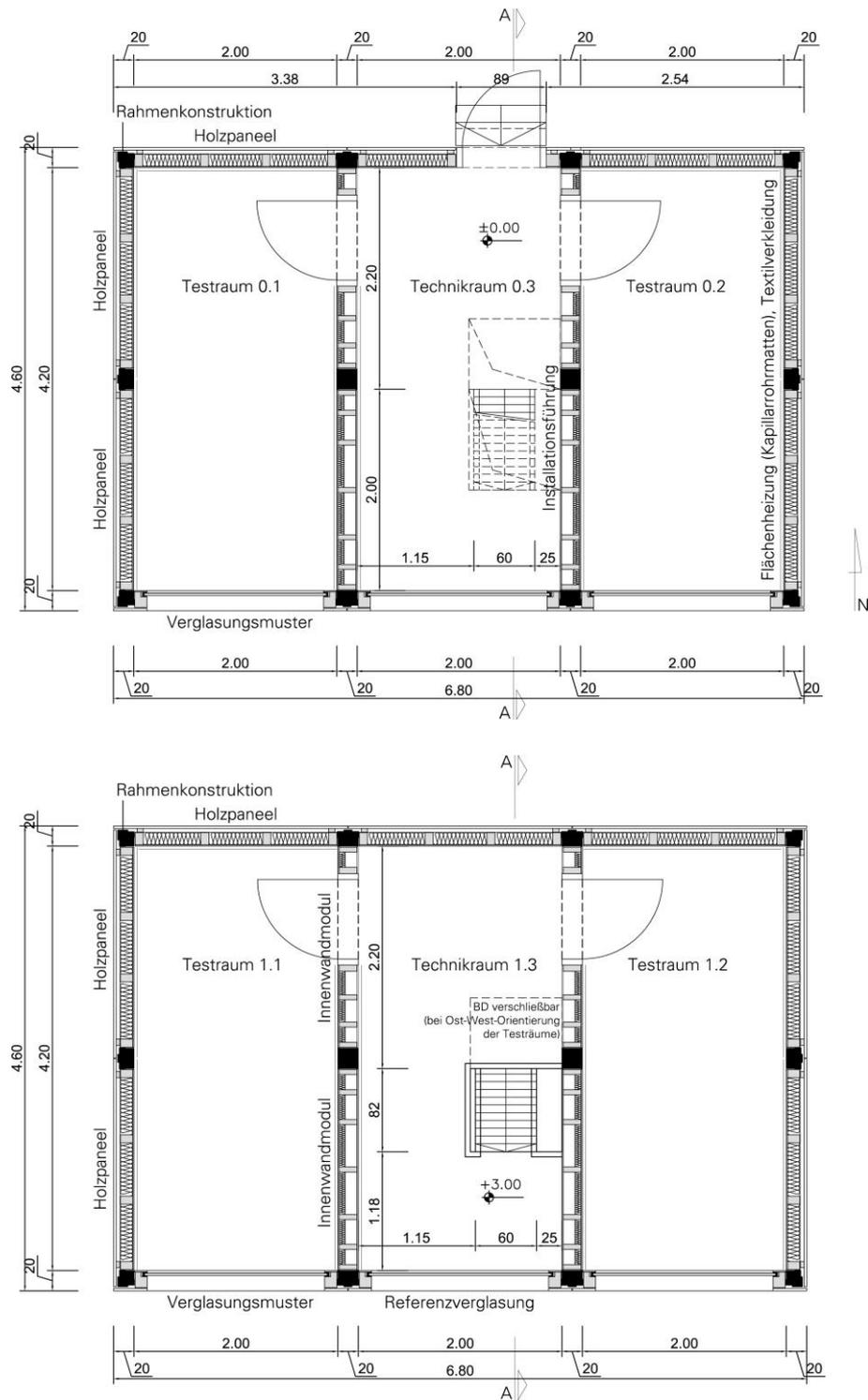


Abbildung 10-2: Grundrisse des Fassadentestgebäudes (o. M.). Oben: Erdgeschoss, unten: Obergeschoss.

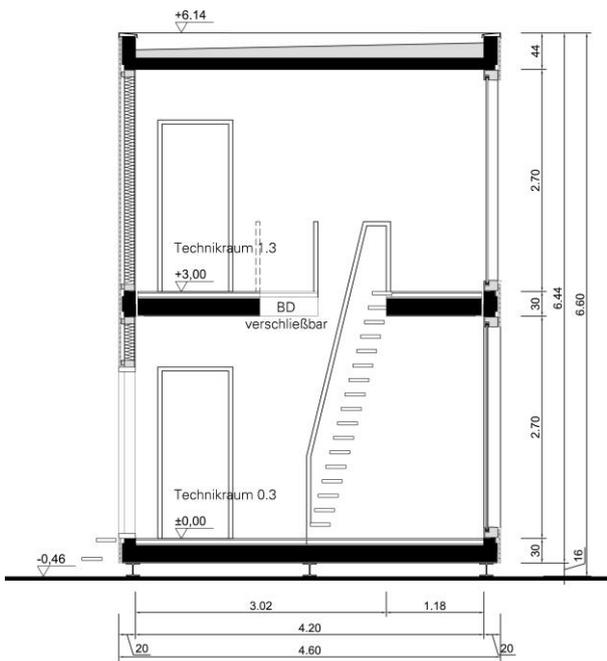


Abbildung 10-3: Schnitt A-A des Fassadentestgebäudes (o. M.)

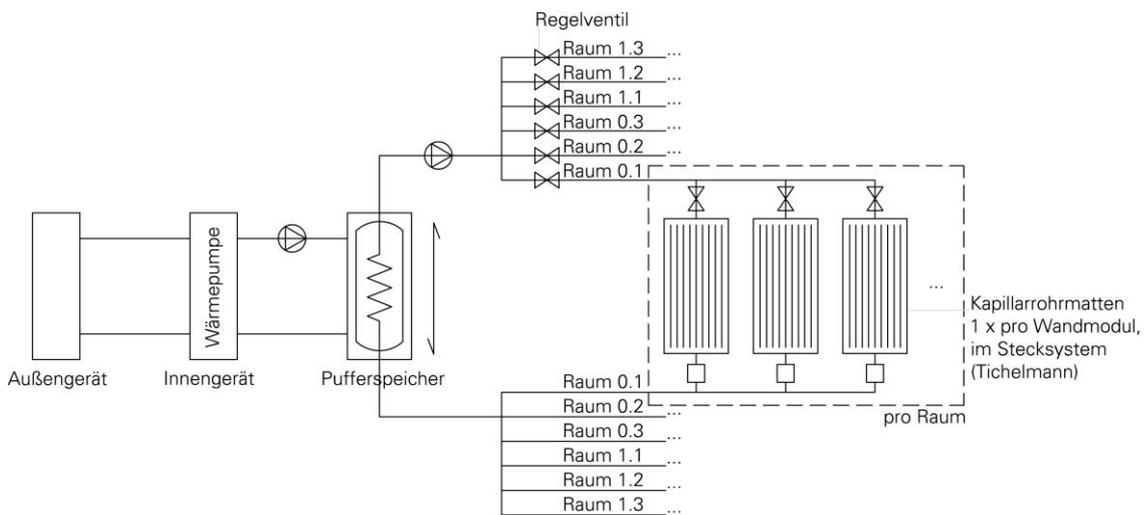


Abbildung 10-4: Hydraulikschema des Konditionierungssystems (o.M.)

11. Anhang 2: Dokumentation der Leuchtdichtemessungen

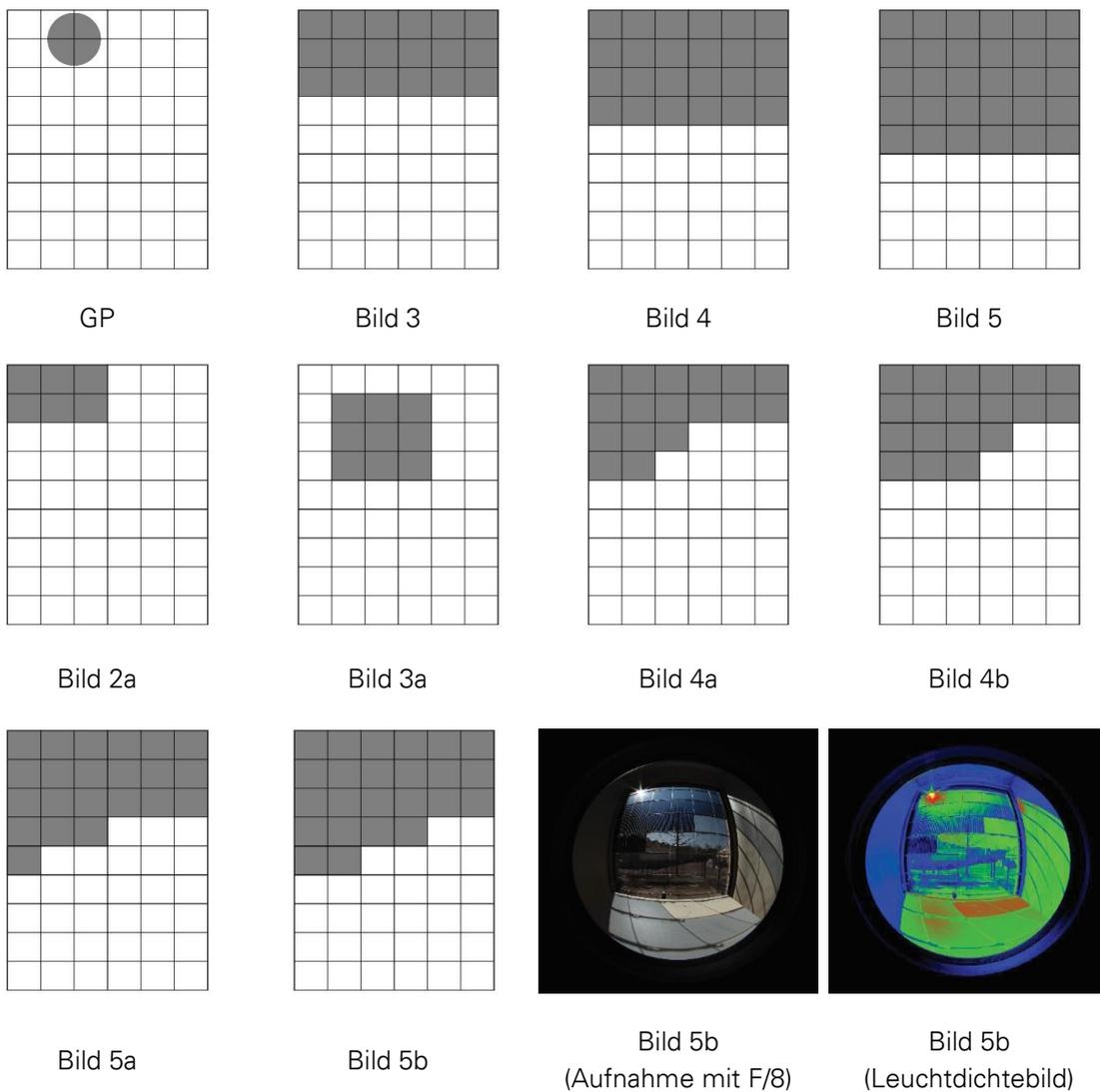


Abbildung 11-1: Schematische Darstellung der analysierten Verschattungsmuster, jeweils für die Verglasungsfläche (6 x 9 TN-Module) gesehen vom Innenraum. Für Muster „Bild 5b“ sind zusätzlich die zugehörigen Aufnahmen mit der Leuchtdichtekamera dargestellt.

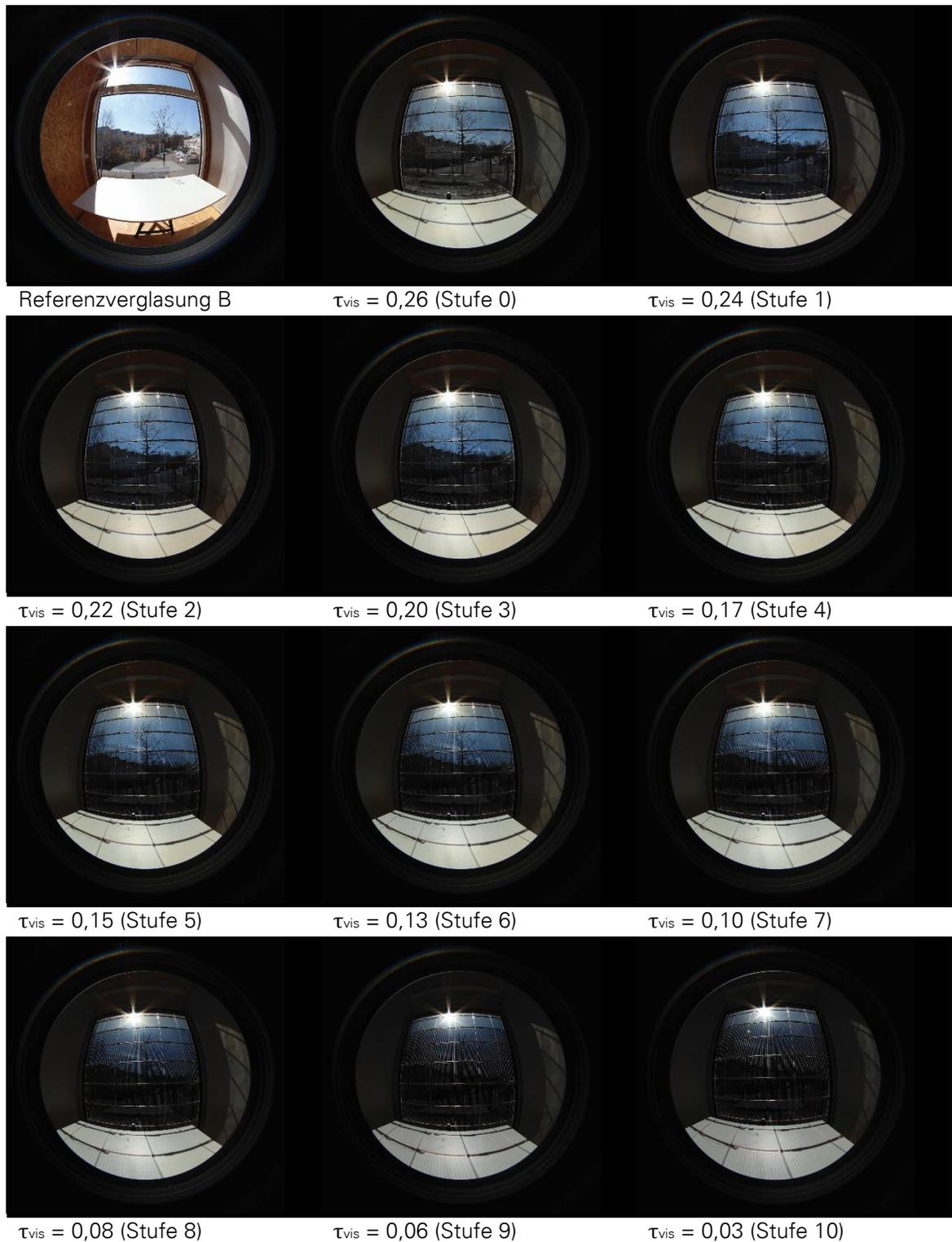


Abbildung 11-2: Blendungsanalyse am sonnigen Frühlingstag 30.03.2018. Aufnahmen mit Blendzahl F/8, Belichtungszeit 1/125 Sek., ISO 100.

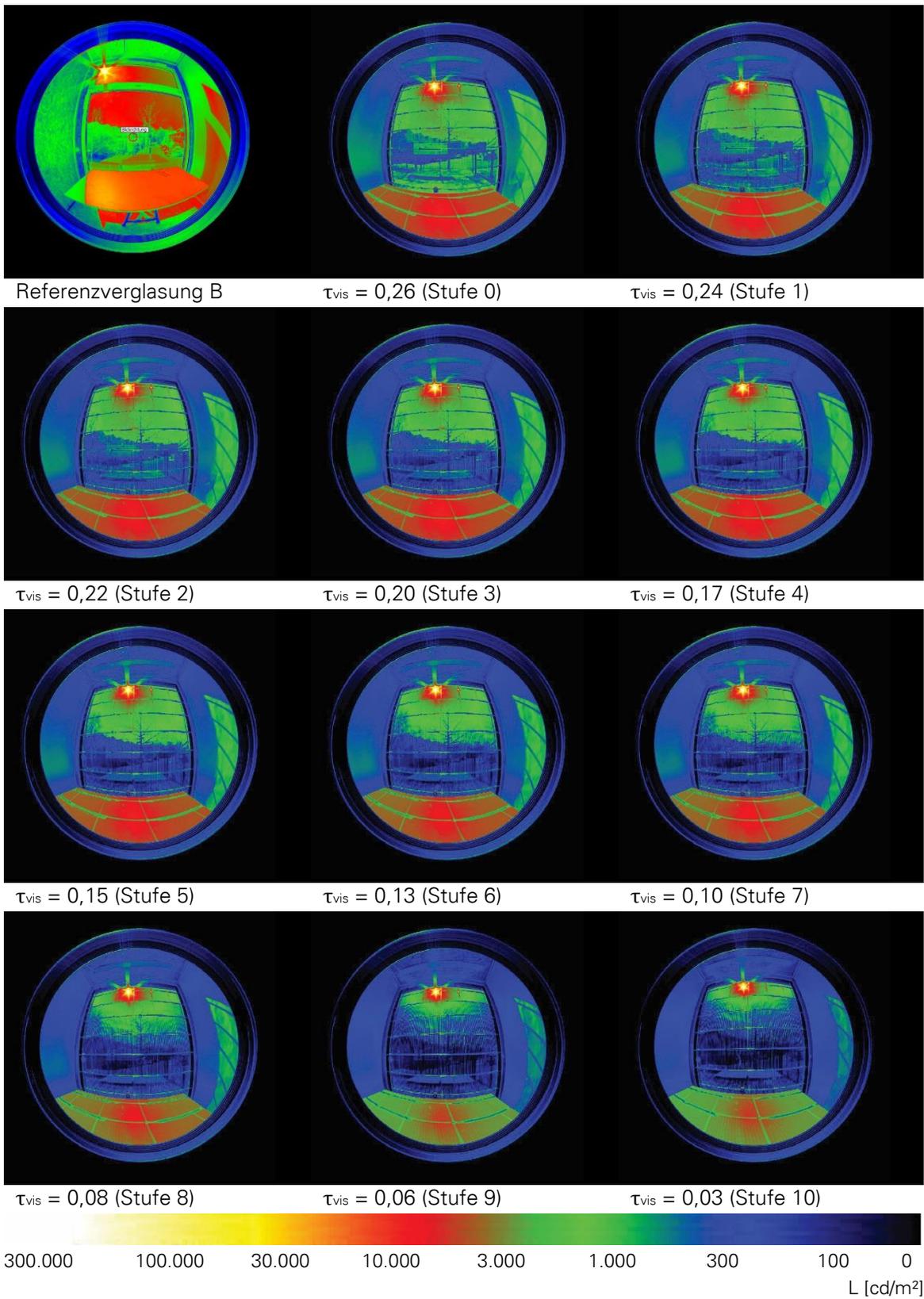
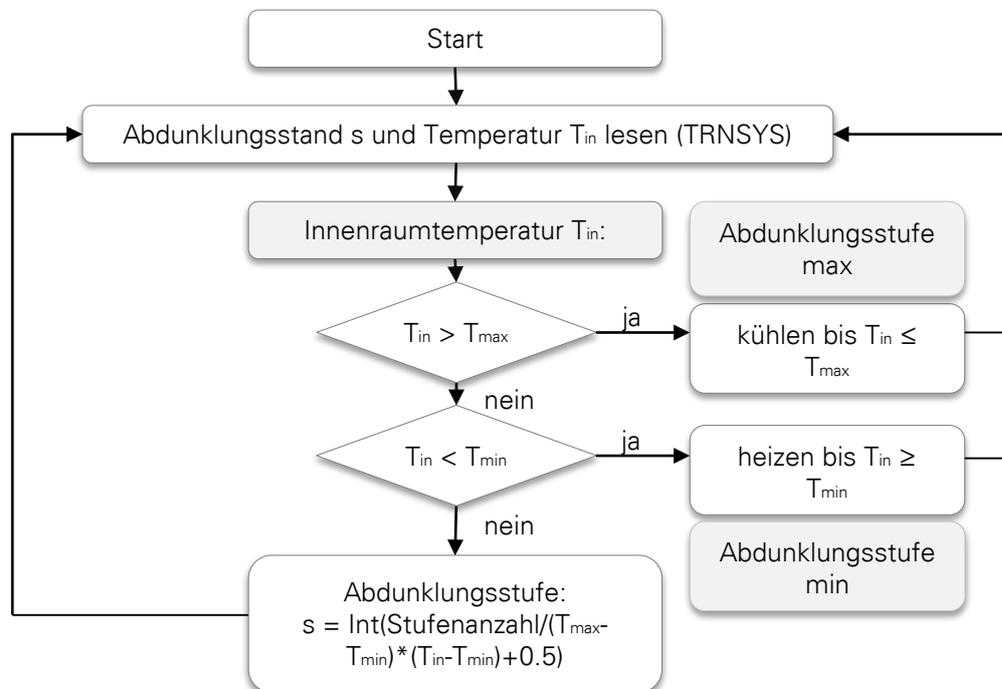


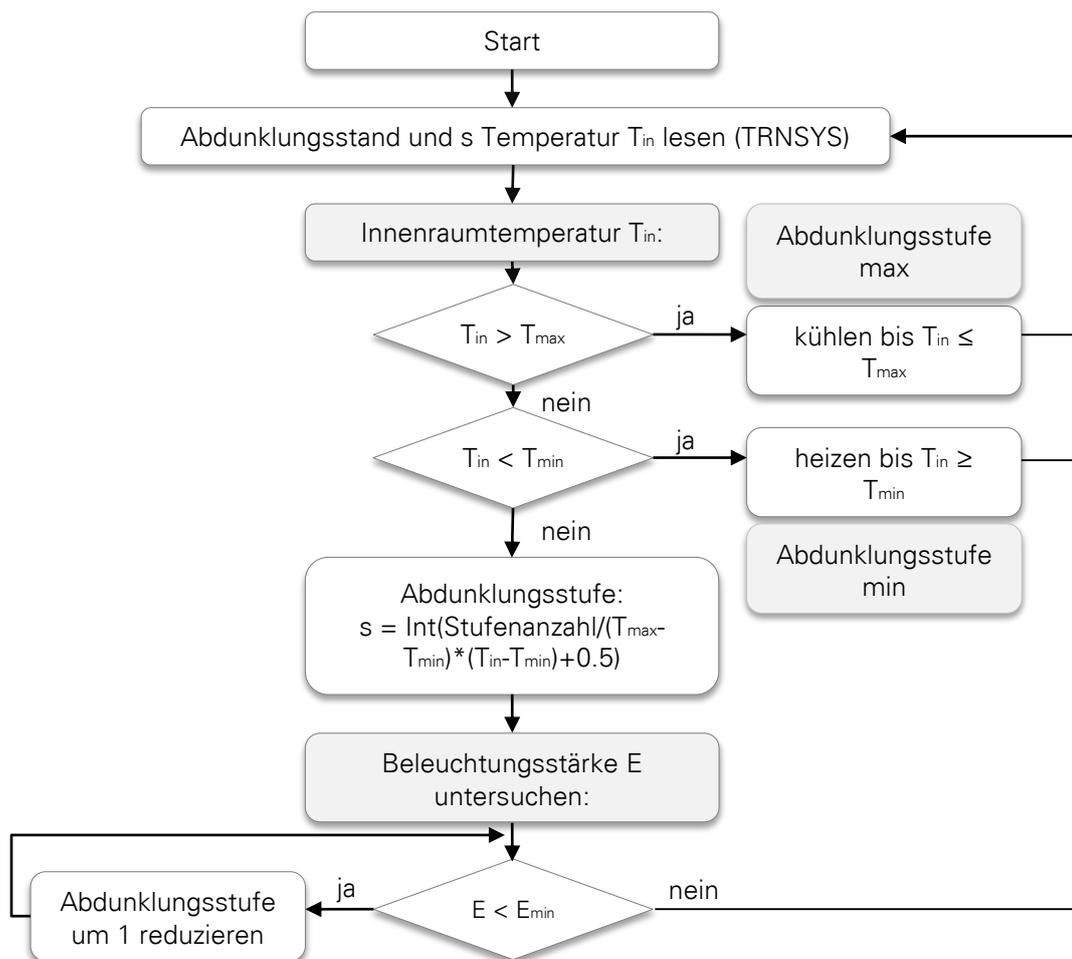
Abbildung 11-3: Blendungsanalyse am sonnigen Frühlingstag 30.03.2018. Leuchtdichtebilder.

12. Anhang 3: Detaillierte Darstellung iterativer Ansteuerungsstrategien



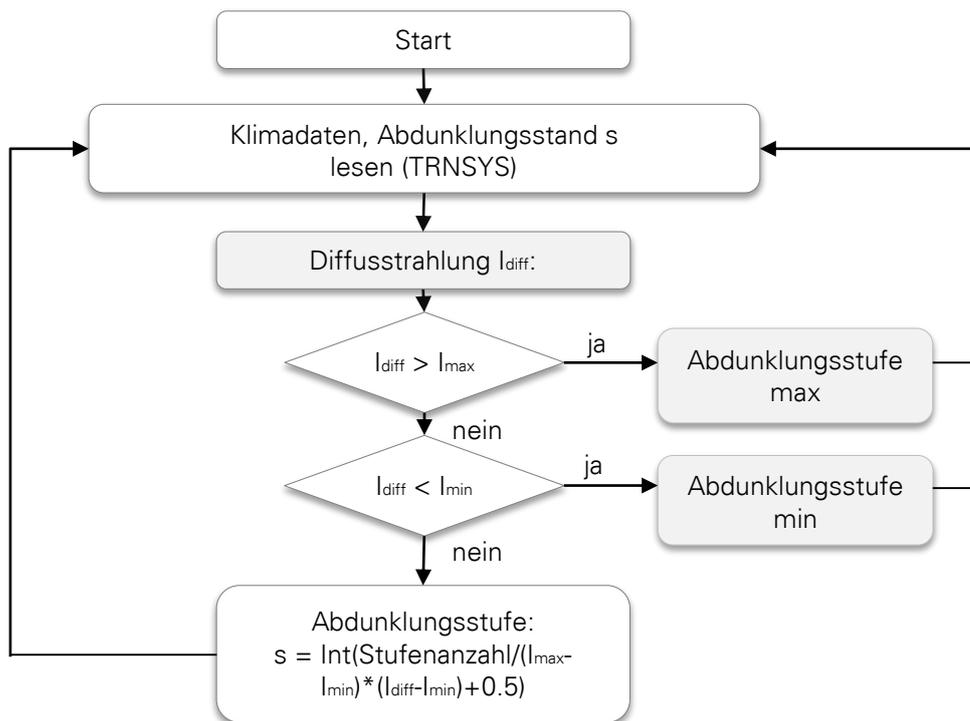
- T_{in} - Aktuelle Innentemperatur [°C]
- T_{max} - Oberer Schwellenwert der Temperatur [°C]
- T_{min} - Unterer Schwellenwert der Temperatur [°C]
- s - Aktuelle Abdunklungsstufe [-]
- Int - Ganzzahl („Integer“)
- Stufenanzahl - Gesamte Stufenanzahl [-]

Abbildung 12-1: Strategie I, detaillierte Darstellung



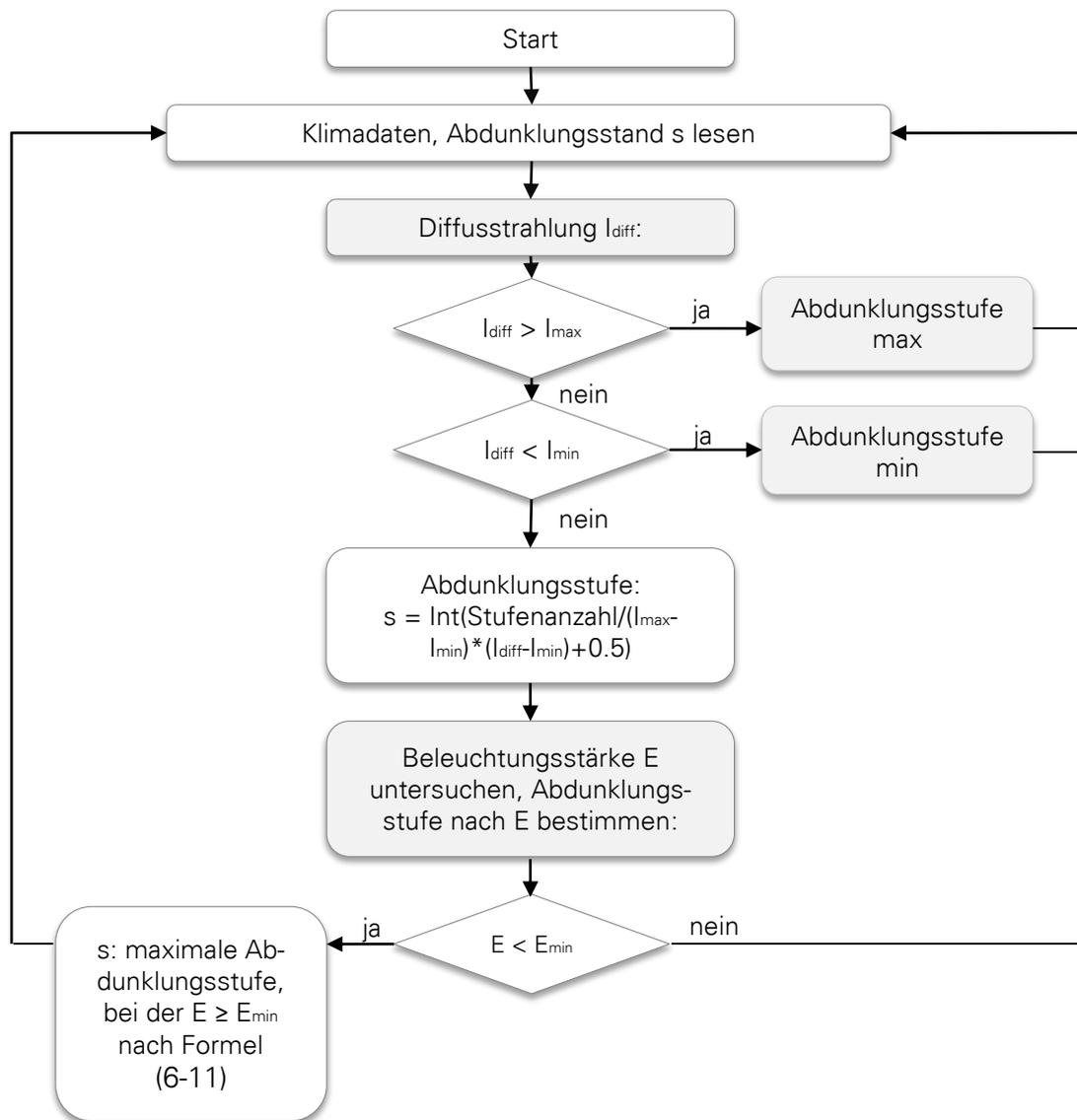
- T_{in} - Aktuelle Innentemperatur [°C]
- T_{max} - Oberer Schwellenwert der Temperatur [°C]
- T_{min} - Unterer Schwellenwert der Temperatur [°C]
- E - Aktuelle Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche [lx]
- E_{min} - Unterer Schwellenwert der Beleuchtungsstärke [lx]
- s - Aktuelle Abdunklungsstufe [-]
- Int - Ganzzahl („Integer“)

Abbildung 12-2: Strategie II, detaillierte Darstellung



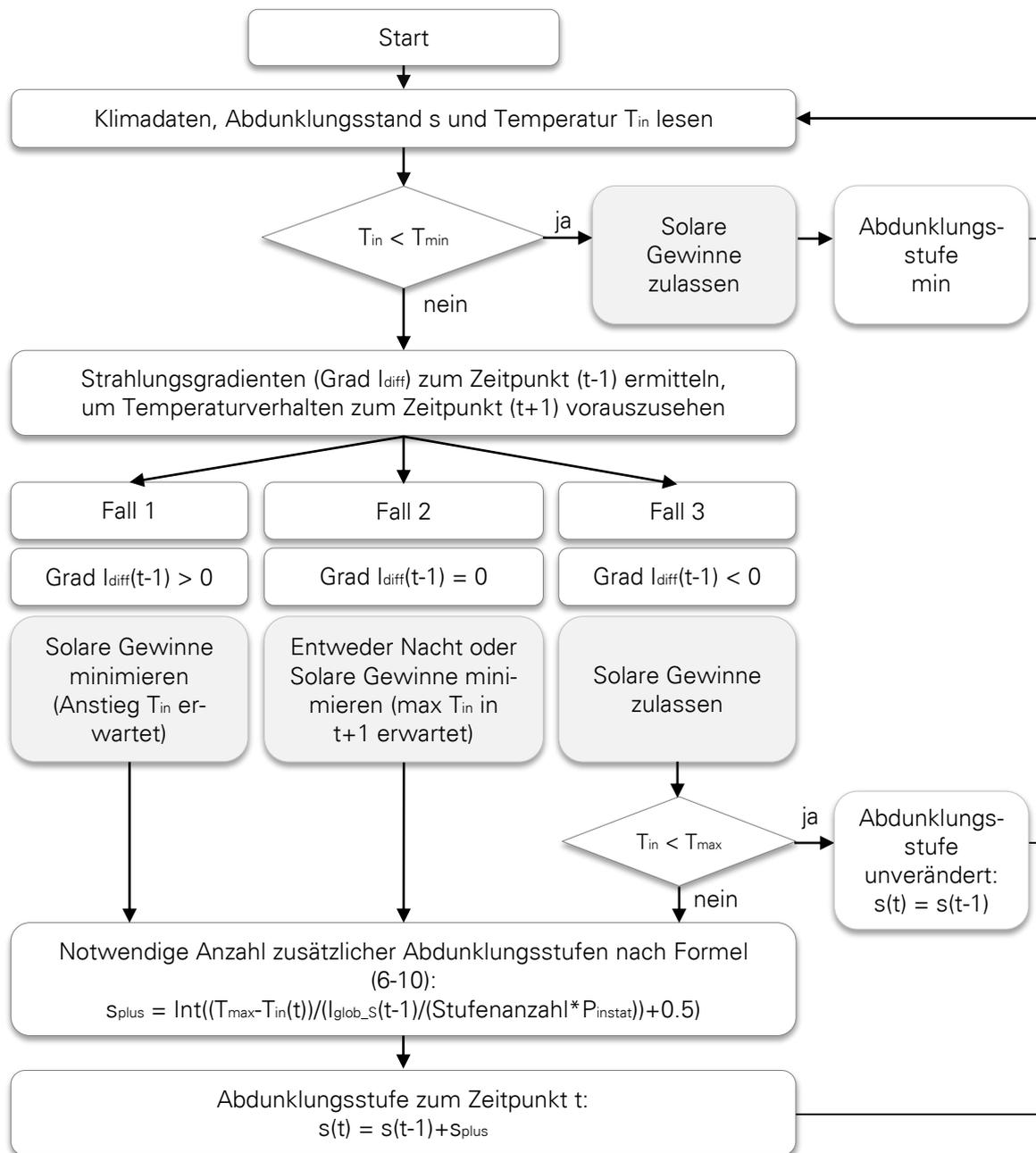
- I_{diff} - Diffuse Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsfläche [W/m²]
- I_{max} - Oberer Schwellenwert der Bestrahlungsstärke [W/m²]
- I_{min} - Unterer Schwellenwert der Bestrahlungsstärke [W/m²]
- s - Aktuelle Abdunklungsstufe [-]
- Int - Ganzzahl („Integer“)

Abbildung 12-3: Strategie III, detaillierte Darstellung



- I_{diff} - Diffuse Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsoberfläche [W/m²]
- I_{max} - Oberer Schwellenwert der Bestrahlungsstärke [W/m²]
- I_{min} - Unterer Schwellenwert der Bestrahlungsstärke [W/m²]
- E - Aktuelle Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche [lx]
- E_{min} - Unterer Schwellenwert der Beleuchtungsstärke [lx]
- s - Aktuelle Abdunklungsstufe [-]
- Int - Ganzzahl („Integer“)

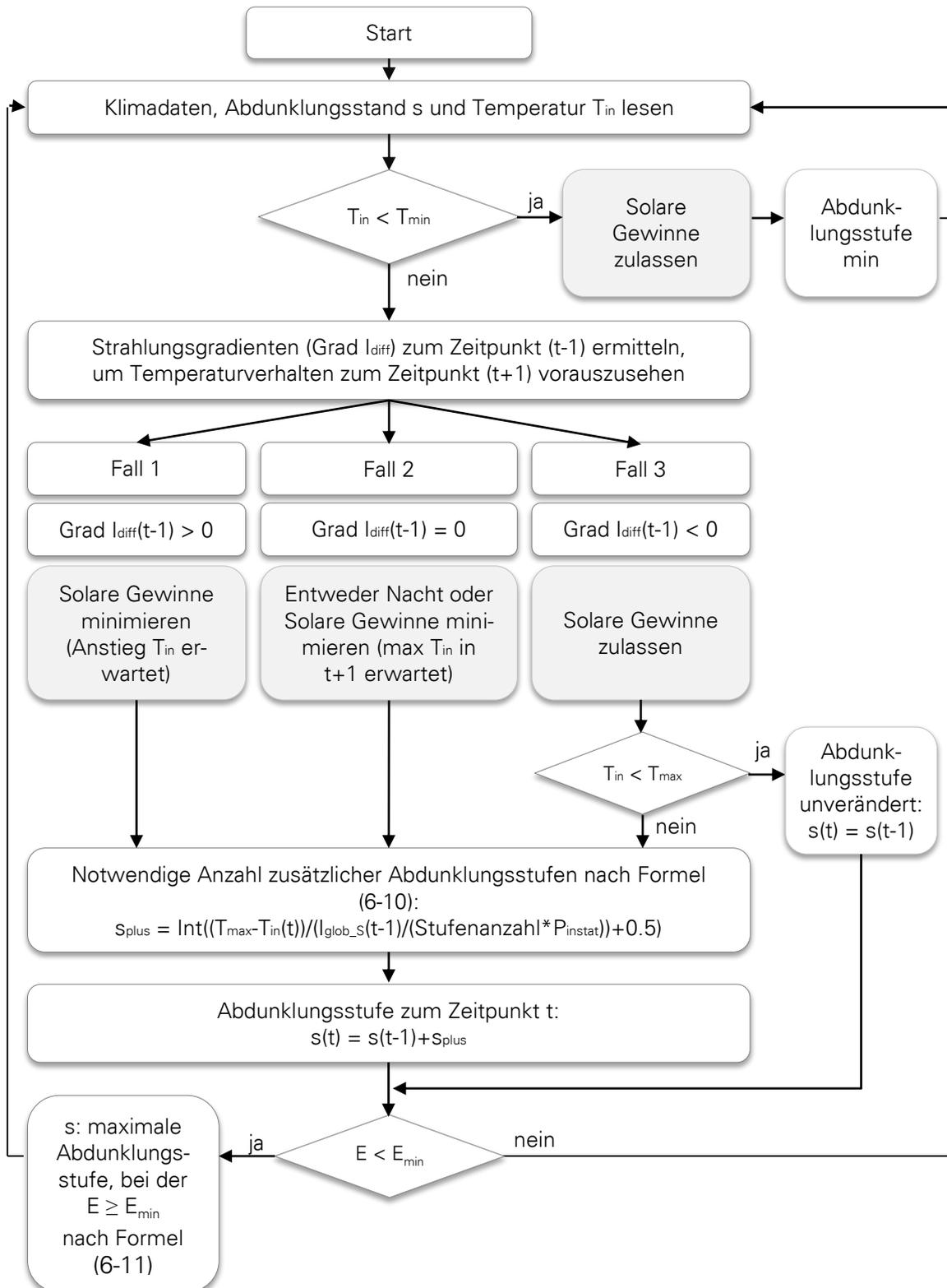
Abbildung 12-4: Strategie IV, detaillierte Darstellung



- T_{in} - Inentemperatur [°C]
- T_{max} - Oberer Schwellenwert der Temperatur [°C]
- T_{min} - Uterer Schwellenwert der Temperatur [°C]
- I_{diff} - Diffuse Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsoberfläche [W/m²]
- I_{glob_S} - Globale Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsoberfläche (Südfassade) [W/m²]
- P_{instat} - Proportionalitätsfaktor, vorab ermittelt nach Formel (6-9)
- Grad - Gradient
- t - Zeit (aktuelle Stunde) [-]

- s(t) - Abdunklungsstufe zum Zeitpunkt t [-]
- s_{plus} - Anzahl zusätzlicher Abdunklungsstufen [-]
- Int - Ganzzahl („Integer“)

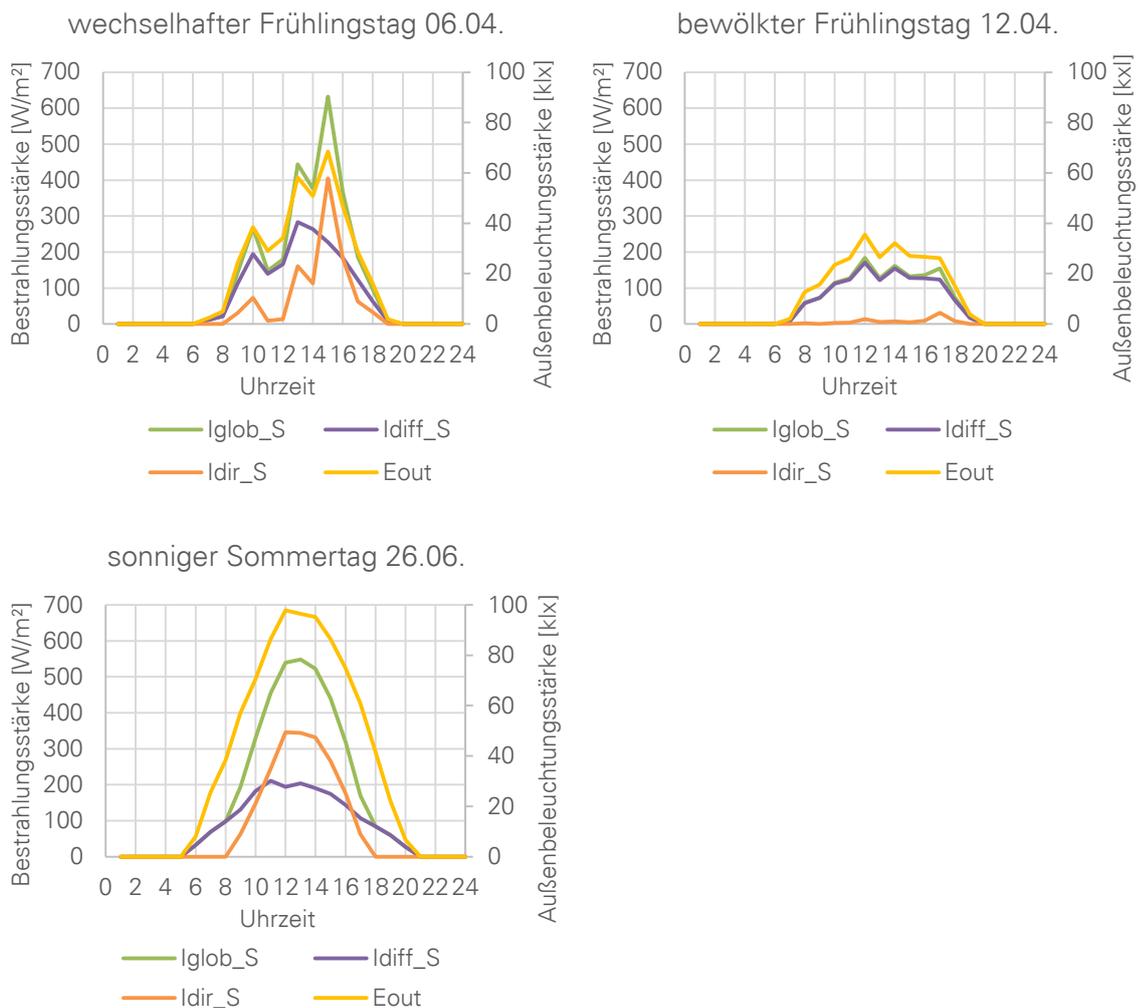
Abbildung 12-5: Strategie V, detaillierte Darstellung



T_{in}	- Innentemperatur [°C]
T_{max}	- Oberer Schwellenwert der Temperatur [°C]
T_{min}	- Uterer Schwellenwert der Temperatur [°C]
I_{diff}	- Diffuse Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsfläche [W/m ²]
I_{glob_S}	- Globale Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsfläche (Südfassade) [W/m ²]
P_{instat}	- Proportionalitätsfaktor, vorab ermittelt nach Formel (6-9)
E	- Aktuelle Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche [lx]
E_{min}	- Unterer Schwellenwert der Beleuchtungsstärke [lx]
Grad	- Gradient
t	- Zeit (aktuelle Stunde) [-]
$s(t)$	- Abdunklungsstufe zum Zeitpunkt t [-]
s_{plus}	- Anzahl zusätzlicher Abdunklungsstufen [-]
Int	- Ganzzahl („Integer“)

Abbildung 12-6: Strategie VI, detaillierte Darstellung

13. Anhang 4: Tagesprofile der Solarstrahlung



- $I_{\text{glob_S}}$ - Globalstrahlung auf die Südfassade [W/m^2]
- $I_{\text{dir_S}}$ - Direktstrahlung auf die Südfassade [W/m^2]
- $I_{\text{diff_S}}$ - Diffusstrahlung auf die Südfassade [W/m^2]
- E_{out} - Außenbeleuchtungsstärke (auf unverschatteter, horizontaler Ebene) [klx]

Abbildung 13-1: Tagesprofile der solaren Einstrahlung auf die Südfassade sowie Außenbeleuchtungsstärke auf die Horizontale in Stuttgart an repräsentativen Tagen gemäß TMY-Wetterdatensatz

14. Verzeichnisse

14.1 Bezeichnungen und Symbole

Folgende Bezeichnungen werden im Rahmen dieser Arbeit verwendet. Davon abweichende oder ergänzende Definitionen bzw. hier nicht aufgeführte Bezeichnungen werden im Text erläutert.

Akronyme

BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology (Gebäudezertifizierungssystem)
CICS	Constant Illuminance Control Strategy
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl im Heizmodus)
DA	Daylight Autonomy (Tageslichtautonomie)
DF	Daylight Factor (Tageslichtquotient)
DGI	Daylight Glare Index
DGP	Daylight Glare Probability (Blendungswahrscheinlichkeit)
DHCS	Daylight Harvesting Control Strategy
DP	Daylight provision (Tageslichtversorgung)
EER	European Energy Ratio (Leistungszahl bei Vollastbedingungen im Kühlmodus)
ESEER	European Seasonal Energy Efficiency Ratio (Leistungszahl bei Teillastbedingungen im Kühlmodus)
EVA	Ethylen-Vinylacetat
GP	Glare protection (Blendschutz)
grad	Gradient
IEQ	Indoor Environmental Quality
JAZ	Jahresarbeitszahl einer Wärmepumpe
JNB	Jährliche Nutzbelichtung
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory
LCD	Liquid crystal display (Flüssigkristallbildschirm)
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design (Gebäudezertifizierungssystem)
MTN(-Zelle)	Modified twisted nematic (modifizierte verdrillt nematische (Zelle))
NIR	Nahinfrarot
OSB	Oriented strand board (Grobspanplatte)
PD	Prozentsatz Unzufriedener aufgrund lokaler Unbehaglichkeit

PDLC	Polymer-Dispersed Liquid Crystal
PMV	Predicted Mean Vote (vorausgesagtes mittleres Votum)
POCS	Predicted Occupancy Control Strategy
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied (Prozentsatz Unzufriedener)
PVC	Polyvinylchlorid
ROCS	Real Occupancy Control Strategy
SF	Shading Factor (Verschattungsfaktor)
SPD	Suspended-Particle-Device
TMY	Typical meteorological year
TN(-Zelle)	Twisted nematic (verdrillt nematische (Zelle))
TPU	Thermoplastisches Polyurethan
TQ	Tageslichtquotient (auch: daylight factor)
UDI	Useful daylight illuminance (nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke)
UGR	Unified Glare Rating
UV	Ultraviolett

Lateinische Buchstaben

A	Fläche
c, h	Gleichheitsnebenbedingungen bzw. Ungleichheitsnebenbedingungen eines Optimierungsproblems
e	Regelabweichung
E	Beleuchtungsstärke
E_v	Vertikale Beleuchtungsstärke
E_{wp}	Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche
f	Zielfunktion bei der Optimierung
g-Wert	Gesamtenergiedurchlassgrad
I	Bestrahlungsstärke
I_{diff}	Diffusstrahlungsstärke
I_{dir}	Direktstrahlungsstärke
I_{glob}	Globalstrahlungsstärke
K_p	Proportionalitätsfaktor
L	Leuchtdichte
L_b	Hintergrundleuchtdichte
L_s	Quellenleuchtdichte
P	Positionsindex
Q	Endenergiebedarf
s	Schaltstufe der Verglasung
S	Selektivität
S_λ	Relative spektrale Globalstrahlungsflussverteilung
t	Zeit
T	Temperatur
T_{in}	Innentemperatur (Raumlufttemperatur)
$T_{meanrad}$	Mittlere Strahlungstemperatur der Raumumschließungsflächen
T_{op}	Operative Temperatur
T_{out}	Außentemperatur

ΔT_{pr}	Asymmetrische Strahlungstemperatur
T_{win}	Oberflächentemperatur der Verglasung (der Innenscheibe)
u	Stellgröße bei der Regelung
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
U(s)	Nutzwertfunktion bei der Optimierung
V	Hellempfindlichkeitsgrad für phototopisches Sehen
w	Gewichtungsfaktor
x	Vektor der Optimierungsvariablen
y	Regelgröße

Griechische Buchstaben

α	Absorptionsgrad
β	Einfallswinkel / Abstrahlwinkel des Lichtstrahls
ε	Emissivität
λ	Wellenlänge
ρ	Reflexionsgrad
τ	Transmissionsgrad
ϕ_i	Lichtstrom in die Abstrahlrichtung
ω	Raumwinkel

Indizes

max	Maximalwert
min	Minimalwert
off	Ausgeschaltet (Zustand maximaler Transmission)
on	Eingeschaltet (Zustand minimaler Transmission)
sol	Wellenlängenbereich des Solarspektrums von 300 nm – 2500 nm
soll	Sollwert (Führungsgröße bei der Regelung)
vis	Sichtbarer Wellenlängenbereich (380 nm – 780 nm)

14.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Darstellung der Inhalte der nachfolgenden Kapitel.....	3
Abbildung 2-1:	Inhaltsübersicht - Kapitel 2.....	5
Abbildung 2-2:	Paradigmenwechsel in der Fassadenwahrnehmung. Links: traditionelles Grassodenhaus, Island, Phot. M. Husser, rechts: Farnsworth House, Mies van der Rohe, Illinois, 1950/51, Phot.: M. Hemmerling, ILEK.	7
Abbildung 2-3:	Schutz- und Versorgungsfunktionen der Gebäudehülle und deren Wechselwirkungen	7
Abbildung 2-4:	Erweiterte systematische Darstellung von Behaglichkeitsfaktoren auf der Grundlage von Hegger u.a. [4]. Grün: beeinflussbar durch Variabilität der Eigenschaften der untersuchten adaptiven Verglasung. Grau: durch die Verglasungen nicht beeinflussbare nutzungsspezifische Parameter, die jedoch zur Anwendbarkeitsevaluierung herangezogen werden können.....	10
Abbildung 2-5:	Fanger'sche Behaglichkeitsdiagramme [7]	21
Abbildung 2-7:	Zusammenhang thermischer und visueller Komfortparameter bei der Beurteilung der Zufriedenheit mit der Innenraumumgebung nach Wong et al. [80].....	24
Abbildung 2-8:	Zufriedenheit mit operativer Temperatur in Abhängigkeit der Beleuchtungsstärke nach Huang et al. [81]	25
Abbildung 2-9:	Gewichtungsfaktoren für thermische, visuelle, akustische und olfaktorische Komfortaspekte gemäß Literaturrecherche	27
Abbildung 2-10:	Mittelwerte aus den recherchierten Gewichtungsfaktoren für den thermischen und den visuellen Komfort	28
Abbildung 3-1:	Inhaltsübersicht - Kapitel 3.....	29
Abbildung 3-2:	TN-Zelle mit externen Polarisatoren (Rendering: D. Meurer, ILEK)	33
Abbildung 3-3:	Prototypen schaltbarer Zellen. Links: erste MTN-Zellen mit internen Polarisatoren (Phot. G. Metzger, ILEK, Juli 2009), Mitte: MTN-Zelle mit internen Polarisatoren in einem Isolierglasaufbau, ausgestattet mit Thermoelementen für Versuche im Sonnensimulator (Phot. G. Metzger, ILEK, Februar 2011), rechts: die in der vorliegenden Arbeit betrachtete, bereichsweise schaltbare TN-Zelle mit externen Polarisatoren (Phot. G. Metzger, ILEK, Dezember 2015).	33

Abbildung 3-4:	Ausschnitt eines schaltbaren TN-Moduls (Typ i ³) mit Darstellung einiger Bildpunkte	34
Abbildung 3-5:	Gemessene normal-normale spektrale Transmission einer TN-Zelle (TN-Moduls), jeweils im Zustand maximaler Transmission (off) und im Zustand minimaler Transmission (on) (vgl. [99]).....	37
Abbildung 3-6:	Kontrastdiagramm einer TN-Zelle (Datenquelle: BMG MIS, Messung am Bildpunkt). Theta-Winkel: Winkel zur Flächennormalen (Zenitwinkel), Phi-Winkel: Azimutwinkel (vgl. Abbildung 3-8).	39
Abbildung 3-7:	Gemessene direkt-hemisphärische Lichttransmission einer TN-Zelle (gemessen am Bildpunkt mit Ulbrichtkugel im Bereich 0° - 65°) für drei Schaltzustände, in Abhängigkeit des Zenitwinkels (beim Azimutwinkel = 0°), im Vergleich mit zwei beispielhaften Floatglasscheiben (unbeschichtet: Eurofloat 3 mm und beschichtet: Selekt Bronze 8 mm) mit für Glas charakteristischen Winkelabhängigkeitsverläufen der Transmission (Quelle: IGDB Glasdatenbank)	40
Abbildung 3-8:	Schematische Darstellung des Strahlungseinfallswinkels auf die Südfassade	40
Abbildung 3-9:	Schaltcharakteristik der TN-Module (Typ i ³): gemessen am Bildpunkt, Schalhub unterteilt in 16 Schaltstufen.....	42
Abbildung 3-10:	Schaltcharakteristik der TN-Module (Typ i ³): berechnete, gewichtete Modulwerte (mit Berücksichtigung der Pixelfläche und der Pixelzwischenräume), Schalhub unterteilt für Simulationszwecke in 11 Schaltstufen.	42
Abbildung 3-11:	Integrationsmöglichkeiten schaltbarer Zellen in eine Isolierverglasung	44
Abbildung 3-12:	Schematische Darstellung der Isolierglasvarianten mit integrierten schaltbaren Zellen. Für jeden der Aufbauten wurden mehrere Beschichtungstypen verschiedener Hersteller eingesetzt und simuliert. Umrandete Aufbauten wurden für die Messungen des thermischen Verhaltens (Kapitel 3.2.2.5) verwendet.....	44
Abbildung 3-13:	Gesamtenergiedurchlassgrad und Lichttransmission der schaltbaren TN-Verglasung (Aufbau i ³) und einiger herkömmlicher Verglasungen	47
Abbildung 3-14:	Simulierte Temperaturverläufe untersuchter Isoliergläser: einer schaltbaren MTN-Verglasung (Aufbau 30434a), einer TN-Verglasung (Aufbau i ³) und vier Referenzverglasungen (*Bei Zweifachverglasungen sind Pos. 1-4 zusammenzufassen (Außenscheibe))	50

Abbildung 3-15: Gemessene Temperaturverläufe (*Bei Zweifachverglasungen sind Pos. 1-4 zusammenzufassen (Außenscheibe))	50
Abbildung 3-17: Schaltcharakteristik der TN-Verglasung (Aufbau i ³), flächengewichtete Verglasungswerte τ_{vis} , τ_{sol} und g-Wert (incl. Pixel und Pixelzwischenräume), für den in 11 Schaltstufen unterteilten Schalhub, berechnet mit Window 7. Die Lichttransmissionswerte der zugehörigen 16 Schaltstufen der im Fassadenprüfstand eingebauten Verglasung (τ_{vis} (FP)) wurden zum Vergleich in Grau eingetragen.....	52
Abbildung 3-18: Fotodokumentation der Schaltzustände (Phot.: G. Metzger ILEK)	54
Abbildung 3-19: Adaptive Fassade als Ausdruck der Evolution der Gebäudehülle von der Additivität zur Multifunktionalität und Flexibilität.....	56
Abbildung 4-1: Südfassade des Fassadenprüfstands mit eingebauter TN-Verglasung des Typs 2 / i ³ im Testraum 0.1 (sowie TN-Verglasung Typ 1 im Raum 0.2, elektrochrome Verglasungen in Räumen 1.1 und 1.2, statische Zweifach-Referenzverglasung in der Technikzone 0.3 und 1.3). Phot.: G. Metzger ILEK.....	59
Abbildung 4-2: Messtechnische Ausstattung des Fassadentestgebäudes. Testraum 0.1. Schematische Darstellung.....	61
Abbildung 5-1: Inhaltsübersicht – Kapitel 5.....	63
Abbildung 5-2: Simulationsstrategie mit Verknüpfung lichttechnischer und energetischer Simulationswerkzeuge.....	65
Abbildung 5-3: Lage der gewählten repräsentativen Orte im Bezug auf Köppen-Geiger-Klimazonen (nach [129], überarbeitet)	67
Abbildung 5-4: Darstellung relevanter Sensorpunkte des Testraums im Simulationsmodell im Bezug auf die Nutzerposition. Oben: Längsschnitt, unten: Grundriss.	70
Abbildung 5-5: Verglasungen für den Vergleich der Raumenergiebedarfe. Aufbau jeweils von außen nach innen. Die Eigenschaften der TN-Verglasung aufgetragen für den maximal abgedunkelten (on) und den maximal aufgehellten (off) Zustand, die Eigenschaften der Referenzverglasungen mit Jalousie – für Jalousie vollständig geschlossen (Shading Factor / SF 1) („on“) und Jalousie hochgefahren („off“), berechnet mit Window 7, NFRC-Randbedingungen.....	72
Abbildung 6-1: Inhaltsübersicht – Kapitel 6.....	74

Abbildung 6-2: Vergleich der Strahlungscharakteristik und der Temperaturentwicklung für zwei Extremzustände der TN-Verglasung an einem warmen, sonnigen Sommertag (Simulation unter TMY-Wetterbedingungen)	80
Abbildung 6-3: Jahresanalyse der möglichen Innenraumtemperaturänderung ΔT aufgrund des Schaltvorgangs der TN-Verglasung zwischen Abdunklungsstufen 0 und 10. Stundenwerte der Temperaturdifferenz, simuliert unter instationären Bedingungen in Stuttgart (TMY-Wetterdaten).....	83
Abbildung 6-4: Mögliche Innenraumtemperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs der TN-Verglasung an einem sonnigen Sommertag 26.06. in Abhängigkeit von der Schaltdauer der Verglasung, simuliert unter instationären Bedingungen in Stuttgart (TMY-Wetterdaten).....	83
Abbildung 6-5: Strahlungscharakteristika sowie gemessene und simulierte Temperaturverläufe an überwiegend sonnigen Tagen 30.05.2018 (TN-Verglasung im Zustand maximaler Transmission) und 06.06.2018 (TN-Verglasung im Zustand minimaler Transmission)	85
Abbildung 6-6: Relativer Innentemperaturanstieg im Tagesverlauf im Bezug auf 9:00 Uhr und berechnete Temperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs (ΔT). Links: Messung, rechts: Simulation.....	86
Abbildung 6-7: Jahresanalyse der möglichen Innenraumtemperaturänderung aufgrund des Schaltvorgangs bei einem hohen g-Wert-Schalhub, simuliert unter instationären Bedingungen in Stuttgart (TMY-Wetterdaten) am Beispiel einer elektrochromen Verglasung mit g-Wert-Schalhub = 0,26 (bei $g_{\max} = 0,33$ und $g_{\min} = 0,07$)	87
Abbildung 6-8: Analyse des Schutzpotentials der TN-Verglasung hinsichtlich der lokalen thermischen Unbehaglichkeit aufgrund direkter Solarstrahlung auf der Grundlage der Strahlungstransmission τ_{sol} nach DIN EN 14501 [16] (zulässige maximale Strahlungstransmissionswerte für sehr hohen, hohen und mäßigen Schutz gestrichelt aufgetragen). Die Strahlungstransmissionswerte der TN-Verglasung beispielhaft für drei Schaltzustände dargestellt: max. Transmission (0), min. Transmission (10) und Schaltstufe 8 (Verglasung zu 80 % abgedunkelt) (8).	89
Abbildung 6-9: Simulationsbasierte Analyse der PVM-Werte während der Arbeitszeiten im Jahresverlauf in Stuttgart für Extremzustände der TN-Verglasung: A 0 – Zustand maximaler Transmission, A 10 – Zustand minimaler Transmission, ohne Unterstützung durch das Konditionierungssystem	91

Abbildung 6-10: Simulationsbasierte Analyse der PVM-Werte während der Arbeitszeiten im Jahresverlauf in Stuttgart für Extremzustände der TN-Verglasung: A 0 – Zustand maximaler Transmission, A 10 – Zustand minimaler Transmission. Heizsollwert: 20 °C, Kühlsollwert: 26 °C.	91
Abbildung 6-11: Simulationsbasierte Analyse der PVM-Werte während der Arbeitszeiten im Jahresverlauf in Stuttgart, TN-Verglasung im Zustand minimaler Transmission (A 10), Bekleidungsfaktor variabel (1 clo ± 0,5 clo).....	92
Abbildung 6-12: Simulationsbasierter Vergleich sommerlicher PVM-Werte während der Arbeitszeiten in Stuttgart für Extremzustände der TN-Verglasung: A 0 – Zustand maximaler Transmission, A 10 – Zustand minimaler Transmission und der Dreifachreferenzverglasung D. Heizsollwert: 20 °C, Kühlsollwert: 26 °C.	92
Abbildung 6-13: Simulierte Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche in Abhängigkeit von der Außenbeleuchtungsstärke und dem Schaltzustand der Verglasung, Simulationsbedingungen nach Tabelle 5-2.....	94
Abbildung 6-14: Gemessene (links) und simulierte (rechts) Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche E_{wp} in Abhängigkeit vom Schaltzustand der Verglasung, am überwiegend sonnigen Tag 18.10.2017.	95
Abbildung 6-15: Links: Tageslichtautonomie DA, rechts: Nutzbare Tageslichtbeleuchtungsstärke UDI, Grenzwerte der Beleuchtungsstärke $E_{min} = 500$ lx, $E_{max} = 2500$ lx. Vergleich der TN-Verglasung A in extremen Schaltzuständen (maximale Abdunklung A 10, minimale Abdunklung A 0) mit der Dreifachreferenzverglasung D.	96
Abbildung 6-16: Arbeitsplatzkonfigurationen mit Zuordnung der Helligkeitsbereiche zur Analyse der Leuchtdichtekontraste: Konfiguration a entsprechend dem im Kapitel 5.2.2 vorgestellten Nutzungsszenario, zzgl. zwei weiterer für Büroräume typischer Konfigurationen b und c.	97
Abbildung 6-17: Schematische Darstellung der Helligkeitsbereiche 1 – 5 für die Berechnung der Leuchtdichtekontraste am Beispiel der Arbeitsplatzkonfiguration a (Auswahl der Bereiche gem. Kapitel 2.3.2.3).....	98
Abbildung 6-18: Angewendete Verschattungsmuster zur situationsbedingter Verschattung der Arbeitsaufgabe (schematische Darstellung).....	98
Abbildung 6-19: Ergebnisse der DGP-Berechnung für die Referenzverglasung B im Raum 1.3 und für die die TN-Verglasung im Raum 0.1 bei unterschiedlichen Schalteinstellungen, Arbeitsplatzkonfiguration a. Oben: TN-Verglasung vollflächig abgedunkelt, Messung am 30.03.2018. Unten: TN-Verglasung bereichsweise	

abgedunkelt, Messung am 06.04.2018, jeweils um 12:30 Uhr (Muster „GP“ wurde an beiden Messtagen vermessen). Gestrichelt wurde jeweils der DGP-Grenzwert von 0,4 dargestellt (hohe Wahrscheinlichkeit störender Blendung). Dokumentation der Verschattungsmuster s. Anhang 2.	101
Abbildung 6-20: Nahaufnahme einer maximal abgedunkelten TN-Verglasung (i^3) zur Darstellung der winkelabhängigen Transparenz (Zunahme der Durchsicht in Randbereichen)	103
Abbildung 6-21: Visualisierung der Straffunktionen zur Bestimmung der visuellen und der thermischen Nebenbedingungen (Darstellung ohne die Multiplikation mit dem mit jeder Iteration steigenden Strafparameter i)	107
Abbildung 6-22: Das Prinzip der Pareto-Dominanz für ein Minimierungsproblem mit zwei Zielfunktionen f_1 und f_2 . Lösung a dominiert Lösung b , Pareto-Front P , bestehend aus dominanten Lösungen der gesamten Lösungsmenge, wurde durch Linienstärke hervorgehoben.	108
Abbildung 6-23: Links: Raumtemperatur T_{in} und Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche E_{wp} an drei beispielhaften Tagen jeweils für 12:00 Uhr, 14:00 Uhr und 16 Uhr. Die einzelnen Punkte stellen jeweils den diskretisierten Entwurfsraum dar (Entwurfsvariablen: Menge von 11 Abdunklungsstufen 0 - 10). Rechts: Zielfunktionsdiagramme für die ausgewählten Tage, Pareto-Fronten mit Lösungen, die visuelle Nebenbedingungen erfüllen, wurden durch Linienstärke hervorgehoben.	109
Abbildung 6-24: Ergebnisse der Optimierung für repräsentative Wetterbedingungen. Stationärer Zustand, keine Heizung / Kühlung.	112
Abbildung 6-25: Ergebnisse der Multiparameteroptimierung für Wetterbedingungen des bewölkten Frühlingstags. Keine Heizung / Kühlung.	114
Abbildung 6-26: Außentemperatur (T_{out}) sowie simulierte Innentemperatur (T_{in}) und Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche (E_{wp}) am 28.03 (TMY-Wetterbedingungen für Stuttgart) beim Zustand maximaler Transmission der Verglasung (Stufe 0) und beim Zustand minimaler Transmission der Verglasung (Stufe 10). Innentemperaturverläufe jeweils ohne Konditionierungssystem (ohne Kond.) und mit eingeschalteter Heizung / Kühlung (mit Kond.), Heizsollwert: 20 °C, Kühlsollwert: 26 °C.	118
Abbildung 6-27: Links: Energiebedarf des Testraums für Heizung, Kühlung und Beleuchtung für beide Extremschaltzustände der Verglasung (0 und 10) am 28.03. Rechts: Strombedarf der Konditionierungsanlagen (Heizung, Kühlung) am Beispiel einer reversiblen Wärmepumpe mit COP = 4,76, EER = 3,66, LED-Beleuchtung (Bel.) und TN-Verglasung (TN) am 28.03.	118

Abbildung 6-28: Simulierter Temperaturverlauf am Nachmittag des 28.03 (TMY-Wetterbedingungen für Stuttgart) in vier Fällen: Verglasung im Zustand maximaler Transmission (Stufe 0, T_{in_0}), im Zustand minimaler Transmission (Stufe 10, T_{in_10}), jeweils mit eingeschalteter Konditionierung (Kühlung) (mit Kond.) und ohne Kühlung (ohne Kond.). Links: Absolutwerte, rechts: Relative Temperaturänderung im Bezug auf die Temperatur um 12:00 Uhr.....	121
Abbildung 6-29: Simulierte Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche am Nachmittag des 28.03 (TMY-Wetterbedingungen für Stuttgart) beim Zustand maximaler Transmission (Stufe 0, E_{wp_0}) und beim Zustand minimaler Transmission (Stufe 10, E_{wp_10}) der Verglasung	121
Abbildung 7-1: Inhaltsübersicht – Kapitel 7.....	123
Abbildung 7-2: Unterteilung der Verglasungsfläche in zwei Funktionsbereiche. Rendering: V. Kalaydzhieva, ILEK, überarbeitet.	130
Abbildung 7-3: Unterteilung der Verglasungsfläche in zwei Funktionsbereiche. Aufnahmen aus dem Innenraum des Fassadentestgebäudes im Tagesverlauf. Phot.: G. Metzger, ILEK.	131
Abbildung 7-4: Steuerung der Schaltvorgänge nach Bestrahlungsstärke. Links (a.): mit einem Schwellenwert der Bestrahlungsstärke. Rechts (b.): mit zwei Schwellenwerten. τ_{max} : Lichttransmission der Verglasung im hellen Zustand, τ_{min} : Lichttransmission im vollständig verdunkelten Zustand. I_{gmin} und I_{gmax} : Schwellenwerte der Bestrahlungsstärke auf die Verglasungsoberfläche.....	133
Abbildung 7-5: Wirkungsplan mit typischen Elementen eines elementaren Regelungssystems (in Anlehnung an DIN IEC 60050-351 [175]).....	134
Abbildung 7-6: Wirkungsplan mit typischen Elementen eines elementaren Steuerungssystems (in Anlehnung an DIN IEC 60050-351 [175])	134
Abbildung 7-7: Übersicht der entwickelten Ansteuerungsstrategien (R – Regelung, S – Steuerung)	135
Abbildung 7-8: Temperaturbasierte Abdunklung bei Unterteilung des Schaltbereichs in 10 Stufen, bei $T_{min} = 20\text{ °C}$, $T_{max} = 26\text{ °C}$ (rot: Heizungsbereich, blau: Kühlungsbereich)	136
Abbildung 7-9: Bestrahlungsstärkebasierte stufenweise Abdunklung bei Unterteilung des Schaltbereichs in 10 Stufen, bei $I_{min} = 150\text{ W/m}^2$, $I_{max} = 400\text{ W/m}^2$...	137

Abbildung 7-10: Links: Jahresverläufe der Direkt- (a.), Diffus- (b.) und Globalstrahlung (c.) auf die Südfassade in Stuttgart nach TMY-Wetterbedingungen. Rechts (d.): Konditionierungsenergiebedarf des simulierten Testraums im Jahresverlauf (Fassadenprüfstand Stuttgart, Verglasung im Zustand maximaler Transmission).	138
Abbildung 7-11: Regelungskonzept V, schematische Darstellung der betrachteten Fälle in Abhängigkeit vom Gradienten der Diffusstrahlungsstärke auf die Fassadenoberfläche ($\text{Grad } I_{\text{diff}}$).....	140
Abbildung 7-12: Wirkungsplan des erstellten Modells mit zwei Regelgrößen	141
Abbildung 7-13: Plausibilitätsanalyse des Reglerentwurfs: Vergleich der Simulationsergebnisse für repräsentative Außenbedingungen beim Einsatz des P-Reglers (links, $K_{p1}=-2,5$, $K_{p2}=-0,0004$, Gewichtung 1 : 1) und des Optimierungsalgorithmus (rechts, Gewichtung 1 : 1). Simulation ohne Heizung und Kühlung, $T_{\text{soll}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, $E_{\text{soll}} = 1200 \text{ lx}$	144
Abbildung 8-1: Tagesanalyse sonniger Sommertag, konstante Abdunklung	146
Abbildung 8-2: Tagesanalyse sonniger Sommertag, Strategien I (links) und II (rechts)	147
Abbildung 8-3: Tagesanalyse sonniger Sommertag, Strategien III (links) und IV (rechts)	148
Abbildung 8-4: Tagesanalyse sonniger Sommertag, Strategien V (links) und VI (rechts)	149
Abbildung 8-5: Tagesanalyse sonniger Sommertag, Strategien VII (links) und VII* (rechts)	150
Abbildung 8-6: Tagesanalyse wechselhafter Frühlingstag, dargestellt für Strategie III. Die GP-Zone (lila) wird durch die direkte Einstrahlung auf die Fassade aktiviert und bietet einen zusätzlichen Blendschutz an der Nutzerposition.	152
Abbildung 8-7: Tagesanalyse bewölkter Frühlingstag, dargestellt beispielhaft für Strategie III (links) und Strategie VI (rechts). Beleuchtungsstärkeverlauf um 13:00 Uhr in Abhängigkeit von der Raumtiefe (unten) identisch für beide Strategien.	153
Abbildung 8-8: Messtechnische Tagesanalyse sonnige Wintertage, dargestellt für Strategie III (links) und Strategie IV (rechts).....	155
Abbildung 8-9: Messtechnische Tagesanalyse sonniger Wintertag. Temperaturverlauf beim Einsatz der Strategie III (vgl. auch Abbildung 8-8 links). In Grün wurde die Differenz zwischen der Vorlauf- und der Rücklauftemperatur der	

Kapillarrohrmatten aufgetragen (erhöhte Temperaturdifferenzen bedeuten Heizvorgänge).	156
Abbildung 8-10: Messtechnische Tagesanalyse sonniger Herbsttag. Strahlungscharakteristik, Abdunklungs- und Temperaturverläufe beim Einsatz der Strategie I.	157
Abbildung 8-11: Messtechnische Tagesanalyse sonniger Wintertag (links) und bewölkter Wintertag (rechts). Strahlungscharakteristik, Abdunklungs- und Tageslichtbeleuchtungsstärkeverläufe beim Einsatz der Strategie IV.	159
Abbildung 8-12: Abdunklungshäufigkeiten des Tageslichtversorgungs- (DP) und des Blendschutzbereichs (GP) der Verglasung während der Büroarbeitszeiten im Jahr, Strategie I	161
Abbildung 8-13: Links (a.): Abdunklungshäufigkeiten des Tageslichtversorgungsbereichs (DP) während der Büroarbeitszeiten im Jahr, Strategie IV ($I_{\min} = 150 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$). Rechts (b.): Visualisierung der starken Abhängigkeit der Abdunklungshäufigkeiten von Strahlungsgrenzwerten am Beispiel von Valencia, Abdunklungshäufigkeiten bei veränderten Strahlungsgrenzwerten ($I_{\min} = 50 \text{ W/m}^2$, $I_{\max} = 400 \text{ W/m}^2$).	161
Abbildung 8-14: Helligkeitsanalyse: Tageslichtautonomie (Grenzwert der Beleuchtungsstärke $E_{\min} = 500 \text{ lx}$). Vergleich der TN-Verglasung A mit Referenzverglasungen D und E (Jalousie perfekt schließend (SF 1)).	164
Abbildung 8-15: Helligkeitsanalyse: UDI (Grenzwerte der Beleuchtungsstärke $E_{\min} = 500 \text{ lx}$, $E_{\max} = 2500 \text{ lx}$). Vergleich der TN-Verglasung A mit Referenzverglasungen D und E (Jalousie perfekt schließend (SF 1)).	164
Abbildung 8-16: Anzahl der Jahresbetriebsstunden mit hohen Blendungswahrscheinlichkeiten berechnet für Stuttgart, Helsinki, Valencia und Accra	166
Abbildung 8-17: Vergleich der Strombedarfe der Kühl- und Heizungsanlagen in Abhängigkeit von der jeweiligen Leistungszahl, dargestellt beispielhaft für den Modellraum mit einer nach der Strategie IV angesteuerten TN-Verglasung (A IV) und die Referenzverglasung D, jeweils für den Kühlsollwert von $26 \text{ }^\circ\text{C}$, Stuttgart.....	168
Abbildung 8-18: Vergleich der Raumenergiebedarfe für unterschiedliche Strahlungsgrenzwerte der Jalousiensteuerung ($I_{\min} - I_{\max}$) = (50 - 150), (150 - 150), ... in W/m^2 am Beispiel der Verglasung C in Stuttgart, Jalousien perfekt schließend (SF 1). 170	170

Abbildung 8-19: Vergleich der Raumenergiebedarfe bei unterschiedlichen Verschattungsfaktoren der Jalousie SF (Shading Factor, zwischen 0 und 1) am Beispiel der Verglasungen C und E in Stuttgart	170
Abbildung 8-20: Vergleich der Raumenergiebedarfe bei Kühlsollwerten (26) °C und (28) °C in Stuttgart	171
Abbildung 8-21: Vergleich der Raumenergiebedarfe ohne (unten) und mit (oben) internen Wärmegewinnen (intG), dargestellt für die Fassadensysteme: A (angesteuert nach der Strategie II), B, C	172
Abbildung 8-22: Energiebedarfsanalyse für den Fassadenprüfstand in Stuttgart. Ansteuerung der TN-Verglasung nach den Strategien I bis VII*, verglichen mit den Zuständen maximaler Transparenz (A 0) und maximaler Abdunklung (A 10). Für Strategien I, II, IV wurden zum Vergleich die Ergebnisse mit zwei unterschiedliche Kühlsollwert-Einstellungen aufgetragen (unten: 26 °C, oben: 28 °C).....	173
Abbildung 8-23: Prozentuale Abweichungen der Heiz-, Kühl- und Beleuchtungsenergiebedarfe bei den untersuchten Regelungsstrategien vom jeweiligen Minimum	174
Abbildung 8-24: Energiebedarfsanalyse für den Fassadenprüfstand für Stuttgart .	176
Abbildung 8-25: Vergleich der Jahresenergiebedarfe des Testraums mit der TN-Verglasung A, einer kommerziell verfügbaren elektrochromen Verglasung mit einem hohen g-Wert-Schalhub EC (jeweils angesteuert nach der Strategie IV) und der Referenzverglasung D in Stuttgart.	177
Abbildung 8-26: Energiebedarfsanalyse für den Fassadenprüfstand für Helsinki...	178
Abbildung 8-27: Energiebedarfsanalyse für den Fassadenprüfstand für Valencia ..	179
Abbildung 8-28: Energiebedarfsanalyse für den Fassadenprüfstand für Accra	179
Abbildung 10-1: Ansichten des Fassadentestgebäudes (ohne Maßstab)	185
Abbildung 10-2: Grundrisse des Fassadentestgebäudes (o. M.). Oben: Erdgeschoss, unten: Obergeschoss.....	186
Abbildung 10-3: Schnitt A-A des Fassadentestgebäudes (o. M.)	187
Abbildung 10-4: Hydraulikschema des Konditionierungssystems (o.M.)	187
Abbildung 11-1: Schematische Darstellung der analysierten Verschattungsmuster, jeweils für die Verglasungsfläche (6 x 9 TN-Module) gesehen vom Innenraum. Für Muster	

„Bild 5b“ sind zusätzlich die zugehörigen Aufnahmen mit der Leuchtdichtekamera dargestellt.	189
Abbildung 11-2: Blendungsanalyse am sonnigen Frühlingstag 30.03.2018. Aufnahmen mit Blendzahl F/8, Belichtungszeit 1/125 Sek., ISO 100.	190
Abbildung 11-3: Blendungsanalyse am sonnigen Frühlingstag 30.03.2018. Leuchtdichtebilder.	191
Abbildung 12-1: Strategie I, detaillierte Darstellung	193
Abbildung 12-2: Strategie II, detaillierte Darstellung	194
Abbildung 12-3: Strategie III, detaillierte Darstellung	195
Abbildung 12-4: Strategie IV, detaillierte Darstellung	196
Abbildung 12-5: Strategie V, detaillierte Darstellung	198
Abbildung 12-6: Strategie VI, detaillierte Darstellung	200
Abbildung 13-1: Tagesprofile der solaren Einstrahlung auf die Südfassade sowie Außenbeleuchtungsstärke auf die Horizontale in Stuttgart an repräsentativen Tagen gemäß TMY-Wetterdatensatz	201

14.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Klassifizierung der Sonnenschutzsysteme auf der Basis des senkrecht-senkrechten Strahlungstransmissionsgrads des Sonnenschutzes (in Verbindung mit der Verglasung) hinsichtlich der Auswirkung auf den thermischen Komfort nach DIN EN 14501 [14].....	14
Tabelle 2-2: Statistische Interpretation des DGP-Werts nach Wienold und Christoffersen [56] (95 % Konfidenzintervall).....	20
Tabelle 2-3: Übersicht der Studienergebnisse zu zulässigen und optimalen Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsfläche (Werte gerundet)	23
Tabelle 3-1: Mittelwerte der Transmission, Reflexion und Absorption der untersuchten schaltbaren Zelle (TN-Modul des Typs i ³)	37
Tabelle 3-2: Untersuchung des thermischen Verhaltens schaltbarer Verglasungen. Übersicht der Testaufbauten (Aufbau jeweils von außen nach innen). ...	49

Tabelle 3-3:	Zusammenfassung thermischer und optischer Eigenschaften der betrachteten Verglasung mit integrierter schaltbarer Zelle (berechnet mit Window 7, NFRC-Randbedingungen nach ISO 15099).....	53
Tabelle 4-1:	Wand- und Deckenaufbauten des Fassadentestgebäudes mit zugehörigen U-Werten (U-Wert-Berechnung: Herstellerangaben RubnerHaus AG – S.p.A)	60
Tabelle 5-1:	Übersicht und Lage der gewählten repräsentativen Orte	67
Tabelle 5-2:	Repräsentative Wetterbedingungen für Stuttgart (TMY-Referenzjahr)	68
Tabelle 6-1:	Leuchtdichtekontraste. Konfiguration a: Blickpunkt 1,2 m hinter der Fassade, Blickrichtung Süden (Sonnenscheibe im Blickfeld). Konfiguration b: Blickpunkt 2,2 m hinter der Fassade, Blickrichtung Süden (Sonnenscheibe nicht im Blickfeld). Konfiguration c: Blickpunkt 1,0 m hinter der Fassade, Blickrichtung Westen (Sonnenscheibe nicht im Blickfeld).....	99
Tabelle 6-2:	Vergleichende Analyse der mit repräsentativen Verglasungssystemen erreichbaren Sichtverbindung	102
Tabelle 6-3:	Vergleich der Leistungsaufnahme und der Tagesenergiebedarfe des simulierten Testraums an einem sonnigen Frühlingstag 28.03. (TMY-Wetterbedingungen für Stuttgart) bei der Annahme: COP = 4,76, EER = 3,66, LED-Beleuchtung	119
Tabelle 8-1:	Links: Gesamtzahl der Jahresstunden mit sehr guten PMV-Werten, berechnet für Arbeitszeiten, für Referenzverglasungen D und E und drei Ansteuerungsvarianten der TN-Verglasung. Heizung aktiv bei $T_{in} \leq 20$ °C, Kühlung aktiv bei $T_{in} \geq 26$ °C, Jalousie E angesteuert nach Solarstrahlung ($I_{min}=150$ W/m ² , $I_{max}=400$ W/m ²), perfekt schließend. Rechts: prozentuelle Erhöhung dieser Stundenanzahl durch den Einsatz der nach der Strategie IV angesteuerten TN-Verglasung.....	162
Tabelle 8-2:	Gesamtzahl der Jahresstunden mit sehr guter Ausleuchtung der Arbeitsfläche ausschließlich durch das Tageslicht, berechnet für Arbeitszeiten, für Referenzverglasungen D und E und drei Ansteuerungsvarianten der TN-Verglasung. Heizung aktiv bei $T_{in} \leq 20$ °C, Kühlung aktiv bei $T_{in} \geq 26$ °C, Jalousie E angesteuert nach Solarstrahlung ($I_{min}=150$ W/m ² , $I_{max}=400$ W/m ²), perfekt schließend.....	165

14.4 Literatur

- [1] Fitch, J. M.: The environmental forces that shape it. American building, / by James Marston Fitch ; 2. Houghton Mifflin, Boston, Mass., 1972.
- [2] Addington, M.: Contingent Behaviours. Architectural Design 79 (2009), Heft 3, S. 12–17.
- [3] Herzog, T.; Krippner, R.; Lang, W. X.: Fassaden Atlas. Birkhäuser Verlag, Basel, 2013.
- [4] Hegger, M.: Energie-Atlas. nachhaltige Architektur. Birkhäuser, Basel, Berlin[u.a.], 2008.
- [5] 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), 2006.
- [6] Schettler-Köhler, H.-P.; Lawrenz, H.-P.: Energieeinsparung contra Behaglichkeit? Forschungen 121 (2007).
- [7] Fanger, P. O.: Thermal Comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- [8] DIN EN 15251: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik (Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics), 2012.
- [9] DeDear, R.; Brager, G.; Cooper, D.: Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. Final report [on] ASHRAE RP-884. Macquarie Research Ltd, Sydney, 1997.
- [10] Nicol, J. F.; Humphreys, M. A.: Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. Energy and Buildings 34 (2002), Heft 6, S. 563–572.
- [11] Knaack, U.; Auer, T.; Bilow, M. et al.: Fassaden Prinzipien der Konstruktion. Birkhäuser Verlag AG, Basel, 2007.
- [12] Bernard, T.: Ein Beitrag zur gewichteten multikriteriellen Optimierung von Heizungs- und Lüftungsregelkreisen auf Grundlage des Fuzzy Decision Making. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2000.

-
- [13] Glück, B.: Dynamisches Raummodell zur wärmetechnischen und wärmephysiologischen Bewertung, 2004.
- [14] Gräff, B.: Gutachten über die thermische Behaglichkeit in Wohnräumen hinsichtlich elektrischer Heizflächen, 2006.
- [15] Schmid, C.: Heizung/Lüftung/Elektrizität. Energietechnik im Gebäude. Bau und Energie. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich, 2016.
- [16] DIN EN 14501: Abschlüsse - Thermischer und visueller Komfort - Leistungsanforderungen und Klassifizierung, 2006.
- [17] DIN EN 12464-1: Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen, 2011.
- [18] DIN EN 12665: Licht und Beleuchtung - Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung, 2016.
- [19] Farley, K. M. J.; Veitch, J. A.: A Room with a View. A Review of the Effects of Windows on Work and Well-Being. Institute for Research in Construction, National Research Council, Ottawa, Canada, 2001.
- [20] Daylight in Building Design. In: International Energy Agency (Hrsg.): Daylight in Buildings. A source Book in Daylighting Systems and Components. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 2000.
- [21] Andersen, M.; Mardaljevic, J.; Lockley, S. W.: A framework for predicting the non-visual effects of daylight – Part I. Photobiology-based model. Lighting Research and Technology 44 (2012), Heft 1, S. 37–53.
- [22] Baker, N.: We are all outdoor animals. 2000. http://www.fau.usp.br/aut5823/Conforto_Termico/Baker_2000_Plea_We_Are_All_Outdoor_Animals.pdf (Abruf: 14.03.2018).
- [23] Bellia, L.; Bisegna, F.; Spada, G.: Lighting in indoor environments. Visual and non-visual effects of light sources with different spectral power distributions. Building and Environment 46 (2011), Heft 10, S. 1984–1992.
- [24] Corrodi, M.; Spechtenhauser, K.; Auer, G. et al.: LichtEinfall. Tageslicht im Wohnbau. ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich; Birkhäuser, Zürich, Basel [etc.], 2008.

- [25] Hennings, D.: Das Optimieren zwischen Tageslicht und solarem Wärmeeintrag - eine zentrale Planungsaufgabe bei Büro- und Dienstleistungsgebäuden. In: 12. Int. Passivhaustagung Nürnberg April 2008.
- [26] Kim, S.-Y.; Kim, J.-J.: Influence of light fluctuation on occupant visual perception. *Building and Environment* 42 (2007), Heft 8, S. 2888–2899.
- [27] Mardaljevic, J.: Rethinking daylighting and compliance. *Journal of Sustainable Engineering Design* 1 (2013).
- [28] Pechacek, C. S.: Preliminary Method for Prospective Analysis of the Circadian Efficacy of (Day)Light with Applications to Healthcare Architecture. 2008.
- [29] Pechacek, C.: Space, light, and time. Prospective analysis of Circadian illumination for health-based daylighting with applications to healthcare architecture, 2014.
- [30] van Bommel, W. J.M.: Non-visual biological effect of lighting and the practical meaning for lighting for work. Special Issue: Meeting Diversity in *Ergonomics* 37 (2006), Heft 4, S. 461–466.
- [31] Webb, A. R.: Considerations for lighting in the built environment. Non-visual effects of light. *Energy and Buildings* 38 (2006), Heft 7, S. 721–727.
- [32] DIN 5034-3: Tageslicht in Innenräumen - Teil 3: Berechnung, 2007.
- [33] Kölzow, D.-P. C. V.; Kühn, J. V.: Licht - Einführung. In: Willems, W. (Hrsg.): *Lehrbuch der Bauphysik*, S. 555. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [34] Kölzow, D.-P. C. V.; Kühn, J. V.: Licht - Grundlagen. In: Willems, W. (Hrsg.): *Lehrbuch der Bauphysik*, S. 556–590. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [35] DGU: Tageslicht am Arbeitsplatz – leistungsfördernd und gesund. 2014.
- [36] Leather, P.; Pyrgas, M.; Di Beale et al.: Windows in the Workplace. Sunlight, View, and Occupational Stress. *Environment and Behavior* 30 (1998), Heft 6, S. 739–762.
- [37] Schuster, H.: Tageslichtsysteme im Spiegel der Nutzer, Universität Dortmund, 2006.
- [38] Reinhart, C.: Daylight performance predictions, in. *Building performance simulation for design and operation*. Spon Press, London, New York, 2011.
- [39] de Boer, J.: Tageslichtbeleuchtung und Kunstlichteinsatz in Verwaltungsbauten mit unterschiedlichen Fassaden. Dissertation, Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik, Stuttgart, 2004.

-
- [40] Reinhart, C. F.; Mardaljevic, J.; Rogers, Z.: Dynamic Daylight Performance Metrics for Sustainable Building Design. *Leukos* 3 no. 1 (2006), S. 7–31.
- [41] Husser, M.; Haase, W.: Adaptive Verglasungssysteme. Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien. Abschlussbericht. Universität Stuttgart, Stuttgart. Fraunhofer IRB Verlag (Hrsg.). Forschungsinitiative Zukunft Bau, 2017.
- [42] Reinhart, C. F.; Walkenhorst, O.: Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. *Energy and Buildings* 33 (2001), Heft 7, S. 683–697.
- [43] Nabil, A.; Mardaljevic, J.: Useful daylight illuminance. A new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research and Technology* 37 (2005), S. 41–59.
- [44] DIN 5034-1: Tageslicht in Innenräumen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, 2011.
- [45] Boyce, P. R.: *Human Factors in Lighting*, Third Edition. Taylor and Francis, Hoboken, 2014.
- [46] DIN 5340: Begriffe der physiologischen Optik, 1998.
- [47] VDI 6011 Blatt 1 Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung - Grundlagen, 2014.
- [48] DIN 5035-7: Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil 7: Beleuchtung von Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen, 2004.
- [49] schorsch.com. Lichtplanungssoftware für die Architektur: Glossar der Lichtplanung. 2018. <https://www.schorsch.com/de/wissen/glossar/kontrast.html> (Abruf: 10.04.2018).
- [50] Voss, K.: *Bürogebäude mit Zukunft. Konzepte, Analysen, Erfahrungen*. Solarpraxis, Berlin, 2006.
- [51] Berufsgenossenschaftliche Information (BGI) / VBG: BGI 827: Sonnenschutz im Büro - Hilfen für die Auswahl von geeigneten Blend- und Wärmeschutzvorrichtungen an Bildschirm- und Büroarbeitsplätzen. Berufsgenossenschaftliche Information (BGI) / VBG. Schriftenreihe Prävention, 2014:20:06.
- [52] Jakubiec, J. A.; Reinhart, C. F.: The 'adaptive zone' – A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces. *Lighting Research and Technology* 44 (2012), Heft 2, S. 149–170.

- [53] Moosmann, C.; Wienold, J.; Wagner, A. et al.: Ermittlung relevanter Einflussgrößen auf die subjektive Bewertung von Tageslicht zur Bewertung des visuellen Komforts in Büroräumen. Abschlussbericht. Universität Karlsruhe, 2012.
- [54] Moosmann, C.: Studie zur Leuchtdichteverteilung an Bildschirmarbeitsplätzen. Karlsruhe, 2003.
- [55] Lee, E. S.; DiBartolomeo, D. L.: Application issues for large-area electrochromic windows in commercial buildings. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 71 (2002), Heft 4, S. 465–491.
- [56] Osterhaus, W. K. E.; Bailey, I. L.: Large area glare sources and their effect on discomfort and visual performance at computer workstations. In: Institute of Electrical and Electronic Engineers Industry Applications Society (IEEE-IAS) annual conference, Houston, TX (United States), 4-9 Oct 1992.
- [57] Moghbel, N.: New Model for VDT Associated Visual Comfort in Office Spaces. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2012.
- [58] Wienold, J.; Christoffersen, J.: Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and Buildings* 38 (2006), Heft 7, S. 743–757.
- [59] Moosmann, C.: Visueller Komfort und Tageslicht am Büroarbeitsplatz. Eine Felduntersuchung in neun Gebäuden. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2014.
- [60] Draeger, S.: Vergleich des Systems des Deutschen Gütesiegels Nachhaltiges Bauen mit internationalen Systemen. Endbericht. Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR), Berlin. Zukunft Bau, SF - 10.08.17.7-09.15, 2010.
- [61] DGNB: Das DGNB Zertifizierungssystem. <http://www.dgnb-system.de/de/system/zertifizierungssystem/> (Abruf: 01.02.2018).
- [62] Ne'Eman, E.; Hopkinson, R. G.: Critical minimum acceptable window size. A study of window design and provision of a view. *Lighting Research and Technology* 2 (1970), Heft 1, S. 17–27.
- [63] Fernandes, L.L.; Lee, E.S.; Ward, G.: Lighting energy savings potential of split-pane electrochromic windows controlled for daylighting with visual comfort. *Energy and Buildings* 61 (2013), S. 8–20.

- [64] Aries, M. B.C.; Veitch, J. A.; Newsham, G. R.: Windows, view, and office characteristics predict physical and psychological discomfort. *Journal of Environmental Psychology* 30 (2010), Heft 4, S. 533–541.
- [65] Shin, W. S.: The influence of forest view through a window on job satisfaction and job stress. *Scandinavian Journal of Forest Research* 22 (2007), S. 248–253.
- [66] Ulrich, R. S.: View through a window may influence recovery from surgery. *Science* 224 (1984), Heft 4647, S. 420–421.
- [67] Ulrich, R. S.: Human responses to vegetation and landscapes. *Landscape and Urban Planning* 13 (1986), Heft 0, S. 29–44.
- [68] Keep, P.; James, J.; Inman, M.: Windows in the intensive therapy unit. *Anaesthesia* 35 (1980), Heft 3, S. 257–262.
- [69] Raanaas, R. K.; Patil, G. G.; Hartig, T.: Health benefits of a view of nature through the window. A quasi-experimental study of patients in a residential rehabilitation center. *Clinical Rehabilitation* 26 (2012), Heft 1, S. 21–32.
- [70] Bundesverbandes Flachglas e.V.: Richtlinie zur Beurteilung der visuellen Qualität von Glas für das Bauwesen, 2009.
- [71] Husser, M.; Haase, W.: Adaptive Verglasungssysteme. Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien. Zwischenbericht II. Universität Stuttgart, Stuttgart, Nr. 2, 2014.
- [72] Mardaljevic, J.; Andersen, M.; Roy, N. et al.: Daylighting Metrics. Is there a relation between Useful Daylight Illuminance and Daylight Glare Probability? In: Building Simulation and Optimization Conference BSO12, Loughborough, UK, September 10-11, 2012.
- [73] Heinzerling, D.; Schiavon, S.; Webster, T. et al.: Indoor environmental quality assessment models. A literature review and a proposed weighting and classification scheme. *Building and Environment* 70 (2013), S. 210–222.
- [74] Mäkitalo, J.: Simulating control strategies of electrochromic windows. Impacts on indoor climate and energy use in an office building, Uppsala University, Solid State Physics, Uppsala, 2013.
- [75] Cao, B.; Ouyang, Q.; Zhu, Y. et al.: Development of a multivariate regression model for overall satisfaction in public buildings based on field studies in Beijing and Shanghai. *Building and Environment* 47 (2012), S. 394–399.

- [76] Loonen, R.; Trcka, M.; Hensen, J.: Performance simulation of climate adaptive building shells - Smart Energy Glass as a case study, 2010.
- [77] Wienold, J.: Dynamic simulation of blind control strategies for visual comfort and energy balance analysis (2007).
- [78] Wienold, J.: Blendschutz und Tageslichtnutzung - Nutzerakzeptanz und Präferenzen. In: OTTI (Hrsg.): 13. Symposium Licht + Architektur. Tageslicht-Kunstlicht-Energie, Bad Staffelstein, 08-09. Februar, S. 126–131, 2007.
- [79] Vine, E.; Lee, E.; Clear, R. et al.: Office worker response to an automated Venetian blind and electric lighting system. A pilot study. *Energy and Buildings* 28 (1998), Heft 2, S. 205–218.
- [80] Wong, L. T.; Mui, K. W.; Hui, P. S.: A multivariate-logistic model for acceptance of indoor environmental quality (IEQ) in offices. *Building and Environment* 43 (2008), Heft 1, S. 1–6.
- [81] Huang, L.; Zhu, Y.; Ouyang, Q. et al.: A study on the effects of thermal, luminous, and acoustic environments on indoor environmental comfort in offices. *Building and Environment* 49 (2012), S. 304–309.
- [82] Gossauer, E.: Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden. Eine Feldstudie. Dissertation, Universität Karlsruhe, 2008.
- [83] Kim, J.; Dear, R. de: Nonlinear relationships between individual IEQ factors and overall workspace satisfaction. *Building and Environment* 49 (2012), S. 33–40.
- [84] Vischer, J. C.: Environmental quality in offices. van Nostrand Reinhold, New York [u.a.], 1989.
- [85] Marino, C.; Nucara, A.; Pietrafesa, M.: Proposal of comfort classification indexes suitable for both single environments and whole buildings. *Building and Environment* 57 (2012), Heft 0, S. 58–67.
- [86] Bluysen, P. M.; Aries, M.; van Dommelen, P.: Comfort of workers in office buildings. The European HOPE project. *Building and Environment* 46 (2011), Heft 1, S. 280–288.
- [87] Ncube, M.; Riffat, S.: Developing an indoor environment quality tool for assessment of mechanically ventilated office buildings in the 5UK6 – A preliminary study. *Building and Environment* 53 (2012), S. 26–33.

-
- [88] Chiang, C. M.; Chou, P. C.; Lai, C. M. et al.: A methodology to assess the indoor environment in care centers for senior citizens. *Building and Environment* 36 (2001), Heft 4, S. 561–568.
- [89] Frontczak, M.; Wargocki, P.: Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment* 46 (2011), Heft 4, S. 922–937.
- [90] Humphreys, M. A.: Quantifying occupant comfort. Are combined indices of the indoor environment practicable? *Building Research & Information* 33 (2005), Heft 4, S. 317–325.
- [91] Schakib-Ekbatan, K.: Bürogebäude auf dem Prüfstand: Zufriedenheit mit Raumklima und Raum. Einbindung der NutzerInnenperspektive in die Nachhaltigkeitsbewertung. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2016.
- [92] Nitz, P.; Wagner, A.: Schaltbare und regelbare Verglasungen. BINE Informationsdienst Themeninfo 1/02 (2002).
- [93] Haase, W.; Husser, M.; Sobek, W.: Potentiale strukturierter, schaltbarer Verglasungen. In: Weller, B.; Tasche, S. (Hrsg.): *Glasbau 2016*. Ernst und Sohn, Berlin, 2016.
- [94] Haberlag, B.; Lüttig, A. K.: *Flüssigkristalle*. Technische Universität Braunschweig, 2006.
- [95] Khoo, I.-C.: *Liquid Crystals*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, USA, 2007.
- [96] Chen, R. H.: *Liquid crystal displays. Fundamental physics and technology*. Wiley SID series in display technology. Wiley, Hoboken, N.J, 2011.
- [97] Haase, W.: *Adaptive Strahlungstransmission von Verglasungen mit Flüssigkristallen*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2004.
- [98] Haase, W.; Husser, M.; Rau, L. et al.: *Schaltbare Verglasung auf der Basis von lyotropen und nematischen Flüssigkristallen - Schlussbericht zum Verbundvorhaben*. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2014.
- [99] Husser, M.; Haase, W.; Bader, P. et al.: *i³ - intelligente, interaktive, integrative Fassadenverglasung für Sonnenschutzanwendungen*. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben NaBau-3 bei der Baden-Württemberg Stiftung im Rahmen der Ausschreibung "Nachhaltiges Bauen". Universität Stuttgart, 2018.
- [100] Haase, W.: *TN-Technologie für den Einsatz in Architekturverglasungen*. Endbericht. Universität Stuttgart, 2017.

- [101] DIN EN 410: Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen, 2011.
- [102] Gärtner, A.: LCD-Monitore – Teil 1: Grundlagen und Technologie. In: mt-Medizintechnik, 2008.
- [103] Machanek, S.: Identifikation von Prozessparametern für das Laminieren von Display-Modulen auf Glassubstrate. Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, ILEK, 2017.
- [104] Haase, W.; Husser, M.; Rau, L. et al.: Schaltbare Verglasung auf der Basis von lyotropen und nematischen Flüssigkristallen. Universität Stuttgart, Stuttgart, Nr. 5, 2013.
- [105] Haase, W.; Husser, M.; Rau, L. et al.: Schaltbare Verglasung auf der Basis von lyotropen und nematischen Flüssigkristallen. Universität Stuttgart, Stuttgart, Nr. 6, 2014.
- [106] Haase, W.; Prskalo, M.; Królak, M. et al.: Switchable glazing for architectural applications based on liquid crystal technology. In: GPD Glass Performance Days 2011. Tampere, 2011.
- [107] Haase, W.; Husser, M.; Sobek, W. et al.: Flüssigkristallbasierte Verglasung zur Regelung des Licht- und Energieeintrags in Gebäude. In: Weller, B.; Tasche, S. (Hrsg.): Glasbau 2014. Ernst und Sohn, Berlin, 2014.
- [108] Husser, M.; Haase, W.; Sobek, W. et al.: Structured sun protection glazing. In: Engineered transparency. International Conference at glasstec. Düsseldorf, 2014.
- [109] Glas Trösch Holding AG: SILVERSTAR-Sonnenschutzgläser. Produktinformation. https://www.glastroesch.ch/uploads/tx_lwgtbrochures/bro_silverstar-sonnenschutz_de.pdf (Abruf: 27.03.2018).
- [110] Glas Trösch Holding AG: SILVERSTAR ZERO E. Produktinformation. https://www.glastroesch.ch/uploads/tx_lwgtbrochures/bro_silverstar_zero-e_de.pdf (Abruf: 27.03.2018).
- [111] Eicker, U.: Solare Technologien für Gebäude. Grundlagen und Praxisbeispiele. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [112] Wyon, D. P.: Individual control at each workplace: the means and the potential benefits. In: Clements-Croome, D. (Hrsg.): Creating the Productive Workplace, S. 192–206. E & FN Spon, New York, 2000.

- [113] Doggart, J.: Future design – guidelines and tools. In: Clements-Croome, D. (Hrsg.): *Creating the Productive Workplace*, S. 304–312. E & FN Spon, New York, 2000.
- [114] Clements-Croome, D.; Kaluarachchi, Y.: Assessment and measurement of productivity. In: Clements-Croome, D. (Hrsg.): *Creating the Productive Workplace*, S. 129–166. E & FN Spon, New York, 2000.
- [115] Farley, K. M. J.; Veitch, J. A.: *A Room With A View. A Review of the Effects of Windows on Work and Well-Being*. NRC Institute for Research in Construction, Ottawa, Canada, 2001.
- [116] Morel, N.: *Daylight and electric lighting control systems design guide*. Solar Energy & Building Physics Laboratory (LESO-PB), EPFL, Lausanne, 2005.
- [117] Hawighorst, M.; Schweiker, M.; Wagner, A.: Thermal Comfort in Naturally Ventilated Offices: Combined Analysis of Psychological and Physiological Aspects with regard to Control. In: *Proceedings of the 5th International Building Physics Conference (IBPC)*, Kyoto, Japan, 28-31 Mai, 2012, 28-31 Mai, 2012.
- [118] Husser, M.; Haase, W.; Hoß, P. et al.: New Possibilities of Sun and Glare Protection with a Structured Switchable Glazing. In: *Challenging Glass 5*. Ghent, 2016.
- [119] Haas-Arndt, D.; Ranft, F. (Hrsg.): *Tageslichttechnik in Gebäuden*. Müller, Heidelberg, Neckar, 2007.
- [120] Wagner, A.; Herkel, S.; Kohne, W.: *Energieeffiziente Fenster und Verglasungen*. BINE-Fachbuch. Fraunhofer IRB Verl., Stuttgart, 2013.
- [121] Hartwig, H.: *Konzepte für die Integration selbstregelnder, thermotroper Schichten in moderne Gebäudehüllen zur passiven Nutzung der Sonnenenergie*, TU München, 2003.
- [122] Bigalke, K.: Berechnung der Verschattung durch die geplante Bebauung im Bereich des Bebauungsplangebietes „Altona-Nord 26“, Gutachten. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Amt für Landes- und Landschaftsplanung Hamburg, Pinneberg, 2013.
- [123] Hiller, M.; Schulz, M.: Das dynamische Gebäude- und Anlagensimulationsprogramm TRNSYS. In: *Bauphysik Kalender 2015*, S. 343–376. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015.
- [124] Gassel, A.: *Beiträge zur Berechnung solarthermischer und exergieeffizienter Energiesysteme*, Technische Universität Dresden, Dresden, 1996.

- [125] Lawrence Berkeley National Laboratory: Windows and Daylighting. Building Technology and Urban Systems. Software Tools. <https://windows.lbl.gov/software> (Abruf: 01.02.2018).
- [126] Reinhart, C.: DAYSIM. Advanced Daylight Simulation Software. DAYSIM Header File Keyword: Simple Dynamic Shading. <http://daysim.ning.com/page/daysim-header-file-keyword-simple-dynamic-shading> (Abruf: 10.01.2018).
- [127] Podbregar, N.; Schwanke, K.; Frater, H.: Wetter, Klima, Klimawandel. Wissen für eine Welt im Umbruch. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [128] Solargis: Solar Resource Map. Global Horizontal Irradiation. 2017. <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/download/world> (Abruf: 08.02.2018).
- [129] Chen, D.; Chen, H. W.: Using the Köppen classification to quantify climate variation and change. An example for 1901–2010. Environmental Development 6 (2013), S. 69–79.
- [130] National Renewable Energy Laboratory: Weather Data. <https://energyplus.net/weather> (Abruf: 13.12.2017).
- [131] Setzer, M. J.; Hohmann, R.; Kasperek, S. et al.: Formelsammlung Bauphysik. Wärme - Feuchte. Universität Duisburg-Essen, 2004.
- [132] Willems, W. (Hrsg.): Lehrbuch der Bauphysik. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013.
- [133] DIN EN ISO 7345: Wärmeschutz - Physikalische Größen und Definitionen, 1996.
- [134] Pech, A.; Pöhn, C.: Bauphysik. Baukonstruktionen, Band 1. Birkhäuser, Basel, 2018.
- [135] Pohlenz, R.: Der schadenfreie Hochbau. Band 3: Wärmeschutz, Tauwasserschutz und Schallschutz. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Köln, 1995.
- [136] SAGE Electrochromics: Products - SageGlass. 2016. www.sageglass.com/products (Abruf: 10.05.2018).
- [137] Lawrence Berkeley National Laboratory: International Glazing Database. 2011. <https://windows.lbl.gov/materials/igdb> (Abruf: 10.05.2018).
- [138] Licht, U. B.: Tageslicht - Kunstlicht. Grundlagen, Ausführung, Beispiele. DETAIL, München, 2005.

-
- [139] ECONTROL® – Sonnenschutz mit dimmbarem Glas. 2016. www.econtrol-glas.de (Abruf: 10.05.2018).
- [140] Harzheim, L.: Strukturoptimierung. Grundlagen und Anwendungen. Edition Harri Deutsch. Verl. Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, Haan-Gruiten, 2014.
- [141] Wetter, M.: GenOpt. Generic Optimization Program, User Manual. 2016. <http://SimulationResearch.lbl.gov> (Abruf: 26.06.2017).
- [142] Papageorgiu, M.: Optimierung statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung. Springer, Berlin, 2012.
- [143] Nguyen, A.-T.; Reiter, S.; Rigo, P.: A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis. *Applied Energy* 113 (2014), S. 1043–1058.
- [144] Wetter, M.: Design Optimization with GenOpt. *Building Energy Simulation, User News* Vol. 21 (2000).
- [145] Futrell, B. J.; Ozelkan, E. C.; Brentrup, D.: Optimizing complex building design for annual daylighting performance and evaluation of optimization algorithms. *Energy and Buildings* 92 (2015), S. 234–245.
- [146] Eickenhorst, H. (Hrsg.): Energieeinsparung in Gebäuden. Stand der Technik ; Entwicklungstendenzen. Vulkan-Verl., Essen, 1999.
- [147] Wirkungsgrad einer Wärmepumpe berechnen und erhöhen. 2013. <http://www.heizungsbau.net/wirkungsgrad-waermepumpe-20131549> (Abruf: 05.04.2018).
- [148] TOSHIBA Klimageräte Vertrieb Deutschland: ESTIA Wärmepumpensystem Luft/Wasser. Produktinformation, 2018.
- [149] TOSHIBA Klimageräte Vertrieb Deutschland: Engineering Data Book. Produktspezifikation, 2018.
- [150] TOSHIBA Klimasysteme: Wirtschaftlichkeitsberechnung nach ESEER-Wert. 2018. http://toshiba-klimasysteme.de/technik/1741/eseer_effizienz_inverter_waermepumpe/ (Abruf: 09.04.2018).
- [151] Nimbus Group GmbH: Produktdatenblatt Modul Q 36, 2015.
- [152] Nimbus Group GmbH: Produktdatenblatt Modul L 196, 2015.
- [153] Nimbus Group GmbH: Beleuchtungskonzept für ILEK Fassadenprüfstand Uni Stuttgart, 2015.

- [154] Halonen, L.; Tetri, E.; Bhusal, P.: Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings, Summary Report. Aalto University, Espoo, Finland, 2010.
- [155] Rundquist, R. A.; McDougall, T. G.; Benya, J.: Lighting Controls: Patterns for Design. Technical Report. R. A. Rundquist Associates, Northampton, 1996.
- [156] DiLouie, C.: Advanced lighting controls. Energy savings, productivity, technology and applications. Fairmont Press; Distributed by Taylor & Francis, Lilburn, GA, 2006.
- [157] Lichtmess, M.: Aktivierung von Blend- und Sonnenschutzsystemen. Arbeitsbericht. Universität Wuppertal, 2008.
- [158] Reinhart, C. F.; Wienold, J.: The daylighting dashboard – A simulation-based design analysis for daylit spaces. *Building and Environment* 46 (2011), Heft 2, S. 386–396.
- [159] DIN EN ISO 13790: Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung, 2008.
- [160] van den Wymelenberg, K.: Patterns of occupant interaction with window blinds. A literature review. *Energy and Buildings* 51 (2012), Heft 0, S. 165–176.
- [161] Reinhart, C. F.; Voss, K.: Monitoring manual control of electric lighting and blinds. *Lighting Research & Technology* 35 (2003), Heft 3, S. 243–258.
- [162] Sutter, Y.; Dumortier, D.; Fontoynt, M.: The use of shading systems in VDU task offices. A pilot study. *Energy and Buildings* 38 (2006), Heft 7, S. 780–789.
- [163] Assimakopoulos, M. N.; Tsangrassoulis, A.; Santamouris, M. et al.: Comparing the energy performance of an electrochromic window under various control strategies. *Building and Environment* 42 (2007), Heft 8, S. 2829–2834.
- [164] Lee, E.; DiBartolomeo, D. L.; Klems, J. H. et al.: Monitored energy performance of electrochromic windows controlled for daylight and visual comfort. In: ASHRAE Transactions, LBNL-58912. ASHRAE 2006 Summer Meeting, Quebec City, Canada, 24-28 Juni, S. 122–141, 2006.
- [165] Jonsson, A.; Roos, A.: Evaluation of control strategies for different smart window combinations using computer simulations. *Solar Energy* 84 (2010), Heft 1, S. 1–9.
- [166] Sullivan, R.; Lee, E. S.; Papamichael, K. et al.: Effect of switching control strategies on the energy performance of electrochromic windows. In: International Society for Optics and Photonics (Hrsg.): *Optical Materials Technology for Energy Efficiency and Solar Energy Conversion XIII*, S. 443–456, 1994.

- [167] Jonsson, A.; Roos, A.: A tool for evaluating smart windows and external shading devices using different control strategies. In: Malardalen University (Hrsg.): Conference proceedings 3rd International Scientific Conference on "Energy systems with IT" at Alvsjö fair in association with Energitinget, Alvsjö, March 16-17, 2010.
- [168] Sullivan, R.; Rubin, M.; Selkowitz, M.: Reducing residential cooling requirements through the use of electrochromic windows. In: Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings VI Conference, Clearwater Beach, FL, 4-8 Dezember, 1995.
- [169] Karlsson, J.; Karlsson, B.; Roos, A.: Control strategies and energy saving potentials for variable transmittance windows versus static windows. Proc. of Eurosun, Copenhagen, Denmark (2000).
- [170] Gugliermetti, F.; Bisegna, F.: Visual and energy management of electrochromic windows in Mediterranean climate. Building and Environment 38 (2003), Heft 3, S. 479–492.
- [171] Husser, M.; Haase, W.: Adaptive Verglasungssysteme. Einsatzbereiche, energetische und tageslichttechnische Evaluierung, Regelungsstrategien. Zwischenbericht I. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2013.
- [172] Piccolo, A.; Simone, F.: Effect of switchable glazing on discomfort glare from windows. Building and Environment 44 (2009), Heft 6, S. 1171–1180.
- [173] Konstantzos, I.; Tzempelikos, A.; Chan, Y.-C.: Experimental and simulation analysis of daylight glare probability in offices with dynamic window shades. Building and Environment 87 (2015), S. 244–254.
- [174] Fehringer, A.: Vergleichende Analyse unterschiedlicher Regelungsstrategien schaltbarer Verglasungen unter Berücksichtigung der Einflussparameter Strahlung und Temperatur. Universität Stuttgart, 2015.
- [175] DIN IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2013), 2014.
- [176] SAMSON AG: Technische Information. Regler und Regelstrecken. <http://www.samson.de> (Abruf: 20.06.2017).
- [177] GIRA: Einbau- und Gebrauchsanleitung für Rohrmotoren. <https://www.gira.com/data2/08571410.pdf> (Abruf: 24.05.2018).
- [178] Jarolift: JAROLIFT SL45 - 30/15 Rolladenmotor. Produktdatenblatt. <https://www.jalousiescout.de/Rolladenmotor/Rohrmotor> (Abruf: 24.05.2018).

- [179] Cherubini: Elektronischer Rohrmotor Blue Plug & Play. Produktdatenblatt.
<https://www.enobi.de/rohrmotore/elektronisch-rohrmotoren/cb0153> (Abruf:
24.05.2018).