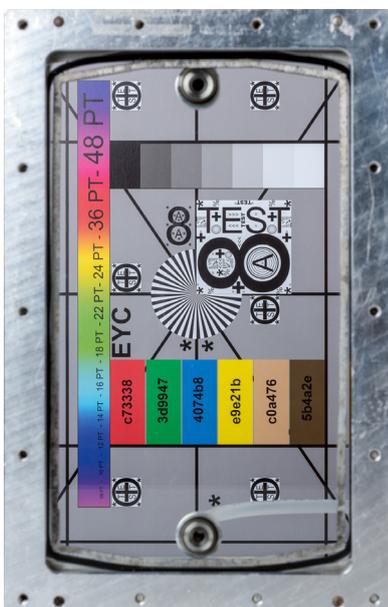


Jochen Stopper

FLUIDGLAS - Flüssigkeitsdurchströmte Fassadenelemente

Anwendbarkeit von flüssigkeitsdurchströmten, transparenten Fassadenelementen zur Kontrolle der Energietransmission von Gebäuden in der Gebäudehülle.



Technische Universität München



Fakultät für Architektur

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen

FLUIDGLAS- Flüssigkeitsdurchströmte Fassadenelemente

Anwendbarkeit von flüssigkeitsdurchströmten, transparenten Fassadenelementen zur Kontrolle der Energietransmission von Gebäuden in der Gebäudehülle.

Jochen Marc Stopper

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Thomas Auer

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen
2. Prof. Dr.-Ing. Werner Lang

Die Dissertation wurde am 19.02.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 12.04.2018 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für nachhaltiges Bauen der Technischen Universität München. Den Anfang nahm diese Arbeit während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Architektur und Raumentwicklung der Hochschule Liechtenstein (heute Universität Liechtenstein) und meiner Tätigkeit bei der GlassX AG in Zürich. Ausgangslage war das Patent Nr. WO 98751973 „Vorrichtung zur transparenten Wärmedämmung an einem Gebäude“ von Prof. Dietrich Schwarz (Schwarz, 1998). Aufbauend auf grundlegenden Erkenntnissen des Forschungsprojekts „Wasserdurchströmte Glasfassaden“ unter Leitung der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich ETH im Rahmen der europäischen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung COST und deren Aktion C13 (Eberle, 2005), wurde im Rahmen der im Folgenden genannten Forschungsprojekte unter meiner Beteiligung das Fluidglas System weiter entwickelt. Involviert war ich als stellvertretender Projektleiter in das Forschungsprojekt „Fluid durchströmte Glasfassadenelemente zur aktiven Energietransmissionskontrolle“ (Projekt-Nr. ar-1-07), gefördert durch den Forschungsförderungsfonds der Hochschule Liechtenstein, und als Projektleiter der Arbeitsbereiche der Technischen Universität München in das europäische Forschungsprojekt „FLUIDGLASS - Solar Thermal Glass Facades with Adjustable Transparency“, finanziert durch die Europäische Kommission innerhalb des siebten Rahmenprogramms, Grant Agreement No. 608509. Diese Arbeit entstand parallel zu meinen Aktivitäten in den genannten Forschungsprojekten. Als Architekt und Wissenschaftlicher Mitarbeiter beschäftige ich mich mit nachhaltigen, energieoptimierten und ästhetisch anspruchsvollen Gebäuden. Dabei spielt die Fassade eine entscheidende Rolle sowohl für das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes für den visuellen und thermischen Nutzerkomfort im Innenraum als auch für die Nutzung erneuerbarer Solarenergie am Gebäude. In Zukunft sollen Gebäude u.a. nicht nur wenig Energie verbrauchen, sondern vielmehr die benötigte Energie am Gebäude „produzieren“. Aus diesem Grund habe ich großes persönliches Interesse daran zu untersuchen, inwiefern Fluidglas einen Beitrag zur Erreichung dieser Ziele leisten kann.

Danksagung

Ich möchte mich ganz herzlich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Bearbeitung meiner Dissertation begleitet haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt dabei:

- Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gehard Hausladen für die thematischen Anregungen zu dieser Arbeit, die Bereitschaft, die akademische Betreuung in Form des Hauptreferats zu übernehmen und die Möglichkeit, die er mir gegeben hat, als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für nachhaltiges Bauen tätig zu sein.
- Prof. Dr.-Ing. Werner Lang für die fachliche Unterstützung, die kontinuierliche Motivation, die Zeit, die er mir für meine Arbeit im Rahmen meiner Tätigkeit am Zentrum für nachhaltiges Bauen unter seiner Leitung eingeräumt hat und für die Übernahme des Koreferats.
- Prof. Dietrich Schwarz, der mir das Thema zur Verfügung gestellt hat und auf dessen Vorarbeiten und Ideen ich aufbauen durfte. Er hat mir die Chance gegeben, als sein Mitarbeiter bei der GlassX AG und der Hochschule Liechtenstein mich mit diesem spannenden Thema zu beschäftigen, bei dem er mich fachlich sehr unterstützt hat.
- Dr. Thomas Hamacher und Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner, die mir den Modellraumprüfstand der TUM zur Verfügung gestellt haben.
- Prof. Thomas Auer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.
- Meinen Kolleginnen und Kollegen an der Technischen Universität München, der Universität Liechtenstein und der Interstaatlichen Hochschule für Technik in Buchs NTB, ganz besonders: Prof. Dr. Stefan Bertsch und Prof. Dr. Daniel Gstöhl, deren fachliche Hilfe über einen sehr langen Zeitraum unentbehrlich waren und die mir darüber hinaus die Prototypen und Messergebnisse zur Verfügung gestellt haben. Prof. Dr.-Ing. Isabell Nemeth, die mir immer den Rücken frei gehalten hat und mich fachlich und menschlich unterstützt hat. Christine Röger, die mich in der Lehre entscheidend entlastet hat. Christoph Matschi, der mir mit seinen Beiträgen im Forschungsprojekt wichtige Denkanstöße geliefert hat und ganz besonders Shan Hua, der mit seinem SimulationX-Modell, seinen entscheidenden fachlichen Beiträgen und seinem unermüdlischen Einsatz die Gebäudesimulationen mit Fluidglas ermöglicht hat.
- Federico Garzia, Hans Beck, Felix Böing und Julian Renz für ihre sehr wertvollen Beiträge im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten; Daniel Oppliger, der die Spektrometermessungen durchgeführt hat. Heinrich Kleeberger, Anian Hampe und Florian Gantert für die Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen im Modellraumprüfstand der TUM.
- Astrid Eckert für die Fotos vom Prototypen.
- Allen Projektpartnern im EU-Projekt „FLUIDGLASS“.
- Den wichtigsten Menschen in meinem Leben, meiner Familie Andrea, Karla und Anton, die mich immer unterstützt und meine Launen ertragen haben, meiner Schwester Ellen für den Glauben an mich, Erika und Jochen Sommer, die in der vielen Zeit in der ich an der Dissertation gearbeitet habe, sich um unsere Kinder gekümmert haben. Jochen Sommer darüber hinaus für das Korrigieren dieser Arbeit. Allen voran meinen Eltern Sigrid und Wolfgang, die mich immer moralisch und finanziell unterstützt haben, die nie ihre Zweifel an meinem Weg geäußert haben und ohne die auch diese Arbeit nie entstanden wäre.

„Wenn alle Menschen statt der Augen grüne Gläser hätten, so würden sie urteilen müssen, die Gegenstände, welche sie dadurch erblicken, sind grün - und nie würden sie entscheiden können, ob ihr Auge ihnen die Dinge zeigt, wie sie sind, oder ob es nicht etwas zu ihnen hinzutut, was nicht ihnen, sondern dem Auge gehört (Kleist, 1801).“

Danke Margarete

Für Andrea, Karla und Anton.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Simulationsmodell für flüssigkeitsdurchströmte Glasfassadenelemente („Fluidglas“) und dessen Validierung mit experimentellen Untersuchungen. Fluidglas integriert die folgenden Funktionen in einem transparenten Fassadenelement: adaptive Verglasung mit thermischer Trennung und variablem Sonnen- und Blendschutz, Solarkollektor und flächiges Heiz- und Kühlsystem.

Diese Funktionen und deren Zusammenspiel werden modelliert und Kennwerte berechnet. Mittels dynamisch-thermischen Gebäudesimulationen wird die Anwendbarkeit von Fluidglasfassaden bei vollverglasten Verwaltungsgebäuden in drei unterschiedlichen Klimazonen untersucht: kaltes, gemäßigtes und heißes Klima vertreten durch Moskau, München und Riad.

Als adaptive Verglasung kann Fluidglas die Transmission der Solarstrahlung in den Innenraum kontrollieren. Mit einer 2 mm starken Fluidschicht kann durch das Umschalten vom klaren auf den eingefärbten Zustand die visuelle Transmission von ca. 70% auf 7% und die solare Transmission von ca. 45% auf 5% verringert werden. Erhöht man die Fluidschicht auf 6 mm, kann die Transmission vollständig unterbunden werden. An allen drei Standorten kann mit Fluidglasfassaden ein guter visueller Komfort im Innenraum gewährleistet werden. Eine gleichmäßige Einfärbung über die gesamte Fassadenhöhe ist jedoch nicht optimal und führt zu relativ geringen Beleuchtungsstärken in der Raumtiefe.

Als Solarkollektor weist Fluidglas eine geringe Effizienz auf. Es können jedoch bis zu ca. 85% der auf die Fassade auftreffenden, kurzwelligigen Solarstrahlung im Fluidkreislauf absorbiert und thermische Wärmegewinne abgeführt werden. Damit kann Fluidglas im Gegensatz zu anderen Sonnenschutzsystemen die Abwärme als regenerative Energiequelle nutzbar machen.

Fluidglas kann als flächiges Niedertemperatur-Heiz- und Kühlsystem betrieben werden. Zur thermischen Konditionierung des Raums sind moderate Vorlauftemperaturen zwischen 18°C und 35°C ausreichend. Die Heizleistung beträgt dabei maximal 120 W/m², die Kühlleistung max. 60 W/m². In kalten und gemäßigten Klimazonen ist die Leistung ausreichend, um einen optimalen thermischen Komfort zu erreichen. In heißen Klimazonen müsste dagegen eine zusätzliche Kühlung mit geringer Leistung integriert werden. Über die innere Fluidschicht kann die Oberflächentemperatur der Fassade gezielt gesteuert werden. Strahlungstemperaturasymmetrien im Raum können dadurch verhindert werden.

Die praktische Umsetzung stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar, v.a. die Entwicklung technisch einwandfreier und ästhetisch ansprechender reversibler Einfärbungen und Abstandhalter im Scheibenzwischenraum.

An allen drei Standorten weisen Büroräume mit Fluidglasfassade einen niedrigen Energiebedarf auf. Sollte Fluidglas zu einem marktfähigen Produkt entwickelt werden, könnte es einen Beitrag dazu leisten Gebäude mit einem großen Verglasungsanteil zu „Nearly Zero Energy Buildings“ zu machen, d.h. zu Gebäuden, dessen sehr geringer Energiebedarf zu einem großen Teil durch lokale, regenerative Energiequellen gedeckt wird (Europäisches Parlament, 2010, L 153/18).

Abstract

The present work describes a simulation model for glass façade elements with inner circulating fluids (so-called 'fluidglass'), which is validated by experimental investigations.

Fluidglass combines the following functions in one transparent façade element:

- adaptive glazing, with thermal insulation and variable sun and glare protection
- solar collector
- flat heating and cooling system

These functions and their interplay are modeled and key indicators of fluidglass are calculated. By implementing the model in dynamic-thermal building simulations, the applicability of fluidglass facades in fully glazed administration buildings is examined at three climatically different locations: cold, temperate and hot, represented by Moscow, Munich and Riyadh.

As adaptive glazing, fluidglass controls the transmission of solar radiation into the interior. With a 2 mm thick fluid layer, by switching from clear to colored state visual transmission is reduced from approx. 70% to 7% and solar transmission from approx. 45% to 5%. By enlarging the fluid layer up to 6 mm, solar and visual transmission can be completely eliminated. Fluidglass façades provide visual comfort in the interior space. However, uniform coloring over the entire façade height leads to relatively low illuminance levels in the room depth.

As a solar collector, fluidglass has a low efficiency. Nevertheless, up to approx. 85% of shortwave solar radiation impacting on the façade can be absorbed within the fluid circuit and partly dissipated as thermal heat gains. Fluidglass can thus utilize the waste heat as a regenerative energy source. This is an advantage over other sun protection systems.

Fluidglass can be operated as a flat low-temperature heating and cooling system. Moderate flow temperatures between 18°C and 35°C are sufficient to condition the room. The system has a heating power up to 120 W/m² and a cooling power up to 60 W/m². In cold and temperate climates, this is sufficient to achieve optimum thermal comfort. In hot climate, additional low-power cooling would have to be integrated for best thermal comfort. The surface temperature of the façade can be precisely controlled via the inner fluid layer. In every climate zone, this prevents radiation temperature asymmetries in the room.

Practical implementation remains a major challenge, particularly the development of technically optimal and aesthetically pleasing reversible colorations and spacers in the gap between the glass panes.

At all three locations, an office space with fluidglass façade has low energy requirements. If fluidglass can be developed into a marketable product, it could turn buildings with a large proportion of glazing into "Nearly Zero Energy Buildings", buildings "where the very low amount of energy required" is extensively covered by "renewable sources produced on site or nearby" (European Parliament, 2010, L 153/18).

Inhalt

1	Einleitung	12
1.1	Relevanz und Problemstellung.....	12
1.2	Stand der Forschung	14
1.3	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	17
1.4	Eingrenzung	20
2	Grundlagen	22
2.1	Funktionskonzept von flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden	22
2.2	Die Fassade als Schnittstelle zwischen Außen- und Innenraum	23
2.3	Solar- und Wärmestrahlung	25
2.4	Komfort	29
2.4.1	Visueller Komfort	29
2.4.2	Thermischer Komfort	31
2.5	Energiehaushalt von Verwaltungsgebäuden.....	34
2.5.1	Heizwärmebedarf.....	35
2.5.2	Kühlbedarf	35
2.5.3	Energiebedarf für mechanische Lüftung.....	36
2.5.4	Energiebedarf für Be- und Entfeuchtung	36
2.5.5	Energiebedarf für künstliche Beleuchtung.....	36
2.5.6	Energiebedarf für Warmwasser.....	37
2.6	Standorte, Klima und Gebäudeparameter	37
2.6.1	Kühlgemäßigtes Klima - Moskau	38
2.6.2	Gemäßigtes Klima - München	40
2.6.3	Wüstenklima - Riad.....	41
2.7	Bauliche Parameter einschaliger, adaptiver, transparenter Gebäudehüllen	43
2.7.1	Einschalige, mehrschichtige, transparente Fassaden.....	43
2.7.2	Transparente, thermische Hüllen	44
2.7.3	Adaptive Verglasungen.....	47
2.8	Bauliche Parameter fassadenintegrierter, thermischer Solarkollektoren	52
2.9	Bauliche Parameter flächiger Heiz- und Kühlsysteme	54
3	Systemkonzepte von Fluidglasfassaden	56
3.1	Anforderungen an die Funktionszonen von Fluidglasfassaden	56
3.2	Aufbauvariationen von Fluidgläsern.....	65
3.3	Bauliche Umsetzung von Fluidglasfassaden	66
4	Modellierung von Fluidglas.....	72
4.1	Strahlungsmodell.....	72
4.1.1	Modellierung des Strahlungsdurchgangs durch das Fluidglas.....	73
4.1.2	Aufbau des Strahlungsmodells.....	76
4.2	Energiebilanzmodell	78
4.2.1	Modellierung des Energiebilanzmodells	78

4.2.2	Aufbau des Energiebilanzmodells	84
4.3	Zusammenfassung	89
5	Experimentelle Untersuchungen von Fluidgläsern	90
5.1	Spektrometermessungen	90
5.1.1	Aufbau der Spektrometermessungen	90
5.1.2	Ergebnisse der Spektrometermessungen	91
5.1.3	Diskussion und Fazit aus den Spektrometermessungen	96
5.2	Messungen im Modellraumprüfstand	97
5.2.1	Aufbau Messungen im Modellraumprüfstand	98
5.2.2	Ergebnisse Messungen im Modellraumprüfstand.....	102
5.2.3	Unsicherheiten bei den experimentellen Untersuchungen	110
5.2.4	Diskussion und Fazit.....	113
5.3	Zusammenfassung und Anmerkungen.....	113
6	Validierung Fluidglasmodelle.....	114
6.1	Validierung Strahlungsmodell.....	114
6.1.1	Validierung ohne Fluidfüllung.....	116
6.1.2	Validierung mit klarer Fluidfüllung.....	125
6.1.3	Modellerweiterung eingefärbte Fluidfüllung	129
6.2	Validierung Energiebilanzmodell	138
6.2.1	Validierung ohne Fluidfüllung.....	139
6.2.2	Validierung mit Fluidfüllung.....	139
6.2.3	Diskussion und Fazit.....	143
6.3	Zusammenfassung	144
7	Kennwerte von Fluidgläsern	145
7.1	Fluidglas als adaptive Verglasung.....	145
7.2	Fluidglas als thermischer Solarkollektor	155
7.2.1	Bilanzierung der Solarkollektorfunktion von Fluidglas	155
7.2.2	Ergebnisse der Solarkollektorfunktion von Fluidglas	156
7.3	Fluidglas als flächiges Heiz- und Kühlsystem	158
7.4	Wärmeströme zwischen den Zonen	160
7.5	Hinweise Langzeitstabilität des Fluids.....	165
7.6	Hinweis Fluidglas ohne Fluidfüllung	165
7.7	Pumpenstrombedarf	166
8	Gebäudesimulationen	178
8.1	Bilanzierung	180
8.2	Steuerungsstrategie.....	181
8.3	Simulationsergebnisse.....	182
8.3.1	Moskau.....	183
8.3.2	München	192
8.3.3	Riad.....	201

Inhalt	11
8.4 Zusammenfassung	209
9 Zusammenfassung und Fazit	211
10 Ausblick	218
11 Literaturverzeichnis	221
12 Abbildungsverzeichnis	233
13 Tabellenverzeichnis	245
14 Abkürzungsverzeichnis	252
15 Glossar	256
16 Anhang	259
16.1 Foto Fluidglasprototyp	259
16.2 Spektrale Strahlungsverteilung im Strahlungsmodell	259
16.3 Simulationsergebnisse Systemkonzept Fluidglas	261
16.4 Messergebnisse Spektrometermessungen	262
16.5 Messergebnisse Modellraumprüfstand	266
16.6 Validierung Strahlungsmodell	268
16.7 Validierung Energiebilanzmodell	288
16.8 Kenndaten Fluidglasaufbauten aus EES	290
16.9 Pumpenstrombedarf	293
16.10 Gebäudetechnikkonzepte	298
16.11 Randbedingungen Simulationen	299
16.12 Validierung SimulationX-Fluidglasmodell	303
16.13 Ergebnisse Simulationen	304
16.13.1 Moskau	304
16.13.2 München	309
16.13.3 Riad	314
16.13.4 Gesamt	321

1 Einleitung

1.1 Relevanz und Problemstellung

Der durch anthropogene Einflüsse verursachte Klimawandel ist ein schwerwiegendes, globales Problem und stellt eine der wichtigsten, aktuellen Herausforderungen für die Menschheit dar (Papst Franziskus, 2015). Im Pariser Übereinkommen vom Dezember 2015 haben sich die Länder darauf geeinigt, den Anstieg der weltweiten Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2°C gegenüber vorindustriellen Werten zu begrenzen, indem sie langfristig die weltweiten Emissionen senken (Europäische Kommission, 2015). Zu 70% der globalen Treibhausgasemissionen tragen die Kohlendioxidemissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, der Zementproduktion und anderer industrieller Prozesse bei (*The Emissions Gap Report*, 2017, XV). In der Europäischen Union sind Gebäude für 40% des Gesamtenergieverbrauchs und 36% der Kohlendioxidemissionen verantwortlich (Europäische Kommission, 2017).

Aus diesem Grund hat das Europäische Parlament bereits 2010 die Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) erlassen, in der Maßnahmen zur Senkung des Energieverbrauchs und die Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen im Gebäudesektor eingefordert werden. Ab 2020 sollen alle neuen Gebäude Niedrigstenergiegebäude (nZEB¹) sein, d.h. Gebäude, die nahezu keinen Energiebedarf haben und diesen geringen Bedarf überwiegend aus erneuerbaren Energiequellen am Standort oder in der Nähe decken. Auch der Anteil der Bestandsgebäude, die zu Niedrigstenergiegebäuden saniert werden, soll erhöht werden. (Europäisches Parlament, 2010)

Die Gebäudehülle spielt dabei eine entscheidende Rolle. Sie hat Einfluss auf den Energiebedarf des Gebäudes, die Nutzung erneuerbarer Energien am Standort und den Innenraumkomfort. Die Architektur, insbesondere die Fassade, sollte auf die lokalen Gegebenheiten abgestimmt sein, z.B. bei der Wahl der Baumaterialien, dem Anteil der transparenten Flächen und deren Überhitzungsschutz. Dieser Grundsatz wurde bei traditionellen Bauweisen stets eingehalten. Ab den 1920'er Jahren entwickelte sich ein Internationaler Stil, der nicht von klimatischen Aspekten geleitet war. Durch technische Lösungen und einen großen Einsatz fossiler Energie konnte der Innenraumkomfort dennoch hergestellt werden. (Hausladen, Liedl & Saldanha, 2012, S. 7)

Großflächige Verglasungen kamen unabhängig vom Standort und der Gebäudenutzung zum Einsatz. Bereits 1921 reichte Ludwig Mies van der Rohe einen visionären Entwurf eines vollverglasten, transparenten Hochhauses an der Friedrichstraße in Berlin ein (Riley, Bergdoll, Magnago Lampugnani & Mies van der Rohe, L., 2001, S. 325–328). In den vergangenen Jahrzehnten wurden diese Glashochhäuser in allen Teilen der Welt gebaut, bis hin zum höchsten Gebäude der Welt, dem 2013 fertiggestellten Burj Khalifa in Dubai, in der Wüste der Vereinigten

¹ Nearly Zero Energy Buildings

Arabischen Emirate. Großflächige Verglasungen verschärfen die Herausforderungen mit dem Auskühlen im Winter, durch die schlechtere Wärmedämmeigenschaft als die von opaken Wänden und der Überhitzung im Sommer durch die solare Einstrahlung, nicht nur an klimatisch extremen Standorten. Der Kühl- bzw. Heizenergieaufwand zur Einhaltung des thermischen Innenraumkomforts erhöht sich, insbesondere bei Hochhäusern, bei denen der Einsatz eines effektiven, außenliegenden Sonnenschutzes aufgrund der erhöhten Windlasten erschwert wird. Transparente Fassaden haben aber auch große Potentiale. Durch den erhöhten Tageslichteintrag und die Sichtbeziehungen zwischen Innen- und Außenraum kann das Wohlbefinden des Nutzers verbessert und der Strombedarf für künstliche Beleuchtung reduziert werden. Nicht zuletzt ermöglicht die transparente Gebäudehülle passive und aktive Solarenergiegewinne.

LeCorbusier hatte schon 1929 die Idee einer neutralisierenden Wand, der „mur neutralisant“, die durch das Einblasen vortemperierter Luft in Zwischenräume der Außenwand, die klimatischen Bedingungen des Außenraums neutralisiert und einen komfortablen Innenraum schafft. Mike Davis ging in seinem Artikel „A Wall for all Seasons“ (Davis, 1981) über die Neutralisation hinaus. Seine Idee einer polyvalenten Wand vereinte Sonnenschutz, Wärmeschutz und Energiegewinnung in mehreren Funktionsschichten in der Glasebene. (Knaack, 2007, S. 88–89)

Aus diesen Ideen haben sich unterschiedliche Fassadenansätze entwickelt:

- Adaptive Glasfassaden, z.B. elektrochromatische Verglasungen, können in ihren Transmissionseigenschaften verändert werden, um je nach Intensität der Solarstrahlung mehr oder weniger Strahlung in den Raum zu lassen (Dreher, 2009, S. 17–19). Damit kann das Risiko der Überhitzung des Raums minimiert und die Nutzung des natürlichen Tageslichts maximiert werden.
- Temperierte Fassaden, bei denen warmes oder kaltes Wasser durch die Fassadenprofile fließt, halten sowohl im Winter als auch im Sommer die Fassade auf der gewünschten Temperatur und verbessern somit den thermischen Innenraumkomfort auch direkt an der Fassade (Gartner, 2017).
- Fassaden mit integrierten Solarkollektoren (luft- oder wassergeführt) oder Photovoltaik-Anlagen ermöglichen die Umwandlung der Solarstrahlung in thermische oder elektrische Energie. Die Fassaden tragen damit zur Wärme- und Stromerzeugung² am Standort bei und damit zur Umsetzung der EU-Richtlinie EPD. (Herzog, Krippner & Lang, 2016, S. 295–303)

Die oben beschriebenen Glashochhäuser haben mit ihren großen vertikalen Fassadenflächen ein enormes Flächenpotential zur Solarenergiegewinnung. Dabei gibt es in der Fassade zunehmende Flächenkonkurrenz in Bezug auf die Nutzung, z.B. als transparentes Fenster für den Sichtbezug zwischen innen und außen, zur Energiegewinnung, als Gebäudehülle mit minimalen Transmissionswärmeverlusten (i.d.R. opake Flächen), zur Fassadenbegrünung oder als zugänglicher Außenraum (z.B. Balkone). Die Mehrfachnutzung von Fassadenflächen durch

² Der Begriff Energieerzeugung wird in der Arbeit für die Umwandlung von Energieformen verwendet, in diesem Fall der von der Sonne ausgehenden elektromagnetischen Strahlung in Strom oder Wärme.

mehre hintereinander liegende Systeme (polyvalent wall) könnten dabei in Zukunft immer wichtiger werden.

Um die thermischen Energiegewinne der Solarkollektoren und weitere am Standort verfügbare, erneuerbare Umweltwärmequellen und – senken, z.B. Grundwasser oder Erdwärme zum Heizen und Kühlen effizient nutzen zu können, müssen die Systemtemperaturen moderat sein. Zum Heizen sollten sie möglichst niedrig und zum Kühlen möglichst hoch sein. Zur Wärme- und Kälteübergabe im Raum müssen flächige Übergabesysteme eingesetzt werden, da große, energieübertragende Flächen geringe Vorlauftemperaturen ermöglichen. Flächige Systeme tragen darüber hinaus zur thermischen Behaglichkeit bei, da die Energie in Form von Strahlung an den Nutzer übertragen wird. (Hausladen, 2005, 71, 137 und 157-158)

Das Konzept der flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden, das in dieser Arbeit untersucht wird, kombiniert in einem System aus hintereinanderliegenden, transparenten Schichten: Adaptiven Überhitzungsschutz, solarthermischen Kollektor, transparente Wärmedämmung und flächiges Heiz- und Kühlsystem (Baumgärtner, Krasovsky, Stopper & Grabe, 2017; Stopper, Ritter & Gstöhl, 2014). Mit der Fluidglasfassade ausgestattete Gebäude, insbesondere großflächig verglaste Hochhäuser, sollen, unabhängig vom klimatischen Standort, einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen und erneuerbare Energie am Standort gewinnen und nutzen können. Darüber hinaus soll der Innenraumkomfort sehr hoch sein.

1.2 Stand der Forschung

Im Gegensatz zu traditionellen Gebäuden entwickelte sich die Architektur ab den 1920'er Jahren mit dem Internationalen Stil zunehmend unabhängig von den lokalen klimatischen Bedingungen. Dies war u.a. durch den Einsatz von fossilen Brennstoffen möglich. Als Reaktion auf die Ölkrise in den 1970'er Jahren beschäftigten sich Architekten intensiv mit der Nutzung der Solarenergie zur Gebäudetemperierung und Warmwassererzeugung, um den Einsatz fossiler Brennstoffe wieder zu reduzieren. Insbesondere in den Vereinigten Staaten von Amerika entstanden dabei neue Fassadensysteme, z.B. die „Trombe wall“ oder die „drum wall“, u.a. von Steve Baer, bei denen massive, schwarze Wände oder wassergefüllte Fässer hinter Verglasungen die Solarstrahlung absorbieren, speichern und zeitversetzt in den Raum abgeben konnten. (Reeder, Loftness, Holtz, Masterson & Clagett, 1979, S. 63–104).

Heute gibt es zahlreiche fassadenintegrierte Systeme auf dem Markt die die Solarstrahlung in Wärme umwandeln und zur Raumtemperierung und Warmwassererzeugung genutzt werden können. Zur passiven Nutzung der Solarenergie, zum Beheizen des hinter der Fassade liegenden Raums, gibt es sogenannte transparente oder transluzente Wärmedämmungen. Hierzu zählt auch das von Dietrich Schwarz erfundene GLASSX®crystal, das einen prismatischen Überhitzungsschutz und einen Latentwärmespeicher aus Salzhydrat in der Isolierverglasung integriert (GlassX AG, 2005). Zur aktiven, thermischen Nutzung der Solarenergie gibt es zahlreiche fassadenintegrierte Kollektoren (Cappel et al., 2015). Die in Wärme umgewandelte Solarstrahlung kann bei diesen Systemen mit einem Wärmeträgermedium (Luft oder Flüssigkeit)

von der Fassade aktiv an einen beliebigen Ort geführt werden. Bei wassergeführten³ Systemen wird die abgeführte Energie i.d.R. zur Heizungsunterstützung oder Warmwasserbereitung genutzt.

Die Idee der flüssigkeitsdurchströmten Glasfassade ist eine Kombination aus beiden Systemen. Durch seine Transparenz ermöglicht es die passive Solarenergienutzung für den dahinter liegenden Raum, durch das Durchströmen mit reversibel einfärbbarer Flüssigkeit kann es die Solarstrahlung absorbieren und die thermische Energie aktiv abführen.

Das erste Patent zu flüssigkeitsdurchströmten Fassaden meldete die Firma Pilkington Brothers Limited 1972 an: Zwischen zwei transparenten Scheiben, die mit Abstandhaltern auseinander gehalten werden, befindet sich eine Flüssigkeit. Über Verbindungskanäle ist der Scheibenzwischenraum mit einem Ausdehnbehälter verbunden. (Woods, 1972)

Frederick McKee formulierte in seinem Patent 1982 die Ideen von großformatigen Fenstern, gefüllt mit einer einfärbbaren Wärmeträgerflüssigkeit, angeschlossen an einen geschlossenen Flüssigkeitskreislauf und eingebunden in die Gebäudetechnik. Er formulierte in den folgenden Jahren auf seiner Internetseite Konzepte zur Integration von flüssigkeitsdurchströmten Gläsern im Gebäude und präsentierte Testergebnisse und Kennwerte seiner Prototypen⁴. (McKee, 1982), (McKee, 2007)

Ebenfalls 1982 meldete Robert Seemann sein Patent zu einem „All Season Window“ an. Er hatte die Idee zu einem Fensterelement mit drei transparenten Scheiben, zwei Scheibenzwischenräumen und wasserdicht angeschlossenen, mit Flüssigkeit befülltem Fensterrahmen. Die Zwischenräume konnten wahlweise mit der solarstrahlungsabsorbierenden Flüssigkeit befüllt werden, im Sommer der äußere, im Winter der innere. Der zweite Zwischenraum blieb mit Luft gefüllt. (Seemann, 1982)

Dietrich Schwarz entwickelte 1997 in seinem Patent „Method for Transparent Heat Insulation in a Building“ das Konzept für flüssigkeitsdurchströmte Glasfassaden, auf dem diese Dissertation aufbaut. Er erweiterte das flüssigkeitsdurchströmte Fensterelement zu einer Fassade mit integrierter, transparenter Wärmedämmung und reversibel einfärbbarer Flüssigkeit als Überhitzungsschutz und Heiz- und Kühlsystem. Seine Idee war es mit der Fluidglasfassade den Energiehaushalt im Gebäudeinneren zu kontrollieren und die Sonnenenergie zu nutzen. Der Flüssigkeitskreislauf sollte über Wärmetauscher mit dem Haustechnikkreislauf verbunden werden und mittels Wärmepumpen auf das gewünschte Niveau gehoben werden. Der in der Dissertation im Wesentlichen untersuchte Fluidglasaufbau mit zwei flüssigkeitsführenden Schichten, eine zum Außenraum und eine zum Innenraum orientiert, und einer dazwischen angeordneten Isolierglaseinheit gehen ebenfalls auf dieses Patent zurück. (Schwarz, 1998)

Unter der Leitung von Dietrich Schwarz wurden in den folgenden Jahren Forschungsprojekte basierend auf seinem Patent durchgeführt:

³ Als Wärmeträgermedium wird Wasser mit zusätzlichen Additiven verwendet, z.B. Frostschutzmittel.

⁴ Es waren auch einzelne Simulationsergebnisse der zu erwartenden Raumtemperatur dargestellt. Es stand jedoch kein öffentlich zugängliches Modell zur Verfügung. Die Methode der Modellbildung und eine Validierung waren nicht dargestellt.

- Im europäische Forschungsprojekt COST Aktion C13⁵ konnte die grundsätzliche Funktionsfähigkeit von Fluidglas nachgewiesen und Systemkonzepte entwickelt werden (Eberle, 2005).

Das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE wies nach, dass eine flüssigkeitsdurchströmte Glasfassade mittels Einfärbung der Flüssigkeit solare Strahlung über die gesamte Fassadenfläche gleichmäßig absorbiert und diese über einen angeschlossenen Flüssigkeitskreislauf mit Wärmetauscher abgeführt werden kann. Die Idee, das Fluidglassystem im Unterdruck zu betreiben, um die Scheibendicken und damit den Gesamtaufbau möglichst dünn halten zu können, geht aus diesem Projekt hervor. Darüber hinaus wurde ein Kreislaufsystem entwickelt, das durch nicht mischbare Flüssigkeiten – Wasser und Öl – einen Austausch von klarer und eingefärbter Flüssigkeit ermöglichte (Hermann, Hube & Platzer, 2003). Aus Brandschutzgründen wurde jedoch der Einsatz von brennbarem Öl in der Fassade im weiteren Verlauf der Forschung ausgeschlossen. (Hube, Platzer & Schwarz, 2004).

An der École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL wurde ein wasserdichter Randverbund entwickelt, der auch bei aktuellen Prototypen zum Einsatz kommt. In statischen Berechnungen konnte nachgewiesen werden, dass punktförmige Abstandhalter im Scheibenzwischenraum die Scheiben des Fluidglasaufbaus bei Unterdruck auseinanderhalten und grundsätzlich eingesetzt werden können. Bis heute konnte keine Lösung für das dauerhafte Anbringen punktförmiger Abstandhalter entwickelt werden. In den aktuellen Prototypen werden lineare Abstandhalter aus Kunststoff eingesetzt (siehe Abbildung 138).
- Im Rahmen darauf aufbauender Forschungsprojekte⁶, die von der Universität Liechtenstein geleitet wurden und an denen ich beteiligt war, entstanden funktionsfähige Fluidglasprototypen, die experimentell untersucht und mit deren Messergebnissen die entwickelten Simulationsmodelle validiert wurden. Teile der Forschungsarbeiten und der Ergebnisse sind in dieser Dissertation dargestellt.

Andere Erfinder haben in den letzten Jahren zahlreiche Patente zu flüssigkeitsdurchströmten Fenstern mit reversibel Einfärbung angemeldet, u.a.: (Su, 2003), (Kwang, 2004), (Hessabi, 2004), (Tinoco Cavalheiro & Sousa Tavares da Fonseca, Mário Alexandr, 2008) und (Nadtochiy, 2008). Veröffentlichungen zu praktischen Umsetzungen dieser Erfindungen liegen aktuell nicht vor.

Eine Forschergruppe an der Università Politecnica delle Marche konnte in experimentellen Untersuchungen nachweisen, dass ihre mit eingefärbter Flüssigkeit befüllten Fensterprototypen

⁵ Projekt zur europäischen Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung COST Aktion C13 „Glass and interactive Buildings Envelopes“ mit den Projektpartnern Eidgenössische Technische Hochschule Zürich ETH, der École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL und dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE).

⁶ U.a. das Forschungsprojekt „Fluid durchströmte Glasfassadenelemente zur aktiven Energietransmissionskontrolle“ (Projekt-Nr. ar-1-07, Forschungsförderungs fonds der Hochschule Liechtenstein) und das europäische Forschungsprojekt „FLUIDGLASS - Solar Thermal Glass Facades with Adjustable Transparency“.

den solaren Eintrag in das dahinter liegende Testvolumen signifikant reduziert (Carbonari, Fioretti, Naticchia & Principi, 2012).

Von der Universidad Politecnica de Madrid wurde 2008 ein weiteres Patent zu flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden angemeldet (Hernández Ramos, Hermanns, Gonzales del Ama & Hernández Jiménez, 2008). Die Forschergruppe forscht seither zu diesem Thema und ist auch an dem aktuellen europäischen Forschungsprojekt „Industrial Development of Water Flow Glazing Systems“ (InDeWaG) - beteiligt (Giménez Molina, 2011), (Universität Bayreuth et al., 2017). Im Rahmen dieses Projekts sollen flüssigkeitsdurchströmte Glasfassaden an Gebäuden umgesetzt werden. Als Spinn-off der Universidad Politecnica de Madrid wurde die Firma Intelliglass gegründet. Neben Konzeptionen zum Einsatz flüssigkeitsdurchströmter Gläser konnten Prototypen gebaut und experimentell untersucht werden. Darüber hinaus konnten Prototypenfassaden und -innentrennwände mit den flüssigkeitsdurchströmten Gläsern realisiert werden. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Anwendung als Kühlsystem (Hermanns, Hernández Ramos & del Ama Gonzales, Fernando, 2010). Die Fluidgläser von Intelliglass haben eine Flüssigkeitsschicht. Der flüssigkeitsführende Scheibenzwischenraum ihrer Fluidgläser hat i.d.R. eine Stärke von ca. 16 mm und wird, kombiniert mit einer Isolierglaseinheit, zum Außenraum hin orientiert angeordnet. Das Fluid strömt über perforierte Abstandhalter im Randverbund ein. In den Publikationen wird eine Einfärbung erwähnt, jedoch kann diese in den Darstellungen der umgesetzten Beispiele nicht nachvollzogen werden. Auch im InDeWaG-Projekt wird nach aktuellem Kenntnisstand keine Einfärbung umgesetzt, sondern nur klares Fluid verwendet. Es gibt keine Abstandhalter im Scheibenzwischenraum, d.h. es kann davon ausgegangen werden, dass der Flüssigkeitskreislauf nicht mit Unterdruck betrieben wird. Wie der Wasserdruck auf die Scheiben und den Randverbund abgefangen wird, kann nicht eindeutig nachvollzogen werden. Bei der umgesetzten Fassade sind die Scheibenhöhen auf ca. 60 cm begrenzt und der Wasserdruck ist damit deutlich geringer als bei raumhohen Verglasungen, bei Innenwänden sind auch raumhohe Verglasungen abgebildet. Voraussichtlich muss der Wasserdruck über die Scheibendicken und die Rahmenkonstruktion aufgenommen werden.

Die vorliegende Arbeit baut auf den Forschungsergebnissen und den Erkenntnissen von Prof. Dr.-Ing. Werner Lang zum Thema Fassade auf. Die Methodik dieser Arbeit orientiert sich am Aufbau seiner Dissertation (Lang, 2000). Der aktuelle Stand der Fassadenentwicklungen beruft sich im Wesentlichen auf den Fassaden Atlas (Herzog et al., 2016).

Die Untersuchungen in dieser Arbeit zum Thema Komfort, klimagerechtes Bauen und Climadesign basieren auf den Forschungsergebnissen und den Erkenntnissen von Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen und seinen MitarbeiterInnen am Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik. Als Standardwerke werden dabei die Veröffentlichungen Climadesign (Hausladen, 2005), Climaskin (Hausladen, Saldanha & Liedl, 2006) und (Hausladen et al., 2012) verwendet.

1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Aktuell steht keine Software zur Verfügung, mit der flüssigkeitsdurchströmte Glasfassadenelemente simuliert werden können. Zur Simulation der einzelnen Elemente von Fluidglas gibt es jeweils Standardsoftware, jedoch nicht für deren Kombination. Aus diesem

Grund ist es bislang nicht möglich, die Auswirkung der Fluidglasfassade auf den dahinterliegenden Raum, d.h. auf den Nutzerkomfort und den Energiebedarf und die potentiellen thermischen Energiegewinne, zu bestimmen.

Das Hauptziel der Dissertation ist es daher, ein validiertes Simulationsmodell für flüssigkeitsdurchströmte Glasfassadenelemente mit reversibler Einfärbung zu erstellen. Mit dem entwickelten Simulationsmodell sollen die Potentiale von Fluidglasfassaden untersucht und Kennwerte für die folgenden, im Fluidglas integrierten, Funktionen bestimmt werden:

- transparente, thermische Trennung zwischen Außen- und Innenraum
- transparenter, variabler Sonnen- und Blendschutz
- transparenter Solarkollektor
- transparentes, flächiges Heiz- und Kühlsystem

Darüber hinaus soll mit Hilfe des neuen Simulationsmodells exemplarisch die Anwendbarkeit von Fluidglasfassaden an klimatisch unterschiedlichen Standorten untersucht werden.

Zur Validierung des Fluidglasmodells müssen experimentelle Untersuchungen fluiddurchströmter Verglasungen durchgeführt werden. Das Fluidglas soll mit reversiblen Einfärbungen betrieben werden, um einen variablen Überhitzungsschutz zu gewährleisten. Eine geeignete reversible Einfärbung muss im weiteren Verlauf der Forschung gefunden werden⁷.

Um dynamisch-thermische Gebäudesimulationen durchführen zu können, müssen die Fluidglasfunktionen aktiv gesteuert werden. Dazu muss im weiteren Verlauf der Forschung eine Steuerungsstrategie entwickelt werden, die folgende Fluidglasfunktionen sinnvoll aufeinander abgestimmt regelt:

- Transparenzgrad der Flüssigkeiten, d.h. die Einfärbungskonzentration in den Fluiden
- Vorlauftemperatur und Massenstrom des äußeren und inneren Fluidkreislaufes

Die Steuerung muss die lokalen Außenraumbedingungen am jeweiligen Standort und die Komfortanforderungen im Innenraum je nach Nutzungen aufeinander abstimmen. Darüber hinaus sollten die thermischen Solargewinne maximiert und der Energiebedarf für die Gebäudeklimatisierung minimiert werden.

Die dieser Arbeit zugrundeliegende Hypothese ist:

Mit flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden können die Energieflüsse zwischen natürlichem Außenraum und künstlichem Innenraum effektiv kontrolliert werden. Die in den Innenraum transmittierende solare Einstrahlung kann mit Fluidgläsern gezielt gesteuert und gleichzeitig die innere Oberfläche der Fassade auf der gewünschten Temperatur gehalten werden. Die zum Heizen und Kühlen benötigte Temperaturdifferenzen zwischen dem Heiz- und Kühlmedium im Fluidglaskreislauf und dem Innenraum können dabei für die Gebäudeklimatisierung gering sein.

⁷ Die Untersuchungen zu geeigneten Einfärbungen wurden federführend durch die Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB), Schweiz durchgeführt. Außerdem durch Julian Renz in seiner von mir betreuten Bachelorarbeit an der TUM (Renz, 2013).

Dadurch kann in jeder Klimazone ein sehr guter visueller und thermischer Innenraumkomfort erreicht, der Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung und die Gebäudeklimatisierung gering gehalten und es können lokale, regenerative Energiequellen⁸ genutzt werden. Darüber hinaus können mit flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden nennenswerte thermische Energiegewinne erzielt werden.

Um diese These bestätigen zu können, müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Kann Fluidglas mittels reversibel einfärbbaren Flüssigkeiten die Transmission der Solarstrahlung in den Innenraum kontrollieren, d.h. kann die visuelle und solare Transmission und der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) gesteuert werden?
- Kann der visuelle Komfort durch Fluidglasfassaden gewährleistet werden?
- Kann die innere Oberflächentemperatur von Fluidglas nach Bedarf gesteuert und die Innenraumtemperatur damit kontrolliert werden, d.h. ist die Heiz- und Kühlleistung der Fluidglasfassade ausreichend und ist der thermische Innenraumkomfort durch Fluidglasfassaden gewährleistet?
- Kann die Heiz- bzw. Kühlfunktion der Fluidglasfassade mit moderaten⁹ Vorlauftemperaturen betrieben werden, d.h. ist die Fluidglasfassade ein flächiges Niedertemperatur-Heiz- und Kühlsystem?
- Können die Transmissionswärmeverluste vom Innenraum zum Außenraum bzw. die Transmissionswärmegewinne vom Außenraum in den Innenraum mit Fluidglas effektiv kontrolliert werden, d.h. sind die Energieverluste beim Heizen und Kühlen direkt an der Fassade so gering, dass Gebäude mit Fluidglasfassade einen niedrigen Energiebedarf aufweisen?
- Kann innerhalb der Fluidglasfassade die auftreffende Solarstrahlung absorbiert und mit dem Flüssigkeitskreislauf abgeführt werden, d.h. kann Fluidglas als Solarkollektor betrieben werden und sind die thermischen Gewinne von Fluidglasfassaden höher als deren Verluste?

⁸ Lokale, regenerative Energiequellen als Wärmequellen oder –senken sind in diesem Zusammenhang, z.B. Grundwasser, Erdreich, Luft oder solarthermische Gewinne.

⁹ Moderate Temperaturen bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Temperaturdifferenzen zwischen Heiz- und Kühlmedium und dem Innenraum gering sind.

Aufbau der Arbeit

Im ersten Kapitel erfolgt eine thematische Einführung mit der Darstellung des Stands der Technik, den Untersuchungszielen und der Eingrenzung des Untersuchungsrahmens.

Im zweiten Kapitel sind die Grundlagen beschrieben, die zur Erarbeitung der Untersuchungsziele und zur Einordnung von Fluidglasfassaden und deren einzelnen Funktionsschichten benötigt werden.

Im dritten Kapitel sind Systemkonzepte flüssigkeitsdurchströmter Glasfassaden und deren bauliche Umsetzung dargestellt.

Im vierten Kapitel wird die Modellbildung von Fluidgläsern erläutert. Sie besteht aus zwei Teilmodellen, dem „Strahlungsmodell“ und dem „Energiebilanzmodell“. Das „Strahlungsmodell“ simuliert den kurzwelligen Strahlungsdurchgang durch die transparente Fassade mit klaren und eingefärbten Fluidschichten und berechnet die transmittierten, absorbierten und reflektierten Strahlungsanteile. Mit „Energiebilanzmodell“ wird die Energiebilanz der im Fluidglas absorbierten Solarstrahlungsenergie und der durch die Flüssigkeitskreisläufe zugeführten Energie mit dem umgebende Außen- bzw. Innenraum berechnet.

Im fünften Kapitel sind die experimentellen Untersuchungen an Fluidglasprototypen beschrieben und die Messergebnisse dokumentiert. Mit Hilfe von Spektrometermessungen wurde dabei die wellenlängenabhängige Strahlungstransmission durch das Fluidglas ohne bzw. mit klarem und eingefärbtem Fluid untersucht, mit Messungen in einem Modellraumprüfstand das thermische Verhalten von Fluidglasfassaden und dem dahinter liegenden Raum.

Das sechste Kapitel zeigt die Validierung der beiden Fluidglasmodelle mit den Messergebnissen.

Im siebten Kapitel werden die Kennwerte der Funktionsschichten von Fluidgläsern dargestellt, die mithilfe der validierten Fluidglasmodelle berechnet wurden. Das Fluidglas wird in den aktuellen Stand der Technik vergleichbarere Systeme eingeordnet.

Im achten Kapitel werden dynamisch-thermische Gebäudesimulationen dargestellt. Ein Einzelbüroraum mit einer Fluidglasfassade wurde dabei an drei klimatisch unterschiedlichen Standorten nach jeweils drei Orientierungen simuliert. Die Gebäudesimulationen zeigen die Anwendbarkeit von Fluidglasfassaden in unterschiedlichen Klimazonen auf, d.h. dem erreichten thermischen und visuellen Komfort, dem Energiebedarf und den thermischen Energiegewinne.

Im letzten Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst und sich aus der Arbeit ergebende Forschungsansätze dargestellt.

1.4 Eingrenzung

Gebäudetyp und Nutzung

Die Herausforderungen für Glasfassaden hinsichtlich Überhitzung, Nutzerkomfort und Energiebedarf sind bei Hochhäusern, bei denen die erhöhten Windlasten den Einsatz von externen Sonnenschutzsystemen erschweren, mit großem Verglasungsanteil am größten. Je nach Orientierung und Standort müssen bereits ab einem Fensterflächenanteil von 30% geeignete Sonnenschutzmaßnahmen getroffen werden, um Überhitzungsprobleme und einen

erhöhten Kühlenergiebedarf zu vermeiden (Hausladen et al., 2012, S. 102). Bei Verwaltungsgebäuden wird dieser Effekt aufgrund der erhöhten internen Lasten und Anforderungen an den visuellen und thermischen Komfort verstärkt. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Arbeit als „Worst-Case-Szenario“ ein typischer Einzelbüroraum mit nahezu 100% Verglasungsanteil untersucht. Dabei werden exemplarisch drei Standorte mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen und jeweils unterschiedlichen Orientierungen betrachtet.

Für die Weiterverwendung des Warmwassers aus den solarthermischen Gewinne der Fluidglasfassade ist die Beschränkung allein auf Verwaltungsgebäude, aufgrund deren geringen Warmwasserbedarfs, nicht ideal (DIN V 18599-10, S. 29). Für diese Betrachtung wären zusätzliche Nutzungsarten sinnvoll, z.B. Wohnen, Restaurant oder Hotel. Entsprechende Nutzungsmischungen sind bei zeitgenössischen Hochhäusern, z.B. dem Burj Khalifa in Dubai, vorzufinden (Emaar Properties PJSC, 2016).

Fluidglas

Die Untersuchungen im Rahmen der Arbeit gehen grundsätzlich von einem Fluidglasaufbau mit zwei vollflächig flüssigkeitsdurchströmten Schichten in zwei Scheibenzwischenräumen außerhalb und innerhalb einer Isolierglaseinheit aus. Der Aufbau basiert auf dem Patent von Dietrich Schwarz (Schwarz, 1998) und grundlegenden Erkenntnissen aus einem vorangegangenen COST-Projekt.

Das Fluidglassystem wird mit Unterdruck betrieben. Daraus ergibt sich eine maximale Fluidtemperatur von ca. 80°C, da über dieser Temperatur das Fluid verdampft. Aufgrund des Unterdrucks müssen Stützen im Scheibenzwischenraum der Fluidschichten den Glasabstand gewährleisten. In der Arbeit sind die Effekte der Abstandhalter nicht berücksichtigt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die grundlegenden Systemansätze Sonnen- und Blendschutz, Heiz- und Kühlsystem und Solarkollektor untersucht. Das Fluidglas wird als ein einschaliges, raumhohes Fassadensystem betrachtet, das ohne zusätzliche Fassadensysteme, z.B. Sonnen- und Blendschutz, auskommt. Lüftungsfunktionen durch das offenbare Fluidglaselement oder zusätzliche Lüftungselemente und Be- und Entfeuchtung wurden nicht betrachtet. Die Einfärbung des Fluids soll strahlungsabsorbierend und nicht streuend sein, um die Solarkollektorfunktion zu unterstützen und eine Durchsicht zu ermöglichen. Lichtlenkfunktionen sind aus diesem Grund nicht gegeben und wurden nicht untersucht. Anforderungen an den Schall- und Brandschutz und statische Betrachtungen wurden nicht betrachtet. Die Untersuchungen betreffen nur die Glasmitte. Einflüsse von Elementen im Scheibenzwischenraum oder den Fensterrahmen wurden nicht berücksichtigt. Für die Flüssigkeiten wurden die Eigenschaften von destilliertem Wasser und den entsprechenden Farbstoffen berücksichtigt. Zusätzlich im Betrieb voraussichtliche benötigte Additive wie z.B. Frostschutzmittel wurden nicht betrachtet.

2 Grundlagen

2.1 Funktionskonzept von flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden

Mit der flüssigkeitsdurchströmten Glasfassade sollen die Energieflüsse zwischen Außen- und Innenraum kontrolliert und der Nutzerkomfort im Innenraum gewährleistet werden. Darüber hinaus soll der Energiebedarf des Gebäudes reduziert und solarthermische Gewinne sollen generiert werden (Stopper et al., 2014).

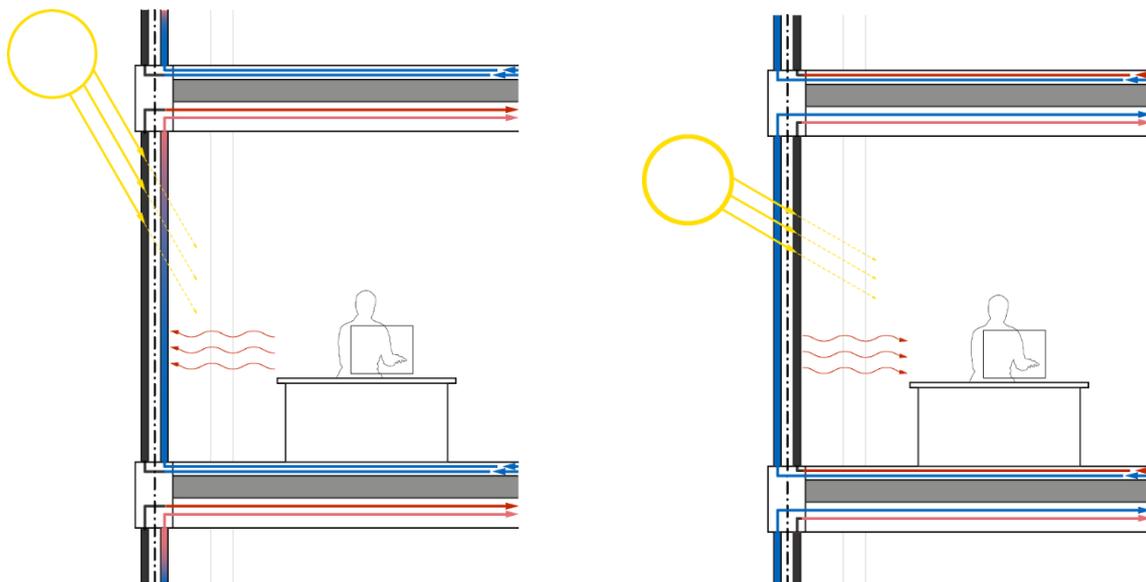


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Funktionskonzepts von flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden (links: Kühlfall, rechts: Heizfall)

Das Fluidglaskonzept sieht vor, Flüssigkeiten vollflächig in die transparente Glasfassade zu integrieren (siehe Abbildung 1). Die Flüssigkeiten können reversibel eingefärbt und in den Scheibenzwischenräumen zirkuliert werden. Ausgehend von den Voruntersuchungen und dem Patent von Dietrich Schwarz, auf denen diese Arbeit aufbaut, sieht die dargestellte Fluidglasfassade zwei flüssigkeitsführende Schichten vor, eine außerhalb und eine innerhalb der thermischen Trennung (gestrichelte Linie in Abbildung 1). Bei Kühlbedarf des Innenraums soll die äußere Flüssigkeit eingefärbt werden, um die Solarstrahlung außerhalb der thermischen Hülle zu absorbieren und den Energieeintrag in das Gebäude zu reduzieren. Zusätzlich kann das innere Fluid gekühlt werden. Bei Heizbedarf soll das innere Fluid eingefärbt werden, um die solaren Wärmegevinne dem Innenraum zur Verfügung zu stellen. Zusätzlich kann das innere Fluid beheizt werden.

Die Fluidglasfassade sieht folgende Elemente vor:

- transparente, solarstrahlungs- bzw. lichtdurchlässige Schichten, d.h. Verglasungen
- transparente, wärmedämmende Schichten
- Flüssigkeiten in Scheibenzwischenräumen

- reversible Einfärbung der Flüssigkeiten
- thermische Konditionierung der Flüssigkeiten

Mit diesen Elementen soll die Fluidglasfassade vier Systemkomponenten bilden:

- transparente, thermische Trennung zwischen Außen- und Innenraum
- transparenter, variabler Sonnen- und Blendschutz
- transparenter, fassadenintegrierter Solarkollektor
- transparentes, flächiges Heiz- und Kühlsystem

Bei der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fluidglasfassade sind folgende Parameter veränderbar:

vor dem Einbau:

- Verglasungsanteil – Abmessungen der Fluidglaselemente
- Verglasungsart – Anzahl der Gläser, Glasarten, Beschichtungen, Randverbund
- Scheibenzwischenräume – Anzahl, Stärke und Füllung (Gas, Vakuum oder Flüssigkeit)

im Betrieb durch Konditionieren der Flüssigkeiten im Scheibenzwischenraum:

- Vorlauftemperaturen
- Massenströme
- Konzentration der Einfärbung

2.2 Die Fassade als Schnittstelle zwischen Außen- und Innenraum

Fassaden bilden die Schnittstelle zwischen dem natürlichen Außenraum mit seinen unterschiedlichen und wechselnden Verhältnissen, je nach Standort, Tages- und Jahreszeit, und dem Innenraum mit seinen nahezu konstanten Anforderungen an den Nutzerkomfort (Hausladen et al., 2006, S. 151). Dabei übernimmt die Fassade zahlreiche zentrale Funktionen, die den Energiebedarf des Gebäudes beeinflussen. Je besser die Fassade funktioniert, desto geringer ist der Technik- und Energieaufwand für die Raumkonditionierung (Hausladen et al., 2006, S. 150–151). Insbesondere bei transparenten Fassaden sind die Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Komfort und den Energiebedarf besonders groß, aber auch die Notwendigkeit mithilfe von Manipulatoren die Funktionen wie Sonnen-, Blend- und Wärmeschutz den wechselnden Klimabedingungen anzupassen (Krippner, Lang & Schittich, 2006, S. 31–45). Die Manipulatoren müssen auf z.T. zeitgleiche Zielkonflikte bestmöglich reagieren können, z.B. gute Tageslichtverfügbarkeit und solare Gewinne vs. Blendung, Überhitzung und Wärmeschutz. Je besser die Fassade funktioniert, desto geringer ist der Technik- und Energieaufwand für die Raumkonditionierung (Hausladen et al., 2006, S. 150–151).

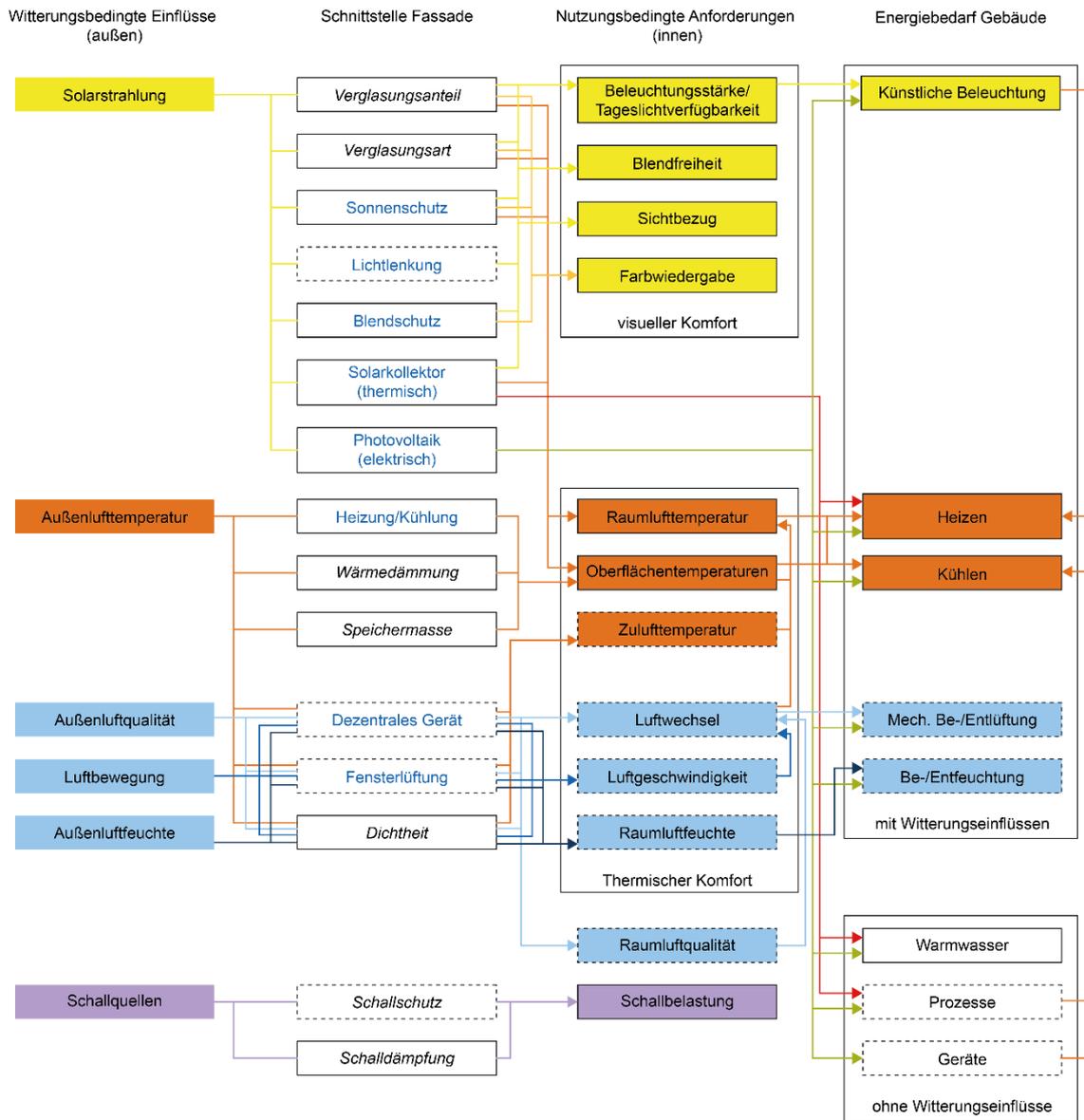


Abbildung 2: Transparente Fassade mit integriertem Sonnen- und Blendschutz, Solarthermie, Photovoltaik und Heiz- und Kühlsystem als Schnittstelle zwischen Außen- und Innenraum; Einflüsse auf den Nutzerkomfort und den Energiebedarf des Gebäudes (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Hausladen et al., 2006, S. 151), (Lang, 2000, S. 16), (DIN EN ISO 7730), (DIN EN 410); (Lemaitre, 2012, S. 235–302))

In Abbildung 2 sind die Schnittstellenfunktionen der transparenten Fassade mit integriertem Sonnen- und Blendschutz, Solarthermie, Photovoltaik¹⁰ und Heiz- und Kühlsystem zwischen Außen- und Innenraum und deren Einfluss auf den Nutzerkomfort und den Energiebedarf des Gebäudes dargestellt. Es wird zwischen im Betrieb veränderbaren und nicht veränderbaren Eigenschaften unterschieden. Grundsätzlich sollten Fassadensysteme nach Standort und Nutzung individuell konzipiert werden. Das Fluidglaskonzept sieht einen standortunabhängigen Einsatz ohne zusätzliche Manipulatoren vor und muss daher auf alle inneren und äußeren Gegebenheiten flexibel reagieren können.

Für die Fluidglasfassade sind nach dem Funktionskonzept (siehe Kapitel 2.1) folgende Schnittstellenfunktionen relevant¹¹:

- mit nicht veränderbaren Eigenschaften: Verglasungsanteil¹², -art, Wärmedämmung und Speichermasse
- mit veränderbaren Eigenschaften: Sonnen- und Blendschutz, Solarkollektor sowie Heiz- und Kühlsystem

Die Fluidglasfassade beeinflusst den visuellen und teilweise den thermischen Nutzerkomfort. Darüber hinaus kann sie den Energiebedarf für künstliche Beleuchtung, Heizen und Kühlen direkt, und über die solarthermischen Gewinne den Bedarf an thermischer Energie für Heizungsunterstützung, Warmwasserbereitstellung und ggf. Prozesswärme indirekt beeinflussen.

Im weiteren Verlauf werden die benannten Schnittstellenfunktionen und deren Einflüsse auf den Komfort und den Energiebedarf untersucht.

2.3 Solar- und Wärmestrahlung

Die für das Fluidglas entscheidende regenerative Energiequelle ist die von der Sonne ausgehende elektromagnetische Strahlung bzw. der Anteil, der auf der Erdoberfläche ankommt. Diese gilt es zu kontrollieren, d.h. zu absorbieren und in Form von Wärme zu speichern (Kaltschmitt, 2013, S. 140). Die beiden entscheidenden Strahlungsarten sind die initiale, kurzwellige Solarstrahlung und die nach Absorption und Umwandlung in Wärme von den Festkörpern bzw. Flüssigkeiten ausgehende langwellige Wärmestrahlung.

¹⁰ Eine Integration von Photovoltaik im Fluidglasaufbau ist im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgesehen. In weiteren Forschungsarbeiten könnte der Einbau von PV-Zellen, z.B. einlaminiert in die äußere Verglasung, untersucht werden, um zusätzlich zur thermischen auch die elektrische Energiegewinnung über die Fluidglasfassade zu ermöglichen.

¹¹ Lichtlenkung ist beim Fluidglaskonzept mit einer vollflächigen, nicht streuenden Einfärbung der Flüssigkeiten nicht möglich. Lüftungsfunktionen und Schallschutz werden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

¹² Der Fensterflächenanteil wird im Rahmen dieser Arbeit mit nahezu 100% angenommen, um den Extremfall zu untersuchen.

Solarstrahlung

Die Solarstrahlung lässt sich vereinfacht in die drei Wellenlängenbereiche Ultraviolettstrahlung (UV) von 100 bis 380 nm, für das menschliche Auge sichtbare Strahlung (VIS) von 380 bis 780 nm und Infrarotstrahlung (IR) von 780 bis $5 \cdot 10^8$ nm einteilen, wie in Tabelle 1 zu sehen ist. Der Infrarotbereich wird dabei noch in nahe Infrarotstrahlung (NIR) zwischen 780 bis 3000 nm und in mittlere, ferne Infrarotstrahlung (IR-C) von 3000 bis $5 \cdot 10^8$ nm unterteilt (DIN 5031-7, S. 1).

Bezeichnung		Spektralbereiche		
		Kurzzzeichen		Wellenlänge λ [nm]
Ultraviolettstrahlung	Vakuum UV	UV	UV-C	100 - 280
	mittleres UV		UV-B	280 - 315
	nahes UV		UV-A	315 - 380
Sichtbare Strahlung		VIS		380 - 780
Infrarotstrahlung	nahes IR	IR	NIR	780 - 3000
	mittleres IR		IR-C	3000 - $5 \cdot 10^8$
	fernes IR			

Tabelle 1: Einteilung der optischen Strahlung (Quelle: Eigene Darstellung nach DIN 5031-7)

Die solare Strahlung gelangt in zwei Wellenlängenbereichen durch die Erdatmosphäre auf die Erde. Der erste Bereich liegt zwischen 300 und 5000 nm, der zweite Bereich zwischen $10 \cdot 10^7$ bis $10 \cdot 10^{11}$ nm, wobei nur der erste Bereich aus Leistungsgründen für die Solarenergienutzung relevant ist (Kaltschmitt, 2013, S. 57–60).

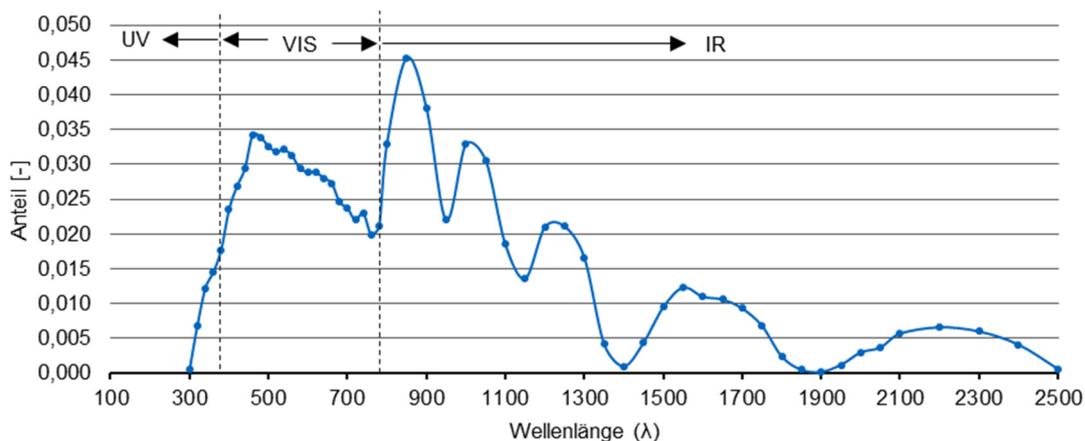


Abbildung 3: Normierte relative spektrale Verteilung der Globalstrahlung S_λ (Quelle: Eigene Darstellung nach EN 410 Tabelle 2)

Für Glasanwendungen im Bauwesen ist nach EN 410 der Wellenlängenbereich zwischen 300 und 2500 nm der solaren Strahlung zu betrachten. Die auf die Erde auftreffende Solarstrahlung setzt sich nach EN 410 aus ca. 3% ultravioletter Strahlung (UV), ca. 57% sichtbarer Strahlung (VIS) und ca. 40% Infrarotstrahlen (IR) zusammen (siehe Abbildung 3). Die Gewichtung der solaren Einstrahlung erfolgt in dieser Arbeit entweder nach EN 410 Tabelle 1 und 2 (DIN EN 410,

S. 23–24) (siehe auch Anhang 16.1) oder nach ISO 9845-1 Tabelle 1 Spalte 2, d.h. ASTM E 981-87¹³, gemäß Abbildung 4 (ISO 9845-1, S. 4–6).

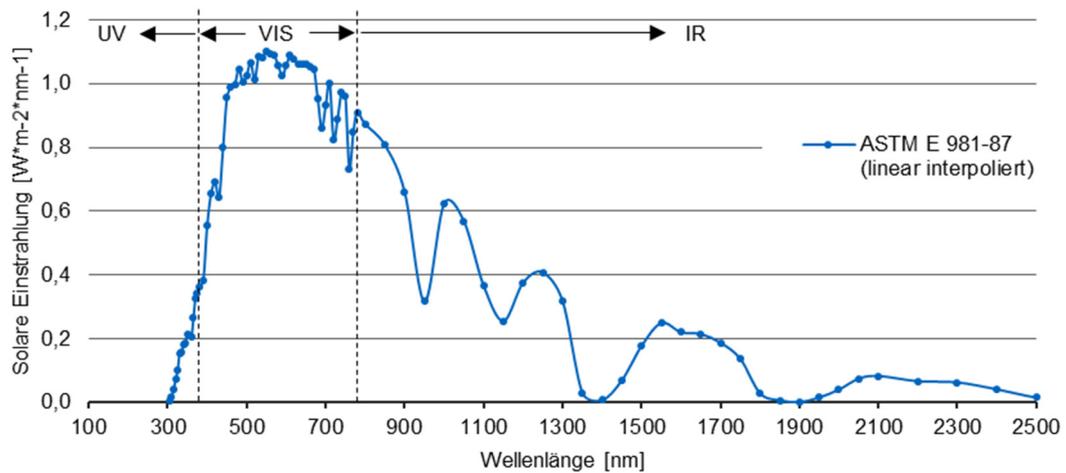


Abbildung 4: Solare Einstrahlung in 88 Wellenlängenschritten (Quelle: Eigene Darstellung nach ISO 9845-1)¹⁴

Bei Berechnungen für den visuellen Wellenlängenbereich (VIS) erfolgt eine Gewichtung mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad des helladaptierten Auges $V(\lambda)$ nach EN 410 Tabelle 1 (DIN EN 410, S. 23). Wie in Abbildung 5 zu sehen ist, hat das helladaptierte menschliche Auge seine maximale Empfindlichkeit bei 550 nm, d.h. im hellgrünen Bereich (DIN EN 410, S. 23).

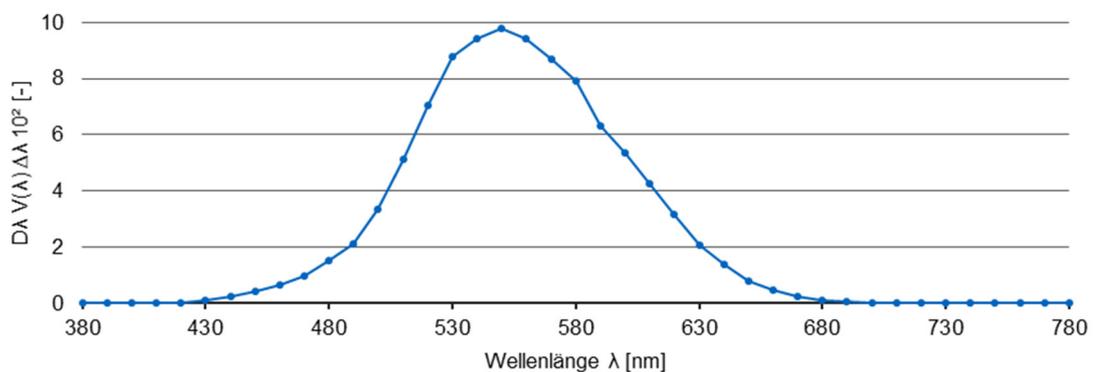


Abbildung 5: Gewichtung des visuellen Spektrums gemäß EN 410 Tabelle 1 (Quelle: Eigene Darstellung nach EN 410)¹⁵

¹³ Die American Society for Testing and Materials (ASTM) entwickelte zwei Referenzspektren für auf die Erde auftreffende solare Einstrahlungen, E891 „direct normal solar spectral irradiance for air mass 1,5“ und E892 die entsprechende Einstrahlung auf eine 37° zum Äquator geneigte Fläche. Die Berechnung der wellenlängenabhängigen Werte für solare Transmission, Reflexion und Absorption erfolgt in Window mit E891 gemäß NFRC 300-2003.

¹⁴ Die Festlegung der 88 Wellenlängenschritte erfolgt nach EN 410. Die Werte aus ISO 9845-1 Tabelle 1 Spalte 2 sind linear interpoliert.

¹⁵ Gewichtung solares Wellenlängenspektrum nach EN 410 Tabelle 1: „Normierte relative spektrale Strahlungsverteilung $D\lambda$ der Normlichtart D65, multipliziert mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ und dem Wellenlängenintervall $\Delta\lambda$ “

Wärmestrahlung und Emissivität

Die auf einen Körper auftreffende Solarstrahlung wird z.T. transmittiert, reflektiert und absorbiert. Dabei geht nach dem Energieerhaltungssatz keine Energie verloren, d.h. die Summe aus Transmission, Reflexion und Absorption entsprechen 100%. Der absorbierte Anteil wird in Form von Konvektion, Wärmeleitung und –strahlung an die Umgebung abgegeben, bis ein Temperaturgleichgewicht entsteht. Jeder Körper mit einer Temperatur über 0 Kelvin emittiert Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung. Er steht im Strahlungsaustausch mit seiner Umgebung. Die Strahlungsleistung nimmt mit der Temperaturdifferenz des Körpers zu seiner Umgebung zu. Das dabei emittierte Wellenlängenspektrum ist abhängig von der Körpertemperatur, wobei sich mit zunehmender Temperatur die Wellenlänge verkürzt.

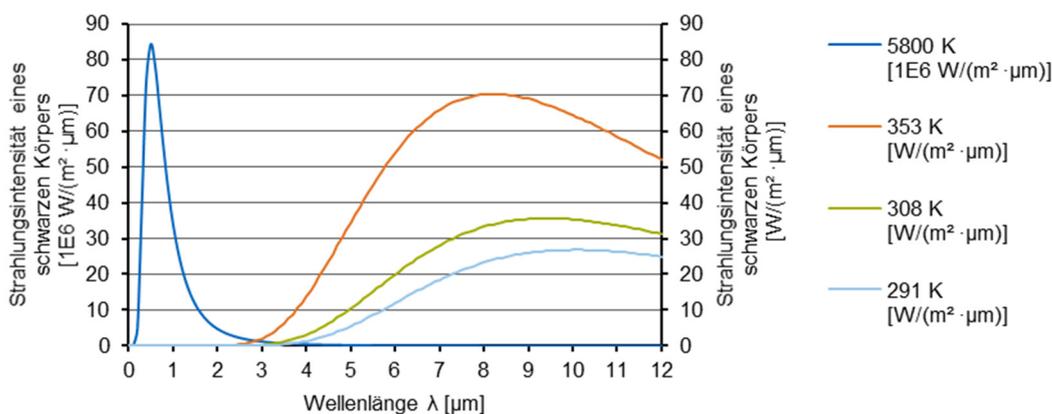


Abbildung 6: Strahlungsspektren idealer schwarzer Körper mit den Temperaturen von 5800 K (Sonne), 353 K (ca. 80°C), 308 K (ca. 35°C) und 291 K (ca. 18°C) bei einer Umgebungstemperatur von 300 K (Quelle: Eigene Darstellung mit (Tabellenblatt zu Plancksches Strahlungsgesetz))

Ein idealer Strahler oder Schwarzer Körper absorbiert alle auf ihn auftreffende Strahlung und sendet abhängig von seiner Temperatur eine Wärmestrahlung aus. Er gibt das Maximum der theoretischen Strahlungsleistung E_b vor, welches durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben wird.

$$E_b = \sigma T_s^4 \quad (1)$$

mit

E_b = Maximale Strahlungsleistung

σ = Stefan Boltzmann-Konstante ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$)

T_s = Absolute Temperatur

Sein Emissionsvermögen ist proportional zu seinem Absorptionsvermögen, d.h. er absorbiert 100% der Strahlung und emittiert 100% seiner Energie in Form von thermischer Strahlung (Incropera, 2013, S. 9–11). In Abbildung 6 sind die Strahlungsintensitäten Schwarzer Körper mit unterschiedlichen Temperaturen innerhalb des Wellenlängenspektrums von 0 bis 12 Mikrometer dargestellt. 5800 Kelvin entspricht dabei in etwa der Temperatur der emittierenden Sonnenschicht, 291 bis 353 Kelvin in etwa dem zu erwartenden Temperaturbereich von

Fluidgläsern. Der Wellenlängenbereich, der für die Wärmestrahlung von Fluidgläsern zu betrachten ist, schließt ab ca. 2500 nm an den Bereich der Solarstrahlung nach EN 410 an.

Mit dem Emissionskoeffizienten ϵ wird das Verhältnis der an die Umgebung abgestrahlten Leistung eines Körpers gegenüber eines idealen Schwarzen Körpers beschrieben (Kaltschmitt, 2013, S. 182–183). Bei unbeschichteten Verglasungen beträgt der Emissionskoeffizient i.d.R. 0,837, mit Low-E-Beschichtungen kann die Emissivität der Glasoberfläche aktuell bis auf 0,01 reduziert werden (Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH).

2.4 Komfort

Das Wohlbefinden des Menschen im Innenraum basiert auf der subjektiven Wahrnehmung einer Vielzahl von Umgebungseinflüssen (z.B. Raumtemperatur, Raumluftfeuchte, Beleuchtungsstärke, Geräuschpegel) bei individuellen intermediären Bedingungen (z.B. Kleidung, Tätigkeitsgrad) und physiologischen Bedingungen (z.B. Alter, Geschlecht, Konstitution). Für komfortable empfundene Arbeitsbedingungen muss ein thermisch, akustisch, visuell und olfaktorisch angenehmes Raumklima gewährleistet sein. Ein guter Innenraumkomfort leistet einen wichtigen Beitrag zu Wohlempfinden, Leistungsfähigkeit und Gesundheit des Nutzers am Arbeitsplatz. (Hegger, Fuchs, Stark & Zeumer, 2007, S. 55–60)

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, kann über die Fluidglasfassade durch das reversible Einfärben, das thermische Konditionieren und das Steuern der Fließgeschwindigkeit der Flüssigkeiten im Scheibenzwischenraum Einfluss auf den visuellen und z.T. den thermischen Komfort (Raumlufttemperatur und Oberflächentemperatur) im Innenraum genommen werden. Die im Weiteren ausgeführten Komfortgrundlagen dienen sowohl der Zielausrichtung der Fluidglasentwicklung, der Optimierung der Betriebsstrategie als auch der Beurteilung der Leistungsfähigkeit der Fluidglasfassade.

2.4.1 Visueller Komfort

Licht, insbesondere das dynamische Tageslicht, hat einen positiven psychischen und physischen Einfluss auf den Menschen. Am Arbeitsplatz ist auf eine gute, störungsfreie Beleuchtung, v.a. mit Tageslicht, zu achten, da sie die Gesundheit, das Wohlbefinden und die Produktivität des Nutzers positiv beeinflusst (VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, 2002). Die Fassade bestimmt über das Zusammenspiel von Verglasung, Sonnen- und Blendschutz sowohl über eine quantitativ ausreichende Tageslichtversorgung und Beleuchtungsstärke als auch über das Verhindern von störenden Einflüssen, z.B. Blendung oder verfälschte Farbwiedergabe im Innenraum. Insbesondere bei Bildschirmarbeitsplätzen, von denen i.d.R. bei Bürogebäuden auszugehen ist, muss durch geeignete Beleuchtung und Lichtschutzvorrichtungen ein angemessener Kontrast zwischen Bildschirm und Arbeitsumgebung gewährleistet sein und Blendwirkungen, Reflexionen und Spiegelungen auf dem Bildschirm vermieden werden (Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, 1996, S. 3). Die Sichtverbindung nach außen ist ein wichtiges Kriterium für die Nutzerzufriedenheit, da diese den Nutzer, z.B. über Tageszeit, Ort und Wetterbedingungen, informiert (Bundesbauministerium, 2013).

Tageslichtverfügbarkeit

Nach Vorgaben der Arbeitsstättenverordnung müssen Arbeitsstätten möglichst ausreichend Tageslicht erhalten. Dies ist grundsätzlich durch ausreichende, lichtdurchlässige Flächen zu gewährleisten. Deren Verhältnis zur Raumgrundfläche muss mind. 1:10 betragen. Darüber hinaus muss der Tageslichtquotient, d.h. das Verhältnis der Beleuchtungsstärke im Innenraum zu der im Freien, bei bedecktem Himmel mindestens 2% am Arbeitsplatz betragen (ASR A3.4, 2011 - 04, S. 4). Bei Tageslichtquotienten im Arbeitsbereich von >3% kann mit einer optimalen Tageslichtautonomie von über 70% gerechnet werden, d.h. in über 70% der Nutzungsstunden ist das Tageslicht ausreichend ohne Kunstlicht dazu zu schalten. Arbeitsplätze können in diesem Fall als tageslichtorientiert bewertet werden (Augustesen & Brandi, 2005, S. 22–25). Nach DIN EN 5034-1 ist darüber hinaus für einseitige belichtete Arbeitsräume ein Tageslichtquotient von mindestens 0,75% bzw. im Mittel mind. 0,9% in halber Raumtiefe mit einem Meter Abstand von den Seitenwänden in 0,85 m über dem Fußboden vorgeschrieben (DIN 5034-1, S. 17).

Beleuchtungsstärke

Anforderungen an Beleuchtungsstärken mit Tages- und Kunstlicht in Abhängigkeit von Raumtyp und Tätigkeit sind in den Technischen Regeln für Arbeitsstätten vorgegeben. Für überwiegend sitzende Tätigkeiten, z.B. schreiben und lesen, muss die horizontale Beleuchtungsstärke in 0,75 m über dem Boden im Bereich der Sehaufgabe bei Büros mind. 500 Lux betragen, im Umgebungsreich 300 Lux im Mittel (ASR A3.4, 2011 - 04). Bei reiner Tageslichtbeleuchtung ist die 0,6 fache Beleuchtungsstärke, d.h. 300 Lux, ausreichend (DIN 5034-1, S. 13). Die ideale Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene bei Bildschirmarbeitsplätzen liegt nach ViS bei 500 – 1500 Lux (ViS Verband innenliegender Sicht- und Sonnenschutz e.V., 2014, S. 6). Bei experimentellen Untersuchungen wurden höherer Beleuchtungsstärken bis 4000 Lux als nicht störend empfunden. Die optimale, die Leistungsfähigkeit des Nutzers fördernde Beleuchtungsstärke lag bei 2000 Lux (Hentschel, 1994, S. 217–222).

Sichtverbindung

Ergebnisse wissenschaftlicher Untersuchungen haben gezeigt, dass sich eine gute Sichtverbindung nach außen positiv auf die Leistung und die Gesundheit von Büroarbeitern auswirkt, mehr noch als die Beleuchtungsstärke (Heschong, 2003, S. 137–138). Aufenthaltsräume müssen mit durchsichtigen, verzerrungsfreien und möglichst farbneutral verglasten Fenstern ausgestattet sein, um eine möglichst ungehinderte Sichtverbindung nach außen zu gewährleisten. Die Fenster müssen so angeordnet und dimensioniert sein, dass ein Ausblick möglich ist (DIN 5034-1, S. 9–11). Die Sichtverbindung nach außen sollte auch bei aktiviertem Sonnen- oder Blendschutz gegeben sein, zumindest zu einem Großteil der Nutzungszeiten (Cakir, 2015, S. 29). Nach DIN EN 14501 ist bei Sonnenschutzrichtungen ein hohe senkrechte Lichttransmission bei gleichzeitig geringer diffuser Lichttransmission anzustreben (DIN EN 14501, S. 18).

Farbwiedergabe

„Für Sehleistung, Behaglichkeit und Wohlbefinden müssen die Farben der Umgebung, der Objekte und der menschlichen Haut natürlich, unverfälscht und auf eine Art wiedergegeben

werden, die Menschen attraktiv und gesund aussehen lässt.“ (DIN EN 12464-1, S. 17). Das durch Verglasung und Sonnen- bzw. Blendschutz fallende Tageslicht soll Farben im Innenraum möglichst unverfälscht wiedergeben. Quantitativ kann diese Eigenschaft nach DIN EN 410 als Farbwiedergabeindex R_a berechnet werden. Dabei ist bei einem Maximalwert von 100 der spektrale Transmissionsgrad im sichtbaren Strahlungsspektrum vollkommen konstant (DIN EN 410, S. 22). Der Farbwiedergabeindex für die Kombination aus Verglasung und Sonnen-/Blendschutz sollte größer 80 sein (DIN EN 12464-1, S. 34).

Blendfreiheit Tageslicht

Die DIN EN 12665 definiert Blendung als „Sehzustand, der als unangenehm empfunden wird oder eine Herabsetzung der Sehfunktion zur Folge hat, verursacht durch eine ungünstige Leuchtdichteverteilung oder durch zu hohe Kontraste“ (DIN EN 12665, S. 6).

Dabei kann in psychologische, d.h. gefühlte, und physiologische, d.h. messbare, Blendung unterschieden werden. Blendung tritt bei zu hohen Leuchtdichten auf, zu hohe Leuchtdichtekontraste wiederum können durch häufige Umadaptation der Augen zu Ermüdung führen (DIN EN 12464-1, S. 9). Es wird unterschieden in Direkt-, Kontrast- und Reflexblendung. Direktblendung tritt bei zu hohen Leuchtdichten auf, wobei es ab 10.000 cd/m^2 zur Absolutblendung kommt. Kontrastblendung entsteht durch zu hohe Leuchtdichteunterschiede. Um diese am Arbeitsplatz zu vermeiden, sollten die Leuchtdichteunterschiede zwischen Infeld, dem Arbeitsbereich und dem Umfeld ausgewogen sein und ein Verhältnis von 10:3:1 nicht übersteigen. Nach DIN 5035-7 sollten dabei große Flächen im Raum eine Leuchtdichte von max. 1000 cd/m^2 und hinter dem Bildschirm max. 500 cd/m^2 haben. Reflexblendung kann insbesondere bei Bildschirmarbeitsplätzen auftreten, wenn sich Lichtquellen oder leuchtende Oberflächen im Bildschirm spiegeln. Auch hier sollten die sich spiegelnden Flächen 1000 cd/m^2 nicht überschreiten (DIN 5035-7, S. 7–21). Mit einer Anordnung der Bildschirmarbeitsplätze senkrecht zur Fassade und hellen, matten Oberflächen von Tischen, Wänden und Decken kann der Blendung entgegen gewirkt werden (Hausladen et al., 2006, S. 70), (Hausladen, 2005, S. 21).

Tageslicht wird weniger kritisch als Kunstlicht beurteilt. Untersuchungen an Bildschirmarbeitsplätzen zeigen auf, dass auch höhere Leuchtdichten bei Tageslicht als nicht störend empfunden werden. Erst ab einer Leuchtdichte von ca. 8000 cd/m^2 auf der Fassade waren 5% der Probanden mit den Verhältnissen unzufrieden (Schuster, 2006, S. 158–159).

2.4.2 Thermischer Komfort

Die Beurteilung der thermischen Behaglichkeit hängt vom Wärmehaushalt des Menschen ab. Als optimal werden neutrale Verhältnisse beurteilt, bei denen der Mensch weder Wärme abgeben noch produzieren muss. Dabei spielen neben den Umgebungsbedingungen - Lufttemperatur, mittlere Strahlungstemperatur, Luftgeschwindigkeit und Luftfeuchte - auch die körperliche Verfassung, die Art der Bekleidung und die Tätigkeit eine große Rolle (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 34).

Für Arbeitsumgebungen, basierend auf dem menschlichen Thermoregulationsmodell von Ole Fanger, gibt die DIN EN ISO 7730 Bewertungsvorgaben für die thermische Behaglichkeit durch die Berechnung des vorausgesagten mittleren Votums (predicted mean vote, PMV) und dem

vorausgesagten Prozentsatz an Unzufriedenen (predicted percentage of dissatisfied, PPD) und Kriterien für die lokale thermische Behaglichkeit vor. Die Raumlufttemperatur und die mittlere Strahlungstemperatur, die durch Fluidglas beeinflusst werden können, fließen dabei in die Berechnungen mit ein. ISO 7730 gibt drei Kategorien, A bis C, für das gewünschte Umgebungsklima eines Raumes vor (DIN EN ISO 7730, S. 17–21). Aus ihnen werden Gestaltungskriterien für die operative Raumtemperatur und die Oberflächentemperaturen je nach Raumarten abgeleitet. Die Kategorien werden auch in der DIN EN 15251 (DIN EN 15251) übernommen¹⁶, die grundlegende Anforderungen für Berechnungsverfahren zur Energieeffizienz von Gebäuden für die Europäische Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) (16.12.2002) mit festlegt. Für Gebäude mit einem hohen Maß an Erwartungen an den thermischen Komfort, für besonders empfindliche und anfällige Personen wird die Einhaltung der Kategorie A empfohlen, für neue und renovierte Gebäude mit einem normalen Maß an die Erwartungen Kategorie B und für ein moderates Maß an Erwartungen, z.B. bei Bestandsgebäuden die Kategorie C.

Operative Temperatur

Für die Beurteilung der thermischen Behaglichkeit wird die operative Raumtemperatur herangezogen. Diese ist für normale Bürotätigkeiten und Luftgeschwindigkeiten unter 0,2 m/s als mittlere Temperatur aus der Raumlufttemperatur und der Temperatur der Raumumschließungsflächen definiert (DIN EN ISO 7730). Die Temperaturdifferenz zwischen Lufttemperatur und der mittleren Strahlungstemperatur aller Raumbooberflächen sollte 3 Kelvin nicht überschreiten (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 36).

Gebäude-/Raumtyp	Kategorie	Operative Temperatur [°C]	
		Kühlperiode	Heizperiode
Einzelbüro	A	23,5 – 25,5	21,0 – 23,0
	B	23,0 – 26,0	20,0 – 24,0
	C	22,0 – 27,0	19,0 – 25,0

Tabelle 2: Gestaltungskriterien für Büroräume nach ISO 7730 Tabelle A.5 (DIN EN ISO 7730, S. 21)¹⁷

Als Gestaltungsrichtlinie für Büroräume können die Kategorien nach ISO 7730 angenommen werden, wie in Tabelle 2 zu sehen ist. Eine Abweichung von den Grenzwerten an 3% bzw. 5% der Arbeitsstunden ist zulässig¹⁸. Als Mindestanforderungen für die Lufttemperatur gelten nach den Arbeitsstättenrichtlinien bei leichter, sitzender Tätigkeit für die Heizperiode mind. 20°C und

¹⁶ In der DIN EN 15251 werden die Kategoriebezeichnungen I, II und III anstelle von A, B und C verwendet.

¹⁷ Kühlperiode: Bekleidung 0,5 clo, relative Luftfeuchte 60%. Heizperiode: Bekleidung 1,0 clo, relative Luftfeuchte 40%.

¹⁸ Die Dauer der zulässigen Abweichungen nach DIN EN 15251 ist in Anhang G beschrieben. Bei einer Beurteilung nach DGNB dürfen die Temperaturbereiche in der Heizperiode nicht unterschritten, jedoch für Kategorie A max. 3% und für B bzw. C max. 5% der Nutzungszeit überschritten werden. In der Kühlperiode dürfen die Temperaturgrenzen für Kategorie A 3% und für B und C max. 5% der Nutzungszeit unter- bzw. überschritten werden (Lemaitre, 2012, S. 235-254).

in der Kühlperiode max. 26°C bzw. mit zusätzlichen Kompensationsmöglichkeiten max. 35°C vor (ASR A3.5, Juni 2010, S. 4–7).

Strahlungsasymmetrie

Lokale Unbehaglichkeit kann auch durch zu große Temperaturunterschiede der Raumboflächen hervorgerufen werden. Insbesondere asymmetrische Strahlung durch zu warme Decken oder zu kalte Wände, v.a. Fenster, wird als unangenehm empfunden. Vertikale Temperaturunterschiede von 3 Kelvin zwischen Fuß- und Kopfbereich sollten nicht überschritten werden. Als Grenzwerte für die Oberflächentemperaturen gegenüberliegender Wände, d.h. auch Fassade und Innenwände, sind max. 23°C für warme Wände und max. 10°C für kalte Wände einzuhalten (DIN EN ISO 7730). Als Anhaltswerte für die Praxis von Bürogebäuden können daraus minimal 18°C und maximal 35°C für die Glasfassadeninnenoberflächen abgeleitet werden (Verein Deutscher Ingenieure, 2009, S. 12–13).

Nach ASHRAE Standard 55 sollten folgende Strahlungstemperaturasymmetrien nicht überschritten werden (ASHRAE 55, 2013, S. 11):

- Deckentemperatur <5°C wärmer als die Fußbodentemperatur
- Deckentemperatur <14°C kälter als die Fußbodentemperatur
- Wandtemperatur <23°C wärmer als die Lufttemperatur
- Wandtemperatur <10°C kälter als die Lufttemperatur

Raumluftfeuchte

Bei gemäßigten Temperaturen (< 26°C) und mäßiger körperlicher Arbeit hat die Luftfeuchtigkeit einen geringen Einfluss auf die thermische Behaglichkeit (DIN EN ISO 7730, S. 47). Zu trockene Luft (<15% bis 20% relative Luftfeuchtigkeit) kann jedoch zu Reizungen der Augen und Luftwege führen. Zu hohe Luftfeuchtigkeit kann zu Schwüleempfinden und mikrobiellem Wachstum und Tauwasserausfall an kalten Oberflächen führen (DIN EN 15251, S. 15). Der absolute Feuchtegehalt in der Luft sollte 12 g/kg nicht überschreiten. Bei einer operativen Raumtemperatur zwischen 20°C und 26°C wird eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 30 % und 65% als behaglich empfunden (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 37). Bei flächigen Kühlsystemen wie bei der Fluidglasfassade, muss die Raumluft ggf. entfeuchtet werden, um Tauwasserbildung an der Oberfläche zu vermeiden. Bei einer minimal zulässigen Oberflächentemperatur der inneren Glasoberfläche von 18°C und einer Raumtemperatur von max. 27°C darf die relative Luftfeuchtigkeit von 58% nicht überschritten werden.

Luftbewegung

Frischlufte sollte mit möglichst geringer Geschwindigkeit in den Raum geführt werden und sich dort möglichst gleichmäßig verteilen. Ein Zugluftempfinden des Nutzers ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit, der Lufttemperatur und dem Turbulenzgrad. Je niedriger die Lufttemperatur desto unangenehmer werden höhere Luftbewegungen empfunden. Im Winter können bereits Luftgeschwindigkeiten von 0,16 m/s als unangenehm empfunden werden, im Sommer 0,19 m/s. (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 37)

Adaptiver thermischer Komfort¹⁹

Nach Untersuchungen der ASHRAE Kommission können die Raumtemperaturgrenzen bei Räumen ohne mechanische Kühlung in Abhängigkeit von Außenbedingungen und erhöhten Luftgeschwindigkeiten erweitert betrachtet werden. Dabei sind bei Außentemperaturen von 10°C bis 33,5°C, Raumtemperaturen von 17,4°C bis 31,7°C möglich. Bei Luftgeschwindigkeiten²⁰ im Innenraum von bis zu 1,2 m/s dürfen die Raumtemperaturen ebenfalls bis zu ca. 31°C erreichen. (ASHRAE 55, 2013)

2.5 Energiehaushalt von Verwaltungsgebäuden

Gebäude sind weltweit für etwa 1/3 der Treibhausgasemissionen und 40% des Energieverbrauchs²¹ verantwortlich (UNEP DTIE Sustainable Consumption & Production Branch, 2009, S. 6). Auch in Deutschland betrug im Jahre 2013 der Anteil für den Gebäudebereich am gesamten Endenergieverbrauch ca. 40%. Etwa 1/3 der Gebäude in Deutschland sind Nichtwohngebäude und davon ca. 23% büroähnliche Betriebe (Bigalke et al., 2014). Nach Hochrechnungen von Bestandsgebäuden für das Jahr 2013 teilte sich der Endenergieverbrauch bei büroähnlichen Betrieben in Deutschland in etwa wie folgt auf: 70% Raumwärme, 13% Beleuchtung, 11% Informations- und Kommunikationstechnologie (IuK), 3% Warmwasser und jeweils 1% Klima-, Prozesskälte und mechanische Energie. Der Energieverbrauch für Beleuchtung und IuK basiert ausschließlich auf Strom und ist für ca. 82% des Stromverbrauchs verantwortlich ist (Schlomann et al., 2015, S. 84). In deutschen Büros hat demnach die Raumwärme den mit Abstand größten Anteil am Energieverbrauch, auf die künstliche Beleuchtung entfällt der zweitgrößte Anteil. Auf beide Bereiche kann mit der Fluidglasfassade direkt Einfluss genommen werden, wie in Abbildung 2 zu sehen ist. Der Energiebedarf für Kühlung hat in der Gesamtheit der Bürogebäude in Deutschland noch keinen nennenswerten Anteil, wobei dieser bei Büros mit Fensterflächenanteilen bereits über 50% zur Einhaltung des thermischen Komforts notwendig sein kann (Hausladen, 2005, S. 43). In wärmeren Klimazonen, z.B. in Dubai,

¹⁹ Für Räume mit mechanischer Kühlung, wie dies bei Fluidglasfassaden mit Heiz- und Kühlfunktion der Fall wäre, ist das adaptive Komfortmodell der ASHRAE 55 nicht zulässig.

²⁰ Bei Bürotätigkeiten, normaler Bekleidung (0,5 bis 1 clo) und Kontrolle der Luftgeschwindigkeit durch den Nutzer.

²¹ Energie kann nicht verbraucht, sondern nur umgewandelt werden. Es ist dennoch üblich, den Begriff Energieverbrauch im Kontext Gebäude zu verwenden.

kann die Kühllast bei Fensterflächenanteilen von 100% auf bis zu 300 W/m² Raumfläche ansteigen (Hindrichs & Daniels, 2007, S. 249). Für Deutschland sollte ein Primärenergiebedarf von 100 kWh/(m²a) bei Bürogebäuden für Heizen, Lüften, Kühlen und Beleuchtung nicht überschritten werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2010 - 06, S. 6).

2.5.1 Heizwärmebedarf

Der Heizwärme- oder auch Nutzwärmebedarf genannt, ist der Energiebedarf, der aufgewendet werden muss, um in der Heizperiode²² die minimal zulässige Raumtemperatur des gewünschten Komfortbereichs einzuhalten. Wärmeverluste (Wärmesenken) entstehen durch Transmission durch die thermische Gebäudehülle und Lüftung (Lüftung und Infiltration). Dem entgegen wirken Wärmegewinne (Wärmequellen) durch solare Einstrahlung, interne Lasten - Personen mit ca. 70 W/Person, Arbeitshilfen mit bis zu 15 W/m² und künstliche Beleuchtung mit ca. 10 W/m² bei effizienter Beleuchtung - und in der thermischen Gebäudemasse eingespeicherte Wärme (DIN V 18599-10), (DIN V 18599-2).

Die Transmissionswärmeverluste sind bei transparenten Bauteilen mit U_w-Werten von bestenfalls ca. 0,8 W/m²K deutlich größer als bei opaken Bauteilen mit U-Werten von bis zu 0,1 W/m²K. Jedoch sind solare Gewinne nur mit transparenten oder transluzenten Bauteilen möglich, wobei diese in Deutschland v.a. bei südorientierten Räumen eine positive Jahresbilanz aufweisen. Lüftungswärmeverluste können mit einer dichten Gebäudehülle und durch Wärmerückgewinnung (ca. 75 bis 90%) deutlich reduziert werden. Interne Lasten sind vor allem bei Verwaltungsgebäuden eine entscheidende Wärmequelle. Als Zielwert für den Heizwärmebedarf sind in gemäßigttem Klima ca. 15 kWh/m²a anzustreben, wobei 40 kWh/m²a nicht überschritten werden sollen (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2010 - 06, S. 6). Es werden in diesem Klima auch Bürogebäude ohne Heizung gebaut, bei denen die solaren und internen Gewinne rechnerisch ausreichen, um den Komfortbereich zwischen 22°C und 26°C ganzjährig einzuhalten (Schoof, 2014).

2.5.2 Kühlbedarf

Der Kühlbedarf- oder auch Nutzkältebedarf genannt, ist der Energiebedarf, der aufgewendet werden muss, um außerhalb der Heizperiode die maximal zulässige Raumtemperatur des gewünschten Komfortbereichs einzuhalten. Dieser ist v.a. abhängig von solaren und internen Wärmegewinnen (Personen, Arbeitshilfen und künstliche Beleuchtung), Wärmeeinträgen über die Gebäudehülle durch Transmission und Zuluft. In gemäßigttem Klima kann eine aktive Kühlung durch geeignete Maßnahmen vermieden werden. Empfohlen werden dabei „maßvolle Glasflächenanteile, effektiver Sonnenschutz, tageslichtoptimierte Grundrisse und hocheffiziente Beleuchtung und elektrische Geräte“. Bei geringen Wärmelasten im Gebäude können die maximalen Raumtemperaturen auch durch passive Maßnahmen, z.B. thermisch aktive Speichermassen, oder durch Nutzung von natürlichen Wärmesenken, z.B. kühle Nachtluft oder

²² Bei Niedrigenergiegebäuden kann mit einer Heizgrenztemperatur von 12°C gerechnet werden, d.h. der mittleren Tagesaußentemperatur, bei der geheizt werden muss, um im Innenraum mind. 20°C einzuhalten.

Erdreich bzw. Grundwasser eingehalten werden. (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2010 - 06, S. 30–33)

2.5.3 Energiebedarf für mechanische Lüftung

Um die Arbeits- und Konzentrationsfähigkeit und das Wohlbefinden des Nutzers zu gewährleisten und Feuchtigkeit abzuführen, muss jedes Gebäude mit ausreichend Frischluft versorgt werden (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 174). Durch eine mechanische Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung können die Lüftungswärmeverluste in der Heizperiode deutlich verringert werden. Allerdings führt diese auch zu einem z.T. erheblichem Strombedarf von ca. 6,7 kWh/m²a Endenergie²³ bei einem Standardbürogebäude (Knissel, 1999, S. 68). Für eine energieeffiziente Lüftung sollte auf einen möglichst geringen Luftwechsel geachtet und die Lüftung nur zum hygienischen Luftwechsel, nicht aber zum Heizen und Kühlen verwendet werden.

2.5.4 Energiebedarf für Be- und Entfeuchtung

Be- und Entfeuchtung der Raumluft wird benötigt, wenn die relative Luftfeuchtigkeit in Kombination mit der Raumtemperatur unter oder über dem Komfortbereich liegt bzw. die relative Luftfeuchtigkeit unter ca. 30% bzw. über ca. 65% liegt.

In gemäßigtem Klima ist in der Regel keine Entfeuchtung der Raumluft erforderlich. In anderen Klimazonen, z.B. in Dubai, kann auf die Entfeuchtung bis zu 20% des Kühlenergiebedarfs entfallen (Liedl, 2010, S. 178).

In gemäßigtem Klima ist eine Befeuchtung bei natürlicher Lüftung nicht erforderlich. Bei mechanischer Lüftung mit Wärmerückgewinnung kann es jedoch zu Unterschreitung der gewünschten relativen Luftfeuchtigkeit kommen. Beim Einsatz von Klimageräten entfallen etwa 2/3 des Primärenergieaufwands für Klimatisierung, ca. 15 kWh/m²_{BGF}·a, auf die Be- und z.T. Entfeuchtung (Knissel, 1999, S. 19). In kälteren, trockenen Klimazonen ist eine Befeuchtung i.d.R. erforderlich (Hausladen et al., 2012, S. 58).

2.5.5 Energiebedarf für künstliche Beleuchtung

Der Energiebedarf für künstliche Beleuchtung kann durch optimierte Tageslichtnutzung, energiesparende Leuchtmittel (i.d.R. LED) und intelligente Regelungen, z.B. Dimmfunktionen und automatisiertes Abschalten, reduziert werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2010 - 06, S. 7). 2012 bestand jedoch die Beleuchtung in deutschen Bürogebäuden zu ca. 62% aus Leuchtstoff oder Energiesparlampen und nur zu etwa 6% aus LED-Lampen. Die tägliche Beleuchtungsdauer bei Büronutzungen betrug bei 36% der Büros über 8 Stunden täglich, bei 49% zwischen 4 bis 8 Stunden und nur bei ca. 14% der unter 4 Stunden pro Tag (Schloman et al., 2015, S. 121–124). Neben dem hohen Endenergiebedarf²⁴ für den benötigten Strom von bis zu ca. 28 kWh/m²_{BGF}·a bei Standardbüros und immerhin noch ca. 4 kWh/m²_{BGF}·a bei Passiv-

²³ Aus Simulationen des IWU für Standard-Bürogebäude mit einem Luftwechsel von 3 h⁻¹. Primärenergiebedarf 20 kWh/(m²_{BGF} · a) mit Primärenergiefaktor Strom-Mix 2,97.

²⁴ Primärenergiefaktor Strom-Mix 2,97.

Bürogebäuden (Knissel, 1999, S. 1) ergeben sich auch erhöhte interne Wärmegewinne, die in der Kühlperiode zu erhöhtem Kühlbedarf führen können.

2.5.6 Energiebedarf für Warmwasser

Bei Bürogebäuden spielt der Energiebedarf für Warmwasser keine entscheidende Rolle. Je nach Energieeffizienz des Gebäudes entfallen ca. 2,4% bis 9% des Primärenergiebedarfs auf die Warmwasserbereitstellung (Knissel, 1999, S. 1). Nach DIN V 18599 muss der Nutzenergiebedarf mit 30 Wh/m²d angesetzt werden (DIN V 18599-10, S. 29).

2.6 Standorte, Klima und Gebäudeparameter

Auch wenn es nicht unumstritten ist, dass ein Glasfassadensystem unabhängig vom Standort mit seinen lokalen Klimabedingungen und der jeweiligen Bautradition, weltweit angewendet werden soll, wird dies heutzutage entsprechend praktiziert. Insbesondere in Ländern mit z.T. großem Wohlstand, z.B. den arabischen Ländern, Russland und Südamerika, werden Hochhäuser mit bis zu 100% Verglasungsanteil verwirklicht. (Hausladen et al., 2012, S. 7)

Um zu überprüfen, inwiefern eine Fluidglasfassade in unterschiedlichen Klimazonen hinsichtlich Komfort und Energieeffizienz eine sinnvolle Lösung darstellen könnte, soll an drei Standorten mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen, aber jeweils reger Bautätigkeit, mittels Simulationen die globale Anwendbarkeit von Fluidglasfassaden überprüft werden. Es werden die Standorte Moskau (kühlgemäßigtes Kontinentalklima), München (gemäßigtes Klima) und Riad (Wüstenklima) untersucht (siehe Abbildung 7).

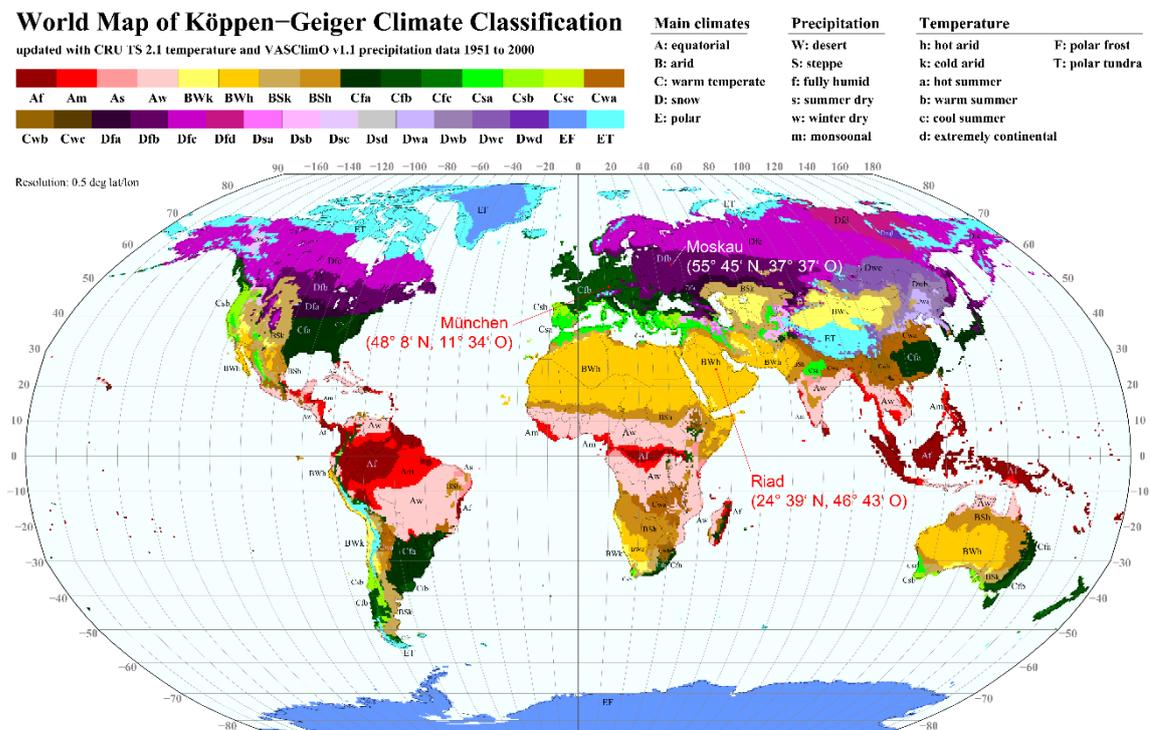


Abbildung 7: Weltkarte der Köppen-Geiger Klimaklassifikationen (Quelle: Standorte ergänzt in (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf & Rubel, 2006))

Das Klima ist ein statistisch ermittelter Zustand der Erdatmosphäre über einen längeren Zeitraum. Es ist vor allem durch die Einstrahlung der Sonne geprägt. Klimafaktoren, z.B. Breitengrad, Meeresnähe oder Kontinentalität, lokale oder überregionale Windsysteme, Höhenlage und Stadtklima rufen ein Klima hervor bzw. erhalten oder verändern es. Mithilfe von Klimaelementen, z.B. Luftfeuchte, Bewölkung, Wind und Solarstrahlung (Direkt- und Diffusstrahlung, Tageslänge und Intensität und Einstrahlwinkel), wird ein Klima beschrieben. (Hausladen et al., 2012, S. 12)

Die folgenden Beschreibungen der Klimazonen der drei Standorte erfolgt nach der Klassifikation von Köppen und Geiger (Köppen & Geiger, 1954), die detaillierteren Ausführungen zu den jeweiligen Klimaten nach (Hausladen et al., 2012).

Neben der Beschreibung des Klimas werden im folgenden Abschnitt Kennwerte für den Energiebedarf von Verwaltungsgebäuden²⁵ und Empfehlungen für Fassadensysteme klimagerechter Gebäude nach (Hausladen et al., 2012) und (Liedl, 2010) zusammengefasst, um die Simulationsergebnisse für die Fluidglasfassade einordnen zu können.

2.6.1 Kühlgemäßigtes Klima - Moskau

Standort

Moskau (Russland), 55° 45' nördlicher Breite und 37° 37' östlicher Länge.

Klimazone (Dfb)

Schneeklima (D) mit einer Durchschnittstemperatur des wärmsten Monats über 10° und des kältesten Monats unter minus 3 °C. Alle Monate mit ausreichend Niederschlag (f). Durchschnittstemperatur des wärmsten Monats unter 22 °C, mindestens vier Monate über 10 °C (b).

Klima

Kontinentales Klima mit ausgeprägten jährlichen Temperaturschwankungen von -25°C im Winter bis 30°C im Sommer. Die Erdreichtemperatur in 10 -12 m Tiefe beträgt ca. 6°C und entspricht in etwa der Jahresmitteltemperatur. Die absolute Luftfeuchtigkeit liegt zwischen minimal ca. 1 g/kg im Winter und maximal ca. 16 g/kg im Sommer. Die Sonnenscheindauer ist im Winter mit ca. sieben Stunden, bei einem Sonnenhöchststand von ca. 11° Höhe, sehr kurz und im Sommer mit ca. 17 Stunden, bei einem Sonnenhöchststand von ca. 58° Höhe, sehr lang (Hausladen et al., 2012, S. 48). Die jährliche Globalstrahlung auf die Horizontale beträgt ca. 1006 kWh/m²a, auf die 90° geneigten Fassaden im Norden ca. 370 kWh/m²a, im Osten und Westen ca. 700 kWh/m²a und im Süden ca. 930 kWh/m²a (siehe Abbildung 8).

²⁵ Die in diesem Kapitel angegebenen Referenzwerte basieren i.d.R. auf thermischen Simulationen für einen nach Süden orientierten Standardbüroraum mit typischen internen Lasten, leichter Bauweise, 50% Fensterflächenanteil mit einem g-Wert von 0,3, einem innenliegenden Sonnenschutz und einem U-Wert der Außenwand von 0,6 W/m²K.

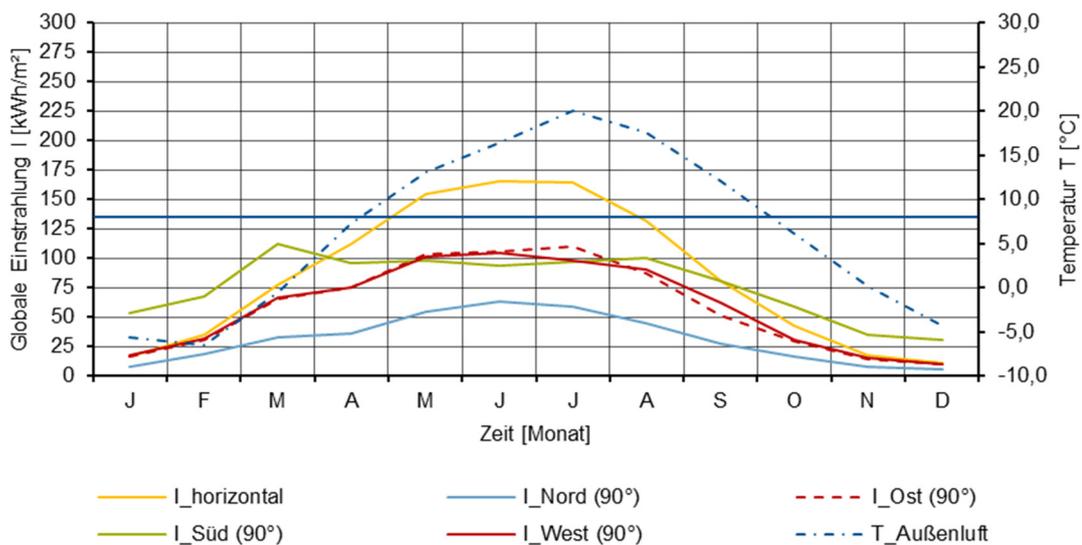


Abbildung 8: Jahresverläufe der globalen Einstrahlung (I) auf die Horizontale und die vertikalen Fassaden und die Außenlufttemperatur (T) (monatliche Durchschnittswert); Jahresdurchschnittstemperatur (blaue, horizontale Linie); Moskau (Quelle: eigene Grafik aus Wetterdaten Meteonorm)

Heizen und Befeuchten

Der Heizwärmebedarf beträgt ca. 40 - 60 kWh/m²a, ca. 10% entfallen dabei auf die Befeuchtung. Die Orientierung hat ca. 30% Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Große Fensterflächenanteile führen bei Nord-, Ost- und Westfassaden zu erhöhtem Heizwärmebedarf. Mit einer Gesamtoptimierung der Gebäudehülle und Anlagentechnik²⁶ kann der Heizwärmebedarf auf bis zu ca. 15 – 20 kWh/m²a gesenkt werden.

Kühlen und Entfeuchtung

Der Kühllältebedarf kann bis zu ca. 45 kWh/m²a betragen. I.d.R. besteht kein Entfeuchtungsbedarf. Bei moderatem Fensterflächenanteil, effizientem Sonnenschutz und Nachtauskühlung kann eine aktive Kühlung vermieden werden.

Empfehlung Fassadensystem

Zu empfehlen ist eine sehr transparente 3-fach Wärmeschutzverglasung mit außenliegendem bzw. sich im Scheibenzwischenraum befindendem Sonnenschutz. Eine Sonnenschutzverglasung ist aufgrund der ganzjährigen Reduktion des solaren Eintrags in den Raum und der damit verbundenen Reduktion der solaren Wärmegewinne in der Heizperiode und der ganzjährig reduzierten Tageslichteinträge nicht ideal.

Gebäudetechnik

Zur Nutzung regenerativer Energiequellen, z.B. Grundwasser oder Erdreich, bieten sich Wärmepumpen in Kombination mit flächigen Übergabesystemen an. Diese können sowohl im

²⁶ Inklusiv Lüftungswärmerückgewinnung.

Winter zum Heizen als auch im Sommer zum Kühlen genutzt werden. Zum Kühlen kann ggf. direkt Grundwasser eingesetzt werden. Eine Lüftungswärmerückgewinnung ist energetisch sinnvoll und behaglicher. (Hausladen et al., 2012, S. 54–59)

2.6.2 Gemäßigtes Klima - München

Standort

München (Deutschland), 48° 8' nördlicher Breite und 11° 34' östlicher Länge.

Klimazone (Cfb)

Warmgemäßigtes Klima (C) mit einer Durchschnittstemperatur des kältesten Monats zwischen 18°C und -3 °C. Alle Monate mit ausreichend Niederschlag (f). Durchschnittstemperatur des wärmsten Monats unter 22 °C, mindestens vier Monate über 10 °C (b).

Klima

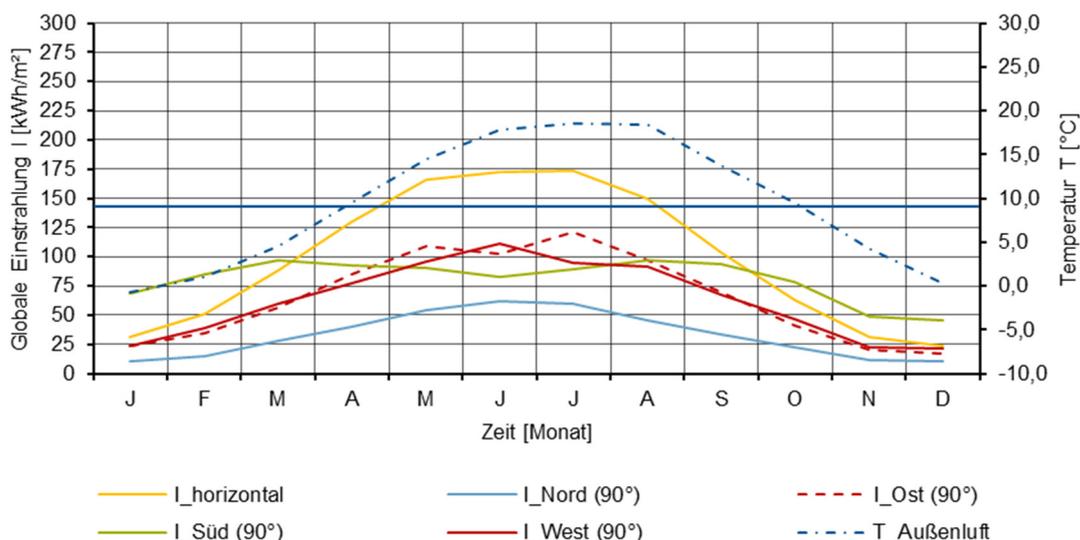


Abbildung 9: Jahresverläufe der globalen Einstrahlung (I) auf die Horizontale und die vertikalen Fassaden und die Außenlufttemperatur (T) (monatlicher Durchschnittswert); Jahresdurchschnittstemperatur (blaue, horizontale Linie); München (Quelle: eigene Grafik aus Wetterdaten Meeonorm)

Typisches, gemäßigtes Klima mit ausgeprägten jährlichen Temperaturschwankungen von -15°C im Winter bis 25°C im Sommer. Die Erdreichtemperatur in 10 -12 m Tiefe beträgt ca. 9°C und entspricht in etwa der Jahresmitteltemperatur. Die absolute Luftfeuchtigkeit liegt zwischen minimal ca. 1,5 g/kg im Winter und maximal ca. 14 g/kg im Sommer. Die Sonnenscheindauer ist im Winter mit ca. acht Stunden, bei maximal ca. 18° Höhe, relativ kurz und im Sommer mit ca. 16 Stunden, bei maximal ca. 65° Höhe, lang (Hausladen et al., 2012, S. 61–66). Die jährliche Globalstrahlung auf die Horizontale beträgt ca. 1180 kWh/m²a, auf die 90° geneigten Fassaden im Norden ca. 390 kWh/m²a, im Osten und Westen ca. 750 kWh/m²a und im Süden ca. 970 kWh/m²a (siehe Abbildung 9).

Heizen und Befeuchtung

Der Heizwärmebedarf beträgt ca. 20 – 40 kWh/m²a. I.d.R. besteht kein Befeuchtungsbedarf. Die Orientierung hat ca. 50% Einfluss auf den Heizwärmebedarf. Fensterflächenanteile von 50 bis 70% können bei Nord-, Ost- und Westfassaden zu erhöhtem Heizwärmebedarf führen. Mit einer Gesamtoptimierung der Gebäudehülle und Anlagentechnik kann der Heizwärmebedarf auf unter 15 kWh/m²a gesenkt werden.

Kühlen und Entfeuchtung

Mit baulichen Maßnahmen, z.B. effizientem Sonnenschutz, thermischer Speichermasse und intensiver Nachtlüftung, kann auf eine aktive Kühlung und Entfeuchtung verzichtet werden.

Empfehlung Fassadensystem

Zu empfehlen ist eine sehr transparente 3-fach Wärmeschutzverglasung mit außenliegendem bzw. sich im Scheibenzwischenraum befindendem Sonnenschutz. Eine Sonnenschutzverglasung ist aufgrund der ganzjährigen Reduktion des solaren Eintrags in den Raum und der damit verbundenen Reduktion der solaren Wärmegewinne in der Heizperiode und der ganzjährig reduzierten Tageslichteinträge nicht ideal.

Empfehlungen Gebäudetechnik

Die Gebäudetechnik kann ähnlich zur kühlgemäßigten Zone ausgeführt werden. Zur Nutzung regenerativer Energiequellen, z.B. Grundwasser, Erdreich oder Luft, bieten sich Wärmepumpen in Kombination mit flächigen Übergabesystemen an. Diese können sowohl im Winter zum Heizen als auch im Sommer zum Kühlen genutzt werden. Zum Kühlen kann ggf. direkt Grundwasser eingesetzt werden. Eine Lüftungswärmerückgewinnung ist energetisch sinnvoll. (Hausladen et al., 2012, S. 70–75)

2.6.3 Wüstenklima - Riad

Standort

Riad (Saudi Arabien), 24° 39' nördlicher Breite und 46° 43' östlicher Länge.

Klimazone (BWh)

Heißes, trockenes Wüstenklima mit einer Jahresmitteltemperatur über 18°C (BWh).

Klima

Wüstenklima mit ganzjährig sehr geringen Niederschlägen und hohen Temperaturen mit Maximalwerten von über 43°C. Die Erdreichtemperatur in 10 - 12 m Tiefe beträgt ca. 27°C und entspricht in etwa der Jahresmitteltemperatur. Die Luftfeuchtigkeit ist mit ganzjährig ca. 6 g/kg sehr gering. Die Sonnenscheindauer und die Sonnenhöhen sind ganzjährig hoch, im Winter ca. 10,5 Stunden, bei maximal ca. 41° Höhe und im Sommer mit fast 14 Stunden, bei maximal ca. 88° Höhe. Die jährliche Globalstrahlung auf die Horizontale mit ca. 2230 kWh/m²a und die diffuse Strahlung mit ca. 840 kWh/m²a sind sehr hoch. Aufgrund der hohen Sonnenstände ist die jährliche Globalstrahlung auf die 90° geneigten Fassaden deutlich geringer, insbesondere auf der

Südfassade in den Sommermonaten. Auf den Ost- und Westfassaden ergeben sich in der Jahresbilanz nahezu gleichhohe Strahlungswerte wie im Süden, wobei die Einstrahlung in den Sommermonaten sogar deutlich höher ist. Auf der senkrechten Nordfassade beträgt die jährliche Globalstrahlung ca. 530 kWh/m²a, auf der Ost- und Westfassade ca. 1250 kWh/m²a und auf der Südfassade ca. 1310 kWh/m²a (siehe Abbildung 10). (Hausladen et al., 2012, S. 109–115)

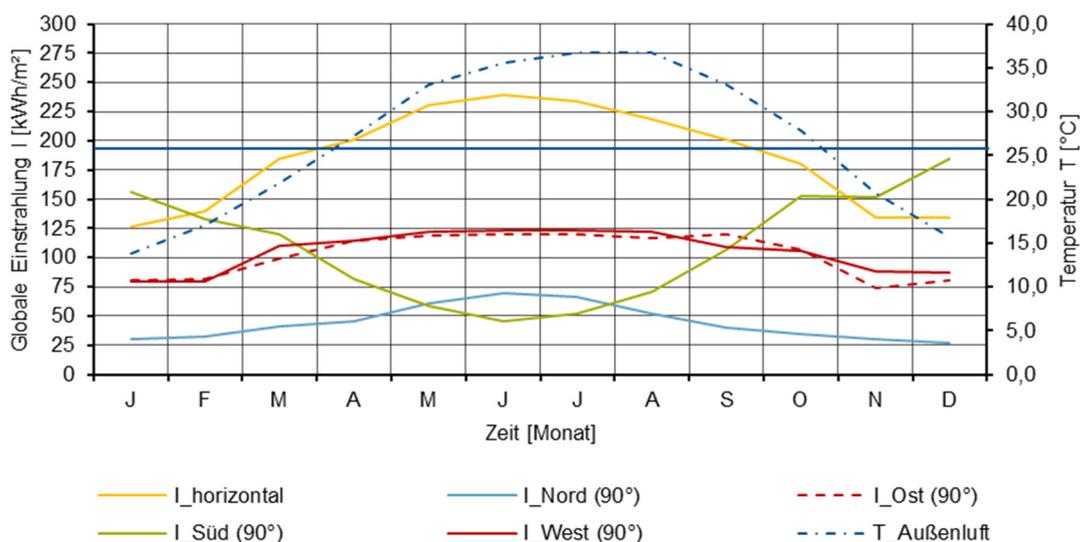


Abbildung 10: Jahresverläufe der globalen Einstrahlung (I) auf die Horizontale und die vertikalen Fassaden und die Außenlufttemperatur (T) (monatlicher Durchschnittswert); Jahresdurchschnittstemperatur (blaue, horizontale Linie); Riad (Quelle: eigene Grafik aus Wetterdaten Meteonorm)

Heizen und Befeuchtung

Heizwärme- und Befeuchtungsbedarf besteht i.d.R. nicht.

Kühlen und Entfeuchtung

Der Kühlkältebedarf liegt bei ca. 150 – 200 kWh/m²a. Ein Entfeuchtungsbedarf liegt nicht vor. Der Kühlkältebedarf kann durch einen reduzierten Fensterflächenanteil, einem sehr guten Sonnenschutz und einer intensiven Nachtlüftung um ca. 30% reduziert werden.

Künstliche Beleuchtung

Der Energiebedarf für künstliche Beleuchtung liegt zwischen ca. 4 und 17 kWh/m²a je nach Tageslichtquotient (Hindrichs & Daniels, 2007, S. 273).

Empfehlung Fassadensystem

Zu empfehlen ist ein reduzierter Fensterflächenanteil (ca. 30%) und eine Sonnenschutzverglasung in Kombination mit außenliegendem bzw. sich im Scheibenzwischenraum befindendem Sonnenschutz.

Gebäudetechnik

Aufgrund der geringen Luftfeuchtigkeit können als Übergabesystem Flächenkühlungen, z.B. Bauteilaktivierung, mit Verdunstungskühlung zum Rückkühlen eingesetzt werden. (Hausladen et al., 2012, S. 109–123)

2.7 Bauliche Parameter einschaliger, adaptiver, transparenter Gebäudehüllen

Im folgenden Kapitel werden grundlegende Prinzipien transparenter Fassaden und der Stand der Technik der im Fluidglas integrierten Funktionen untersucht: transparente, thermische Trennung; adaptiver Sonnenschutz; thermischer Solarkollektor und flächiges Heiz- und Kühlsystem. Dies dient einerseits der Entwicklung, andererseits auch der Beurteilung von Fluidgläsern.

Die Untersuchungen im Rahmen der Dissertation werden auf ebene, senkrechte, rechteckige, nicht tragende Festverglasungen ohne Permeabilität hinsichtlich Luft eingeschränkt²⁷. Fluidgläser übernehmen keine Lastabtragung, integrieren aber mehrere Funktionen im Fassadenaufbau und können somit als einschalige, mehrschichtige Fassaden klassifiziert werden (Herzog, Krippner & Lang, 2004, S. 27–29).

2.7.1 Einschalige, mehrschichtige, transparente Fassaden

Mehrschichtige Fassade

Fluidglas soll großflächig als Teil der Gebäudehülle einsetzbar sein, z.B. in Pfosten-Riegel- oder Modulfassaden. Der Fensterflächenteil kann bis zu ca. 90% betragen. Lichtlenkungs- und Lüftungsfunktionen mit Fluidglasfassaden werden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht, aber grundsätzlich hier mit dargestellt²⁸. Alle Fassadenfunktionen, die zur Gewährleistung des Raumkomforts benötigt werden oder zur Energiegewinnung gewünscht sind, sollen bei Fluidglas hintereinander, seriell angeordnet werden (siehe Abbildung 11 (links)).

²⁷ Andere Fassadenarten mit Fluidgläsern sind theoretisch möglich - z.B. gefaltet, geneigt oder offenbar - werden aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht, da die Funktionsweise von Fluidglasfassaden grundsätzlich abgeschätzt und der technische Aufwand dabei einfach gehalten werden soll.

²⁸ Sollte der Einbau von Fluidglas in Öffnungsflügeln nicht möglich sein, könnten z.B. opake, vertikale Lüftungselemente zusätzlich zu Fluidglas in die Fassade integriert werden. Lichtlenksysteme könnten im Scheibenzwischenraum der Isolierglaseinheit von Fluidglas oder hinter der Fassade im Innenraum eingebaut werden.

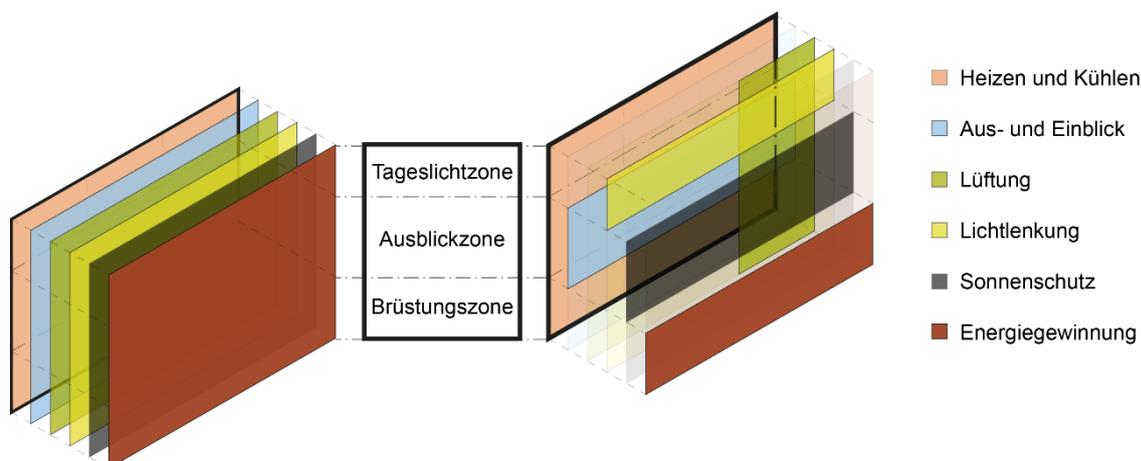


Abbildung 11: Anforderungen und Funktionszonen von mehrschichtigen, transparenten Fassaden (links: serielle Anordnung; Mitte: Funktionszonen; rechts: Optimierung der Schichten nach Funktionszonen) (Eigene Grafik in Anlehnung an (Hausladen, 2005, S. 88–91))

Funktionszonen

Fassaden lassen sich typischerweise in drei vertikal übereinander liegende Zonen gliedern: Brüstungs-, Ausblick- und Tageslichtzone (siehe Abbildung 11 (Mitte)). Der untere Bereich, die Brüstungszone, trägt kaum zur Tageslichtversorgung und zum Ausblick bei und kann opak ausgeführt werden. Hier können zusätzliche Funktionen integriert werden, z.B. Energiegewinnung. Der mittlere Fassadenbereich, die Ausblickzone, dient der Sichtbeziehung zwischen Innen- und Außenraum und der natürlichen Belichtung. Dieser Bereich ist ebenfalls transparent auszuführen, es muss jedoch je nach Außenbedingungen ein Sonnen- bzw. Blendschutz temporär zugeschaltet werden können. Über den oberen Bereich der Fassade, der Tageslichtzone, soll weit bis in die Raumtiefe Tageslicht einfallen. Dieser Bereich sollte möglichst transparent sein und ohne Sturz bis zur Decke reichen. Im Idealfall sind Lichtlenksysteme integriert, die das Tageslicht über die Decke in den Raum reflektieren. Mit Fensterflächenanteilen über 70% werden Büroräume bis zu 5 m Tiefe mit ausreichend Tageslicht versorgt. Hinsichtlich des thermischen Komforts sind jedoch Fensterflächenanteile über 50% kritisch. Sie benötigen einen effektiven Sonnenschutz und i.d.R. eine aktive Kühlung, um Überhitzung zu verhindern. In der Heizperiode werden sehr geringe U-Wert benötigt, um die Transmissionswärmeverluste zu reduzieren. (Hausladen, 2005, 30-31, 39-49, 87–91)

2.7.2 Transparente, thermische Hüllen

Maximale Transparenz

Mit dem transparenten Teil der Gebäudehülle kann der Durchgang der Solarstrahlung und der Sichtbezug vom Außen- in den Innenraum und umgekehrt gewährleistet werden. Dabei ist eine maximale Transparenz über das gesamte solare Spektrum gewünscht, um bei Bedarf möglichst

viel Solarstrahlung in den Innenraum transmittieren zu lassen²⁹. Die Kennwerte für die Tageslichttransmission werden als T_{vis} , für die solare Transmission als T_{sol} und der Gesamtenergiedurchlassgrad als g -Wert angegeben. Der g -Wert setzt sich aus der direkten Strahlungstransmission T_{sol} und der sekundären Wärmeabgabe der Verglasung in den Innenraum zusammen. Die Verglasungskennwerte werden für senkrechte Einstrahlung angegeben, einstrahlungswinkelabhängige Veränderungen sind dabei nicht berücksichtigt³⁰.

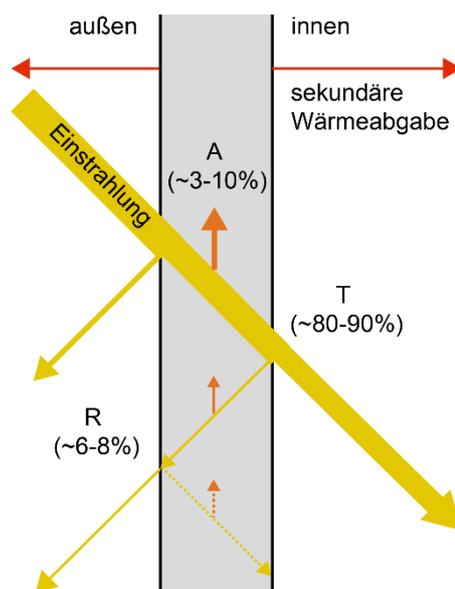


Abbildung 12: Strahlungsdurchgang durch eine Einfachverglasung

Bei normalen, 6 mm dicken, Floatgläsern teilt sich die einfallende Solarstrahlung in ca. 82% Transmission (T), in ca. 8% Reflexion (R) und ca. 10% Absorption (A) auf (siehe Abbildung 12). Um den Anteil der Transmission zu erhöhen, können Gläser mit einem geringen Eisenoxidgehalt (ca. 0,02%) verwendet werden, so genannte Weißgläser (Flachglas MarkenKreis GmbH, 2017, S. 153). Bei gleichbleibender Reflexion reduziert sich die Absorption auf ca. 3%, die Transmission steigt auf bis zu 89%. Üblicherweise kommen bei heutigen Dreifachverglasungen Gläser mit einem reduzierten Eisenoxid-Anteil zum Einsatz. Durch Anti-Reflexbeschichtungen kann die Reflexion um bis zu 2 % im visuellen Spektrum gesenkt werden.

²⁹ Bei Sonnenschutzverglasungen ist eine hohe Transparenz im visuellen Spektrum und eine geringe Transparenz im restlichen Teil des solaren Spektrums gewünscht, um einer Überhitzung entgegen zu wirken.

³⁰ Mit zunehmendem Einstrahlungswinkel erhöht sich die Reflexion. Insbesondere ab einem Winkel von 40% steigt der Anteil der Reflexion deutlich an, bis auf 100% bei einem Winkel von 90% (siehe auch Abbildung 65).

Minimale Wärmeübertragung

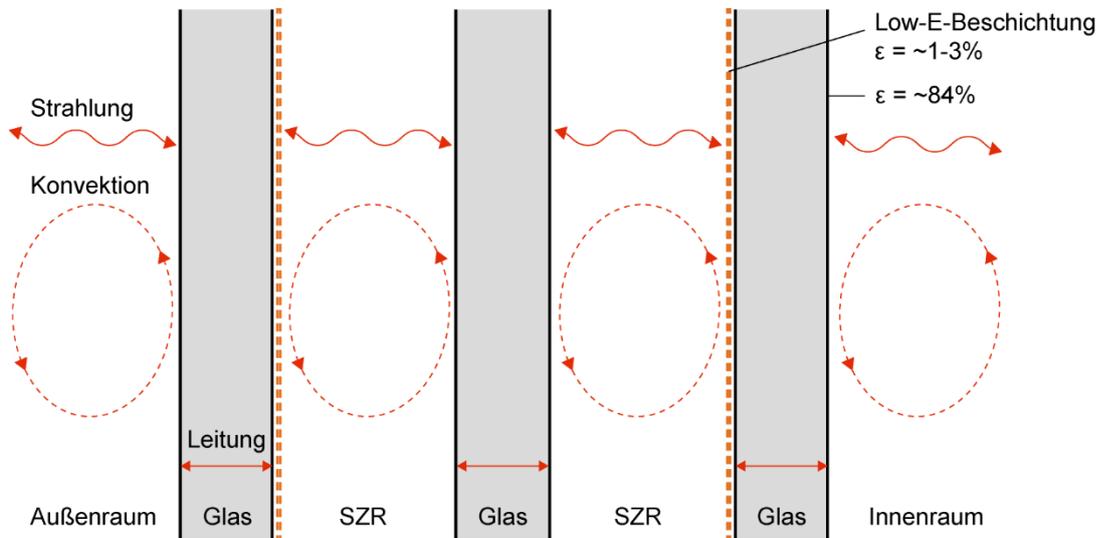


Abbildung 13: Wärmeübertragung bei Wärmeschutzverglasungen (Glasmitte)

Wie in Abbildung 13 zu sehen ist, erfolgt die Wärmeübertragung zwischen Außen- und Innenraum durch die Verglasung über Wärmeleitung durch die Glasschichten³¹, über Wärmestrahlung zwischen den Glasoberflächen im Scheibenzwischenraum bzw. zwischen der äußeren und inneren Glasoberflächen mit dem Außen- und Innenraum und durch Konvektion an den Glasoberflächen.

Die Außenoberflächen der Verglasung stehen im Strahlungsaustausch mit der Umgebung bzw. den Elementen im Innenraum und hängen von den Temperaturunterschieden und der Emissivität ϵ der Gläser im langwelligen Strahlungsbereich ab. Bei Isolierverglasungen mit mehreren Glasscheiben stehen die Scheiben untereinander im Strahlungsaustausch. Die Emissivität von Glas beträgt ca. 84%. Durch sehr dünne, metallische Beschichtungen, so genannte Low-E-Beschichtungen, kann die Emissivität von Glasoberflächen auf bis zu 1% reduziert werden. Der Strahlungsaustausch der Glasflächen untereinander kann damit nahezu unterbunden werden. Da effiziente Beschichtungen - metallische Aufdampfungen („soft-coatings“) - vor Witterungseinflüssen und Feuchte geschützt werden müssen, werden diese im luftdichten Scheibenzwischenraum (SZR) eingesetzt. Die Konvektion wird durch die Lufttemperatur und die Luftgeschwindigkeit beeinflusst. Im SZR kann die Konvektion durch die Stärke des SZR und das Einfüllen von Edelgasen - i.d.R. Argon oder Krypton - oder das Evakuieren der Luft (Vakuum) verringert werden. Der Wärmedurchgangskoeffizient U_g -Wert (in W/m^2K) gibt den Wärmefluss durch die Glasmitte pro Glasfläche und Temperaturunterschied an. (Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH, 2006, S. 350–358)

In Deutschland kommen i.d.R. Wärmeschutzverglasungen (WSV) mit U_g -Werten zwischen 0,4 und 1,0 W/m^2K zum Einsatz. Diese bestehen aus drei Glasscheiben mit zwei Low-E-

³¹ Im Rahmen der Dissertation wurden nur die Einflüsse in der Glasmitte untersucht. Die Wärmeübertragung über den Randverbund und den Fensterrahmen wurden nicht berücksichtigt.

Beschichtungen und zwei Scheibenzwischenräumen mit Edelgasfüllung. Je nach Art der Low-E-Beschichtungen reduzieren sich die Transmission und der g-Wert. Je geringer die Emissivität, desto geringer ist der U-Wert, aber auch die Transmission und der g-Wert. Es muss daher abgewogen werden ob die Transmission („tageslichtoptimiert“) oder die Wärmedämmeigenschaft („wärmedurchgangsoptimiert“) optimiert werden soll (siehe Tabelle 3).

	Tvis	Rvis	Tsol	Rsol	g-Wert	U_g-Wert
	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[W/m²K]
3-fach WSV tageslichtoptimiert ³²	74	17	58	24	0,64	0,5
3-fach WSV wärmedurchgangsoptimiert ³³	59	33	34	51	0,38	0,4
3-fach WSV wärmedurchgangs- + tageslichtoptimiert ³⁴	72	16	45	34	0,51	0,4
Vakuum Glas tageslichtoptimiert ³⁵	80	12	50	23	0,58	0,6
Vakuum Glas wärmedurchgangsoptimiert	64	12	32	38	0,34	0,4

Tabelle 3: Kennwerte von aktuellen Wärmeschutzverglasungen (Stand der Technik)

2.7.3 Adaptive Verglasungen

Die transparente Gebäudehülle bietet neben der Durchsicht die Möglichkeit, dass die Solarstrahlung in den Innenraum transmittiert wird. Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Verglasungen haben dabei in etwa permanente Glaseigenschaften hinsichtlich des Strahlungs- und Energiedurchgangs. Da je nach Außenraumbedingung – Intensität der Solarstrahlung oder Außenraumtemperatur – und gewünschten Innenraumbedingungen – Beleuchtungsstärke, Raumtemperatur – die Eigenschaften der transparenten Gebäudehülle verändert werden müssen, benötigt man zusätzlich zur Verglasung sogenannte Manipulatoren. Mit diesen Manipulatoren kann der Austausch von Luft, Licht, Wärme und Feuchte verändert

³² Berechnet für: 3 x SSG DIAMANT 6mm, 2 x SSG PLANITHERM LUX (Pos. 2 und 5), 12 mm Krypton 100%. Quelle: CALUMEN® II, Version 1.3.7, Saint-Gobain.

³³ Berechnet für: 3 x SSG DIAMANT 6 mm, 2 x SSG PLANITHERM ONE (Pos. 2 und 5), 12 mm Krypton 100%. Quelle: CALUMEN® II, Version 1.3.7, Saint-Gobain.

³⁴ Berechnet für: 3 x SSG DIAMANT 6 mm, 2 x PLANITHERM UltraN (Pos. 2 und 5), 12 mm Krypton 100%, Quelle: CALUMEN® II, Version 1.3.7, Saint-Gobain.

³⁵ Angaben zu Vakuum-Verglasungen von Dr. Helmut Hohenstein für Beschichtungen mit einer Emissivität von 0,03 und einem Stützenabstand von 40 mm. Hersteller Beijing Synergy Vacuum Glazing Technology Co.,Ltd. U-Werte von bis zu 0,34 W/m²K sollen mit verbesserten Beschichtungen möglich sein (Hohenstein, 2016)).

werden (Herzog et al., 2004, S. 259–263). Der Fokus der Manipulation im Kontext Fluidglas liegt auf der Veränderbarkeit von Licht- und Wärmedurchgang.

Übersicht adaptive Verglasungen

In der Forschung und auf dem Markt gibt es unterschiedliche Verglasungen, deren Zustand, v.a. hinsichtlich der Strahlungstransmission veränderbar ist, sogenannte adaptive Verglasungen. Für die Veränderungen sind Schichten im Scheibenaufbau verantwortlich. Die Verglasungen können einerseits unterschieden werden in Verglasungen, die in jedem Zustand eine Durchsicht gewährleisten und in Verglasungen, die in mindestens einem Schaltzustand undurchsichtig sind, z.B. milchig, trüb. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal liegt in der Möglichkeit der aktiven Einflussnahme des Nutzers in den Zustand der Verglasung oder sich selbstregulierende Verglasungen durch selbständige Änderung durch die Umgebungsbedingungen. (Dreher, 2009, S. 17–19)

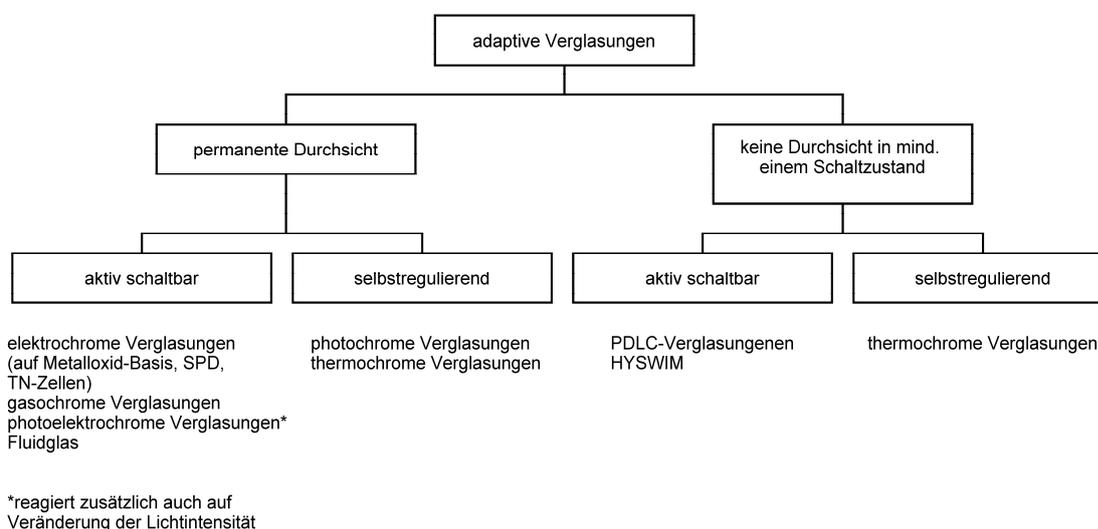


Abbildung 14: Typologische Übersicht adaptiver Verglasungen

Aktive veränderbare adaptive Verglasungen

Bei aktiv veränderbaren Systemen können durch Einflussnahme die Bedingungen innerhalb des Verglasungssystems und damit das Erscheinungsbild der Verglasung – hier insbesondere die Strahlungstransmission und die Durchsicht - verändert werden. Bei elektrochromen Verglasungen geschieht dies durch elektrischen Strom, bei gasochromen Verglasungen durch Einströmen von Gas.

Die aktuell im Fassadenbereich gängigsten Systeme sind elektrochromatische Verglasungen. Zur Gruppe der elektrochromen Verglasungen gehören:

- mit Durchsicht in jedem Schaltzustand:
 - Schichten auf Basis von Metalloxiden (z.B. Wolframoxid (WO_3), Nioboxid (Nb_2O_5), Nickeloxid (NiO)) (Heusing & Aegert, 2014), u.a. auch die Produkte der Firmen Sageglass® und Econtrol®.

- TN-Zellen
- ohne Durchsicht in mind. einem Schaltzustand:
 - PDLC ("Polymer-Dispersed-Liquid-Crystal")
 - SPD ("Suspended-Particle-Devices")
 - HYSWIM („Hydrogen Swichtable Mirrors“) - Schaltbare Spiegel

Selbstregulierende Verglasungen

Bei selbstregulierenden Systemen kann der Nutzer keinen direkten Einfluss nehmen. Der Zustand der Verglasung ändert sich durch äußere Umwelteinflüsse. Bei photochromen Verglasungen erfolgt die Veränderung durch die Intensität der solaren Einstrahlung. Bei geringer Einstrahlung sind die Gläser transparent, bei zunehmender Einstrahlung dunkeln die Gläser ab. Bei thermochromen Verglasungen erfolgt die Veränderung in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, wobei bei zunehmender Temperatur die Transparenz abnimmt. Thermochrome³⁶ Gläser haben eine thermotrope Schicht, die unterhalb einer Schalttemperatur als einphasige Mischung vorliegt und klar, transparent ist. Über der Schalttemperatur entmischt sich diese Schicht und wird milchig, transluzent. Damit sind diese Verglasungen in mindestens einem Schaltzustand nicht durchsichtig³⁷. (Haase, 2004, S. 1–14)

Veränderbarkeit

Bei adaptiven Verglasungen ist i.d.R. das Ziel, im klaren Zustand die solare und visuelle Transmission und den g-Wert³⁸ möglichst groß und im veränderten³⁹ Zustand diese Werte so gering wie möglich zu haben. Im Fassadenbereich wird darüber hinaus eine Durchsicht in jedem Schaltzustand bevorzugt, damit die Verglasung auch im Sichtbereich eingesetzt werden kann (Hausladen et al., 2006, S. 127).

Selektivität

Das Ziel von Sonnenschutzverglasungen ist ein geringer Wärmeeintrag bei gleichzeitig möglichst großer Tageslichttransmission (visuelles Spektrum). Für Sonnenschutzverglasungen wird dafür die Selektivität S angegeben, d.h. das Verhältnis der Lichttransmission zum Gesamtenergiedurchlassgrad:

$$S = T_{vis}/g \quad (2)$$

³⁶ Thermotrop und thermochrom werden häufig synonym verwendet. In der Arbeit wird die Bezeichnung thermochrom gewählt.

³⁷ Laut Herstellerangaben gibt es thermochrome Verglasungen, die ihren Zustand zwischen klar und dunkel verändern können und somit die Durchsicht beibehalten (Gesimat GmbH).

³⁸ Wenn zu keinem Zeitpunkt im Jahr solare Gewinne im Raum erwünscht sind, ist es sinnvoll, in jedem Schaltzustand einen möglichst geringen g-Wert zu haben, bei möglichst hoher Lichttransmission im klaren Schaltzustand.

³⁹ Z.B. eingefärbt oder getrübt.

Dabei liegt die physikalische Obergrenze bei ca. 2. Werte über 1 stellen günstige Verhältnisse für Sonnenschutzverglasungen dar (Flachglas MarkenKreis GmbH, 2017, S. 42).

Bei adaptiven Verglasungen kann die direkte Strahlungstransmission verändert werden. Für elektrochromatische Verglasungen wird daher eine dynamische Selektivität S^* angegeben. In diesem Fall wird das Verhältnis der maximalen Lichttransmission im hellen Zustand zum minimalen g-Wert im maximal abgedunkelten Zustand angegeben:

$$S^* = T_{vis,(max)}/g_{(min)} \quad (3)$$

Farbwiedergabe

Die transparente Fassade sollte das Tageslicht möglichst farbfälschungsfrei in den Raum transmittieren lassen, damit die Wiedergabefarbe eines Objekts im Raum möglichst der Originalfarbe entspricht (DIN 6169-1, 1976, S. 2).

Bei elektrochromatischen Verglasungen kommt es durch das häufig verwendete Wolframoxid zu bläulichen Färbungen.

Kennwerte adaptiver Verglasungen

	Aufbau	Schalt-zustand	U-Wert	T_{vis}	T_{vis} Hub ⁴⁰	g-Wert	g-W. Hub	S	S^*
Gasochrome Verglasungen									
	-	hell	-	0,60	-	0,50	-	1,20	-
	-	dunkel	-	0,16	0,44	0,15	0,35	1,07	4,00
Thermochrome Verglasungen ⁴¹									
	-	hell	-	0,50 (0,73)	-	0,74	-	0,68	-
	-	dunkel	-	0,15 (0,21)	0,35 (0,52)	0,16	0,58	0,94	3,75
Elektrochrome Verglasungen ohne Durchsicht in mind. einem Schaltzustand									
PDLC	-	hell	-	0,69	-	-	-	-	-
	-	dunkel	-	0,68	0,01	-	-	-	-
SPD	-	hell	-	0,45	-	-	-	-	-
	-	dunkel	-	0,09	0,36	-	-	-	-
TN-Zellen	-	hell	-	0,33	-	-	-	-	-
	-	dunkel	-	0,14	0,19	-	-	-	-

⁴⁰ Als Hub wird der maximale Unterschied zwischen klarem, hellem und maximal eingefärbtem, dunklem Zustand bezeichnet.

⁴¹ Angaben in Klammer nach (Haase, 2004, S. 136)

	Aufbau	Schalt-zustand	U-Wert	T _{vis}	T _{vis} Hub ⁴²	g-Wert	g-W. Hub	S	S*
Elektrochrome Verglasungen mit Durchsicht in jedem Schaltzustand									
ECONTROL smart [®] 55/10 (Standard) ⁴³	2-fach IV (EC9/16/4)	hell	1,10	0,55	-	0,41	-	1,34	-
		dunkel	1,10	0,10	0,45	0,10	0,31	1,00	5,50
ECONTROL smart [®] 51/8	3-fach IV (EC9/12/4/12/4)	hell	0,50	0,51	-	0,36	-	1,42	-
		dunkel	0,50	0,09	0,42	0,08	0,28	1,13	6,38
Sageglass ^{®44} Climaplus Classic	2-fach IV (42.1EC-12-4)	hell	1,10	0,60	-	0,40	-	1,50	-
		ZW ⁴⁵ 1	1,10	0,17	-	0,12	-	1,42	-
		ZW 2	1,10	0,05	-	0,07	-	0,71	-
		dunkel	1,10	0,01	-	0,05	0,35	0,20	12,00
Sageglass [®] Climatop Classic	3-fach IV (42.1EC-12-4-12-4)	hell	0,60	0,54	-	0,36	-	1,50	-
		ZW 1	0,60	0,16	-	0,09	-	1,78	-
		ZW 2	0,60	0,05	-	0,05	-	1,00	-
		dunkel	0,60	0,01	0,53	0,03	0,33	0,33	18,00

Tabelle 4: Kennwerte adaptiver Verglasungen nach Hersteller- und Literaturangaben (Quellen: (Econtrol; Vetrotech Saint-Gobain International AG, 2015), (Haase, 2004) und (Hausladen et al., 2006, S. 127))

Referenzverglasungen

Elektrochromatische Verglasungen sind die auf dem Markt aktuell gängigsten schaltbaren Verglasungen für den Fassadenbereich. Aus diesem Grund werden im weiteren Verlauf der Untersuchungen für Fluidglas zur Orientierung die Kennwerte von elektrochromatischen Verglasungen der Firmen Econtrol[®] und Sageglass[®] exemplarisch herangezogen (siehe Tabelle 4). Bei den offiziellen Kennwerten für elektrochromatische Verglasungen mit einem Dreifachaufbau weist das Sageglass[®] Climatop Classic die besten Kennwerte für die Veränderbarkeit der Lichttransmission mit 54% im hellen und 1% im dunklen Zustand auf. Der Schalthub bei der Lichttransmission liegt damit bei 53%. Ebenso ist die Veränderbarkeit des g-Werts um 0,33 von 0,36 im hellen Zustand zu 0,03 im dunklen Zustand bei diesem 3-fach-Isolierglas am höchsten. Die dynamische Selektivität mit 18 ist somit deutlich höher als die des vergleichbaren Produkts von Econtrol[®] mit 8. Die Schaltzeiten von hell zu dunkel liegen bei etwa 5 bis 10 Minuten.

⁴² Als Hub wird der maximale Unterschied zwischen klarem, hellem und maximal eingefärbtem, dunklem Zustand bezeichnet.

⁴³ Alle Kennwerte für Verglasungen von Econtrol[®]-Verglasungen aus Econtrol.

⁴⁴ Alle Kennwerte für Verglasungen von Sageglass[®] aus (Vetrotech Saint-Gobain International AG, 2015)

⁴⁵ ZW = Zwischenschritt

2.8 Bauliche Parameter fassadenintegrierter, thermischer Solarkollektoren

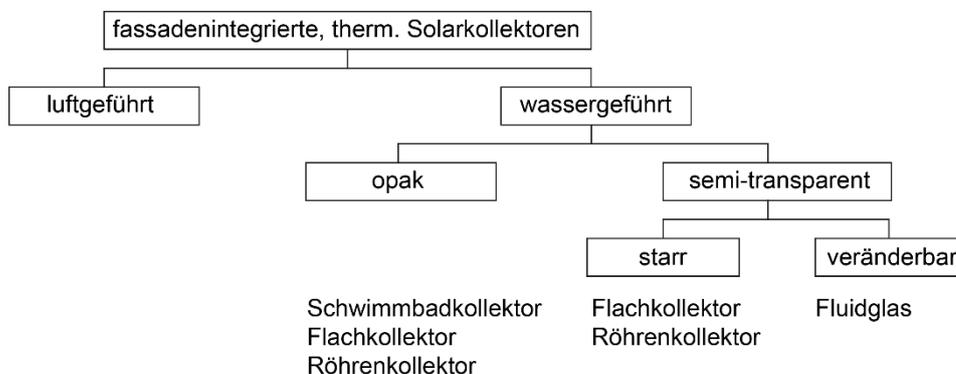


Abbildung 15: Typologische Übersicht fassadenintegrierter, thermischer Solarkollektoren

Es stehen derzeit zwei unterschiedliche Arten fassadenintegrierter, solarthermischer Kollektoren zur solartechnischen Wärmeerzeugung zur Verfügung: luft- bzw. wassergeführte Systeme. Zur Einordnung flüssigkeitsdurchströmter Glasfassaden werden im Rahmen der Arbeit nur fassadenintegrierte, wassergeführte Kollektoren berücksichtigt (siehe Abbildung 15). Für die Integration in die Fassade ist ein weiteres, wichtiges Unterscheidungsmerkmal der Transparenzgrad von undurchsichtig (opak) bis transparent. Für eine hohe Effizienz werden Absorber i.d.R. strahlungsundurchlässig (opak) ausgeführt. Im Falle von Fluidglas wird angestrebt, die Fassade damit vollflächig auszustatten. Der Solarkollektor muss daher die Sichtverbindung nach außen und die Tageslichttransmission in den dahinter liegenden Raum ermöglichen. Der Solarkollektor sollte transparent sein bzw. transparent geschaltet werden können (semi-transparent). Im Falle von Fluidglas ist die Fassade ohne eingefärbtes Fluid transparent, mit Einfärbung kann die Transparenz reduziert werden (veränderbar).

Für die großflächige Anwendung in der Glasfassade, d.h. auch in Bereichen, in denen ein Sichtbezug nach außen bzw. ein Tageslichteintrag gewünscht wird, gibt es aktuelle Ansätze semi-transparenter Solarkollektoren (Abbildung 16).



Abbildung 16: Semi-transparente, solarthermische Kollektoren; links: Flachkollektor mit gebogenem Absorber (Quelle: (Maurer et al., 2012, S. 1037)); rechts: Vakuum-Röhrenkollektor (Quelle: (Molter, 2016, S. 41))

Es handelt sich dabei sowohl um perforierte Flachkollektoren als auch um Vakuum-Röhrenkollektoren. In beiden Fällen ist die Semi-Transparenz nicht veränderbar (starr). Vollflächig transparente, fassadenintegrierte Solarkollektoren gibt es derzeit nicht auf dem Markt. Aktuell stehen einfache Absorber ohne Abdeckung (Schwimmbadabsorber), Flachkollektoren und Röhrenkollektoren für den Einbau in der Fassade zur Verfügung (Munari Probst, Maria Cristina, 2012). Zur Verbesserung der Wirkungsgrade können Absorber selektiv, schwarz beschichtet werden, um die Strahlungswärmeverluste zu reduzieren. Durch die Beschichtung wird die Reflexion der kurzwelligen Strahlung minimiert bzw. die Absorption maximiert. Im langwelligen Strahlungsbereich kehrt sich das Verhalten um, d.h. die Strahlungsemission wird minimiert. (Kaltschmitt, 2013, S. 137–153)

Zusätzlich können zur Reduktion der konvektiven Wärmeverluste transparente Abdeckungen über den Absorbern angebracht werden (Flachkollektoren) und in einer weiteren Optimierung die Luft zwischen Absorber und Abdeckung evakuiert werden (Vakuum-Kollektoren).

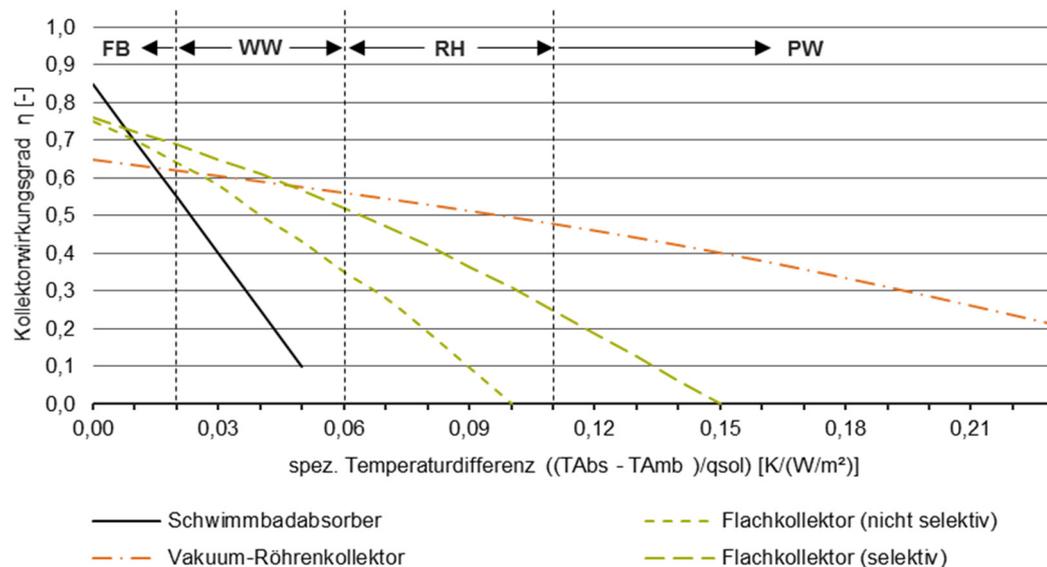


Abbildung 17: Kennlinienverläufe (schematisch) opaker Solarkollektortypen in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung q_{sol} und der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Absorbertemperatur T_{abs} und Außenlufttemperatur T_{amb} ⁴⁶ (Quelle: Eigene Darstellung nach (Kaltschmitt, 2013, Abb. 4.11))

Wie in Abbildung 17 vereinfacht dargestellt, weisen alle Kollektortypen ihr Wirkungsgradmaximum bei einer mittleren Absorbertemperatur auf, die der Außenlufttemperatur entspricht. Dieser Wirkungsgrad am Nullpunkt entspricht dem optischen Wirkungsgrad, der mit dem Produkt aus dem Transmissionsgrad der Glasabdeckung und dem Absorptionsgrad des Absorbers für den kurzwelligen Strahlungsbereich bestimmt wird (Spinnler, 2014, S. 131–140). Bei Kollektoren ohne Abdeckung ist optischen Wirkungsgrad am höchsten, da die Reflexion und die Absorption an der Glasabdeckung entfallen. Bei zunehmender Temperaturdifferenz zwischen Absorber- und Umgebungstemperatur nimmt der Wirkungsgrad ab.

⁴⁶ FB = Freibaderwärmung; WW = Brauchwarmwasser; RH = Raumheizungsunterstützung, PW = Prozesswärme.

	Optischer Wirkungsgrad [-]	Thermischer Verlustfaktor [W/m ² K]	Temperaturbereiche [°C]	Anwendung
Schwimmbadabsorber	0,92	12 – 17	0 – 30	FB
Flachkollektor ⁴⁷ (nicht selektiv)	0,80 – 0,85	5 – 7	20 – 80	WW
Flachkollektor ⁴⁸ (selektiv)	0,75 – 0,81	3 - 4	20 - 80	WW, RH
Vakuum-Flachkollektor	0,72 – 0,80	2,4 – 2,8	50 - 120	WW, RH, PW
Vakuum-Röhrenkollektor	0,64 – 0,80	1,5 – 2,0	50 -120	WW, RH, PW

Tabelle 5: Kennwerte verschiedener Flüssigkeitskollektoren nach (Kaltschmitt, 2013, S. 201)

Je nach dem typischen Temperaturbereich der Kollektoren werden die typischen Anwendungsbereiche unterschieden. Bei geringen Austrittstemperaturen des Wärmeträgermediums – 0°C bis ca. 30°C – werden diese zur Warmwasseraufbereitung für Freibäder (FB), bei höheren Temperaturen - 20°C bis ca. 80°C - für Warmwasser (WW) in Gebäuden und zur Heizungsunterstützung (RH) genutzt.

2.9 Bauliche Parameter flächiger Heiz- und Kühlsysteme

Aktuell gibt es auf dem Markt keine wassergeführten, flächigen Heiz- und Kühlsysteme in der Fassade, mit denen das Fluidglas verglichen werden kann. Es werden Fassadenheizungen bzw. -kühlungen angeboten, bei denen die Fassadenprofile aktiviert werden oder Wärmeübergabesysteme, z.B. Konvektoren oder Radiatoren, die vor der Glasfassade angeordnet werden. Mit diesen Systemen werden den negativen Auswirkungen an Glasfassaden, z.B. erhöhte Transmissionsverluste, zu warme oder kalte Innenoberflächen und Kaltluftabfall, entgegen gewirkt.

Niedertemperatursystem

Die Vorlauftemperaturen von Fluidgläsern sind auf minimal 18°C und maximal 35°C beschränkt aufgrund der entsprechenden minimal bzw. maximal zulässigen Oberflächentemperatur von Glasfassaden (siehe Kapitel 2.4.2). Die Vorlauftemperatur zum Kühlen ist daher relativ hoch, die zum Heizen relativ niedrig⁴⁹. Das System ist vergleichbar mit typischen flächigen Übergabesystemen wie Fußboden-, Wand- und Deckensystemen oder thermoaktiven Decken. Die geringen Temperaturdifferenzen zur Umgebungstemperatur ermöglichen eine effiziente Nutzung regenerativer Energiequellen.

⁴⁷ Nicht selektiver Absorber, einfache Abdeckung

⁴⁸ Selektiver Absorber, einfache Abdeckung

⁴⁹ Im Vergleich zu nicht flächigen Wärme- bzw. Kälteübergabesystemen sind die Vorlauftemperaturen bei Fluidglas moderat. Bei konventionellen Wärmeübergabesystemen, wie Radiatoren oder Konvektoren, werden Vorlauftemperaturen von 45°C bis 90°C benötigt, bei Kälteübergabesystemen, z.B. Klimaanlage, bis zu 6°C.

Heizen

Wärmeübergabesysteme werden benötigt, um die thermischen Verluste des Raums an die Umgebung auszugleichen und die Raumtemperatur auf dem gewünschten Temperaturniveau zu halten. Je besser die thermische Gebäudehülle hinsichtlich Dichtigkeit und Transmissionswärmeverluste ausgebildet ist, desto geringer sind die Wärmeverluste und damit die benötigte Heizleistung. Bei neuen Gebäuden ist dies i.d.R. der Fall. Hier sind flächige Niedertemperatursysteme ausreichend, d.h. die Vorlauftemperatur des Wärmeträgermediums beträgt ca. 25°C bis 35°C. Die spezifische Heizleistung liegt zwischen ca. 40 und 60 W/m² (siehe Tabelle 6). Ist die benötigte Heizleistung größer, müssen andere Systeme mit höheren Vorlauftemperaturen eingesetzt werden, z.B. Radiatoren, Konvektoren oder Deckenstrahlplatten, mit Heizleistungen bis zu 80 W/m². Solare Wärmegewinne über die transparente Fassade, interne Lasten und Wärmerückgewinnung beim Lüftungssystem reduzieren den Heizwärmebedarf. (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 176)

Wärmeübergabesystem	Spez. Heizleistung [W/m ²]	Vorlauftemperatur [°C]	Anteil Strahlung/ Konvektion
Fußbodenheizung	40 - 50	30 - 35	90/10
Deckenheizung	30 - 60	30 - 35	100/0
Wandheizung	bis 80	25 - 40	-
Thermoaktive Decke	bis 40	ca. 25	90/10

Tabelle 6: Typische Kennwerte von Wärmeübergabesystemen (Quelle: (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 176) und (Hegger, Hartwig & Keller, 2012, S. 100))

Kühlen

Kälteübergabesysteme werden benötigt, um die Raumtemperatur im Komfortbereich zu halten und eine maximale Raumtemperatur nicht zu überschreiten. Insbesondere im Verwaltungsbau kommt es durch interne Lasten in Kombination mit großflächig verglasten Fassaden zu hohen Raumtemperaturen und ggf. zu Kühlbedarf. Ein guter Sonnenschutz, der die solaren Einträge begrenzt, ist unabdingbar. Darüber hinaus tragen passive Maßnahmen, z.B. Nachtlüftung, zur Reduktion des Kühlkältebedarfs bei. Bei gering benötigten Kühlleistungen können flächige Systeme mit relativ hohen Vorlauftemperaturen eingesetzt werden. Die Vorlauftemperaturen liegen zwischen 10°C und 20°C. Die Vorlauftemperatur darf je nach Luftfeuchtigkeit nicht zu tief sein, damit es nicht zu Tauwasserausfall an der Oberfläche kommt. Die Kühlleistung liegt bei Vorlauftemperaturen von ca. 18°C zwischen ca. 30 und 80 W/m².

Kälteübergabesystem	Spez. Kühlleistung [W/m ²]	Vorlauftemperatur [°C]	Anteil Strahlung/ Konvektion
Kühldecke	80 - 120	10 - 18	100/0
Flächenkühlung	30 - 40	16 - 20	100/0
Wandkühlung	bis 50	12 - 16	-
Thermoaktive Decke	bis 50	16 - 20	100/0

Tabelle 7: Typische Kennwerte von Kälteübergabesystemen (Quelle: (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 176) und (Hegger et al., 2012, S. 100))

3 Systemkonzepte von Fluidglasfassaden

3.1 Anforderungen an die Funktionszonen von Fluidglasfassaden

Die Tageslichtsimulationen für dieses Kapitel wurden mit der Software Relux durchgeführt (Relux, 2017).

Tageslichtverfügbarkeit

Das Fluidglas ohne Einfärbung im klaren Zustand stellt die Ausgangslage für die Tageslichtverfügbarkeit dar. Der Fensterflächenanteil wird mit ca. 90% und der visuelle Transmissionsgrad der Verglasung mit 70% angenommen (siehe auch Tabelle 39).



Abbildung 18: Visualisierung eines Einzelbüroraums mit Vollverglasung (Fluidglas ohne Einfärbung) bei bedecktem Himmel

Ein typischer Einzelbüroraum in München mit Vollverglasung hat mit einem mittleren Tageslichtquotienten von 9,7% eine optimale Tageslichtverfügbarkeit⁵⁰. Der maximale Tageslichtquotient an der Fassade beträgt 36,3%, der minimale in fünf Meter Tiefe 1% (siehe Abbildung 18).

⁵⁰ Fluidglas im klaren Zustand. Einzelbüroraum nach Süden orientiert. Bedeckter Himmel. (Randbedingungen siehe Anhang 16.10)

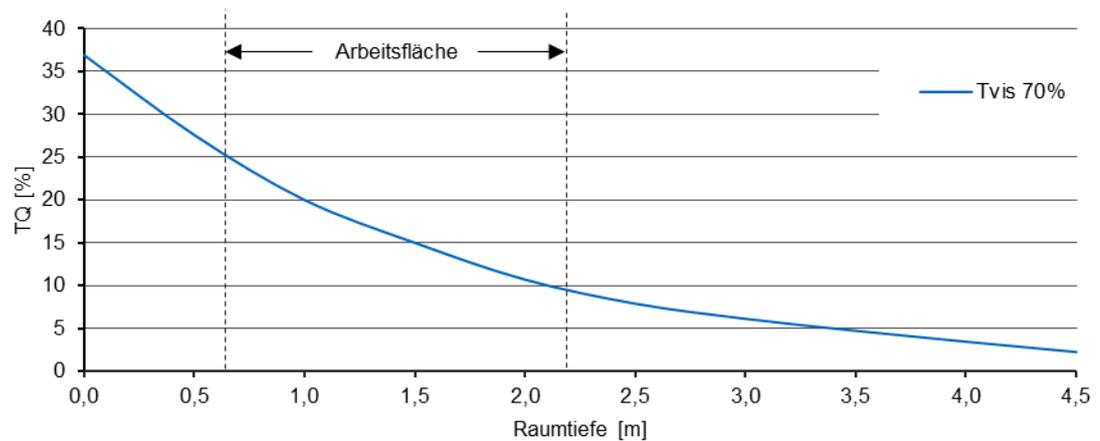


Abbildung 19: Verlauf des Tageslichtquotienten in Raummitte in einem Einzelbüroraum mit Vollverglasung (Fluidglas ohne Einfärbung) bei bedecktem Himmel⁵¹

Funktionszonen von Fluidglasfassaden

Bei Fluidglaselementen können die Zustände der Funktionszonen durch die Veränderung der Vorlauftemperatur und die Fließgeschwindigkeit der Fluide verändert werden, ohne eine Veränderung des kurzwelligen Strahlungsdurchgangs zu verursachen. Diese Zustandsveränderungen werden für Heizen und Kühlen benötigt. Diese Funktionen können vollflächig an der Fassade eingesetzt werden, ohne die dahinter liegenden Schichten und den Innenraum hinsichtlich kurzwelliger Strahlungstransmission zu beeinflussen. Darüber hinaus können die Fluide reversibel eingefärbt werden. Dies verändert die Transparenz der Fassade und wird für die Sonnenschutz-, Blendschutz- und Solarkollektorfunktion eingesetzt. Diese Zustandsveränderung hat einen Einfluss auf die dahinter liegenden Schichten und den Raum (siehe Abbildung 11 (rechts) und Tabelle 8).

⁵¹ Tageslichtsimulationen in diesem Kapitel: Messebene für Tageslichtquotient 0,85 m und Beleuchtungsstärke auf 0,75 m über dem Boden in Raummitte. Standort München, Südorientierung, 21.3. 12:00 Uhr

Fassadenbereich	Anforderung Fassade (Wellenlängenbereich)	Anforderung an Einfärbung Fluidglas	Einfluss auf kurzweilige Strahlungstransmission
Oberer Bereich (Tageslichtzone)	Tageslichteintrag (380 – 780 nm)	Klares Fluid mit max. Transparenz	<ul style="list-style-type: none"> Kein Einfluss auf Strahlungstransmission Durchsicht gegeben
	Heizen-/Kühlen (300 – 2500 nm)	Keine Anforderung (klar oder eingefärbt)	
	Sonnenschutz (300 – 2500 nm)	Eingefärbtes Fluid zur Reduktion der solaren Transmission	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierte Energie- und Tageslichttransmission Durchsicht reduziert, aber gegeben
	Energiegewinnung (300 – 2500 nm)	Eingefärbtes Fluid zur Erhöhung der solaren Absorption	
Mittlerer Bereich (Ausblickzone)	Sichtbezug (380 – 780 nm)	Klares oder eingefärbtes Fluid ohne Streuung oder Verzerrung. Keine Totalverdunkelung im vis. Bereich	<ul style="list-style-type: none"> Ggf. reduzierte Energie- und Tageslichttransmission Durchsicht gegeben
	Tageslichteintrag (380 – 780 nm)	Klares Fluid mit max. Transparenz	<ul style="list-style-type: none"> Kein Einfluss auf Strahlungstransmission Durchsicht gegeben
	Heizen-/Kühlen (300 – 2500 nm)	Keine Anforderung (klar oder eingefärbt)	
	Blendschutz (380 – 780 nm)	Eingefärbtes Fluid zur Reduktion der solaren Transmission	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierte Energie- und Tageslichttransmission Durchsicht reduziert, aber gegeben
	Sonnenschutz (300 – 2500 nm)		
	Energiegewinnung (300 – 2500 nm)	Eingefärbtes Fluid zur Erhöhung der solaren Absorption	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierte Energie- und Tageslichttransmission Durchsicht reduziert, aber gegeben
Unterer Bereich (Brüstungszone)	Energiegewinnung (300 – 2500 nm)	Eingefärbtes Fluid zur Erhöhung der solaren Absorption	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierte Energie- und Tageslichttransmission Durchsicht reduziert, aber gegeben
	Sonnenschutz (300 – 2500 nm)	Eingefärbtes Fluid zur Reduktion der solaren Transmission	
	Heizen-/Kühlen (300 – 2500 nm)	Keine Anforderung (klar oder eingefärbt)	<ul style="list-style-type: none"> Kein Einfluss auf Strahlungstransmission Durchsicht gegeben

Tabelle 8: Anforderungen an die Funktionszonen bei Fluidglasfassaden (fett gedruckte sind die jeweiligen Hauptanforderungen je Zone)

Fassadengliederung in eine Zone

Die technisch einfachste Ausführung der Fluidglasfassade besteht aus raumhohen Fassadenelementen (siehe Abbildung 18). In diesem Fall können die benötigten horizontalen Leitungsführungen in der abgehängten Decke und dem Doppelboden integriert werden. Der architektonische Eindruck ist bei dieser Ausführung sehr reduziert. Für die Variabilität und v.a. die Tageslichtversorgung im Raum stellt diese Ausführungsvariante jedoch keine optimale Lösung dar, wie in Tabelle 8 zu sehen ist. Die gesamte Fassade muss nach den Anforderungen des Blend- und Sonnenschutzes gesteuert werden. Bei direkter Sonneneinstrahlung muss

insbesondere bei Bildschirmarbeitsplätzen sehr stark abgedunkelt werden. In die Raumtiefe nimmt das Tageslicht sehr schnell ab (siehe Abbildung 20 und Abbildung 21)⁵².

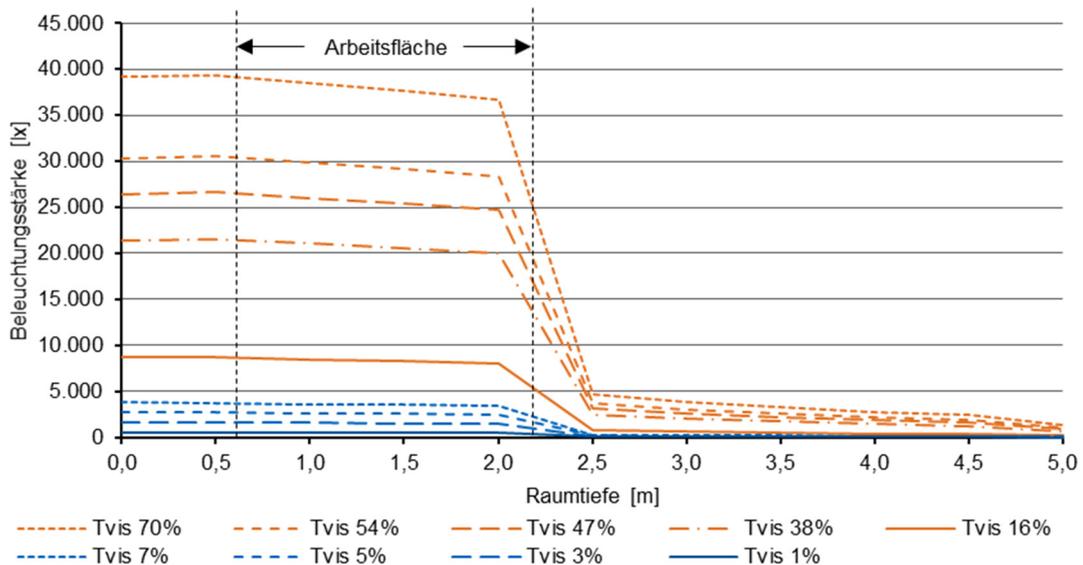


Abbildung 20: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierende Transmissionsgraden (T_{vis}) der Verglasung bei klarem Himmel; Vollverglasung mit gleichen Transmissionsgraden je Fassadenelement

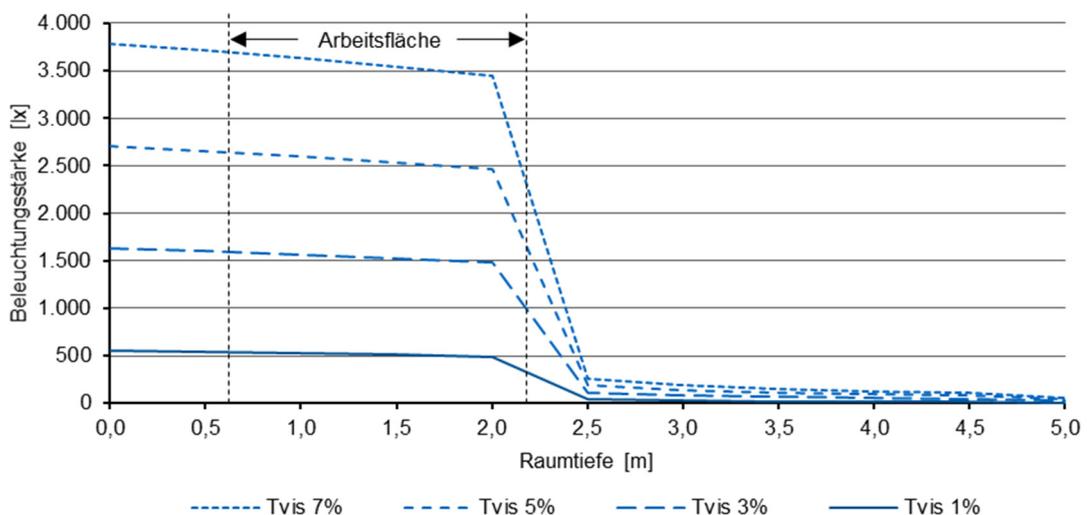


Abbildung 21: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierende Transmissionsgraden (T_{vis}) – 7% bis 1% - der Verglasung bei klarem Himmel; Vollverglasung mit gleichen Transmissionsgraden je Fassadenelement

Die direkte Strahlung reicht am 21.3. im Süden bis in ca. 2 Meter Raumtiefe. Ab dieser Tiefe nimmt die Beleuchtungsstärke stark ab. Wie in Abbildung 20 und Abbildung 21 zu sehen ist, ist bei direkter Einstrahlung eine deutliche Reduktion des visuellen Transmissionsgrads erforderlich, um nicht störende Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene zu erhalten. Erst ab Transmissionsgraden der Verglasung unter ca. 7% werden die gewünschten

⁵² Simulationsergebnisse sind auch Anhang 16.3 nachzulesen.

Beleuchtungsstärken von max. 4000 Lux erreicht (siehe auch Kapitel 2.4.1). Um auf der Arbeitsebene Beleuchtungsstärken unter 2000 Lux zu erreichen, wird im untersuchten Fall eine Transmission von ca. 3% benötigt. In 5 Meter Raumtiefe erreicht man damit lediglich 27 Lux.

Um den Tageslichteintrag bei dieser Fassadenanordnung zu verbessern, können die nebeneinanderliegenden Fassadenelemente unterschiedlich stark eingefärbt werden. Damit kann der Fassadenbereich, der eine Blendungsbegrenzung für den Arbeitsplatz zu gewährleisten hat, stärker eingefärbt werden, andere Bereiche geringer.



Abbildung 22: Visualisierung eines Einzelbüroraums mit Vollverglasung bei klarem Himmel; drei raumhohe, vertikale Fassadenelemente mit unterschiedlichen Transparenzgraden

Wie in Abbildung 23 und Tabelle 54 zu sehen ist, kann mit dieser Anordnung eine ausreichende Begrenzung der Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene erreicht werden. Die Beleuchtungsstärke in 5 Meter Tiefe in der Raummitte beträgt im besten Fall – zwei Elemente mit 5% und ein Element mit 70% Lichttransmission - noch 430 Lux.

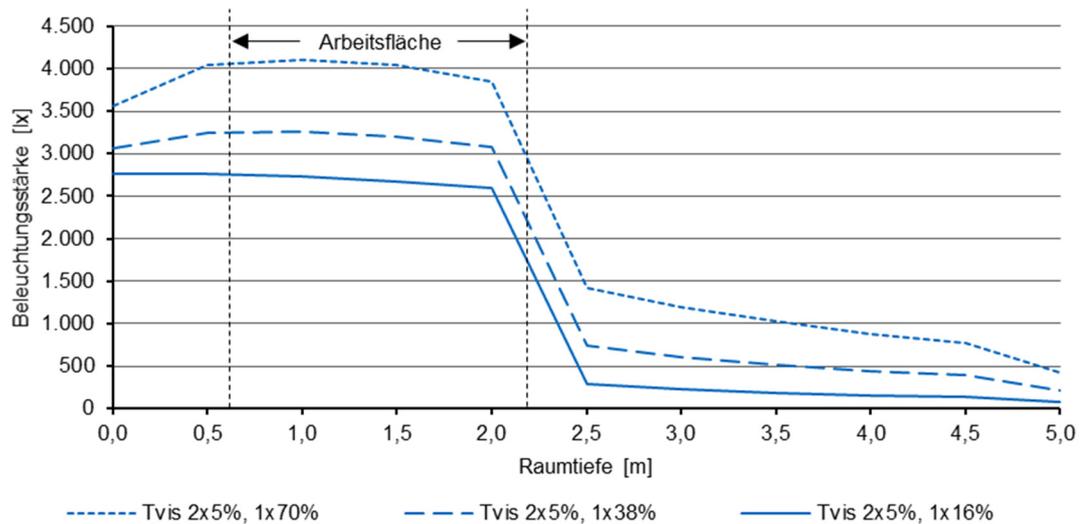


Abbildung 23: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierenden Transmissionsgraden (T_{vis}) der Verglasung bei klarem Himmel; drei raumhohe, vertikale Fassadenelemente mit unterschiedlichen Transparenzgraden

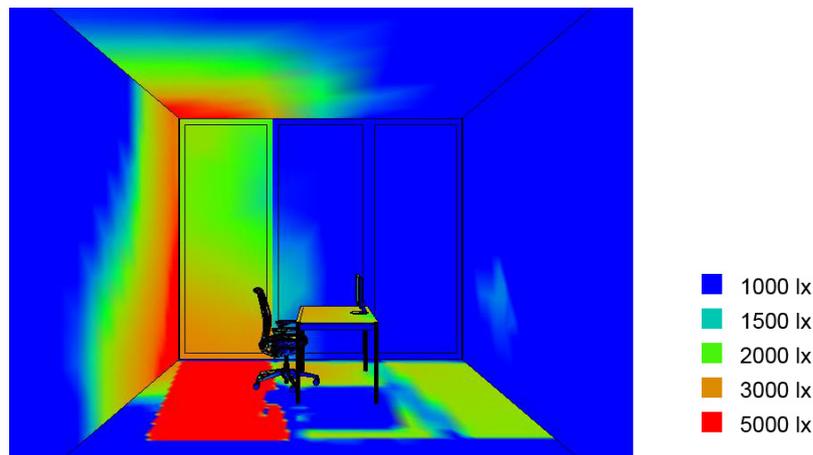


Abbildung 24: Beleuchtungsstärke im Einzelbüro bei asymmetrischen Transmissionsgraden in der Fassade; Innenansicht

Bei dieser Steuerungsvariante der Fassade ergeben sich jedoch sehr asymmetrische Beleuchtungsstärken im Raum (siehe Abbildung 24). In diesem Fall muss darauf geachtet werden, dass helle Flächen im Raum nicht zu störenden Reflexionen oder zu hohen Leuchtdichteunterschieden führen.

Fassadengliederung in drei Funktionszonen

Optimal ist eine vertikal übereinander liegende Gliederung der drei Funktionszonen. In diesem Fall kann der Einfärbungsgrad der Fluidglasfassade auf die jeweiligen Anforderungen individuell angepasst werden. Die Brüstungszone kann für eine maximale Energiegewinnung maximal eingefärbt werden. Der Einfärbungsgrad in der Ausblickzone wird auf die Blendschutz- und Sonnenschutzanforderungen angepasst. Dabei wird der Ausblick noch ermöglicht. Die Tageslichtzone kann transparent bleiben, um möglichst viel Tageslicht in den Raum zu lassen,

solange der thermische Komfort keinen Sonnenschutz erfordert. Das Tageslicht kann durch ein Lichtlenksystem noch weiter in die Raumtiefe gelenkt werden.



Abbildung 25: Visualisierung eines Einzelbüroraums mit Vollverglasung bei klarem Himmel; Fassadeneinteilung in drei übereinander liegende Zonen⁵³ mit vereinfachtem Lichtlenkschwert

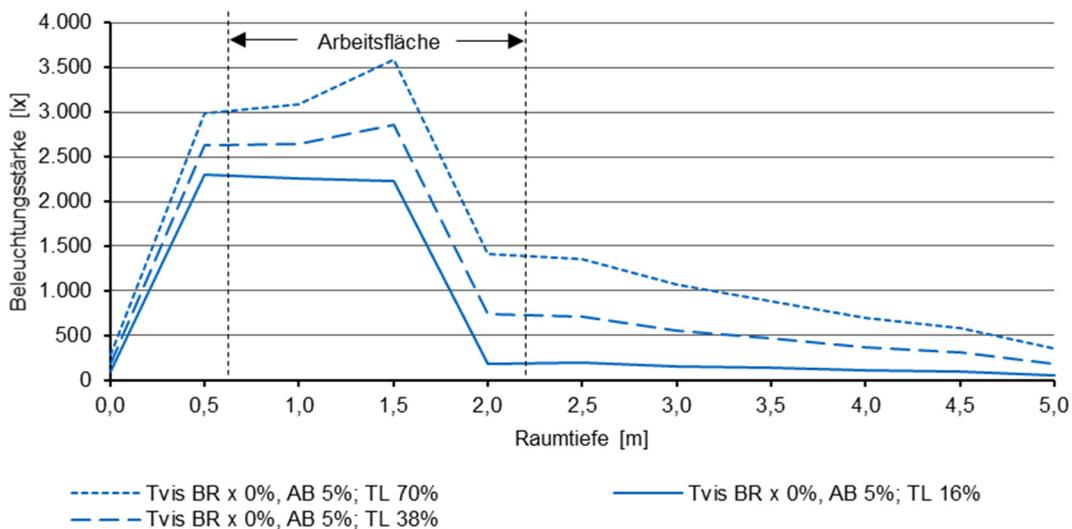


Abbildung 26: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierenden Transmissionsgraden (T_{vis}) der Verglasung bei klarem Himmel; Fassadeneinteilung in drei übereinander liegende Zonen mit vereinfachtem Lichtlenkschwert

Die opake Brüstung (minimale optische Kollektorverluste) reduziert nur in den ersten 0,5 m hinter der Fassade das Tageslicht deutlich. Durch die geringe Transmission in der Ausblickzone mit 5% und die Verschattung durch das Lichtlenkschwert kann die Beleuchtungsstärke auf der

⁵³ (BR = Brüstungszone, AB = Ausblickzone, TL = Tageslichtzone)

Arbeitsebene unter 4000 Lux gehalten werden. Durch die sehr transparente Tageslichtzone in Kombination mit der Lichtlenkung kann der Raum bis in die Tiefe ausreichend natürlich belichtet werden. Die Lichtlenkung ist nur sehr vereinfacht simuliert. Durch eine optimierte Lichtlenkung könnte die Raumtiefe noch besser und der gesamte Raum gleichmäßiger ausgeleuchtet werden. Da pro Fluidglaselement jeweils oben und unten Fluidaus- bzw. Fluideinlässe sowohl außen wie auch innen angebracht werden müssen, ist der technische Aufwand für eine entsprechende Ausführung sehr hoch. Es müssen vier horizontale Leitungsführungen in der Fassade integriert werden, d.h. zwei zusätzliche gegenüber den raumhohen, vertikalen Elementen. Der Riegel zwischen Ausblick- und Tageslichtzone könnte in einem Lichtschwert integriert werden, der Brüstungsriegel stellt eine gestalterische Herausforderung dar.

Fassadengliederung in zwei Funktionszonen

Bei einer Ausführung mit zwei vertikal übereinander liegenden Funktionszonen – Brüstungs- und Ausblickzone in einem Element, Tageslichtzone separat gesteuert – kann auf den Brüstungsriegel verzichtet werden. In diesem Fall kann die Brüstungszone nicht separat hinsichtlich Energiegewinnung optimiert gesteuert werden. Eine Optimierung des Tageslichteintrags ist jedoch möglich. Auch hier kann ein Lichtlenksystem den Tageslichteinfall in Raumtiefe unterstützen. Der Verlauf der Beleuchtungsstärke in Raumtiefe entspricht in etwa der Ausführung mit drei übereinander liegenden Elementen, wenn die Elemente in der Brüstungs- und Ausblickzone gleich gesteuert werden. Durch eine asymmetrische Steuerung, wie in Abbildung 27 dargestellt, kann der Tageslichtverlauf in Raumtiefe weiter verbessert werden, wie in Abbildung 28 zu sehen ist.



Abbildung 27: Visualisierung eines Einzelbüroraums mit Vollverglasung bei klarem Himmel; Fassadeneinteilung in zwei übereinander liegende Zonen mit vereinfachtem Lichtlenkschwert

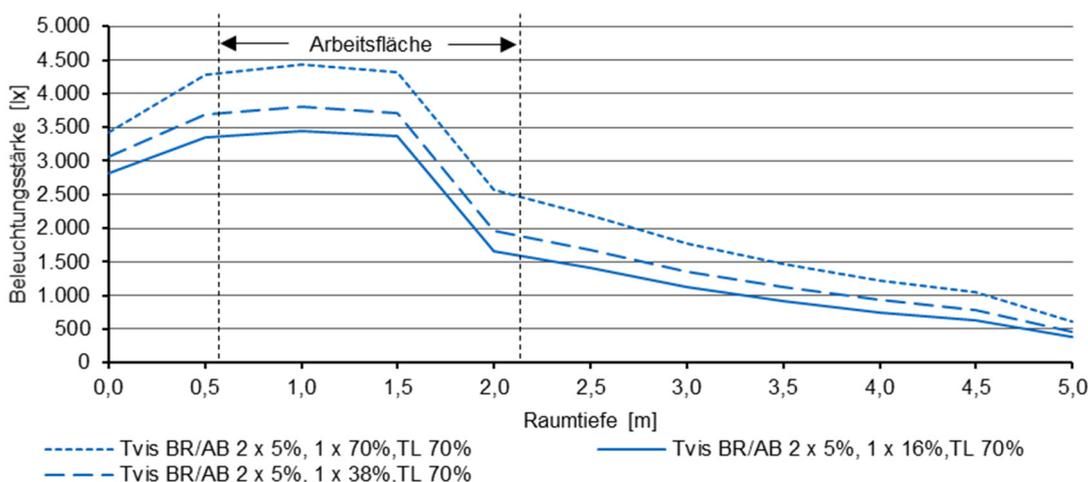


Abbildung 28: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierende Transmissionsgraden (T_{vis}) der Verglasung bei klarem Himmel; Fassadeneinteilung in zwei übereinander liegende Zonen mit vereinfachtem Lichtlenkschwert

Fazit

Idealerweise wird die Fluidglasfassade mit einer getrennten Tageslichtzone ausgeführt, um trotz Blendungsbegrenzung auf Arbeitsebene möglichst hohe Beleuchtungsstärken in der Raumtiefe zu erhalten (siehe Abbildung 29 und Tabelle 57). Der technische Aufwand für zusätzliche Fluidanschlüsse an der Fassade ist jedoch sehr hoch. Fluidglasfassaden mit einer Funktionszone, d.h. raumhohen Fassadenelementen, können durch unterschiedliche Einfärbung der Fassadenelemente hinsichtlich der Belichtung in die Raumtiefe ebenfalls sehr gute Ergebnisse liefern. Dabei muss die Blendung durch helle Raumbooberflächen vermieden werden. Darüber hinaus muss die Einfärbung auch auf den thermischen Komfort abgestimmt und die benötigte Einfärbung zur Begrenzung der solaren Einträge optimiert werden.

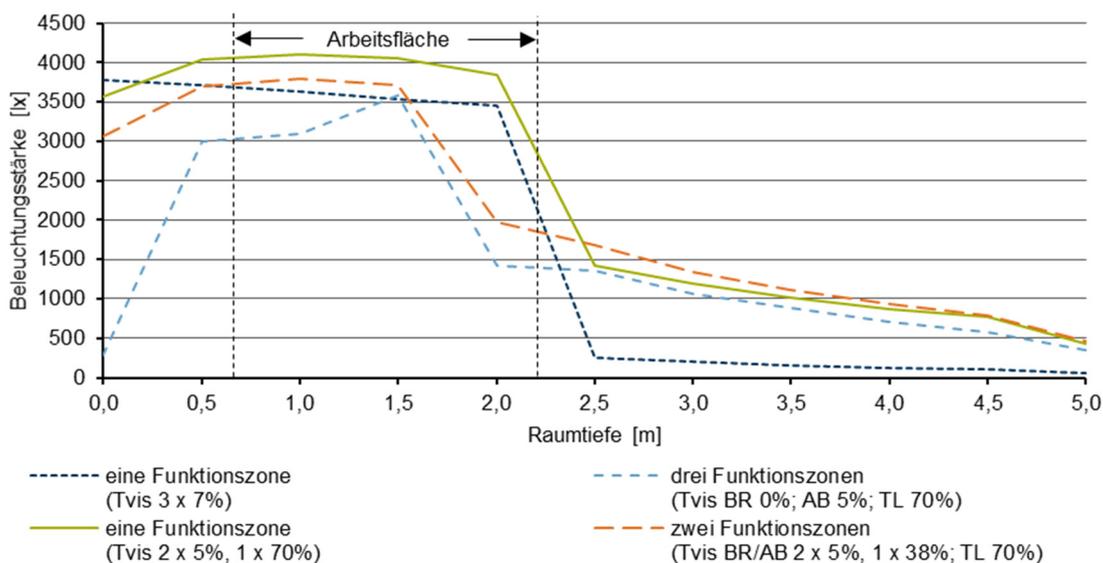


Abbildung 29: Gegenüberstellung unterschiedlicher Fassadenvarianten; Beleuchtungsstärkeverlauf mit variierten Transmissionsgraden

3.2 Aufbauvariationen von Fluidgläsern

Es gibt unterschiedliche Ansätze zum Aufbau von flüssigkeitsdurchströmten Verglasungselementen (siehe Tabelle 9). Sie variieren in der Anzahl und der Anordnung der Flüssigkeitsschichten und der Isolierglaseinheiten. Grundsätzlich fungieren nach außen orientierte Flüssigkeitsschichten als Sonnen- und Blendschutz und als thermischer Solarkollektor. Zum Innenraum hin orientierte Flüssigkeitsschichten dienen als Sonnen- und Blendschutz, als Heiz- und Kühlsystem und eingeschränkt als Solarkollektor. Fluidgläser ohne Isolierglaseinheit können nicht als thermische Hülle für dahinter liegende Räume mit Anforderungen an die Raumkonditionierung verwendet werden. (Stopper et al., 2014)

Nr.	Fluidglasaufbau	Funktionen
1		<ul style="list-style-type: none"> • Sonnen-/ und Blendschutz • thermischer Solarkollektor
2		<ul style="list-style-type: none"> • Sonnen-/ und Blendschutz • thermischer Solarkollektor • transparente, therm. Hülle
3		<ul style="list-style-type: none"> • Sonnen-/ und Blendschutz • transparente, therm. Hülle • Heizsystem • Eingeschränkt als Kühlsystem mit zusätzlichem Sonnenschutz • Eingeschränkt als therm. Solarkollektor
4		<ul style="list-style-type: none"> • Sonnen-/ und Blendschutz • transparente, therm. Hülle • Heiz- und Kühlsystem • thermischer Solarkollektor
5		<ul style="list-style-type: none"> • Sonnen-/ und Blendschutz • transparente, therm. Hülle • thermischer Solarkollektor

Tabelle 9: Aufbauvariationen von flüssigkeitsdurchströmten Verglasungen (Darstellung: grau = Glasscheibe, blau = Flüssigkeitsschicht, strichpunktierte Linie = thermische Trennung)

3.3 Bauliche Umsetzung von Fluidglasfassaden

Fluidglasaufbau

Da der Fluidglasaufbau Nr.4 nach Tabelle 9 alle Fluidglasfunktionen - Sonnen-/ und Blendschutz, transparente, thermische Hülle, Heiz- und Kühlsystem und thermischer Solarkollektor-uneingeschränkt ermöglicht, wurde dieser im weiteren Verlauf untersucht.

Dieser Fluidglasaufbau besteht aus: fünf Glasscheiben, zwei davon mit Low-E-Beschichtung; zwei Scheibenzwischenräumen mit Gasfüllung und zwei flüssigkeitsführenden Schichten (siehe Tabelle 10).

	Grenzflächen (GF)		Zonen (Z)	
	Nr.	Beschreibung	Nr.	Beschreibung
	GF1_2	Luft – Glas	Z1	Außenluft
	GF2_3	Glas – Fluid	Z2	Glas
	GF3_4	Fluid – Glas	Z3	Fluid (F1)
	GF4_5	Glas-Low-E – Gas	Z4	Glas-Low-E (Pos. 4)
	GF5_6	Gas – Glas	Z5	Gas
	GF6_7	Glas - Gas	Z6	Glas
	GF7_8	Gas – Glas-Low-E	Z7	Gas
	GF8_9	Glas – Fluid	Z8	Glas-Low-E (Pos. 7)
	GF9_10	Fluid – Glas	Z9	Fluid (F2)
	GF10_11	Glas – Luft	Z10	Glas
			Z11	Innenraumluft

Tabelle 10: Aufbau des untersuchten Fluidglases (von außen nach innen)

Die Zonen, d.h. die einzelnen Materialien Luft, Glas, Fluid und Gas, sind von außen nach innen von 1 bis 11 nummeriert. Die Grenzflächen der Zonen sind nach den beiderseits angrenzenden Zonen nummeriert, d.h. von GF1_2 bis GF10_11.

Systemkonzept

Die beiden Flüssigkeitsschichten – F1 außen und F2 innen – sind separat steuerbar, d.h. der Massenstrom, die Vorlauftemperatur und die Einfärbungskonzentration sind veränderbar. In beiden Kreisläufen herrscht Unterdruck. Die flüssigkeitsdurchströmten Scheibenzwischenräume sind jeweils an einen Flüssigkeitskreislauf angeschlossen. Über eine Dosiereinheit wird dem Fluid ein Einfärbemittel zugeführt, über einen Abscheider wieder entnommen. Die beiden Kreisläufe sind über Wärmetauscher mit einem normalen Haustechnikkreislauf verbunden. Über diesen wird dem Kreislauf Wärme entzogen bzw. zugegeben, um die Vorlauftemperaturen nach Bedarf zu steuern und im Fluidglas umgewandelte Wärme an anderer Stelle im Gebäude zu nutzen, z.B. für Heizung oder Warmwasser (siehe Abbildung 30).

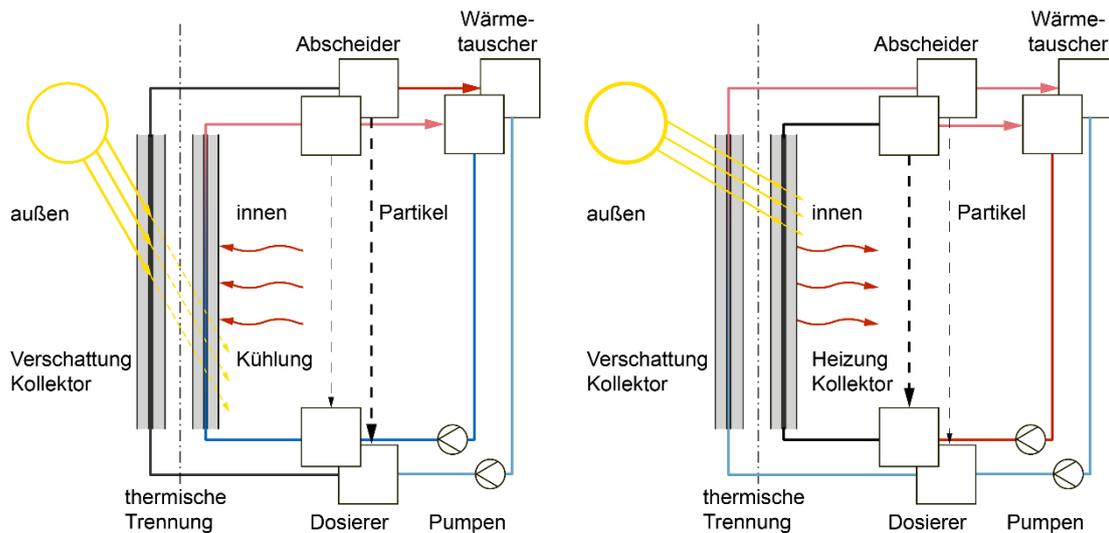


Abbildung 30: Systemkonzept der flüssigkeitsdurchströmten Glasfassade in der Kühl- (links) bzw. Heizperiode (rechts)

Um in der Kühlperiode die solaren Einträge in den Innenraum zu minimieren, wird bei erhöhter solarer Einstrahlung das äußere Fluid eingefärbt, die Solarenergie absorbiert und über den äußeren Fluidkreislauf abgeführt. Das äußere Fluid ist damit sowohl ein Überhitzungsschutz als auch ein Solarkollektor. Das innere Fluid wird bei Bedarf gekühlt und fungiert als Kühlsystem (siehe Abbildung 30 links).

In der Kühlperiode bleibt das äußere Fluid klar, das innere Fluid wird bei erhöhter solarer Einstrahlung eingefärbt. Die Solarstrahlung wird innerhalb der thermischen Hülle absorbiert und steht dem Raum zur Verfügung bzw. wird mit geringen thermischen Verlusten über den inneren Fluidkreislauf abgeführt. Bei Bedarf wird das innere Fluid zusätzlich beheizt und fungiert als Heizsystem (siehe Abbildung 30 rechts).

Integration im Gebäude

Die architektonisch reduzierteste Art, Fluidgläser in die Fassade zu integrieren, erfolgt mit raumhohen, vertikalen Fluidglaselementen (siehe Abbildung 31). Die oberen und unteren Fluidglasanschlüsse sind in der abgehängten Decke bzw. dem Doppelboden integriert (siehe Abbildung 34). In diesen Bereichen sind auch die benötigten technischen Geräte, z.B. Pumpen, Wärmetauscher, Steuerungen, integriert (Technikbox)⁵⁴. Die Fluidglaskreisläufe werden geschossweise betrieben, da ansonsten der Unterdruck im System zu groß wäre. Der über den Wärmetauscher angeschlossene Haustechnikkreislauf wird davon unabhängig betrieben und konventionell ausgelegt.

⁵⁴ Für die thermischen Gebäudesimulationen wird eine raumhohe Fassade mit gleich geschalteten Fluidgläsern angenommen. Eine Einteilung in zwei oder drei Fassadenzonen und individuell gesteuerte Fluidglaselemente hat Vorteile hinsichtlich der Tageslichtnutzung, erfordert jedoch einen erhöhten installations- und steuerungstechnischen Aufwand, der im Rahmen dieser Arbeit nicht abgedeckt werden kann und in folgenden Forschungsarbeiten untersucht werden sollte.

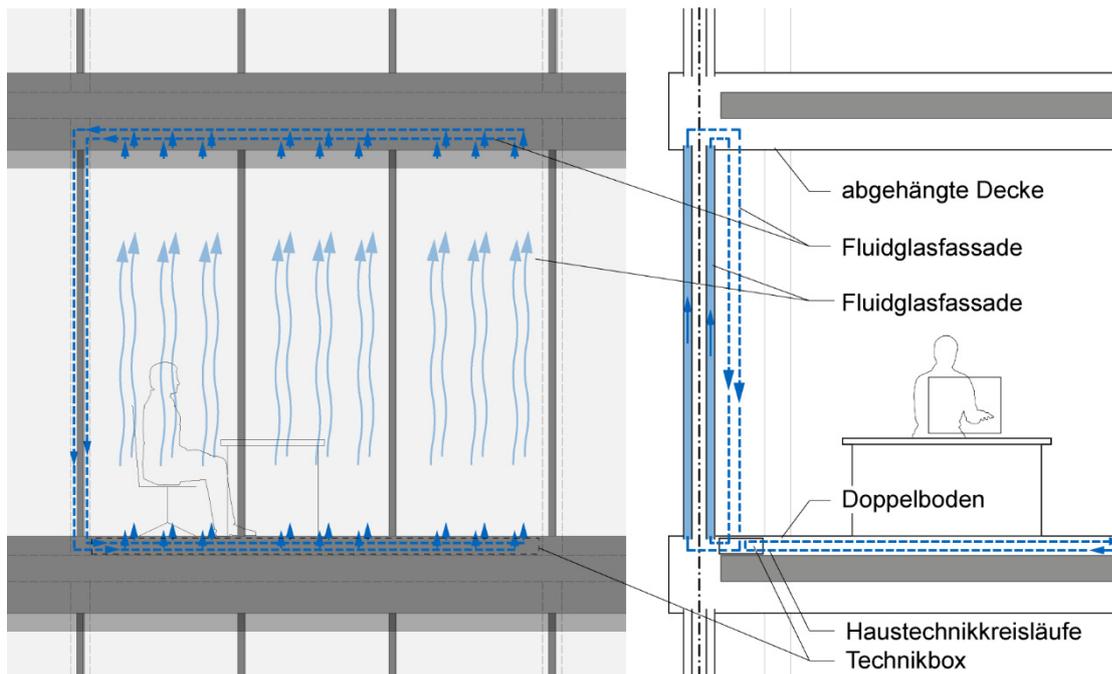


Abbildung 31: Darstellung einer raumhohen, vertikalen Fluidglasfassade mit Flüssigkeitskreisläufen (links: Ansicht, rechts: Schnitt)

Fluidglaselement

Das Fluidglaselement ist als ebene, senkrechte, rechteckige, mehrschichtige, nichttragende Festverglasungen konzipiert, wie in Abbildung 32 dargestellt (vergleiche auch Kapitel 2.7). Die Gläser der Zonen 2 und 4 begrenzen die äußere Fluidschicht, die Gläser der Zonen 8 und 10 die innere Fluidschicht (siehe Tabelle 10). Der wasserdichte und kraftschlüssige Randverbund besteht aus einem umlaufenden O-Ring⁵⁵ und einem ca. 5 cm breitem Silikonrand. Durch Lochbohrungen in den Gläsern (Zone 2 bzw. 10) werden die Leitungen der Flüssigkeitskreisläufe senkrecht zum Glas durchgeführt und verschraubt, wie auch in Abbildung 33 zu sehen ist. Mittels O-Ringen werden die Anschlüsse abgedichtet. Der Randverbund ist im unteren und oberen Bereich mittig zwischen den Ein- und Auslässen erhöht, damit es in diesen Bereichen mit geringerer Strömung zu keinen Ablagerungen, z.B. von Farbpartikeln, kommt. Da im Fluidglassystem Unterdruck herrscht, sind lineare Abstandhalter⁵⁶ im Scheibenzwischenraum eingebracht, die das Zusammendrücken der Glasscheiben verhindern und einen gleichbleibenden Scheibenabstand garantieren. Um eine laminare Strömung zu gewährleisten, sind Düsenbänder aus schwarzem Kunststoff nach den Einlässen bzw. vor den Auslässen im SZR angebracht. Diese minimieren eventuelle Verwirbelungen, die insbesondere beim Einfärbeprozess optisch beeinträchtigend wären.

⁵⁵ NBR (Nitrile Butadiene Rubber)

⁵⁶ Ursprünglich waren punktförmige Abstandhalter geplant, da jedoch keine geeignete Befestigungsmethode gefunden werden konnten, sind die aktuellen Prototypen mit linearen, vertikalen Abstandhaltern aus schwarzem Kunststoff ausgeführt.

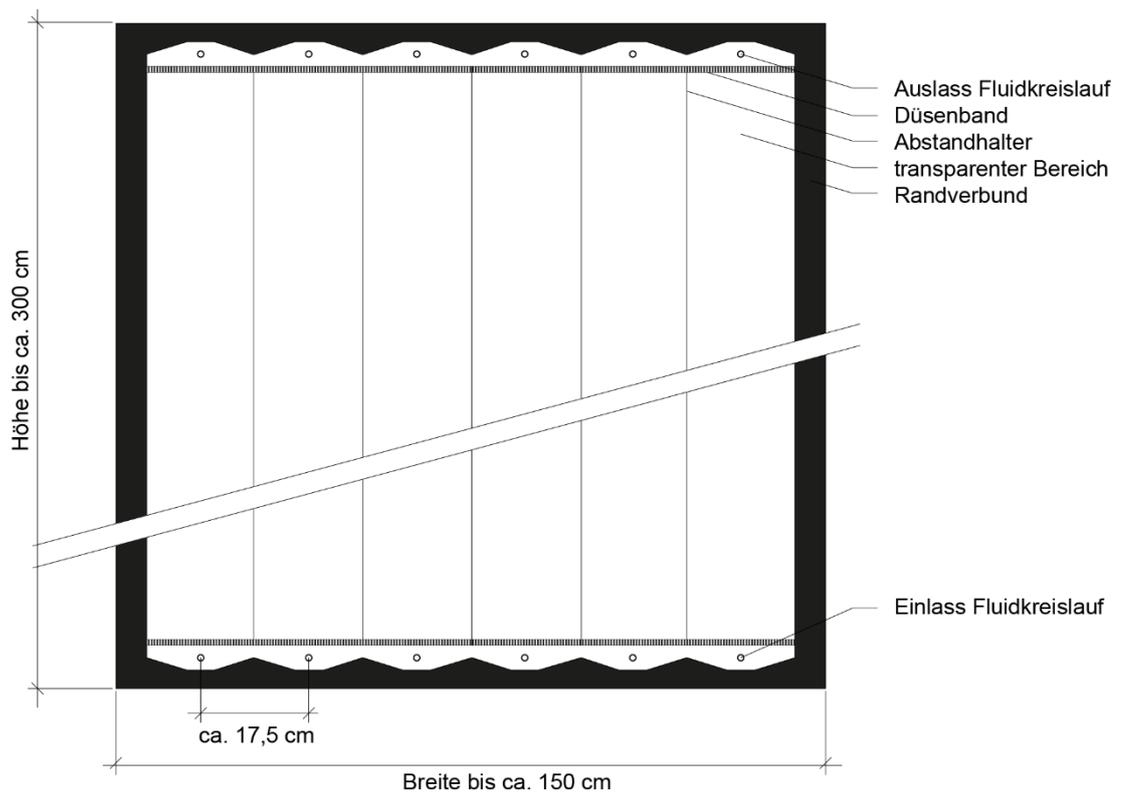


Abbildung 32: Schematische Ansicht eines Fluidglaselements

Fluidkreislauf

Die Leitungen der Fluidkreisläufe sind aus Kunststoff. Sie sind senkrecht an der äußeren bzw. inneren Glasscheibe angebracht. Sie verlaufen im unteren bzw. oberen Bereich der Fluidglaselemente parallel zur Scheibe und sind mit einer Abdeckung kaschiert (siehe Abbildung 33 und Abbildung 34). Die Abdeckung ist gedämmt, um die Wärmeübertragung zwischen Leitungen und Umgebung zu minimieren. Der äußere Fluidkreislauf wird punktuell durch das Fassadenprofil in den Innenraum geführt.

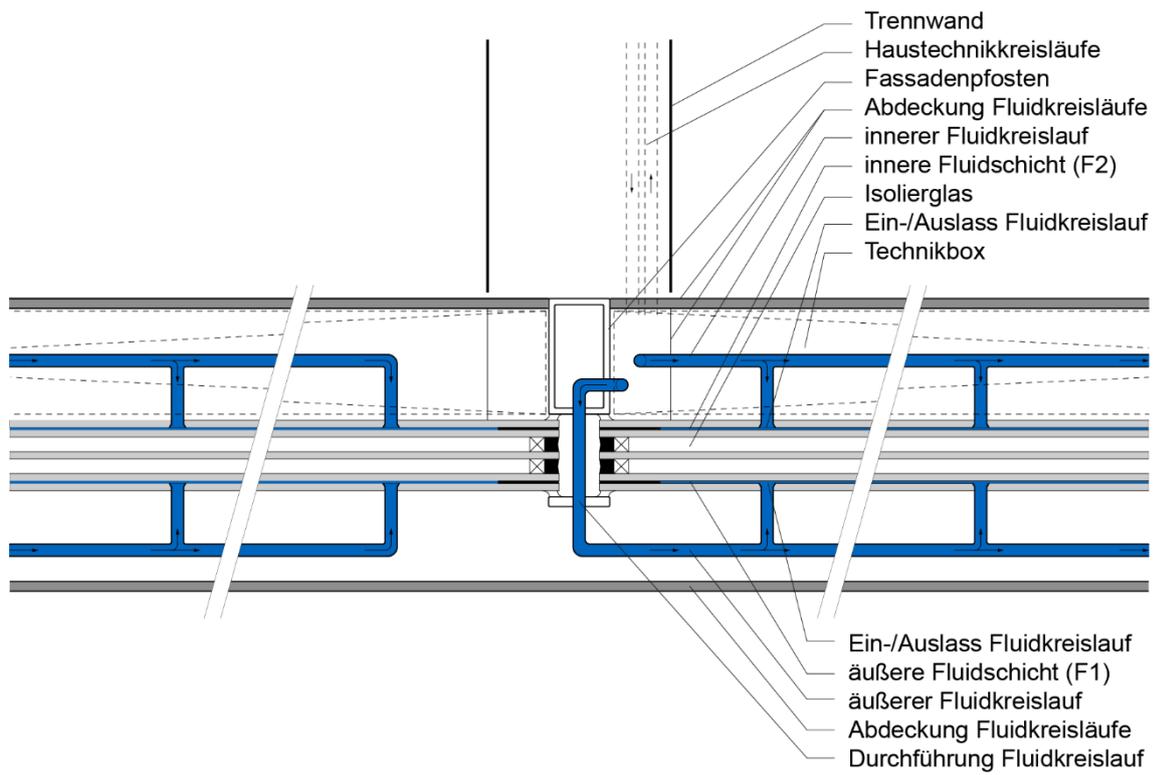


Abbildung 33: Schematischer Horizontalschnitt Fluidglasfassade mit Leitungsführung⁵⁷

⁵⁷ Eine detaillierte Fassadenplanung auf Basis von Standard-Aluminiumfassaden wurde im Rahmen des EU-Projekts FLUIDGLASS vom Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruktion (ILEK) an der Universität Stuttgart durchgeführt. Die dargestellten, schematischen Schnitte orientieren sich an dieser Planung.

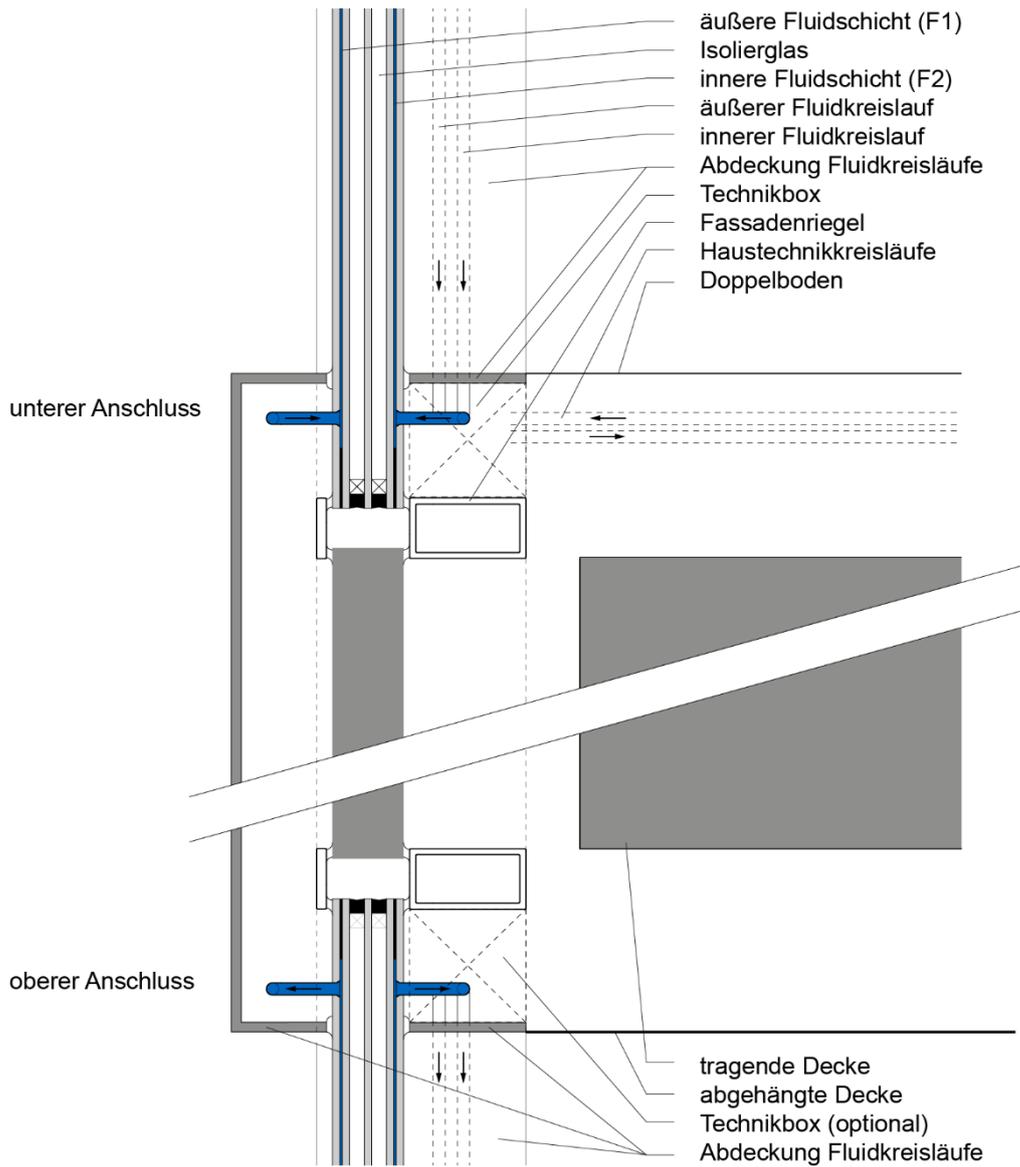


Abbildung 34: Schematischer Vertikalschnitt Fluidglasfassade mit Leitungsführung

4 Modellierung von Fluidglas

Da keine Software zur Simulation von flüssigkeitsdurchströmten Gläsern zur Verfügung steht, wurde ein Fluidglasmodell zur Abbildung der physikalischen Vorgänge im Fluidglas erstellt und validiert. Das Modell setzt sich aus zwei Teilmodellen zusammen, einem Strahlungs- und einem Energiebilanzmodell. Mit dem ersten Modell, dem Strahlungsmodell, wird der Weg der kurzwelligen, elektromagnetischen Strahlung, der Solarstrahlung, durch den Fluidglasaufbau abgebildet. Es werden die reflektierten, absorbierten und transmittierten Strahlungsanteile berechnet. Im zweiten Modell, dem Energiebilanzmodell, wird die Energiebilanz des Fluidglases in seiner Wechselwirkung mit dem Außen- und dem Innenraum abgebildet. Dabei wird die absorbierte Solarstrahlungsenergie, die durch den Flüssigkeitskreislauf zugeführte bzw. abgeführte Energie und die in den Innen- bzw. den Außenraum abgegebene bzw. von dort aufgenommene Energie berücksichtigt.

Die beiden Modelle wurden in der Software Engineering Equation Solver (EES) (*Engineering Equation Solver (EES)*) von Jochen Stopper, Stefan Bertsch und Daniel Gstöhl aufgebaut. Das Strahlungsmodell wurde von Federico Garzia im Rahmen seiner Masterarbeit (Garzia, 2012), das Energiebilanzmodell von Hans Beck in seiner Bachelorarbeit (Beck, 2012) weiter bearbeitet. Die Arbeiten wurden von Jochen Stopper und Daniel Gstöhl betreut. Die Modelle wurden von Jochen Stopper in der vorliegenden Form fertiggestellt und validiert.

4.1 Strahlungsmodell

Die Glaseigenschaften bzw. deren Kennwerte für die kurzwellige Strahlungstransmission, -reflexion und -absorption werden für Gebäudesimulationen benötigt, um den Einfluss der Solarstrahlung auf den Energiehaushalt eines Gebäudes zu simulieren. Für Verglasungen mit mehrfachem Scheibenaufbau und gasgefüllten Scheibenzwischenräumen kann die Standardsoftware Window (Carmody, 2004; Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016b) verwendet werden. Window berechnet die winkelabhängige solare bzw. visuelle Transmission, Reflexion und Absorption nach ISO 15099 (ISO 15099) aus den spektralen Glaseigenschaften Transmission und Reflexion an der Außen- bzw. der Innenseite bei senkrechter Einstrahlung. Diese Glaseigenschaften sind in der International Glazing Database (IGDB) (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016a) frei verfügbar und können in der Software Optics (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013, S. 23–24) für ein- und mehrscheibige Glasaufbauten berechnet werden.

Für die Fluidglas-Modellierung stehen keine detaillierten Herstellerangaben für Gläser und Beschichtungen und deren winkelabhängige Eigenschaften zur Verfügung. Aus diesem Grund wird eine Modellierungsmethode gewählt, die auf Basis der Daten aus der IGDB eine ausreichend genaue Modellierung der winkelabhängigen Eigenschaften des Gesamtaufbaus berechnen kann. Die Modellierung erfolgt in Anlehnung an das von Rubin beschriebene asymmetrische, monolithische Modell für Verglasungen. (Rubin, Powles & Rottkay, 1999, S. 267–271). Im

Fluidglas-Modell werden, zusätzlich zu Gläsern und Gasschichten, klare bzw. eingefärbte Flüssigkeiten eingeführt.

4.1.1 Modellierung des Strahlungsdurchgangs durch das Fluidglas

Die auf das Fluidglas auftreffende elektromagnetische Strahlung wird an den Glasoberflächen reflektiert und in den Stoffschichten, d.h. Glas oder Fluid, absorbiert. Nach dem Energieerhaltungssatz transmittiert die restliche Strahlung in den Innenraum. Diese Effekte sind abhängig von der Wellenlänge λ und durch eine spektrale Stoffkennzahl beschrieben, z.B. die wellenlängenabhängige Transmission $T(\lambda)$. (Schröder & Treiber, 2007, S. 31)

Reflexion und Brechung an den Grenzflächen

Wenn Lichtwellen eine Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlicher Brechzahl – mit n_1 der Brechzahl des ersten Mediums und n_2 der Brechzahl des zweiten Mediums – passieren, werden diese gebrochen und teilweise reflektiert (siehe Abbildung 35).

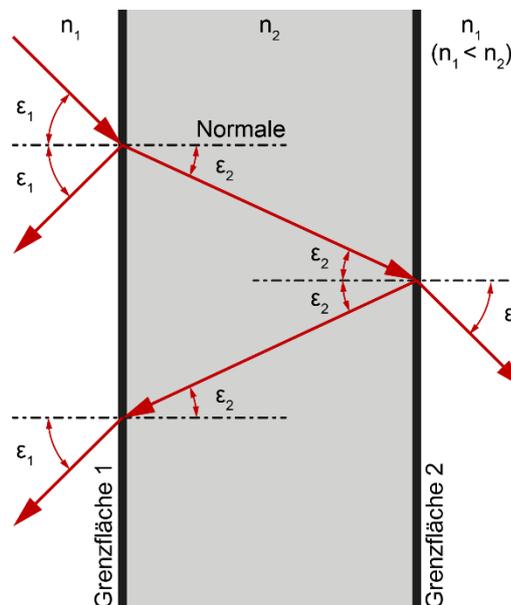


Abbildung 35: Reflexion und Brechung an zwei Grenzflächen

Die Reflexionswinkel an den Grenzflächen im Fluidglasaufbau entsprechen den jeweiligen Einfallswinkeln. Die Brechungswinkel werden über das Snelliussche Brechungsgesetz bestimmt (Kühlke, 2011, S. 13):

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \varepsilon_2}{\sin \varepsilon_1} \quad (4)$$

In der Fluidglas-Modellierung werden die wellenlängenabhängigen Brechzahlen für 88 Wellenlängenschritte im Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 2500 nm nach EN 410 verwendet. Die Brechzahlen für Gläser werden aus den spektralen Transmissions- und Reflexionswerten für senkrechte Einstrahlung berechnet. Diese Werte werden der IGDB

entnommen. Die wellenlängenabhängigen Brechzahlen für Wasser sind Literaturwerte (Hale & Querry, 1973, S. 557).

Der Anteil des Lichts, der an einer Grenzschicht reflektiert bzw. gebrochen (transmittiert) wird, kann für verlustfreie Medien über die fresnelschen Gleichungen berechnet werden (Schröder & Treiber, 2007, S. 28–30).

Für den Reflexionsgrad ρ_{\parallel} für linear polarisiertes Licht parallel zur Einfallrichtung gilt:

$$\rho_{\parallel} = \frac{\tan^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\tan^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \quad (5)$$

Für den Reflexionsgrad ρ_{\perp} linear polarisiertes Licht senkrecht zur Einfallrichtung gilt:

$$\rho_{\perp} = \frac{\sin^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\sin^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \quad (6)$$

Für den durchschnittlichen Reflexionsgrad ρ gilt:

$$\rho = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\sin^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} + \frac{\tan^2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\tan^2(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \right) = \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \quad (7)$$

In der Fluidglas-Modellierung wird der durchschnittliche Reflexionsgrad verwendet.

Für die Transmissionsgrade parallel τ_{\parallel} bzw. senkrecht τ_{\perp} zur Einfallrichtung gilt:

$$\rho_{\parallel} + \tau_{\parallel} = 1, \quad \rho_{\perp} + \tau_{\perp} = 1 \quad (8)$$

Diese Gleichung stellt für verlustfreie Medien die Energieerhaltung dar. Die einfallende Strahlung teilt sich in reflektierte und transmittierte Strahlung auf (Kühlke, 2011, S. 13–20).

Für die Transmission an einer Grenzfläche wird analog zum Reflexionsgrad im Fluidglas-Modell mit dem durchschnittlichen Transmissionsgrad τ gerechnet.

$$\tau = \frac{\tau_{\parallel} + \tau_{\perp}}{2} \quad (9)$$

Die Low-E-Beschichtungen auf den Basisgläsern (Substrat) sind in mehreren unterschiedlichen Schichten aufgebracht. Da keine detaillierten Herstellerangaben zum Material und der Dicke der Beschichtungen zur Verfügung stehen, können in der Modellierung die Low-E-Beschichtungen nicht separat abgebildet werden. Die Beschichtungen sind durch Brechungsindices und Extinktionskoeffizienten für beide Strahlrichtungen berücksichtigt.

Absorption in der Stoffschicht

Beim Strahlungsdurchgang durch die Stoffschichten Glas bzw. Fluid des Fluidglasaufbaus kommt es zur Abschwächung der eingehenden Strahlung I_0 durch Absorption. Die Absorption A ist abhängig von der Wellenlänge λ der Strahlung, der zurückgelegten Weglänge L in der

Stoffschicht und den Absorptionseigenschaften des Mediums. Die Schwächung der Strahlung geschieht dabei exponentiell mit der Weglänge (Kühlke, 2011, S. 46–48). Das in der Fluidglas-Modellierung betrachtete Wellenlängenspektrum zwischen 300 nm und 2500 nm entspricht den Vorgaben der DIN EN 410 für das solare Spektrum (DIN EN 410). Die wellenlängenabhängige Transmission $T(\lambda)$ durch eine Glas- oder Fluidschicht stellt das Verhältnis der durch die Schicht transmittierten Strahlungsintensität $I(\lambda)$ und der auf die Schicht eingefallen Intensität $I_0(\lambda)$ je Wellenlänge dar. Dabei sind die Reflexionen an den Grenzflächen berücksichtigt.

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} \quad (10)$$

Innerhalb der Stoffschicht, d.h. ohne Berücksichtigung der Reflexion an den Grenzflächen, gilt für den spektralen Reintransmissionsgrad $\tau_i(\lambda)$ und den spektralen Reinabsorptionsgrad $\alpha_i(\lambda)$:

$$\tau_i(\lambda) + \alpha_i(\lambda) = 1 \quad (11)$$

Die zurückgelegte Weglänge L innerhalb des Mediums – Glas oder Fluid – ermittelt sich aus dem Brechungswinkel ε_2 und der Dicke des Mediums d mit:

$$L = \frac{d}{\cos \varepsilon_2} \quad (12)$$

Mit dem Bouguer-Lambert-Beer-Gesetz kann der spektrale Reintransmissionsgrad $\tau_i(\lambda)$ innerhalb der Stoffschicht – Glas oder Fluid - bzw. die Strahlungsintensität $I_{L,S}(\lambda)$ nach Durchwandern des optischen Materials in Abhängigkeit von der Weglänge L und der in das Material eintretenden Strahlungsintensität $I_{0,S}(\lambda)$ für jede Wellenlänge λ berechnet werden (Schröder & Treiber, 2007, S. 177).

$$I_{L,S}(\lambda) = I_{0,S}(\lambda) \cdot e^{-\alpha(\lambda) \cdot L} \quad (13)$$

$$\tau_i(\lambda) = \frac{I_{L,S}(\lambda)}{I_{0,S}(\lambda)} = e^{-\alpha(\lambda) \cdot L} \quad (14)$$

Der Absorptionskoeffizient $\alpha(\lambda)$ in Abhängigkeit vom Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ kann für jede Wellenlänge wie folgt berechnet werden (Willey):

$$\alpha(\lambda) = \frac{4\pi k(\lambda)}{\lambda} \quad (15)$$

Dabei werden die Vorgänge innerhalb der Stoffschicht ohne Einfluss der Grenzfläche betrachtet. Der Zusammenhang mit der auf die Grenzfläche des Mediums auftreffenden Strahlung I_0 bzw. aus der Grenzfläche des Mediums austretenden Strahlung I , d.h. inklusive Berücksichtigung der Reflexionen R an den Grenzflächen, kann wie folgt berechnet werden:

$$I_{0,s}(\lambda) = (1 - R)I_0(\lambda) \quad (16)$$

$$I(\lambda) = (1 - R)I_{L,s}(\lambda) \quad (17)$$

4.1.2 Aufbau des Strahlungsmodells

Exemplarisch wird für die zweite Zone (Z2), d.h. die äußerste Glasscheibe, bzw. die ersten beiden Grenzflächen (GF) des Fluidglasaufbaus im Folgenden das Gleichungssystem dargestellt:

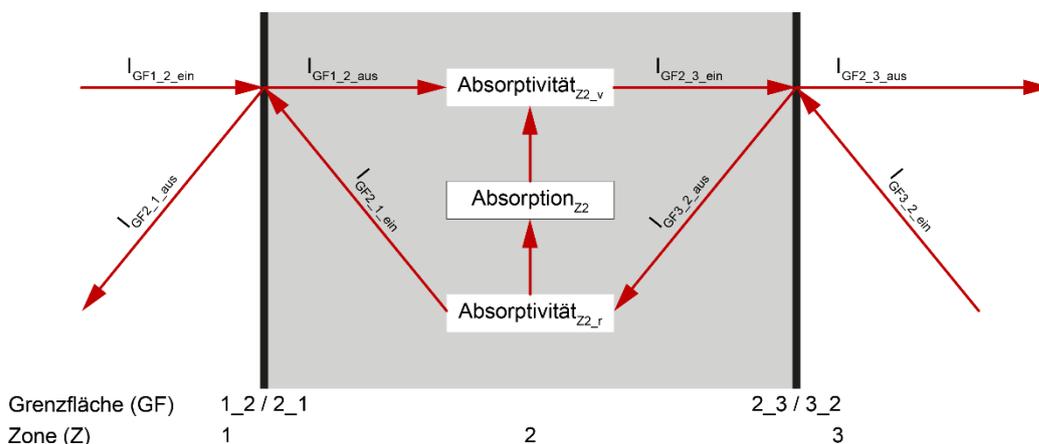


Abbildung 36: Darstellung des Strahlungsdurchgangs für die zweite Zone und die ersten beiden Grenzflächen des Fluidaufbaus

Für die Grenzfläche zwischen Zone 1 und Zone 2 gilt:

$I_{GF1_2_ein}$ Strahlung aus Zone 1 (Z1), d.h. Außenraumluft, auf Grenzfläche (GF1_2) zwischen Zone 1 (Z1) und Zone 2 (Z2) auftreffend. Diese entspricht der initialen Einstrahlung auf die Fassade.

$I_{GF2_1_ein}$ Strahlung aus Z2 auf Grenzfläche (GF2_1) zwischen Z2 und Z1 auftreffend. Diese entspricht der Strahlung, die aus Grenzfläche (GF3_2) zwischen Zone 3 (Z3) und Z2 austritt – $I_{GF3_2_aus}$ – abzüglich des in Z2 in Strahlrichtung absorbierten Strahlungsanteils.

$I_{GF1_2_aus}$ Strahlung, die aus GF1_2 nach Z2 austritt. Diese setzt sich zusammen aus der transmittierten Strahlung durch GF1_2, d.h. $I_{GF1_2_ein}$ abzüglich des reflektierten Strahlungsanteils an GF1_2 und des reflektierten Strahlungsanteils an GF2_1, der aus Zone 2 auf GF2_1 auftrifft.

$I_{GF2_1_aus}$ Strahlung, die aus GF2_1 nach Z1 austritt. Diese setzt sich zusammen aus der transmittierten Strahlung durch GF2_1, d.h. $I_{GF2_1_ein}$ abzüglich des reflektierten Strahlungsanteils an GF2_1 und des reflektierten Strahlungsanteils an GF1_2, der aus Zone 1 auf GF1_2 auftrifft.

Für die Grenzfläche zwischen Zone 2 und Zone 3 gilt:

$I_{GF2_3_ein}$	Strahlung aus Z2 auf GF2_3 auftreffend. Diese entspricht der Strahlung $I_{GF1_2_aus}$, die aus GF1_2 austritt, abzüglich des in Z2 in Strahlrichtung absorbierten Strahlungsanteils.
$I_{GF3_2_ein}$	Strahlung aus Z3 auf GF3_2 zwischen Z3 und Z2 auftreffend. Diese entspricht der Strahlung, die aus GF4_3 zwischen Z4 und Z3 austritt – $I_{GF4_3_aus}$ - abzüglich des in Z3 in Strahlrichtung absorbierten Strahlungsanteils.
$I_{GF2_3_aus}$	Strahlung, die aus GF2_3 nach Z3 austritt. Diese setzt sich zusammen aus der transmittierten Strahlung durch GF2_3, d.h. $I_{GF2_3_ein}$, abzüglich des reflektierten Strahlungsanteils an GF2_3 und des reflektierten Strahlungsanteils an GF3_2, der aus Z3 auf GF3_2 auftrifft.
$I_{GF3_2_aus}$	Strahlung, die aus GF3_2 nach Z2 austritt. Diese setzt sich zusammen aus der transmittierten Strahlung durch GF3_2, d.h. $I_{GF3_2_ein}$, abzüglich des reflektierten Strahlungsanteils an GF3_2 und des reflektierten Strahlungsanteils an GF2_3, der aus Zone 2 auf GF2_3 auftrifft.

Die Gleichungssysteme an den ersten beiden Grenzflächen sind wie folgt:

- für die erste Grenzfläche zwischen Zone 1 und Zone 2 bzw. für den rückwärtigen Strahlungsdurchgang zwischen Zone 2 und Zone 1

$$I_{GF1_2_aus} = I_{GF1_2_ein} * (1 - \rho_{GF1_2}) + I_{GF2_1_ein} * \rho_{GF2_1}$$

$$I_{GF2_1_aus} = I_{GF1_2_ein} * \rho_{GF1_2} + I_{GF2_1_ein} * (1 - \rho_{GF2_1})$$

$$I_{GF2_1_ein} = I_{GF3_2_aus} * (1 - \alpha_{Z2_r})$$

$$I_{GF2_3_ein} = I_{GF1_2_aus} * (1 - \alpha_{Z2_v})$$

- für die zweite Grenzfläche zwischen Zone 2 und Zone 3 bzw. für den rückwärtigen Strahlungsdurchgang zwischen Zone 3 und Zone 2

$$I_{GF2_3_aus} = I_{GF2_3_ein} * (1 - \rho_{GF2_3}) + I_{GF3_2_ein} * \rho_{GF3_2}$$

$$I_{GF3_2_aus} = I_{GF2_3_ein} * \rho_{GF2_3} + I_{GF3_2_ein} * (1 - \rho_{GF3_2})$$

$$I_{GF2_2_ein} = I_{GF4_3_aus} * (1 - \alpha_{Z3_r})$$

$$I_{GF3_4_ein} = I_{GF2_3_aus} * (1 - \alpha_{Z3_v})$$

mit

ρ_{GF1_2}	Reflexionsgrad der Grenzfläche 1_2 (GF1_2)
ρ_{GF2_1}	Reflexionsgrad der Grenzfläche 2_1 (GF2_1)
ρ_{GF2_3}	Reflexionsgrad der Grenzfläche 2_3 (GF2_3)
ρ_{GF3_2}	Reflexionsgrad der Grenzfläche 3_2 (GF3_2)
α_{Z2_v}	Absorptivität der Zone 2 in Richtung der initialen Einstrahlung
α_{Z2_r}	Absorptivität der Zone 2 in entgegengesetzter Richtung der initialen Einstrahlung

Für den Anteil der absorbierten Strahlung innerhalb einer Zone, hier Zone 2 mit $Absorption_{Z2}$, werden die Strahlungsdurchgänge in beide Richtungen, in Richtung der initial eingehenden Strahlung (vorwärts) und in der entgegengesetzten Richtung (rückwärts), berücksichtigt. Absorption wird für die Stoffschichten Glas und Fluid angenommen.

$$Absorption_{Z2} = I_{GF1,2,aus} \cdot \alpha_{Z2_v} + I_{GF3,2,aus} \cdot \alpha_{Z2_r}$$

Die Energiebilanz (EB) für das Strahlungsmodell gibt vor, dass die Summe der transmittierten, reflektierten und absorbierten Strahlung gleich der auf das System auftreffenden Strahlung sein muss.

$$EB = Transmission + Reflexion + Absorption$$

4.2 Energiebilanzmodell

Im Strahlungsmodell wird der in den jeweiligen Stoffschichten des Fluidglasaufbaus absorbierte Anteil der solaren Strahlung berechnet und als Eingabewert im Energiebilanzmodell übernommen. Im Energiebilanzmodell werden die Wärmeströme zwischen dem Außenraum, den Stoffschichten des Fluidglasaufbaus und dem Innenraum bilanziert. Darüber hinaus wird der abgeführte Wärmestrom durch die Fluidströme berechnet.

4.2.1 Modellierung des Energiebilanzmodells

Konvektion im Scheibenzwischenraum mit Gasfüllung – freie Konvektion

Der Wärmedurchlasskoeffizient bei freier Konvektion im Scheibenzwischenraum mit Gasfüllungen $\alpha_{konv_SZR_fK}$ wird über die Grashof-Zahl Gr , die Prandtl-Zahl Pr und die Nusselt-Zahl Nu nach (DIN EN 673, S. 9–12) berechnet:

$$Gr = \frac{g \cdot d^3 \cdot \Delta T \cdot \rho^2}{T_m \cdot \eta^2} \quad (18)$$

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (19)$$

$$Nu = A \cdot (Gr \cdot Pr)^N \quad (20)$$

$$\alpha_{konv_SZR_fK} = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} \quad (21)$$

mit

g	Fallbeschleunigung, 9,81 m/s ²
d	Schichtdicke SZR, [m]
ρ	Dichte des Gases, [kg/m ³]
n	eine Stoffschicht im Fluidglasaufbau
ΔT	Temperaturdifferenz der gegenüberliegenden Scheiben, $\Delta T = T_{n+2} - T_n$, [K]
T_m	mittlere Temperatur in der Zone, $T_m = (T_n + T_{n+2})/2$, [K]
η	dynamische Viskosität des Gases, [kg/(m·s)]
c_p	spezifische Wärmekapazität des Gases, [J/(kg·K)]

λ	Wärmeleitfähigkeit des Gases, [W/(m·K)]
A	Konstante. Für Vertikalverglasungen $A=0,035$
N	Exponent. Für Vertikalverglasungen $N=0,38$
Nu	$Nu \geq 1$, wenn $Nu < 1$, dann $Nu=1$.

Konvektion im SZR mit Fluidfüllung – freie Konvektion

Die Wärmeübertragung im Fluidscheibenzwischenraum ohne Durchfluss kann über Formeln für freie Konvektion in ebenen Schichten nach (Polifke & Kopitz, 2009, S. 288–291) berechnet werden. Mit einer scheinbaren Wärmeleitfähigkeit λ_s kann über Formeln der reinen Wärmeleitung der übertragene Wärmestrom berechnet werden.

$$Ra_s = \frac{g \cdot \beta \cdot d^3 \cdot (T_n - T_{n+1})}{\eta \cdot a} \quad (22)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_s} = 1 + \frac{m \cdot Ra^r}{Ra + u} \quad (23)$$

mit

Ra_s	Rayleigh-Zahl, Gültigkeitsbereich für $Ra_s < 10^8$, [-]
β	thermischer Ausdehnungskoeffizient, [1/K]
a	Temperaturleitfähigkeit, [m ² /s]
m	eine Konstante, 0,0236
u	eine Konstante, $1,01 \cdot 10^4$
r	eine Konstante, 1,393

Alle Stoffkennwerte beziehen sich auf die mittlere Fluidtemperatur:

$$T_{Fm} = 0,5 \cdot (T_{Faus} + T_{Fein}) \quad (24)$$

mit

T_{Fein}	Vorlauftemperatur des Fluids
T_{Faus}	Rücklauftemperatur des Fluids

Konvektion im SZR mit Fluidfüllung - erzwungene, laminare Konvektion

Der Wärmeübergangskoeffizient in der Fluidschicht mit Durchströmung $\alpha_{SZR_{eK}}$ wird über Formeln für Kanalströmung ermittelt. Das Fluidglas wird bei den aktuellen Prototypen mit Volumenströmen von 1 l/min·m betrieben. Dabei stellen sich im Fluid-Scheibenzwischenraum Fließgeschwindigkeiten von 0,0083 m/s ein. Wie in Kapitel 7.7 beschrieben, ist die resultierende Reynolds-Zahl 41 und liegt somit weit unter der kritischen Reynolds-Zahl von 2300, ab der eine laminare Strömung in eine turbulente umschlägt. Die Strömung bleibt im Fluidglas bis zu einem Volumenstrom von ca. 46 l/min·m laminar. Es wird daher von einer ausgebildeten⁵⁸, laminaren

⁵⁸ Nach Spindler ist die Strömung nach einer Lauflänge $L_{h, ein} \approx 0,05 \cdot Re \cdot d$ voll ausgebildet. Beim Fluidglas sollte die Lauflänge ca. 1 bis 8 cm betragen, bei einem Volumenstrom von 1 bis 20 l/min·m.

Strömung ausgegangen. Der hydraulische Durchmesser D_h beträgt 0,004 m, bei einem Fluid-Scheibenzwischenraum mit einer Dicke von 0,002 m⁵⁹:

$$D_h = 2 \cdot d \quad (25)$$

Vereinfacht kann für einen Spalt mit beidseitigem Wärmeübergang und einer konstanten Scheibentemperatur eine Nusselt-Zahl von 7,541 angenommen werden. Daraus kann der Wärmeübergangskoeffizient für erzwungene, laminare Konvektion $\alpha_{konv_SZR_eK}$ berechnet werden: (VDI-Wärmeatlas, 2006, Gb 6-7)

$$\alpha_{konv_SZR_eK} = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_h} \quad (26)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient in einem Scheibenzwischenraum bei erzwungener, laminarer Konvektion liegt zwischen ca. 1070 W/m²K und ca. 1300 W/m²K, abhängig von der Fließgeschwindigkeit – zwischen 0,0083 m/s und 0,167 m/s - und der Fluidtemperatur – von 0°C bis 80°C - bei einem drei Meter hohen Fluidglaselement mit einem zwei Millimeter dicken Scheibenzwischenraum.

Wärmestrahlung an den Grenzflächen im SZR

Beim Fluidglas kann gemäß des Kirchhoff'schen Gesetzes davon ausgegangen werden, dass der Emissionsgrad der Oberflächen dem Absorptionsgrad entspricht.

Strahlungsaustausch im SZR

Der Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizient α_{rad_SZR} zweier planparallelen Glasscheiben, die durch eine Gasschicht getrennt sind, wird nach (Polifke & Kopitz, 2009, S. 137–142) wie folgt berechnet:

$$\alpha_{rad,szr} = \frac{\sigma \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{GF_n}} + \frac{1}{\varepsilon_{GF_{n+2}}} - 1 \right)^{-1} \cdot (T_n^4 - T_{n+2}^4)}{(T_n - T_{n+2})} \quad (27)$$

mit

σ	Stefan-Boltzmann Konstante. $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$,[W/m ² K]
ε_{GF_n}	Emissionsgrad der ersten Grenzfläche GF_n , [-]
$\varepsilon_{GF_{n+2}}$	Emissionsgrad der zweiten, gegenüberliegenden Grenzfläche GF_{n+2} , [-]
T_n	Temperatur der ersten Schicht, [K]
T_{n+2}	Temperatur der zweiten, gegenüberliegenden Schicht, [K]

⁵⁹ Berechnung des hydraulischen Durchmessers abweichend zu Kapitel 7.7.

Äußerer Wärmeübergangskoeffizient

Der äußere, konvektive Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{a,conv}$ an der Fassadenaußenseite, d.h. an der Grenzfläche zwischen Außenluft und äußerer Glasscheibe, kann in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit v_{Wind} nach (DIN EN ISO 6946) berechnet werden:

$$\alpha_{a,conv} = 4 + 4 \cdot w_{Wind} \quad (28)$$

mit

$\alpha_{a,conv}$ Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient an der äußeren Glasscheibe, d.h. Grenzfläche 1_2, [W/m²K]

w_{Wind} Windgeschwindigkeit an der Fassade außen, [m/s]

Der äußere, radiative Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{a,rad}$ kann vereinfacht wie folgt berechnet werden (DIN EN ISO 6946, S. 17–18):

$$\alpha_{a,rad} = \varepsilon_{GF1,2} \cdot 4 \cdot \sigma \cdot \left((T_{amb} + T_{GF1,2}) / 2 \right)^3 \quad (29)$$

Der gesamte, äußere Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{a,ges}$ ergibt sich aus:

$$\alpha_{a,ges} = \alpha_{a,conv} + \alpha_{a,rad} \quad (30)$$

Für die Berechnung der Kennwerte von Fluidgläsern, z.B. den U-Wert, werden für den gesamten äußeren Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{a,ges}$ pauschal 25 W/m²K angesetzt⁶⁰ (DIN EN 673, S. 13).

Innerer Wärmeübergangskoeffizient

Der innerer, konvektive Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{i,conv}$ an der Fassadeninnenseite, d.h. an der Grenzfläche zwischen Innenraumlufte und innerer Glasscheibe, kann in Abhängigkeit von der Raumlufte-temperatur $T_{Raumlufte}$, der inneren Oberflächentemperatur der Fassade T_{GF_innen} und der Höhe der Glasscheibe h_{Glas} nach (Alamdari & Hammond, 1983)⁶¹ berechnet werden:

$$\alpha_{i,conv} = \left(11,39 \cdot \left(\frac{T_{Raumlufte} - T_{GF_innen}}{h_{Glas}} \right)^{\frac{3}{2}} + 3,46 \cdot (T_{Raumlufte} - T_{GF_innen})^2 \right)^{\frac{1}{6}} \quad (31)$$

Der innere, radiative Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{i,rad}$ wird analog zum äußeren berechnet:

⁶⁰ $\alpha_{a,conv} = 20$ W/m²K, $\alpha_{a,rad} = 5$ W/m²K

⁶¹ Vereinfachte Formel nach (van Treeck, 2011, S. 134).

$$\alpha_{i_rad} = \varepsilon_{GF_innen} \cdot 4 \cdot \sigma \cdot \left((T_{Raumluft} + T_{GF_innen}) / 2 \right)^3 \quad (32)$$

Der gesamte, äußere Wärmeübergangskoeffizient α_{a_ges} ergibt sich aus:

$$\alpha_{i_ges} = \alpha_{i_konv} + \alpha_{i_rad} \quad (33)$$

Für die Berechnung der Kennwerte von Fluidgläsern ohne Durchströmung werden für den inneren, konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten bei freier Konvektion pauschal $3,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ angesetzt⁶² und für den inneren, radiativen Wärmeübergangskoeffizienten $4,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ (DIN EN 673, S. 13).

Wärmeleitung in den Stoffschichten

Der Wärmedurchlasskoeffizient der jeweiligen Stoffschicht α_{kond} (Einheit: $[\text{W/m}^2\text{K}]$) bei Wärmeleitung wird über die Dicke d der Stoffschicht und die Wärmeleitfähigkeit λ des Stoffes berechnet (DIN EN 673, S. 7–8):

$$\alpha_{kond} = \frac{\lambda}{d} \quad (34)$$

Für die Berechnung der Wärmeleitung im flüssigkeitsgefüllten Scheibenzwischenraum ohne Durchfluss wird die scheinbare Wärmeleitfähigkeit λ_s verwendet.

Wärmeströme

Der spezifische Wärmestrom \dot{q} (Einheit: $[\text{W/m}^2]$) berechnet sich über die Wärmeübergangs- bzw. Wärmedurchlasskoeffizienten α und die Temperaturdifferenz zwischen der wärmeren Schicht T_1 und der kälteren Schicht T_2 (Polifke & Kopitz, 2009, S. 218):

$$\dot{q} = \alpha \cdot (T_1 - T_2) \quad (35)$$

Wärmeabfuhr durch den Fluidstrom

Die Flüssigkeit im Fluidglas muss immer im flüssigen Zustand sein, d.h. in einem Phasenzustand. Die Enthalpie h [J] des Fluids ist daher abhängig vom jeweiligen Druck P und der Temperatur T , wobei die Druckunterschiede zwischen Vor- und Rücklauf beim Fluidglas zu vernachlässigen sind (Langeheinecke, Jany & Thieleke, 2008, S. 69–74).

Für den jeweiligen Zustand der Enthalpie h gilt somit:

$$h = c_p \cdot T \quad (36)$$

⁶² Der pauschale Wärmeübergangskoeffizient ist relativ niedrig und kann nur für unbeheizte Fluidgläser bzw. bei geringen Temperaturunterschieden zwischen Glasoberfläche und Raumluft angesetzt werden. In den Gebäudesimulationen wird der temperaturabhängige Wärmeübergangskoeffizient verwendet.

mit

c_p spezifische Wärmekapazität des Fluids, [J/(kg·K)]

Für den Enthalpiestrom \dot{H} [kg/s] gilt:

$$\dot{H} = \dot{m} \cdot h \quad (37)$$

mit

\dot{m} Massenstrom des Fluids, [kg/s]

Der durch das durchströmende Fluid abgeführte spezifische Wärmestrom \dot{q} [W] wird über die Enthalpiestromdifferenz zwischen ein- und austretendem Fluid aus dem Fluidglas wie folgt berechnet (siehe auch (Beck, 2012, S. 8–10) und (Böing, 2013, S. 36)):

$$\dot{q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{\text{Fluid}_{aus}} - T_{\text{Fluid}_{ein}}) \quad (38)$$

mit

$T_{\text{Fluid}_{aus}}$ Auslasstemperatur des Fluids, [K]

$T_{\text{Fluid}_{ein}}$ Einlasstemperatur des Fluids, [K]

Thermische Widerstände

Die spezifischen thermischen Widerstände R (Einheit: [(m²K)/W]) können mittels des Wärmeübergangskoeffizienten α berechnet werden (Polifke & Kopitz, 2009, S. 71):

$$R = \frac{1}{\alpha} \quad (39)$$

Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert)

Über die thermischen Widerstände kann der Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung (U-Wert, Einheit: [W/(m²K)]) berechnet werden (DIN EN 673, S. 7):

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{1}{h_t} + \frac{1}{\alpha_i} = R_{se} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{si} \quad (40)$$

mit

h_t Gesamtwärmedurchlasskoeffizient der Verglasung, bestehend aus den konvektiven und radiativen Wärmeübergängen an den Grenzflächen und der Wärmeleitung in den Stoffschichten (Glas und ruhendes Fluid).

R_{se} äußerer Wärmeübergangswiderstand, [(m²K)/W]

R_{si} innerer Wärmeübergangswiderstand, [(m²K)/W]

$R_{1+2+\dots+n}$ thermische Widerstände jeder Schicht, [(m²K)/W]

4.2.2 Aufbau des Energiebilanzmodells

Eingabeparameter

Aus dem Strahlungsmodell werden die berechneten Absorptionsgrade der Stoffschichten – Glas und Fluid - im Energiebilanzmodell übernommen. Dabei werden die Zonen 2, 3 und 4 und die Zonen 8,9 und 10 jeweils zusammengefasst.

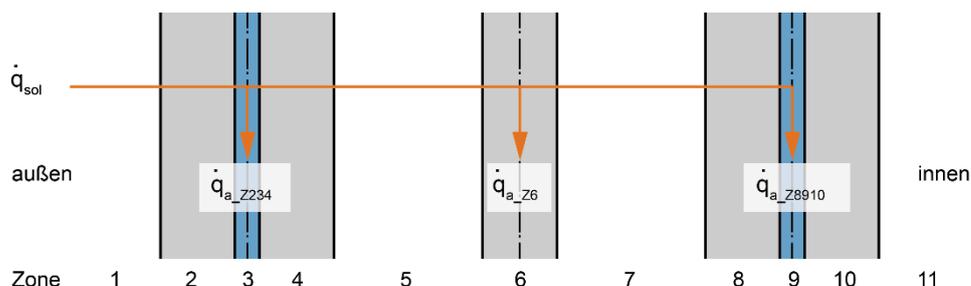


Abbildung 37: Schematische Darstellung der Berechnung der Strahlungsabsorption im Fluidglasaufbau

Die eingehende kurzwellige Strahlung wird in den Stoffschichten absorbiert (siehe Abbildung 37). Weitere Eingabeparameter für Umgebungsbedingungen in das Energiebilanzmodell sind die Außenraumtemperatur T_{Z1} , die Innenraumtemperatur T_{Z11} und die Windgeschwindigkeit w an der Fassadenaußenseite. Darüber hinaus werden die Vorlauftemperaturen der beiden Flüssigkeitskreisläufe - äußeres Fluid 1 $T_{Z3_fluid_in}$ und inneres Fluid 2 $T_{Z9_fluid_in}$ - vorgegeben. Ausgehend von diesen Eingabeparametern berechnet das Modell zu jedem Zeitschritt die Energiebilanz der Fluidglassfassade.

Absorption in den Stoffschichten

Initial wird, über den im Strahlungsmodell berechneten Absorptionsgrad jeder Stoffschicht, der absorbierte Anteil der solaren Einstrahlungsleistung \dot{q}_{sol} [W/m²] je Stoffschicht berechnet. Dabei werden die flüssigkeitsführenden Schichten mit den angrenzenden Gläsern zusammengefasst. Exemplarisch wird die absorbierte Strahlungsleistung in Zone 2, 3 und 4 wie folgt berechnet:

$$\dot{q}_{a,Z234} = A_{Z234} \cdot \dot{q}_{sol}$$

mit

A_{Z234} Absorptionsgrad der Zonen 2, 3 und 4, [-]

$\dot{q}_{a,Z234}$ Absorbierte Strahlungsleistung in Zonen 2,3 und 4, [W/m²]

Analog werden Zone 6 und Zonen 8, 9 und 10 behandelt.

Energiebilanz

Im nächsten Schritt wird der Energieaustausch zwischen dem Fluidglas und seiner Umgebung in jedem Zeitschritt berechnet. Dabei wird die absorbierte Energie der Solarstrahlung in den Fluidglasschichten, der Wärmestrom im äußeren und inneren Fluid und die Temperaturen der Umgebung – Zone 1 (Außenraum) und Zone 11 (Innenraum) – berücksichtigt, wie in Abbildung 38 und Abbildung 39 zu sehen ist.

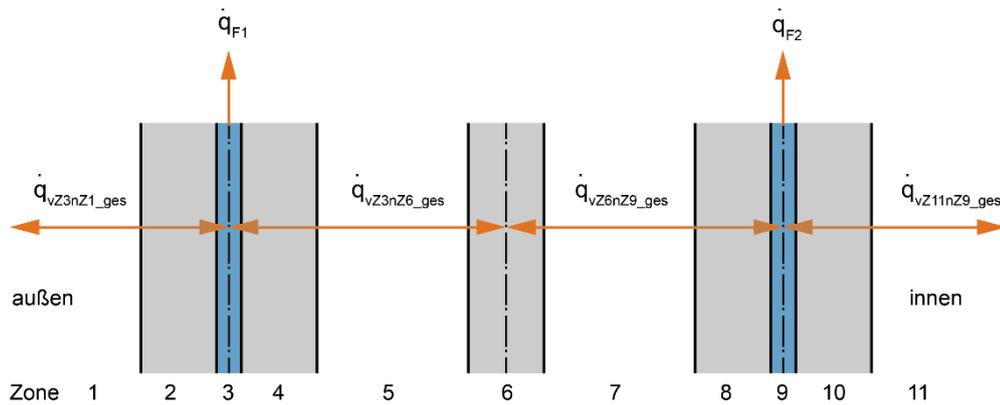


Abbildung 38: Schematische Darstellung der Energiebilanzierung des Fluidglasaufbaus

Temperaturen

Die Außentemperatur T_{Z1} wird über Wetterdaten oder Messwerte, die Innenraumtemperatur T_{Z11} über den vorangegangenen Zeitschritt oder ebenfalls Messwerte im Energiebilanzmodell vorgegeben. Analog zur Absorption der Solarstrahlung werden die Zonen 2, 3 und 4 bzw. 8, 9 und 10 zusammengefasst. Die Temperatur in Zone 3 T_{Z3} ergibt sich aus der Mitteltemperatur der vorgegebenen Vorlauftemperatur von Fluid 1 $T_{Z3_fluid_in}$ und der berechneten Rücklauftemperatur $T_{Z3_fluid_out}$ bzw. in Zone 9 T_{Z9} aus $T_{Z9_fluid_in}$ und $T_{Z9_fluid_out}$. Die Temperaturen in den gasgefüllten Scheibenzwischenräumen – Zonen 5 und 7 – werden als Mittelwerte von Zonen 3 und 6 bzw. Zonen 6 und 9 gerechnet (siehe Abbildung 39).

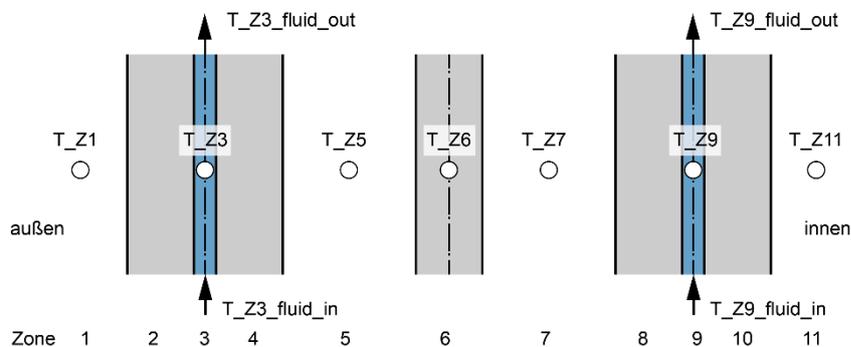


Abbildung 39: Schematische Darstellung der Temperaturen im Fluidglasaufbau

Exemplarisch wird im Folgenden die Energiebilanz zwischen Zone 1 und Mitte Zone 6 beschrieben. Die Energiebilanz zwischen Mitte Zone 6 und Zone 11 wird analog dazu berechnet.

Thermische Widerstände

Zur Berechnung des Wärmestroms werden die thermischen Widerstände und die jeweiligen Temperaturen in den Zonen herangezogen (siehe Abbildung 40).

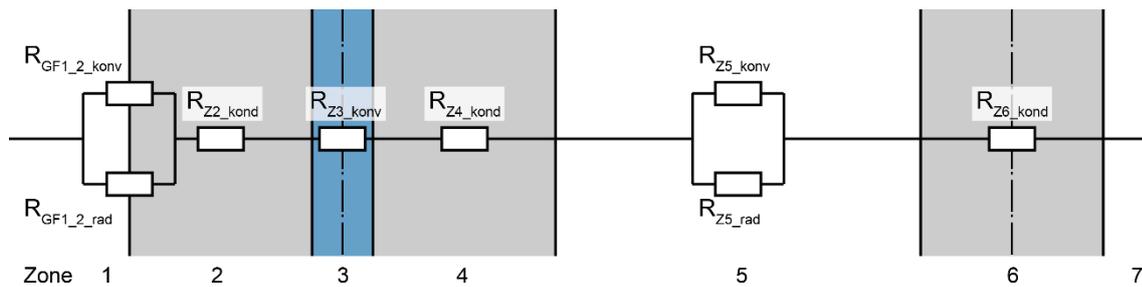


Abbildung 40: Schematische Darstellung der thermischen Widerstände in den Zonen 1 bis 7 des Fluidglasaufbaus

Die thermischen Widerstände zwischen Zone 1 und Mitte Zone 3 werden wie folgt berechnet (Berechnungen der Koeffizienten gemäß Kapitel 4.2.1):

$$R_{GF1_2_konv} = \frac{1}{\alpha_{a_konv}}$$

$$R_{GF1_2_rad} = \frac{1}{\alpha_{a_rad}}$$

$$R_{Z2_kond} = \frac{d_{Z2}}{\lambda_{Z2}}$$

$$R_{Z3_konv} = \frac{1}{\alpha_{Z3_konv}}$$

$$R_{vZ3nZ1_konv_kond} = R_{GF1_2_konv} + R_{Z2_kond} + 0,5 \cdot R_{Z3_konv}$$

$$R_{vZ3nZ1_rad} = R_{GF1_2_rad}$$

mit

$R_{th_GF1_2_konv}$	konvektiver, thermischer Widerstand an GF1_2, [(m ² K)/W]
$R_{th_GF1_2_rad}$	radiativer, thermischer Widerstand an GF1_2, [(m ² K)/W]
α_{a_konv}	äußerer, konvektiver Wärmeübergangskoeffizient, [W/m ² K]
α_{a_rad}	äußerer, radiativer Wärmeübergangskoeffizient, [W/m ² K]
R_{Z2_kond}	konduktiver, thermischer Widerstand in Zone 2 (Glas), [(m ² K)/W]
d_{Z2}	Schichtdicke Zone 2, [m]
λ_{Z2}	Wärmeleitfähigkeit Zone 2, [W/mK]
R_{Z3_konv}	konvektiver, thermischer Widerstand Zone 3 (Fluid), [(m ² K)/W]
α_{Z3_konv}	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient Zone 3 ⁶³ , [W/m ² K]
$R_{vZ3nZ1_konv_kond}$	konvektiver und konduktiver, thermischer Widerstand von Zone 3 nach Zone 1, [(m ² K)/W]

⁶³ Mit Durchfluss als erzwungene, laminare Konvektion, ohne Durchfluss als freie Konvektion (scheinbare Wärmeleitfähigkeit).

R_{vZ3nZ1_rad} radiativer, thermischer Widerstand von Zone 3 nach Zone 1, [(m²K)/W]

Die thermischen Widerstände zwischen Mitte Zone 3 und Mitte Zone 6 werden wie folgt berechnet:

$$R_{Z4_kond} = \frac{d_{Z4}}{\lambda_{Z4}}$$

$$R_{Z5_konv} = \frac{1}{\alpha_{Z5_konv}}$$

$$R_{Z5_rad} = \frac{1}{\alpha_{Z5_rad}}$$

$$R_{Z6_kond} = \frac{d_{Z6}}{\lambda_{Z6}}$$

$$R_{vZ3nZ6_konv_kond} = 0,5 \cdot R_{Z3_konv} + R_{Z4_kond} + R_{Z5_konv} + 0,5 \cdot R_{Z6_kond}$$

$$R_{vZ3nZ6_rad} = R_{Z5_rad}$$

mit

R_{Z4_kond} konduktiver, thermischer Widerstand in Zone 4 (Glas), [(m²K)/W]

d_{Z4} Schichtdicke Zone 4, [m]

λ_{Z4} Wärmeleitfähigkeit Zone 4, [W/mK]

R_{Z5_konv} konvektiver, thermischer Widerstand Zone 5 (Gas), [(m²K)/W]

α_{Z5_konv} Wärmedurchlasskoeffizient Zone 5, [W/m²K]

R_{Z5_rad} radiativer, thermischer Widerstand Zone 5, [(m²K)/W]

α_{Z5_rad} Strahlungs-Wärmeübergangskoeffizient Zone 5, [W/m²K]

R_{Z6_kond} konduktiver, thermischer Widerstand in Zone 6 (Glas), [(m²K)/W]

d_{Z6} Schichtdicke Zone 6, [m]

λ_{Z6} Wärmeleitfähigkeit Zone 6, [W/mK]

$R_{vZ3nZ6_konv_kond}$ konvektiver und konduktiver, thermischer Widerstand von Zone 3 nach Zone 6, [(m²K)/W]

R_{vZ3nZ6_rad} radiativer, thermischer Widerstand von Zone 3 nach Zone 6, [(m²K)/W]

Wärmeströme

Der Wärmestrom zwischen Mitte Zone 3 und dem Außenraum \dot{q}_{vZ3nZ1_ges} wird über den konvektiven und den radiativen Wärmeübergang an der äußeren Grenzfläche GF1_2, der Wärmeleitung in Zone 2 (Glas) und dem konvektiven Wärmeübergang von Mitte Zone 3 (Fluid) nach Zone 2 berechnet:

$$\dot{q}_{vZ3nZ1_ges} = \dot{q}_{vZ3nZ1_konv_kond} + \dot{q}_{vZ3nZ1_rad}$$

mit

$\dot{q}_{vZ3nZ1_konv_kond}$ Wärmestrom von Mitte Zone 3 nach Zone 1 durch Konvektion und Leitung in den Zonen 2 und 3, [W/m²]

\dot{q}_{vZ3nZ1_rad} Wärmestrom von Mitte Zone 3 nach Zone 1 durch Strahlung an GF1_2, [W/m²]

Der Wärmestrom zwischen Mitte Zone 3 und Mitte Zone 6 \dot{q}_{vZ3nZ6_ges} wird über den konvektiven Wärmeübergang von Mitte Zone 3 nach Zone 4, die Wärmeleitung in Zone 4 und Zone 6 (bis Glasmitte), dem konvektiven Wärmedurchlass in Zone 5 (Gas) und dem Strahlungswärmeübergang der Glasscheiben Zone 4 und 6 berechnet.

$$\dot{q}_{vZ3nZ6_ges} = \dot{q}_{vZ3nZ6_konv_kond} + \dot{q}_{vZ3nZ6_rad}$$

mit

$\dot{q}_{vZ3nZ6_konv_kond}$ Wärmestrom von Mitte Zone 3 nach Mitte Zone 6 durch Konvektion und Leitung in den Zonen 3,4 und 6, [W/m²]

\dot{q}_{vZ3nZ6_rad} Wärmestrom von Mitte Zone 3 nach Mitte Zone 6 durch den Strahlungsaustausch der Zonen 4 und 6, [W/m²]

Die Wärmeströme werden über die thermischen Widerstände und die Temperaturen in den Zonen wie folgt berechnet:

$$\dot{q}_{vZ3nZ1_konv_kond} = \frac{T_{Z3} - T_{Z1}}{R_{vZ3nZ1_konv_kond}}$$

$$\dot{q}_{vZ3nZ1_rad} = \frac{T_{Z3} - T_{Z1}}{R_{vZ3nZ1_rad}}$$

$$\dot{q}_{vZ3nZ1_ges} = \dot{q}_{vZ3nZ1_konv_kond} + \dot{q}_{vZ3nZ1_rad}$$

$$\dot{q}_{vZ3nZ6_konv_kond} = \frac{T_{Z3} - T_{Z6}}{R_{vZ3nZ6_konv_kond}}$$

$$\dot{q}_{vZ3nZ6_rad} = \frac{T_{Z3} - T_{Z6}}{R_{vZ3nZ6_rad}}$$

$$\dot{q}_{vZ3nZ6_ges} = \dot{q}_{vZ3nZ6_konv_kond} + \dot{q}_{vZ3nZ6_rad}$$

mit

\dot{q}_{vZ3nZ1_ges} gesamter Wärmestrom von Mitte Zone 3 nach Zone 1 durch Konvektion, Leitung und Strahlung, [W/m²]

\dot{q}_{vZ3nZ6_ges} gesamter Wärmestrom von Mitte Zone 3 nach Mitte Zone 6 durch Konvektion, Leitung und Strahlung, [W/m²]

Der durch den Fluidstrom in Zone 3 abgeführte Wärmestrom wird über den Massenstrom \dot{m}_{F1} , die Wärmespeicherkapazität $c_{p,F1}$ und die Temperaturdifferenz zwischen der Rücklauftemperatur des Fluides in Zone 3 $T_{Z3_fluid_aus}$ und der Vorlauftemperatur des Fluides in Zone 3 $T_{Z3_fluid_in}$ berechnet:

$$\dot{q}_{F1} = \dot{m}_{F1} \cdot c_{p,F1} \cdot (T_{Z3_fluid_aus} - T_{Z3_fluid_in})$$

Energiebilanz

Die Energiebilanz des Gesamtaufbaus – Zonen 1 bis 11 - wird im Energiebilanzmodell wie folgt zusammengefasst:

$$\dot{q}_{a_Z234} = \dot{q}_{vZ3nZ1_ges} + \dot{q}_{vZ3nZ6_ges} + \dot{q}_{F1}$$

$$\dot{q}_{a_Z6} = \dot{q}_{vZ6nZ9_ges} - \dot{q}_{vZ3nZ6_ges}$$

$$\dot{q}_{a_Z8910} = \dot{q}_{F2} - \dot{q}_{vZ6nZ9_ges} - \dot{q}_{vZ11nZ9_ges}$$

4.3 Zusammenfassung

Mit den beiden Fluidglasmodellen, dem Strahlungs- und dem Energiebilanzmodell, ist es möglich, flüssigkeitsdurchströmte Gläser zu simulieren. Im weiteren Verlauf werden die Modelle validiert. Mit Standardsoftware werden Fluidglasaufbauten ohne Flüssigkeiten im SZR validiert. Fluidglasaufbauten mit Flüssigkeiten im SZR werden mit Messergebnissen aus experimentellen Untersuchungen und Literaturwerten validiert.

5 Experimentelle Untersuchungen von Fluidgläsern

Es werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, um mit den Messergebnissen die beiden Modelle zu validieren. Zur Validierung des Strahlungsmodells wird in einem Spektrometer der Strahlungsdurchgang durch die Verglasung je Wellenlängenschritt zwischen 300 nm und 2500 nm gemessen. Dabei werden v.a. klare und eingefärbte Flüssigkeiten im Scheibenzwischenraum untersucht. Zur Validierung des Energiebilanzmodells werden im Modellraumprüfstand – mit künstlicher Sonne, Klimakammer und einem dahinter liegenden Raum mit Fenster – die Temperaturen im Fluidglas und dem Innenraum untersucht.

5.1 Spektrometermessungen

Am Institut für Energiesysteme der Interstaatlichen Hochschule für Technik in Buchs (NTB), Prof. Stefan Bertsch, Ph.D. wurden Spektrometermessungen durchgeführt (Oppliger, Stopper, Bertsch & Schwarz, 2009). Die Daten wurden freundlicherweise zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der Messungen wurden geeignete Einfärbungen für das Fluidglas untersucht. Die Messergebnisse dienen zur Validierung des Strahlungsmodells und zur Implementierung der Einfärbungen in das Strahlungsmodell.

5.1.1 Aufbau der Spektrometermessungen

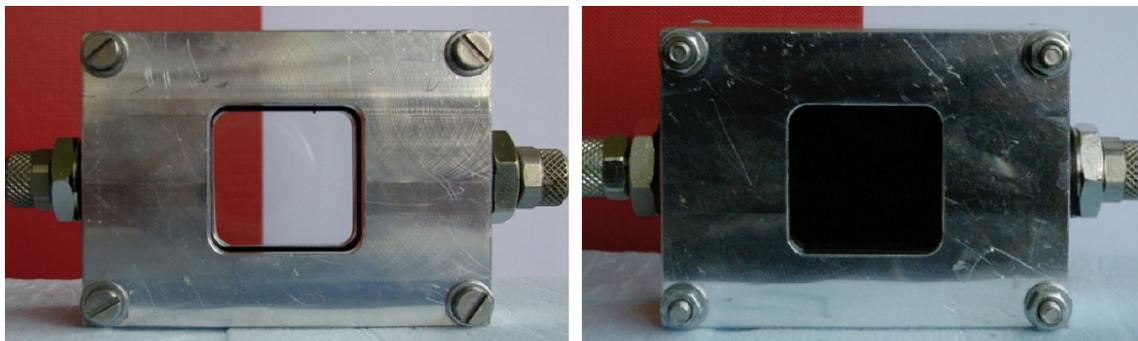


Abbildung 41: Fluidglasprototyp an der NTB. Zweifachverglasung aus zweimal 8 mm SSG Planilux® und 2 mm SZR; links gefüllt mit destilliertem Wasser, rechts mit 1% vol. Farbstoff Basacid® Schwarz X40 liquid in destilliertem Wasser (Quelle: (Oppliger, 2009))

An dem Fluidglasprototypen, wie in Abbildung 41 zu sehen, werden die Transmissionsgrade des Prototypen für das Spektrum zwischen 300 nm und 2500 nm mit einem im Spektrometer Lambda 19 von Perkin Elmer gemessen. Der Prototyp besteht aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm mit einem Scheibenzwischenraum (SZR) von 2 mm und den Glasabmessungen 40 mm x 40 mm, Sichtöffnung von 28 mm x 28 mm. Der Prototyp wird mit unterschiedlichen Füllungen im SZR gemessen. Die erste Messung erfolgt mit Luft im SZR, die weiteren Messungen mit klarem bzw. eingefärbtem, destilliertem Wasser. Für die Einfärbung werden unterschiedliche Farbstoffe bzw. Farbpigmente untersucht. In Abbildung 42 sind die Ergebnisse für den Farbstoff Basacid® Schwarz X40 liquid von BASF (BASF Corporation, 2015a) in den Konzentrationsstufen 1,008 Gramm Farbstoff pro Liter Wasser, d.h. 0,1 Volumenprozent (0,1% vol.) und 11g/l (1% vol.)

dargestellt. Weitere Messungen werden mit Eisenoxid Pigmenten Xfast® Schwarz 0050 von BASF (BASF SE, 2011) mit 1% vol., 2% vol. und 3% vol. in destilliertem Wasser durchgeführt. In diesem Fall werden die Messungen mit Küvetten der Firma Hellma GmbH & Co. KG aus optischem Spezialglas Typ 100-OS mit einer Schichtdicke von 2 mm durchgeführt (Hellma, 2016).

5.1.2 Ergebnisse der Spektrometermessungen

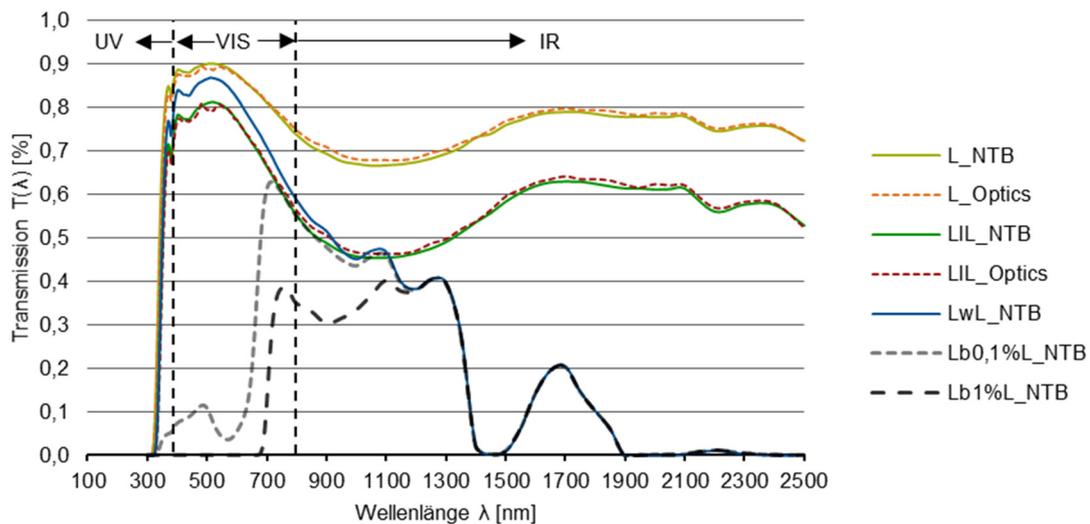


Abbildung 42: Messergebnisse für Strahlungstransmissionen der Messkampagne Basacid® Schwarz X40 bei senkrechter Einstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 300 nm bis 2500 nm und Ausgabewerte IGDB für Verglasungen ohne Fluidfüllung aus Optics (Quelle: Eigene Darstellung aus Messergebnissen NTB)

In der Messkampagne Basacid® Schwarz X40 wurden wie in Abbildung 42 dargestellt für folgende Verglasungsaufbauten Spektrometermessungen für den Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 2500 nm mit senkrechter Einstrahlung durchgeführt und mit Datenbankwerten der IGDB für die Verglasungsaufbauten ohne Fluidfüllung validiert (siehe auch tabellarische Darstellung der Messergebnisse in Anhang 16.4):

L_NTB	Einfachverglasung aus SSG PLANILUX® 8 mm, Messergebnisse NTB.
L_Optics	Einfachverglasung aus SSG PLANILUX® 8 mm; Ausgabewerte IGDB aus Optics.
LIL_NTB	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm Luft im SZR, Messergebnisse NTB.
LIL_Optics	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm Luft im SZR, Ausgabewerte IGDB aus Optics.
LwL_NTB	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm destilliertem Wasser im SZR, Messergebnisse NTB.
Lb0,1%L_NTB	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm destilliertem Wasser mit 0,1% vol. Basacid® Schwarz X40 eingefärbt im SZR, Messergebnisse NTB.

Lb1%L_NTB Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm destilliertem Wasser mit 1% vol. Basacid® Schwarz X40 eingefärbt im SZR, Messergebnisse NTB.

Die Messergebnisse für Verglasungsaufbauten ohne Fluidfüllung sind nahezu identisch mit den offiziellen spektralen Datenbankwerten aus der IGDB wie in Abbildung 42 und Tabelle 11 zu sehen ist. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Messergebnisse ausreichend genau sind, auch für die Messungen mit unterschiedlichen Fluidfüllungen. Bei allen Proben transmittiert keine Strahlung durch den Verglasungsaufbau bei 300 nm. Bei den Verglasungsaufbauten ohne Einfärbung - L_NTB, LIL_NTB und LwL_NTB – steigt die Transmission bis zum Wellenlängenbereich stark an, bis zum Maximum bei ca. 520 nm. Die Einfachverglasung weist in diesem Bereich ca. 90%, die Doppelverglasung mit Luft im SZR ca. 81% und die mit Wasser im SZR ca. 87% Transmission auf. Die Transmission mit Wasser im SZR ist in diesem Bereich höher als mit Luft. Dies ist auf die näher beieinander liegenden Brechungsindizes von Glas und Wasser als von Glas und Luft und der daraus resultierenden geringeren Reflexion an deren Grenzfläche zurückzuführen (siehe 0). In den folgenden Wellenlängenbereichen nimmt die Transmission bei allen drei Proben bis ca. 1000 nm bis 1050 nm ab, mit L_NTB ca. 67%, LIL_NTB ca. 45% und LwL_NTB ebenfalls ca. 45% Transmission.

Bei den Verglasungsaufbauten ohne Wasserfüllung steigt die Transmission bis ca. 1660 nm wieder an, um dann bis 2500 nm über 70% bei der Einfachverglasung bzw. 50% bei der Doppelverglasung zu verbleiben.

Bei den Verglasungsaufbauten mit Wasser – klar oder eingefärbt - im SZR nimmt die Transmission ab 1000nm weiterhin ab, bis zu einem ersten Tiefpunkt bei ca. 1400 nm mit ca. 2% Transmission. Ab ca. 1130 nm ist die Transmission bei Verglasungsaufbauten mit Wasser durchgehend geringer als mit Luft. Zwischen 1405 und ca. 1500 nm und ab 1875 nm transmittiert nahezu keine Strahlung durch die Verglasung mit Wasserfüllung. Der Einfluss des Wassers in diesen Wellenlängenbereichen bleibt bei allen Versuchen mit eingefärbtem Wasser in dieser Messreihe bestehen.

Bei mit Basacid® Schwarz X40 eingefärbtem Wasser entsprechen die Transmissionsgrade ab ca. 1120 nm denen von klarem Wasser. Die Einfärbung hat in diesen Wellenlängen keinen Einfluss auf die Transmission. Bis etwa 675 nm ist der Einfluss der Einfärbung am größten. Im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 675 nm kann mit einer Einfärbung von 1,0 %vol. (Lb0,1%L_NTB) die Transmission vollständig unterbunden werden. Im weiteren visuellen Spektrum bis 780 nm kann die Transmission dagegen nicht vollständig unterbunden werden. Bei beiden Einfärbungsstufen 0,1 %vol. und 1,0 %vol. ist eine maximale Transmission bei ca. 720 nm zu beobachten. Aus diesem Grund ist für das menschliche Auge eine rötliche Färbung zu erkennen (siehe Abbildung 43).



Abbildung 43: Fluidglas-Prototyp mit Einfärbung Basacid® Schwarz X40 im Modellraumprüfstand des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TUM

Für die solare bzw. visuelle Transmission nach EN 410 ergeben sich folgende Werte:

	L_NTB	L_Optics	LIL_NTB	LIL_Optics	LwL_NTB	Lb0,1%L_NTB	Lb1%L_NTB
T_{sol}	0,7889	0,7910	0,6394	0,6410	0,6149	0,2616	0,1457
T_{vis}	0,8893	0,8840	0,7928	0,7870	0,8461	0,0638	0,0001

Tabelle 11: Solare und visuelle Transmissionswerte nach EN 410 für die Messkampagne Basacid® Schwarz X40 (Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung aus Messergebnissen NTB)

Mit 1% vol. Basacid kann bei senkrechter Einstrahlung die solare Transmission (T_{sol}) um ca. 47% und die visuelle Transmission (T_{vis}) um ca. 85% gegenüber klarem Wasser reduziert werden. Im solaren Strahlungsbereich transmittieren noch 15% der Strahlung durch den Scheibenaufbau in den Innenraum. Im visuellen Strahlungsbereich kann der Strahlungsdurchgang nahezu vollständig unterbunden werden. Bereits mit 0,1% vol. reduziert sich die solare Transmission auf 26% und die visuelle Transmission auf 6%.

Für die Spektrometermessungen mit dem Farbstoff Xfast® Schwarz 0050 wurden Küvetten aus optischem Spezialglas der Firma Hellma GmbH & Co. KG verwendet.

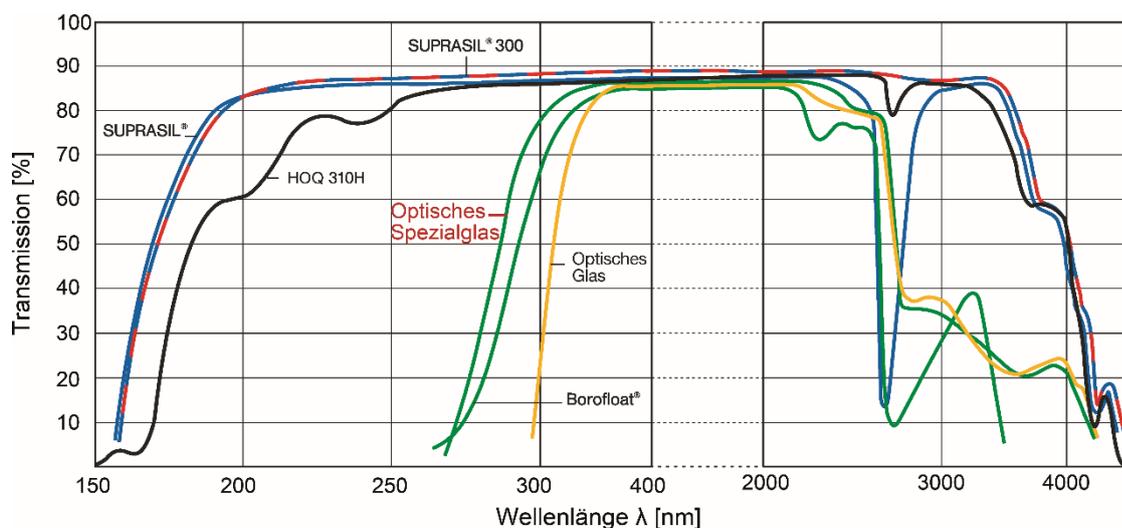


Abbildung 44: Transmission von leeren Küvetten der Firma Hellma aus verschiedenen Gläsern (Quelle: Hellma GmbH & Co. KG)

Nach Herstellerangaben liegt die Transmission durch die leere Küvette im Wellenlängenbereich zwischen 320 nm und 2500 nm über 80%. Wie aus Abbildung 44 ersichtlich, steigt die Transmission von 300 nm bis ca. 330 nm von ca. 78% auf 84% an, bleibt bis ca. 2200 nm kontinuierlich auf diesem Niveau und fällt dann bis ca. 2500 auf ca. 80% ab.

In der Messkampagne Xfast® Schwarz 0050 wurden für folgende Verglasungsaufbauten Spektrometermessungen für den Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 2500 nm mit senkrechter Einstrahlung durchgeführt:

KwK	Küvette, gefüllt mit klarem, destilliertem Wasser, Schichtdicke 2 mm.
Kxf1%K	Küvette, gefüllt mit 1% vol. Xfast® Schwarz 0050 eingefärbtem, destilliertem Wasser, Schichtdicke 2 mm.
Kxf2%K	Küvette, gefüllt mit 2% vol. Xfast® Schwarz 0050 eingefärbtem, destilliertem Wasser, Schichtdicke 2 mm.
Kxf3%K	Küvette, gefüllt mit 3% vol. Xfast® Schwarz 0050 eingefärbtem, destilliertem Wasser, Schichtdicke 2 mm.

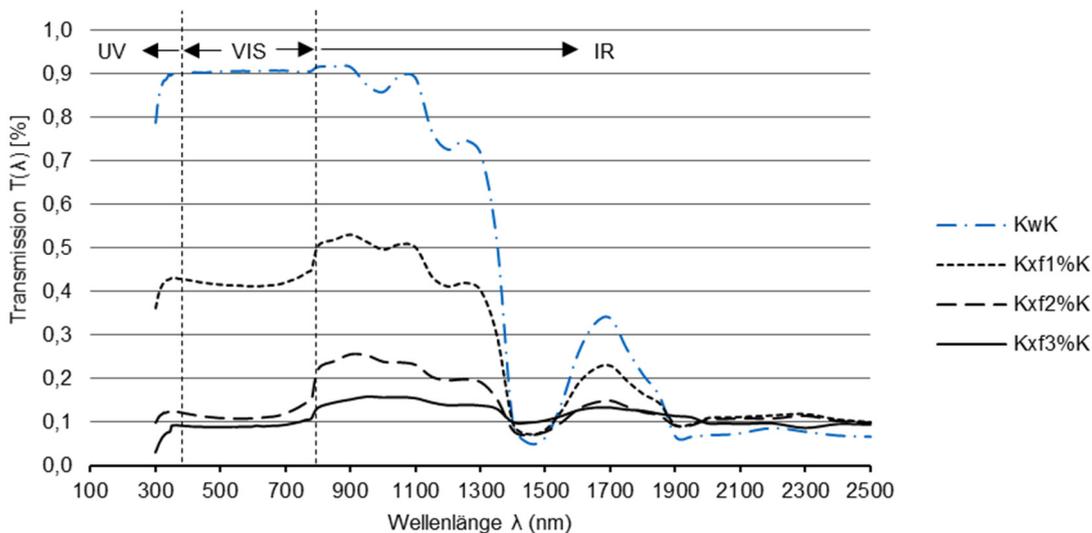


Abbildung 45: Messergebnisse für Strahlungstransmissionen der Messkampagne Xfast® Schwarz 0050 bei senkrechter Einstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 300 nm bis 2500 nm (Quelle: Eigene Darstellung aus Messergebnissen NTB)

Zwischen 300 nm und 330 nm entspricht der Verlauf mit Wasserfüllung dem Verlauf der leeren Küvetten, d.h. der Einfluss der Küvetten zeichnet sich auch im Verlauf mit Wasserfüllung ab. Ab einem Wellenlängenbereich von ca. 900 nm überwiegt der Einfluss der Wasserfüllung, die Transmission nimmt stark ab, bis zu ca. 1450 nm mit ca. 6% Transmission. Bis ca. 1700 nm ist ein erneuter Anstieg bis ca. 33% zu beobachten, um dann ab ca. 1900 nm bei unter 10% zu verbleiben.

	KwK	Kxf1%K	Kxf2%K	Kxf3%K
T_{sol}	0,8169	0,4119	0,1477	0,1095
Reduktion T_{sol} zu KwK		- 41%	- 67%	- 71%
T_{vis}	0,9059	0,4128	0,1608	0,0888
Reduktion T_{vis} zu KwK		-49%	- 80%	- 82%

Tabelle 12: Solare und visuelle Transmissionswerte nach EN 410 für die Messkampagne Xfast® Schwarz 0050 (Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung aus Messergebnissen NTB)

Die Einfärbung mit Xfast® Schwarz 0050 beeinflusst die Transmission gegenüber klarem Wasser über den gesamten Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 2500 nm wie in Abbildung 45 zu erkennen ist. Die solare Transmission nach EN 410 kann mit 3% vol. Einfärbung um ca. 71% und im visuellen Spektrum um bis 82% reduziert werden wie in Tabelle 12 zu erkennen ist. Die Transmission bei Einfärbungen mit Xfast® Schwarz 0050 ist in jeder Konzentrationsstufe im visuellen Bereich sehr gleichmäßig. Aus diesem Grund ist das optische Erscheinungsbild sehr neutral – grau bis schwarz – im Gegensatz zu Einfärbungen mit Basacid® Schwarz X40.

Es ist anzumerken, dass die Messergebnisse in den Wellenlängenbereichen über ca. 1400 nm nicht den erwarteten Verlauf nehmen. Entgegen der Annahme, dass mit zunehmender Einfärbungskonzentration die Transmission abnimmt, steigt sie bei der maximalen Einfärbung von 3% vol. z.T. wieder leicht an. Dies könnte entweder an Messungenauigkeiten oder an Streuungen durch die Partikel liegen⁶⁴. Da die Transmission durch die fünf Gläser des Fluidglasaufbaus über 1400 nm sehr gering ist (siehe Abbildung 69), hat diese Messunsicherheit keinen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Transmission durch das Fluidglas (siehe Abbildung 72).

In den weiteren Berechnungen mit dem Strahlungsmodell werden die Literaturwerte nach Hale für klares Wasser verwendet. Die gemessene, prozentuale Abweichungen der Transmission je nach Xfast-Konzentrationsstufe gegenüber klarem Wasser (siehe Abbildung 45) wird auf die Berechnungen des jeweiligen Fluidglasaufbaus mit klarem Wasser angewendet.

5.1.3 Diskussion und Fazit aus den Spektrometermessungen

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen konnte die spektrale Transmission im solaren Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 2500 nm für unterschiedliche Verglasungsaufbauten mit Luft im SZR und Wasser, klar bzw. eingefärbt, gemessen werden. Der Vergleich mit den offiziellen Datenbankwerten aus der IGDB für Verglasungsaufbauten SSG PLANILUX® 8 mm einfach und zweifach mit Luft im SZR weist eine gute Übereinstimmung auf. Im weiteren Verlauf wird daher angenommen, dass die Messungen mit Fluidfüllung als Anhaltspunkt für die weitere Validierung herangezogen werden können. Da bei den Messungen jedoch nur die Transmission und keine Reflexion gemessen werden konnte, können die Messergebnisse jedoch nicht direkt im Strahlungsmodell weiter verarbeitet werden. Das methodische Vorgehen wird in Kapitel 6.1.2 beschrieben.

Die Messergebnissen zeigen, dass die Transmission im visuellen Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm mit klarem Wasser im SZR gegenüber Luft gesteigert werden kann, bei einer Doppelverglasung mit SSG PLANILUX® 8 mm um ca. 6%. Daraus ergibt sich ein erhöhter Tageslichteintrag in den dahinter liegenden Raum.

Die Messungen mit Einfärbungen mit Xfast® Schwarz 0050 zeigen, dass mit einem nur zwei Millimeter tiefen SZR mit zunehmender Einfärbungskonzentration die Transmission im gesamten

⁶⁴ Im Rahmen der Arbeit konnte keine genaueren Messungen durchgeführt werden diese Abweichungen erklären könnten.

solaren Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 2500 nm stark reduziert und somit kontrolliert werden kann, im solaren Bereich bis zu ca. 71% und im visuellen Bereich bis zu ca. 82%. Im visuellen Bereich kann die Transmission mit Xfast® Schwarz 0050 nahezu vollständig, mit Basacid® Schwarz X40 vollständig unterbunden werden.

Vereinfachte Gebäudesimulationen für die Standorte Moskau, München und Riad eines Einzelbüros mit Fluidglasfassaden - Fluidglasaufbau FGGF - mit der Einfärbung Basacid® Schwarz X40 haben gezeigt, dass es aufgrund der fehlenden Beeinflussung der Transmission im NIR-Bereich zu Überhitzung im dahinter liegenden Raum kommen kann, trotz Totalverdunkelung im visuellen Bereich. Insbesondere mit Weißglas, das zur gewünschten maximierten solaren Transmission im klaren Zustand untersucht wird, kann kein ausreichender Überhitzungsschutz mit Fluidglas gewährleistet werden. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass Fluidgläser ohne Einfärbung ebenfalls keinen ausreichenden Überhitzungsschutz ermöglichen. Im Vergleich zu Fassaden mit Sonnenschutzverglasungen ist mit Fluidglasfassaden ohne Einfärbung bzw. Fluidglasfassaden mit Weißglas und Einfärbung mit Basacid® Schwarz X40 ein erhöhter Kühlenergiebedarf zu erwarten. (Stopper, Boeing & Gstöhl, 2013, S. 35–39)

Für die weiteren Untersuchungen wird aus diesen Gründen festgelegt, dass reversible Einfärbungen mit einer möglichst gleichmäßigen Beeinflussung der Transmission über das gesamte solare Spektrum für Fluidglasfassaden zwingend erforderlich sind. Xfast® Schwarz 0050 wird als geeignetste Einfärbung für weitere Untersuchungen festgelegt.



Abbildung 46: Dreistufige Bildfolge des Entfärbungsprozesses eines klaren Fluids mit Eisenoxidpigmenten durch Anlegen eines Permanentmagneten

Zusätzlich zu den positiven optischen Eigenschaften von Xfast® Schwarz 0050 haben Eisenoxidpartikel den Vorteil, dass diese mithilfe von Magneten aus der Flüssigkeit extrahiert werden können. Ein reversibler Einfärbungsprozess ist dadurch prinzipiell möglich, wie in Abbildung 46 zu sehen ist.

5.2 Messungen im Modellraumprüfstand

Zur Validierung des Energiebilanzmodells werden Messungen im Modellraumprüfstand durchgeführt. Ziel ist dabei stationäre Vor- und Rücklauftemperaturen für die beiden Fluide des Fluidglasaufbaus – äußeres Fluid F1 und inneres Fluid F2 – und die Raumtemperatur zu erhalten. Diese Werte sollen anschließend mit den Berechnungsergebnissen des Energiebilanzmodells verglichen werden.

Das Fluidglaselement wird im Modellraumprüfstand des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der Technischen Universität München experimentell untersucht. Der Prüfstand ist im Rahmen der Dissertation von Werner Eiband entstanden und in dieser Arbeit beschrieben (Eiband, 2004). Er besteht aus einem nahezu adiabaten Raum mit einer Fensteröffnung, die zu einem verglasten, klimatisierten Vorbau orientiert ist. Die Verglasung des Vorraums ist zweischalig ausgeführt, der Glaszwischenraum kann ebenfalls klimatisiert werden (siehe Abbildung 47). Der Vorbau und der Verglasungszwischenraum werden im Rahmen der Experimente auf jeweils konstant 20°C klimatisiert.

Der Um- und Aufbau für die Fluidglas-Messungen wird mit der tatkräftigen Unterstützung von Heinrich Kleeberger, Anian Hampe, Florian Gantert, Hans Beck und dem technischen Personal des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik durchgeführt (Gantert, 2011) und (Beck, 2012, S. 10–17).



Abbildung 47: Modellraumprüfstand an der TU München von außen (Foto: Heinrich Kleeberger)

5.2.1 Aufbau Messungen im Modellraumprüfstand

Aufbau Fluidglaselement

Der Fluidglasprototyp für die Messungen im Modellraumprüfstand wird aus fünf Standard – Flachgläsern mit jeweils 6 mm Dicke und zwei flüssigkeitsführenden Schichten mit 2 mm Dicke ausgeführt. Auf den Positionen 4 und 7 sind Low-E-Beschichtungen aufgebracht (siehe Tabelle 13).

		Zonen (Z)			
		Nr.	Beschreibung	Herstellerbezeichnung	Dicke [mm]
		Z2	Flachglas	SSG PLANILUX®	6
		Z3	Fluid (F1) (Wasser klar/eingefärbt)	Einfärbung: Basacid® Schwarz X40	2
		Z4	Flachglas mit Low-E-Beschichtung (Pos. 4)	SSG PLANITHERM ONE PLANILUX®	6
		Z5	Krypton		16
		Z6	Flachglas	SSG PLANILUX®	6
		Z7	Krypton		16
		Z8	Flachglas mit Low-E-Beschichtung (Pos. 7)	SSG PLANITHERM ONE PLANILUX®	6
		Z9	Fluid (F2) (Wasser klar/eingefärbt)	Einfärbung: Xfast® Schwarz 0050	2/4/6
		Z10	Flachglas	SSG PLANILUX®	6

Tabelle 13: Fluidglasaufbau des Prototyps im Modellraumprüfstand an der TUM

Abmessung Fluidglaselement



Abbildung 48: Fluidglaselement im Bestandsfensterausschnitt des Modellraumprüfstands von außen betrachtet

Das Fluidglaselement wird im Innenraum des Modellraumprüfstands hinter die bestehende Fensteröffnung verschiebbar eingebaut. Aus Kostengründen wird ein bestehender Fluidglasprototyp für die Messungen verwendet und kein neuer mit den zum Fensterausschnitt passenden Maßen angefertigt. Das Fluidglaselement ist schmäler und höher als der Fensterausschnitt. Der Fensterausschnitt wird umlaufend mit 8 cm dickem Styropor WLG 035 ausgekleidet und mit PE-Folie (blau) möglichst luftdicht verkleidet. Der Fluidglas-Fensterrahmen wird ebenfalls überdämmt (siehe Abbildung 48). Von innen wird eine zusätzlich OSB-Platte mit

Dichtunglippe angebracht, um einen möglichst luftdichten Anschluss zwischen Fluidglaselement und Rahmen herzustellen (siehe Abbildung 49)⁶⁵.

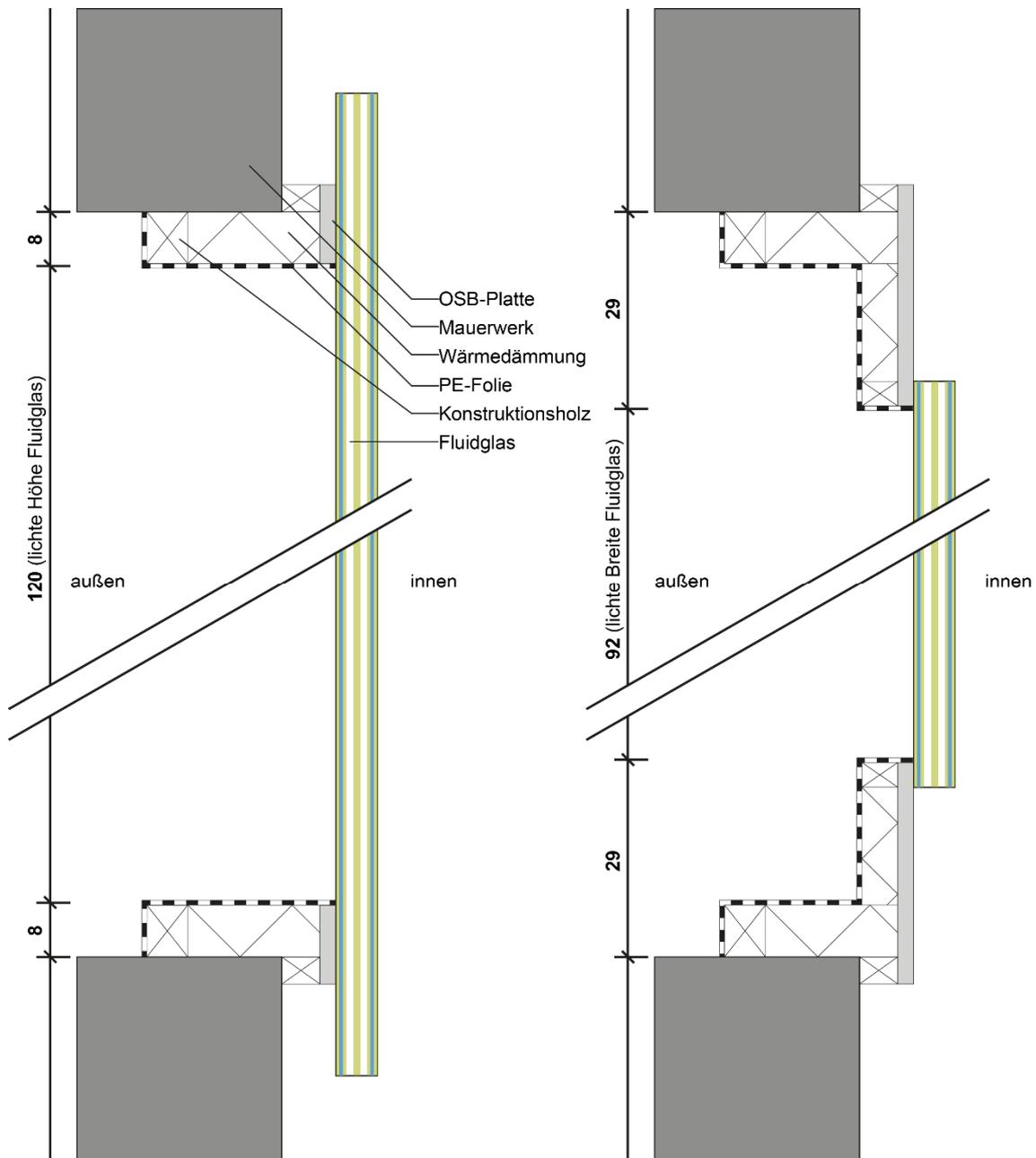


Abbildung 49: Einbau Fluidglaselement in Fensteröffnung Modellraumprüfstand (links: Horizontalschnitt, rechts: Vertikalschnitt)

⁶⁵ Das Fluidglaselement wird verschiebbar auf einem Gestell montiert, damit das gesamte Element an die Fassade bzw. zu Wartungsarbeiten und Messungen auch in die Raumtiefe geschoben werden kann (siehe Abbildung 96).

Der verbleibende, transparente Fluidglasausschnitt ist 0,92 m breit und 1,20 m hoch, dies ergibt eine Fluidglasfläche von ca. 1,10 m² (siehe Abbildung 49).

Fluidkreisläufe

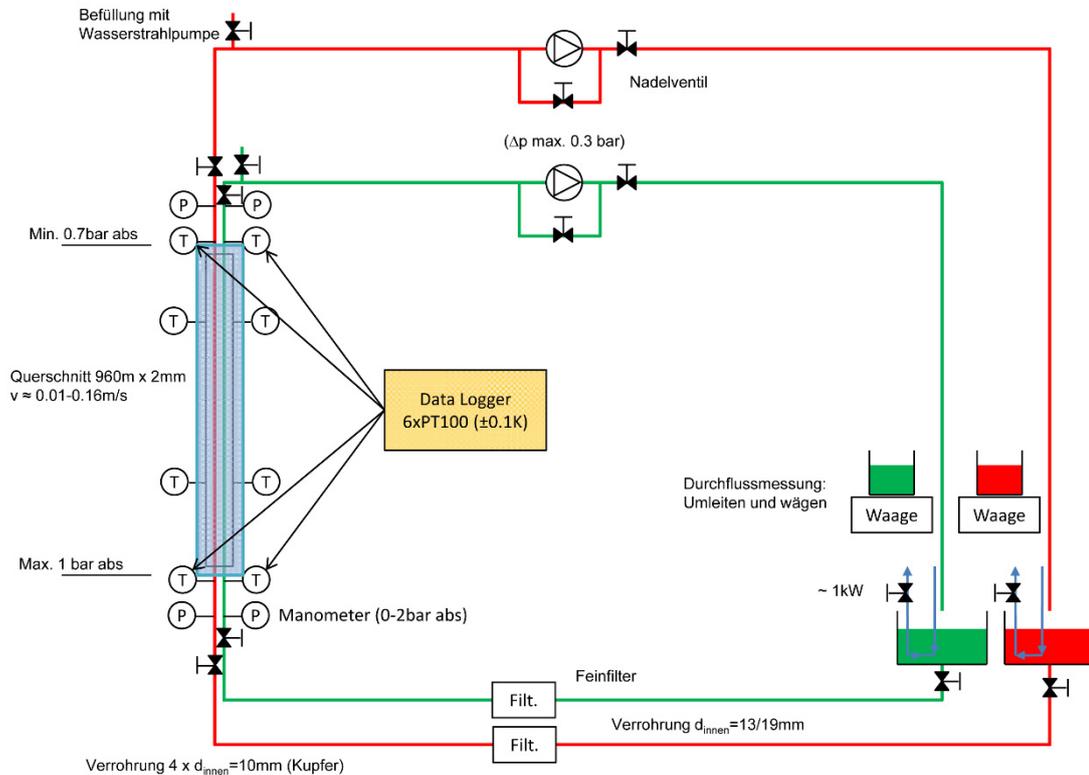


Abbildung 50: Schemazeichnungen Messaufbau Modellprüfraum (Quelle: Gstöhl, Daniel; NTB)

Die beiden Fluidkreisläufe werden aus dem Modellprüfraum in zwei getrennte, offene Behälter geführt. Das deionisierte Wasser wird mittels Umwälzpumpen mit einem Liter pro Minute zirkuliert. In den Wasserbehältern befinden sich Wärmetauscher, die an ein Kühlsystem angeschlossen sind. Die beiden Fluidkreisläufe können unabhängig voneinander gekühlt werden. Durch Beigabe von Farbstoff in die Behälter können die Fluide zusätzlich eingefärbt werden.

Einstrahlung – künstliche Sonne

Die künstliche Sonne bildet mithilfe von zwei unterschiedlichen Lampentypen das solare Spektrum ab. Die Halogen-Metaldampflampen (HQI) liefern vor allem den sichtbaren Wellenlängenbereich des solaren Spektrums, die Halogenleuchtampen (Halogen) den langwelligen Spektralbereich (Eiband, 2004, S. 29–69). Die künstliche Sonne ist auf unterschiedliche Verteilungen direkter und diffuser solarer Strahlung optimiert, nicht aber auf die normierte, spektrale Verteilung nach EN 410, die dem Strahlungsmodell zugrunde liegt. Die Abweichungen zur in den Simulationen verwendeten normierten spektralen Strahlungsverteilung konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass eventuelle Abweichungen bei der Validierung des EES-Energiebilanzmodells mit

den Messergebnissen im Modellraumprüfstand auch aufgrund der unterschiedlichen Strahlungsverteilungen möglich sind.

Die künstliche Sonne wird für die Messungen auf senkrechte Einstrahlung⁶⁶ mit einer Einstrahlung von ca. 1000 W/m² in Fassadenmitte eingestellt.

1		2		3		4		5	HQI
	1		2		3		4		Halogen
6		7		8		9		10	HQI
	5		6		7		8		Halogen
11		12		13		14		15	HQI
	9		10		11		12		Halogen
16		17		18		19		20	HQI
	13		14		15		16		Halogen
21		22		23		24		25	HQI
	17		18		19		20		Halogen
26		27		28		29		30	HQI

Abbildung 51: Leuchtenmatrix der künstlichen Sonne im Modellraumprüfstand (orange Schrift = Lampe an, graue Schrift = Lampe aus)

Die in Abbildung 51 rot dargestellten Lampen sind angeschaltet, die grau dargestellten Lampen sind ausgeschaltet. Die Halogenglühlampen sind jeweils auf 48% ihrer Leistung gedimmt.

Messfühler

Im Modellraumprüfstand sind Pt100-Sensoren installiert (Eiband, 2004, S. 72–74), über die die Oberflächen- und die Raumlufttemperaturen gemessen werden. Mit einem Globe-Thermometer wird die operative Raumtemperatur in Raummitte gemessen. Zusätzlich werden Pt100-Sensoren am Fluidglaselement installiert, kalibriert und mit einem Datenlogger „Memograph M RSG40“ von Endress + Hauser ausgelesen (Gantert, 2011). Mit diesen Sensoren werden die Vor- und Rücklauftemperatur im äußeren und inneren Fluidglaskreislauf gemessen.

5.2.2 Ergebnisse Messungen im Modellraumprüfstand

Einstrahlung auf die Fassade

Zur Messungen der solaren Einstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 285 nm und 2800 nm wird ein Pyranometer (Hersteller: Kipp & Zonen, Typ „CMP11“ inkl. Abdeckung mit zusätzlichem Lüfter „CVF3“ und Verstärker „AMPBOX“) installiert. Der Pyranometer wird vor und

⁶⁶ Neigung vertikal 1°, Neigung horizontal 89,9°

hinter der Fluidglasfassade in 15 cm Schritten horizontal und vertikal verschoben, um die senkrechte Einstrahlung auf die Fassade bzw. hinter der Fluidglasfassade zu messen (siehe Abbildung 52).



Abbildung 52: Pyranometer vor dem Fluidglaselement. Messung der Einstrahlung auf die Fassade im Modellraumprüfstand (Foto: Heinrich Kleeberger)

Die senkrechte Einstrahlung auf die Fassade beträgt im Maximum 997 W/m^2 (siehe Tabelle 14). In der Fassadenmitte (0 cm vertikal und 0 cm horizontal) liegt die Einstrahlung bei $992 \text{ W/m}^2\text{K}$. Die durchschnittliche Einstrahlung auf das Fassadenelement beträgt 626 W/m^2 , d.h. die $1,10 \text{ m}^2$ große Fluidglasfassade wird mit ca. 698 W bestrahlt.

	-45cm h	-30cm h	-15cm h	0cm h	15cm h	30cm h	45cm h
45cm v	295	418	512	516	498	447	350
30cm v	375	570	732	750	728	651	460
15cm v	420	694	885	945	940	800	570
0cm v	451	725	930	992	997 ⁶⁷	855	608
-15cm v	440	675	875	974	985	828	600
-30cm v	412	670	828	875	858	713	528
-45cm v	370	543	652	672	629	543	432
-60cm v	320	406	450	462	440	402	338

Tabelle 14: Senkrechte Einstrahlung auf die Fluidglasfassade (Messwerte Pyranometer in W/m^2 ; Messung vom 13.04.2011)

Einstrahlung hinter der Fassade ohne Einfärbung

	-45cm h	-30cm h	-15cm h	0cm h	15cm h	30cm h	45cm h
45cm v	77	92	97	98	98	82	63
30cm v	95	136	139	150	141	115	80
15cm v	110	151	165	173	164	138	90
0cm v	114	151	169	170	168	141	95
-15cm v	108	142	163	166	162	135	95
-30cm v	99	127	144	152	154	140	93
-45cm v	87	112	117	125	130	125	90
-60cm v	71	84	92	96	99	97	80

Tabelle 15: Senkrechte Einstrahlung im Innenraum hinter der Fluidglasfassade, beide Kreisläufe mit klarem Wasser gefüllt (Messwerte Pyranometer in W/m^2 ; Messung vom 18.04.2011)

Die Einstrahlung hinter der Fluidglasfassade mit zwei Flüssigkeitsschichten ohne Einfärbung beträgt im Maximum $170 W/m^2$ in der Fassadenmitte (siehe Tabelle 15). Die durchschnittliche Einstrahlung auf das Fassadenelement beträgt $121 W/m^2$, d.h. durch die $1,10 m^2$ große Fluidglasfassade transmittieren $133 W$ direkt in den Raum.

⁶⁷ Der Maximalwert ist leicht außerhalb der Mitte nach rechts versetzt. Dies kann einerseits an der Position der Halogenlampe Nr. 15 liegen, die ebenfalls außermittig angebracht ist, andererseits auch an Messungenauigkeit. Die hohe Empfindlichkeit des Pyranometers und Signalschwankungen lassen die Messwerte an gleicher Stelle um $3 - 4 W/m^2$ variieren. Trotz Bildung eines Mittelwerts kann es zu Ungenauigkeiten führen. Die angegebenen Werte sind Mittelwerte.

	-45cm h	-30cm h	-15cm h	0cm h	15cm h	30cm h	45cm h
45cm v	71	89	95	99	93	80	62
30cm v	87	121	116	132	117	100	68
15cm v	96	141	146	148	144	125	68
0cm v	103	137	152	154	151	131	82
-15cm v	101	135	154	160	151	124	83
-30cm v	94	123	139	145	136	134	73
-45cm v	87	112	118	126	129	125	80

Tabelle 16: Senkrechte Einstrahlung im Innenraum hinter der Fluidglasfassade, beide Kreisläufe mit klarem Wasser gefüllt (Messwerte Pyranometer in W/m². Messung vom 17.11.2011)

Die Messungen hinter der klaren Fluidglasfassade werden am 17.11.2011 wiederholt (siehe Tabelle 16), nachdem u.a. Messungen mit Einfärbung stattgefunden haben. Die direkte Transmission ist geringer als bei den Messungen am 18.04.2011.

Die maximale Einstrahlung beträgt 160 W/m² in der Fassadenmitte (-15 cm vertikal und 0 cm horizontal). Die durchschnittliche Einstrahlung auf das Fassadenelement beträgt 115 W/m², d.h. durch die 1,10 m² große Fluidglasfassade werden 127 W direkt in den Raum transmittiert. Es wird davon ausgegangen, dass Ablagerungen in den fluiddurchströmten Scheibenzwischenräumen die direkte Strahlungstransmission verringern.

	Einstrahlung [W/m ²]			T _{sol} [-]		
	max.	0v/0h	Ø	max.	0v/0h	Ø
auf Fassade	997	992	626	-	-	-
hinter Fassade, 18.04.2011	170	170	120	0,17	0,17	0,19
hinter Fassade, 17.11.2011	160	154	115	0,16	0,16	0,18

Tabelle 17: Vergleich Einstrahlung und solare Transmission durch das Fluidglas ohne Einfärbung

Die solare Transmission durch die Fluidglasfassade mit zwei klaren Flüssigkeiten beträgt 17% am 18.4.2011 bzw. 16% am 17.11.2011, sowohl beim Vergleich der Maximalwerte (max.) als auch beim Vergleich der Messungen in der Fassadenmitte (0v/0h). Beim Vergleich der gemessenen Durchschnittswerte über das gesamte Fluidglas (Ø) liegt die Transmission bei 19% am 18.4.2011 bzw. 18% am 17.11.2011 (siehe Tabelle 17).

Während der Temperaturmessungen kann der Raum nicht betreten werden. Aus diesem Grund wird der Pyranometer im weiteren Verlauf direkt hinter der Fassade in Fassadenmitte (0 cm vertikal und 0 cm horizontal) fest installiert und die direkte solare Transmission wird an diesem Punkt gemessen.

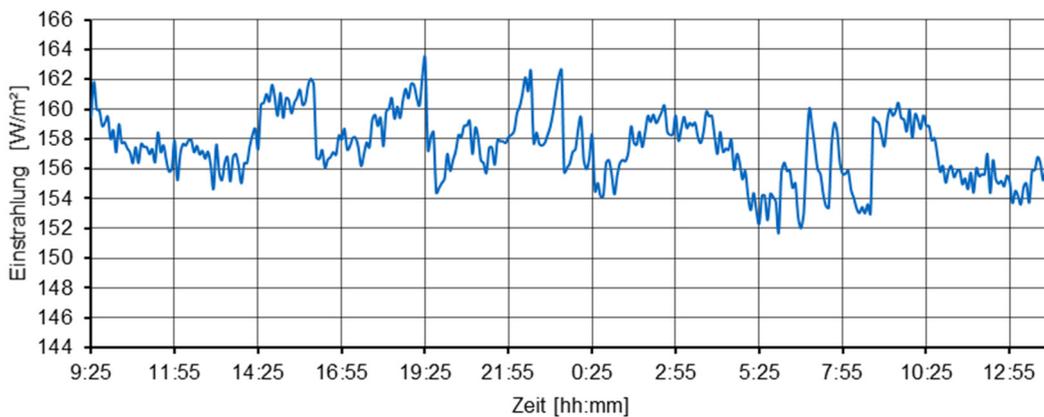


Abbildung 53: Einstrahlung hinter der Fluidglasfassade in Fassadenmitte; zwei klare Flüssigkeiten; Pyranometermessung von 25.07.2011, 9:25 Uhr bis 26.07.2011, 14:35 Uhr

Wie in Abbildung 53 zu sehen ist, schwankt die Einstrahlung hinter der Fassade zwischen 151,7 W/m² und 163,4 W/m². Im weiteren Verlauf wird der Mittelwert der Einstrahlung innerhalb des stationären Zeitraums ermittelt. Als stationärer Zeitraum wird der Zustand betrachtet, in dem sich die Raumtemperatur und die Rücklauftemperatur des äußeren und inneren Fluids, d.h. F1 und F2, auf einem möglichst gleichbleibenden Temperaturniveau einpendeln.

Temperaturverläufe

Im Folgenden werden exemplarisch die Temperaturverläufe von drei Messungen dargestellt. Bei allen drei Versuchen werden sowohl das äußere Fluid (F1) als auch das innere Fluid (F2) mit einem konstanten Durchlauf von ca. 1 l/min betrieben. Bei den ersten beiden Versuchen werden die Fluide nicht eingefärbt, d.h. es befindet sich klares Wasser in den Flüssigkeitskreisläufen. Beim dritten Versuch wird das Wasser im äußeren Fluid mit Basacid® Schwarz X40 eingefärbt. Es werden 156 ml Farbstoff in ca. 20 Liter Wasser gegeben, d.h. ca. 0,78 Vol.-%. Beim ersten Versuch wird keines der Fluide gekühlt, bei den beiden letzten Versuchen wird jeweils das innere Fluid gekühlt.

Messungen ohne Einfärbung, ohne Kühlung

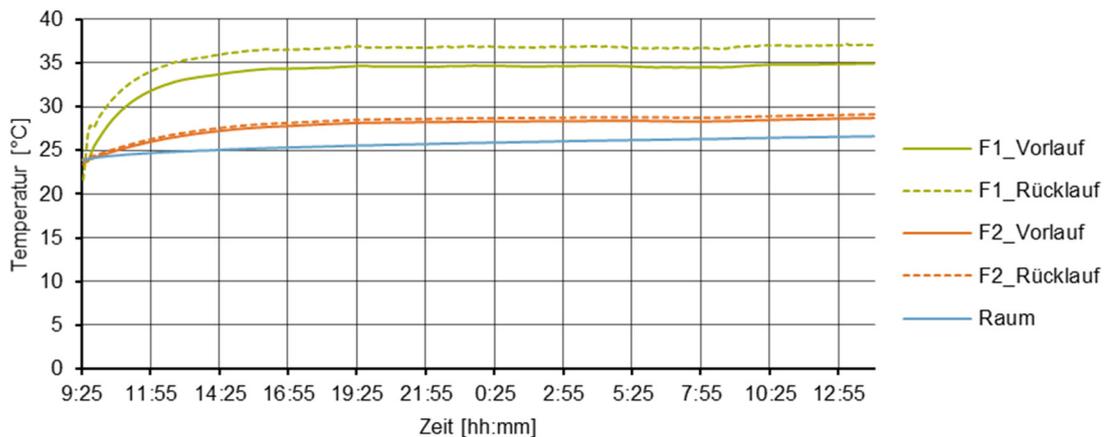


Abbildung 54: Messverlauf der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung und ohne Kühlung (Messung von 25.07.2011, 09:25 Uhr bis 26.07.2011, 14:35 Uhr)

	Einstr. [W/m ²]	F1_Vorl. [°C]	F1_Rückl. [°C]	F2_Vorl. [°C]	F2_Rückl. [°C]	Raum [°C]
Minimalwerte	151,70	29,09	31,47	25,00	25,24	24,43
Mittelwerte	157,37	34,27	36,48	27,98	28,36	25,80
Maximalwerte	163,41	34,95	37,19	28,71	29,13	26,61
Abweichungen:						
Min.- zu Mittelwert	-5,67	-5,18	-5,01	-2,98	-3,12	-1,37
Max.- zu Mittelwert	6,04	0,68	0,71	0,73	0,77	0,81

Tabelle 18: Messergebnisse der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung und ohne Kühlung (Messung von 25.07.2011, 09:25 Uhr bis 26.07.2011, 14:35 Uhr)

Abbildung 54 zeigt den Verlauf der Messung ohne Einfärbung der beiden Flüssigkeiten und ohne Kühlung der beiden Flüssigkeiten. Wie in allen Messungen beträgt die Außentemperatur 20°C und die mittlere senkrechte Einstrahlung 626 W/m². Dargestellt sind die gemessenen Temperaturen des Vor- und Rücklaufs des äußeren Flüssigkeitskreislaufs (F1) und des inneren Flüssigkeitskreislaufs (F2) sowie die operative Raumtemperatur in Raummitte. In den ersten ca. 7 Stunden steigen die Vor- und Rücklaufemperaturen in den beiden Flüssigkeitskreisläufen sehr stark an, insbesondere die des äußeren Flüssigkeitskreislaufs. Die Vorlauftemperaturen von F1 bzw. F2 steigen ebenfalls an, da die jeweiligen Rückläufe aus F1 bzw. F2 in die Behälter fließen, aus denen dann wiederum der jeweilige Vorlauf von F1 bzw. F2 gespeist wird. Beim äußeren Fluid (F1) steigt die Vorlauftemperatur auf ca. 34,1°C, die Rücklauftemperatur auf ca. 36,4°C an, beim inneren Fluid (F2) die Vorlauftemperatur auf 27,5°C und die Rücklauftemperatur auf 27,9°C (siehe Tabelle 18). In den weiteren ca. 22 Stunden sind die Temperaturanstiege nur noch sehr gering, es stellt sich jedoch keine konstante Temperatur ein. Die operative Raumtemperatur steigt langsamer als die Fluidtemperaturen an. Der Anstieg verläuft gleichmäßig über den gesamten

Messzeitraum von ca. 23,9°C auf ca. 26,6°C. Auch hier stellt sich keine konstante Raumtemperatur ein, da die thermischen Gewinne durch die Einstrahlung die Verluste überwiegen. Es kann somit kein stationärer Zustand erreicht werden. Die stündlichen Messdaten sind in Anhang 16.5 aufgeführt.

Messungen ohne Einfärbung, mit Kühlung F2

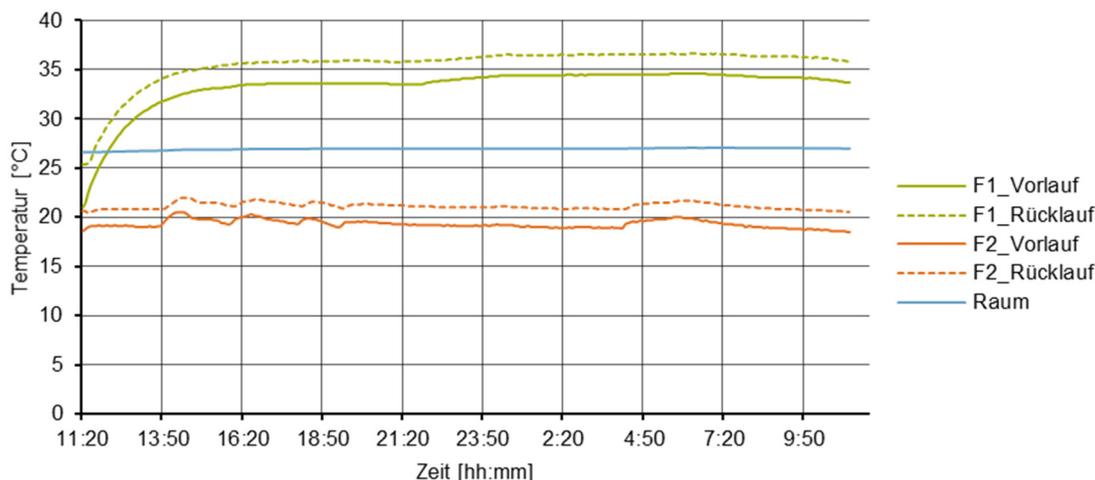


Abbildung 55: Messverlauf der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung, mit Kühlung F2 (Messung von 08.06.2011, 11:20 Uhr bis 9.06.2011, 11:15 Uhr)

	Einstr. [W/m ²]	F1_Vorl. [°C]	F1_Rückl. [°C]	F2_Vorl. [°C]	F2_Rückl. [°C]	Raum [°C]
Stationärer Bereich						
Minimalwerte	159,80	33,50	35,70	18,50	20,50	26,96
Mittelwerte	165,72	34,20	36,27	19,18	21,05	27,00
Maximalwerte	172,70	34,60	36,60	20,00	21,70	27,06
Abweichungen:						
Min.- zu Mittelwert	-5,92	-0,70	-0,57	-0,68	-0,55	-0,04
Max.- zu Mittelwert	6,98	0,40	0,33	0,82	0,65	0,06

Tabelle 19: Messergebnisse im stationären Bereich der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung, mit Kühlung F2 (Messung von 08.06.2011, 11:20 Uhr bis 9.06.2011, 11:15 Uhr)

Wie in Abbildung 55 ersichtlich, steigt die Temperatur des äußeren Fluids in den ersten ca. 6 Stunden stark an und bleibt in den folgenden ca. 15 Std. relativ konstant (siehe auch Anhang 16.5). Dieser Zeitraum wird als stationärer Bereich angesetzt (siehe Tabelle 19). Die durchschnittliche Vorlauftemperatur F1 beträgt in diesem Bereich 34,20°C, die Rücklauftemperatur 36,27°C. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf beträgt 2,07°C. Die Raumtemperatur steigt in diesem Zeitraum ebenfalls leicht an und bleibt dann nahezu konstant bei durchschnittlich 27°C. Das innere Fluid wird über den gesamten Zeitraum gekühlt. Die mittlere Vorlauftemperatur F2 beträgt 19,18°C, die Rücklauftemperatur F2 21,05°C. Die

Anfangs- und Endwerte der Vor- und Rücklauftemperaturen von F2 sind nahezu identisch. Im Verlauf der Messungen weicht die Vorlauftemperatur F2 von $-0,55^{\circ}\text{C}$ bis $+0,65^{\circ}\text{C}$ und die Rücklauftemperatur von $-0,68^{\circ}\text{C}$ bis $+0,82^{\circ}\text{C}$ von der jeweiligen Durchschnittstemperatur ab. Dies ist auf Schwankungen bei der Kühlung zurückzuführen (siehe auch (Beck, 2012, S. 44–45)). Die mittlere direkte Einstrahlung in den Raum beträgt $165,72\text{ W/m}^2$. Die Pyranometermessungen weisen Abweichungen von $-5,92\text{ W/m}^2$ bis $+6,98\text{ W/m}^2$ vom Mittelwert auf. Für die Validierung des Energiebilanzmodells werden die Mittelwerte des stationären Bereichs angesetzt.

Messungen mit Einfärbung F1 und Kühlung F2

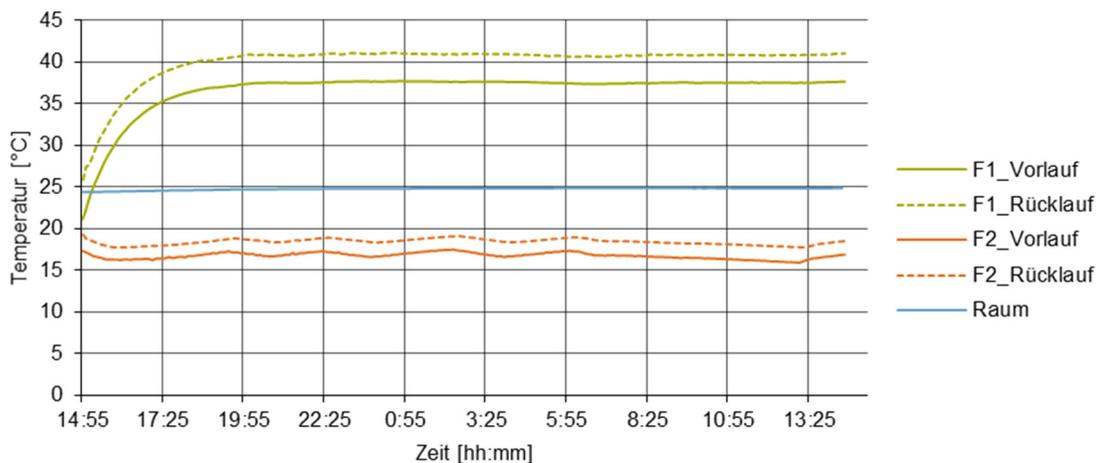


Abbildung 56: Messverlauf der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur mit Einfärbung F1 und Kühlung F2 (Messung von 03.08.2011, 14:45 Uhr bis 4.08.2011, 9:30 Uhr)

	Einstr. [W/m ²]	F1_Vorl. [°C]	F1_Rückl. [°C]	F2_Vorl. [°C]	F2_Rückl. [°C]	Raum [°C]
Stationärer Bereich						
Minimalwerte	14,52	38,11	41,65	16,27	17,71	23,87
Mittelwerte	15,05	38,21	41,81	16,40	17,79	23,92
Maximalwerte	15,59	38,30	41,97	16,56	17,88	23,96
Abweichungen:						
Min.- zu Mittelw.	-0,53	-0,10	-0,16	-0,13	-0,08	-0,04
Max.- zu Mittelw.	0,54	0,09	0,16	0,16	0,09	0,04

Tabelle 20: Messergebnisse im stationären Bereich der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur mit Einfärbung F1 und Kühlung F2 (Messung von 03.08.2011, 14:45 Uhr bis 4.08.2011, 9:30 Uhr)

Im stationären Bereich der letzten ca. 4 Std. liegt die durchschnittliche Vorlauftemperatur von F1 bei $38,21^{\circ}\text{C}$, die Rücklauftemperatur bei $41,81^{\circ}\text{C}$ (siehe Abbildung 56). Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf beträgt $3,6^{\circ}\text{C}$. Die durchschnittliche Vorlauftemperatur des gekühlten, inneren Fluids F2 beträgt $16,40^{\circ}\text{C}$, die Rücklauftemperatur $17,79^{\circ}\text{C}$ und die

Temperaturdifferenz $1,38^{\circ}\text{C}$. Die Raumtemperatur bleibt über den gesamten Zeitraum nahezu konstant bei durchschnittlich ca. $23,9^{\circ}\text{C}$. Die mittlere direkte Einstrahlung in den Raum beträgt $15,05 \text{ W/m}^2$. Die stündlichen Messdaten sind in im Anhang 16.5 aufgeführt.

5.2.3 Unsicherheiten bei den experimentellen Untersuchungen

Kühlung

Die beiden Fluide F1 und F2 werden über Wärmetauscher gekühlt. Die Kühlung wird über ein Kühlsystem für das gesamte Laborgebäude verbraucherabhängig geregelt. Steigt der Kühlbedarf in anderen Bereichen des Gebäudes an, reduziert sich die Kühlleistung für die Fluidglasversuche. In diesem Fall steigen die Temperaturen des gekühlten Fluids an, z.B. in Abbildung 55 ist. Durch die Bildung eines Mittelwerts des stationären Zustands über einen längeren Zeitraum werden diese Schwankungen ausgeglichen.

Einstrahlung

Die Pyranometermessungen weisen starke Schwankungen von bis zu $\pm 4\%$ auf (siehe Abbildung 53). Auch in diesem Fall wird durch die Bildung eines Mittelwerts über einen Messzeitraum versucht, einen stationären Zustand abzubilden. Darüber hinaus liegen keine exakten Aussagen über die spektrale Zusammensetzung der künstlichen Sonne vor. Für die Validierung können Unsicherheiten und Abweichungen bei Transmission, Reflexion und Absorption entstehen, da die Modelle mit den exakten spektralen Wellenlängenanteilen nach EN 410 rechnen.

Windgeschwindigkeiten

Im Prüfstand sind keine Windmesser installiert. Aus diesem Grund können die Windgeschwindigkeiten an der Fassade innen und außen nicht gemessen werden. Eine Überprüfung der angenommenen Wärmeübergangskoeffizienten in der Modellierung kann somit nicht erfolgen.

Rückreflexion

Im Prüfaufbau kann der aus dem Innenraum rückreflektierte, direkte Strahlungsanteil in den Fluidglasaufbau nicht gemessen werden. Der durch den vom Innenraum in den Verglasungsaufbau transmittierten Strahlungsanteil wird die Absorption in den Fluidglasschichten erhöhen, jedoch kann dieser Anteil nicht exakt quantifiziert werden.

Farbkonzentration



Abbildung 57: Fluidglas mit eingefärbtem inneren Fluidglaskreislauf (F2) im Modellraumprüfstand

Wie in Abbildung 57 zu sehen ist, lagert sich der Farbstoff z.T. unregelmäßig an den Scheiben des Fluidglases ab. Darüber hinaus kommt es zu Ablagerungen im Kreislaufsystem. Dadurch kann die Farbkonzentration im Fluid nicht exakt bestimmt, sondern nur über die mit dem Pyranometer gemessene Strahlungstransmission abgeschätzt werden.

Ablagerungen

Im Verlauf der Versuche kommt es zu Korrosion an den Wärmetauschern. Daraufhin wird Leitungswasser anstelle von deionisiertem Wasser verwendet. Dies stellt sich als sehr kalkhaltig und mit Mikroorganismen versetzt heraus. Trotz Zugabe von Chlor und Antialgen setzen sich die Düsenbänder mit Kalk zu und es kommt zur Ausbreitung von Mikroorganismen. Durch Zugabe von Salzsäure wird das Fluidglas gereinigt, wie in der Bildabfolge Abbildung 58 zu sehen ist. Im Zuge der Reinigung korrodiert das Aluminium-Düsenband (siehe schwarze Ablagerungen am Düsenband). In geringerem Ausmaß kommt es auch zu Kalkablagerungen und Verunreinigungen auf den Scheiben. Dies ist voraussichtlich für die Reduktion der Transmission im Verlauf der Messungen verantwortlich, wie in Tabelle 17 zu sehen ist.

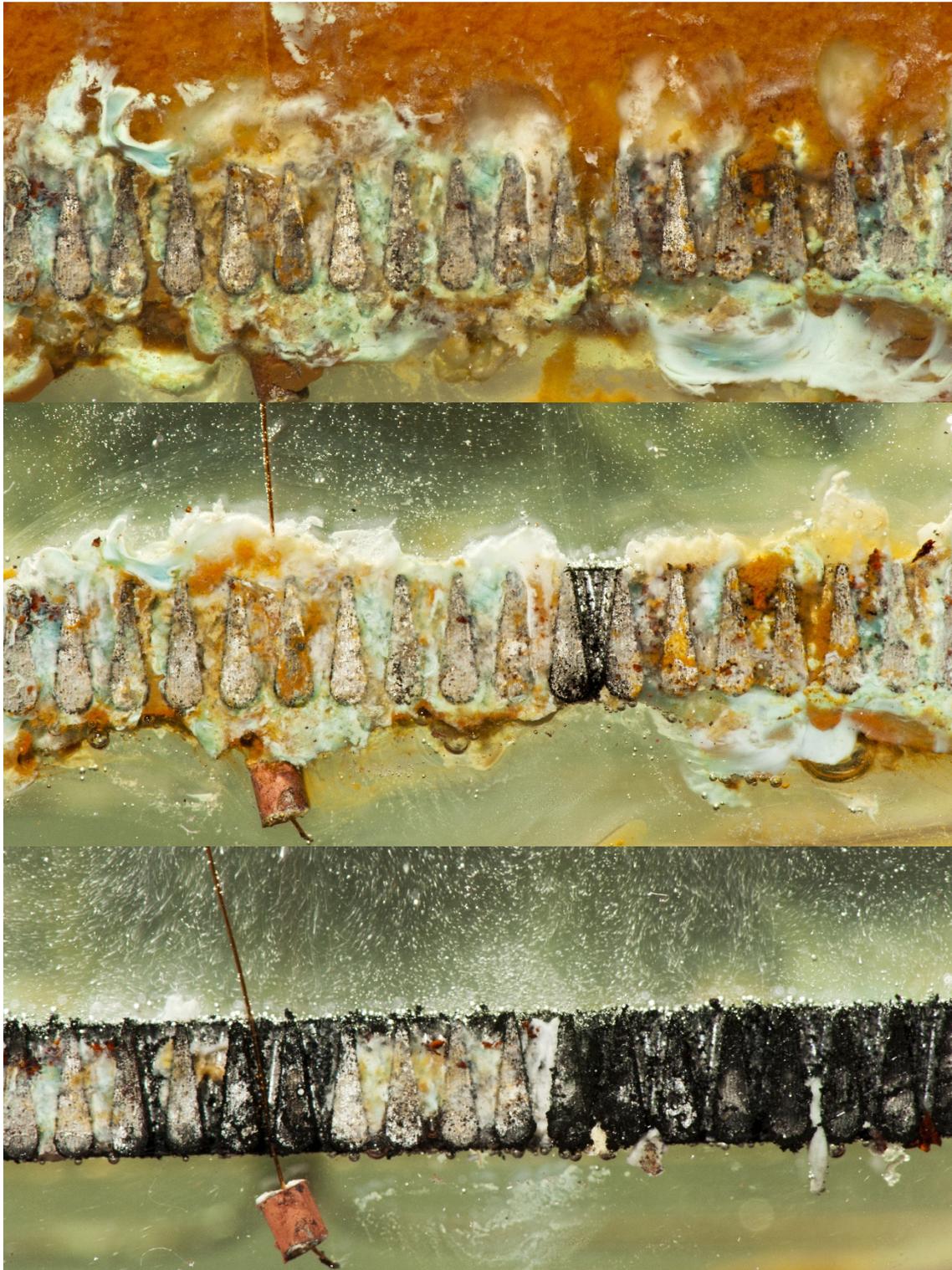


Abbildung 58: Reinigungsvorgang von Ablagerungen am Düsenband im flüssigkeitsdurchströmten Scheibenzwischenraum (Fotos: Heinrich Kleeberger)

5.2.4 Diskussion und Fazit

Trotz der genannten Schwierigkeiten sind aussagekräftige Messergebnisse entstanden. Es zeigt sich, dass ohne Einfärbung und ohne Kühlung der Fluidkreisläufe kein konstanter Zustand hergestellt werden kann, d.h. die Raumtemperatur und die Fluidtemperaturen steigen kontinuierlich an. Der Fensterflächenanteil in der Fassade ist mit ca. 10% sehr gering, jedoch wird über einen Zeitraum von bis zu 24 Stunden mit einer Strahlungsleistung von ca. 630 W/m² senkrecht eingestrahlt, was zu sehr großen solaren Gewinnen führt. Wird der innere Kreislauf gekühlt, stellen sich wiederum konstante Temperaturen ein, auch mit klaren Flüssigkeiten. Die Kühlfunktion des Fluidglases hat Auswirkungen auf die Raumtemperatur. Wird zusätzlich das äußere Fluid eingefärbt, kann die Raumtemperatur deutlich von ca. 27°C auf ca. 24°C gesenkt werden. Die Funktion des Überhitzungsschutzes durch Einfärben des Fluids ist damit ebenfalls nachgewiesen. In allen Fällen sind die Rücklauftemperaturen höher als die Vorlauftemperaturen, sowohl im äußeren als auch im inneren Fluid. Mit dem Fluidglaskreislauf kann Energie abgeführt werden. Darüber hinaus steigt die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf bei eingefärbtem, äußerem Fluid von ca. 2,1°C auf ca. 3,6°C an. Die Effizienz der Solarkollektorfunktion steigt demnach wie erwartet mit der Einfärbung an.

Die experimentellen Untersuchungen liefern konstante Temperaturen für die Vor- und Rücklauftemperaturen des inneren und äußeren Fluids und für die Raumtemperatur. Die jeweiligen Mittelwerte können als stationäre Zustände für die Validierung des Energiebilanzmodells herangezogen werden.

5.3 Zusammenfassung und Anmerkungen

Die experimentellen Untersuchungen liefern weiter verwendbare Ergebnisse für erste Validierung der Fluidglas-Modelle. Das Strahlungsmodell mit klarer Fluidfüllung kann mit den Messergebnissen aus den Spektrometermessungen⁶⁸ validiert werden, das Energiebilanzmodell mit den Ergebnissen aus dem Modellraumprüfstand⁶⁹.

⁶⁸ Da die Spektrometermessungen Unsicherheiten aufweisen, sollten in weiteren Forschungsprojekten zusätzliche Messungen durchgeführt werden bei denen neben der Transmission auch die Reflexion gemessen werden kann. Mit diesen Messergebnissen sollte das Strahlungsmodell zusätzlich validiert werden.

⁶⁹ Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts „FLUIDGLASS“ wurden am CEA-INES weitere Messungen im Solarprüfstand durchgeführt. Das SimulationX-Modell, das auf den EES-Modellen basiert, wurde mit den Messungen validiert. Die Validierung weist eine gute Übereinstimmung auf (siehe Kapitel 8).

6 Validierung Fluidglasmodelle

Bei den Validierungen des Strahlungs- und des Energiebilanzmodells werden im ersten Schritt Fluidglasaufbauten ohne Fluidfüllung mit anerkannter Standardsoftware validiert. Im nächsten Schritt werden Fluidglasaufbauten mit klarer und eingefärbter Fluidfüllung mit den Messergebnissen verglichen.⁷⁰

6.1 Validierung Strahlungsmodell

Alle Modellierungen und Simulationen der Glasaufbauten sind für die Glasmitte berücksichtigt, d.h. ohne Einfluss des Randverbundes und des Fensterrahmens.

Zur allgemeinen Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse und zur Möglichkeit der Validierung mit der offiziell zugelassenen Software Optics (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013) und Window (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016b) werden nur Gläser verwendet, die in der International Glazing Database IGDB (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016a) vorhanden sind. Es werden die physikalisch geeignetsten Gläser (z.B. Weißgläser) und nicht die kostengünstigsten Verglasungsaufbauten untersucht. Eine ev. nicht mögliche Vorspannbarkeit der Beschichtungen wird vernachlässigt. Verglasungsaufbauten mit Verbundsicherheitsglas werden nicht simuliert, auch wenn dies für raumhohe Verglasungen im Einbau vorgesehen werden müsste, da die Modellierung von Verbundgläsern zu Ungenauigkeiten in den Ergebnissen führen kann. Sollten entsprechende Gläser eingebaut werden, müssten Herstellerangaben für die Glaseigenschaften bereitgestellt werden.

Für die Simulationen werden Gläser von Saint-Gobain Glass verwendet, es könnten jedoch auch Gläser anderer Hersteller, die in der IGDB zur Verfügung stehen, nach derselben Methode berechnet werden. Sowohl für den Verglasungsaufbau ohne Fluidfüllung (LGGL) (siehe Tabelle 21) als auch für den Fluidglasaufbau mit Fluidfüllung (FGGF) (siehe Tabelle 27) wird folgender Aufbau festgelegt:

⁷⁰ Alle Berechnungen und Messungen erfolgen für den Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 2500 nm.

	Zonen (Z)			
	Nr.	Beschreibung	Herstellerbezeichnung	Dicke [mm]
<p>Das Diagramm zeigt den Aufbau einer Fünffachverglasung (Z1 bis Z10) von außen nach innen. Die Zonen sind durch vertikale Linien getrennt. Zonen 4 und 7 sind durch gestrichelte rote Linien hervorgehoben. Die Zonen sind wie folgt beschriftet: Z 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. Die Begriffe 'außen' und 'innen' sind an den entsprechenden Enden des Aufbaus platziert.</p>	Z2	Weißglas	SSG DIAMANT®	6
	Z3	Luft		2
	Z4	Weißglas mit Low-E-Beschichtung (Pos. 4)	SSG PLANITHERM ULTRA N DIAMANT®	6
	Z5	Gas		12
	Z6	Weißglas	SSG DIAMANT®	6
	Z7	Gas		12
	Z8	Weißglas mit Low-E-Beschichtung (Pos. 7)	SSG PLANITHERM ULTRA N DIAMANT®	6
	Z9	Luft		2
	Z10	Weißglas	SSG DIAMANT®	6

Tabelle 21: Fünffachverglasungsaufbau LGGL (FGGF ohne Fluid)

Die Validierung des Strahlungsmodells ohne Fluidfüllung, d.h. von Standard- Isolierverglasungen, wird mit offiziell zugelassener Software durchgeführt. Die spektralen Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade im Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 2500 nm für senkrechte Einstrahlung werden mit der Software Optics nach EN 410 und die winkelabhängigen, solaren Werte nach ISO 15099 mit der Software Window validiert.

Für die Validierung der Fluidgläser mit Fluidfüllung kann auf keine bestehende Software zurückgegriffen werden. Es werden Literaturwerte für den spektralen Extinktionskoeffizient k und die Brechungsindizes n von Wasser eingesetzt. Die Berechnungsergebnisse werden den Messergebnissen aus den Spektrometernmessungen an der Interstaatlichen Hochschule für Technik in Buchs NTB gegenübergestellt.

Fluidgläser mit eingefärbtem Fluid können im Rahmen dieser Arbeit nicht validiert werden. Es liegen weder Literaturwerte für die optischen Eigenschaften der gewählten Einfärbungen vor noch können Spektrometernmessungen mit sowohl Transmissions- als auch Reflexionsmessungen durchgeführt werden. Mithilfe der Ergebnisse aus den Spektrometernmessungen an der NTB werden die Ergebnisse aus dem Strahlungsmodell auf Plausibilität überprüft. Für die Modellierung wird vereinfacht angenommen, dass sich der Brechungsindex bei eingefärbtem Wasser gegenüber klarem Wasser nicht verändert. Die Erhöhung der Absorption im Fluid durch die Einfärbung wird über eine Veränderung des Extinktionskoeffizienten berechnet⁷¹.

⁷¹ Im Rahmen der Arbeit konnten keine genaueren Spektrometernmessungen durchgeführt werden. Um eine ev. Beeinflussung des Brechungsindex durch die Einfärbung nachweisen zu können, müssten Messungen durchgeführt werden, bei denen die Transmission und die Reflexion bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln und unterschiedlichen Farbkonzentrationen gemessen werden. Es wird für das Modell vereinfacht angenommen, dass sich aufgrund der nur geringen Farbkonzentrationen (max. 3% vol.) der Brechungsindex nicht verändert. Die erhöhte Absorption in der Fluidschicht durch die Einfärbung wird über die Erhöhung des spektralen Extinktionskoeffizienten des Fluids in der Modellierung berücksichtigt. Eine mögliche Veränderung der Reflexion an der Grenzfläche zwischen Glas und Fluidschicht durch eine ev. Veränderung des Brechungsindex durch die Einfärbung wird im Modell nicht berücksichtigt.

6.1.1 Validierung ohne Fluidfüllung

Die Berechnung im Strahlungsmodell erfolgt in zwei Schritten.

Im ersten Schritt werden für die jeweiligen Einfachverglasungen die spektralen Transmissions- und Reflexionsgrade für senkrechte Einstrahlung mithilfe der Software Optics aus der IGDB ausgelesen und auf 88 Wellenlängenschritte im Wellenlängenbereich zwischen 300 und 2500 nm gemäß EN 410 Tabelle 1 und 2 (DIN EN 410, S. 23–24) (siehe auch Anhang 16.1) reduziert. Mit diesen Eingabewerten werden im Strahlungsmodell die wellenlängenabhängigen Brechungsindizes und Extinktionskoeffizienten berechnet. Bei beschichteten Gläsern wird dieser Schritt einmal für Beschichtung auf Position 1, d.h. zum Außenraum zeigend und einmal für Beschichtung auf Position 2, d.h. zum Innenraum zeigend, durchgeführt. Es ergeben sich, je nach Strahlrichtung, unterschiedliche spektrale Brechungsindizes bzw. Extinktionskoeffizienten. Dies wird im Strahlungsmodell, analog zum von Rubin beschriebenen asymmetrischen, monolithischen Modell (Rubin et al., 1999, S. 270–271) berücksichtigt.

Im zweiten Schritt werden im Strahlungsmodell mit den Eingabewerten spektrale Brechungsindizes und Extinktionskoeffizienten für einzelne Gläser die spektralen Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade für Einfach- und Mehrfachverglasungen berechnet⁷². Aus diesen Spektralwerten werden die solaren und visuellen Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach EN 410 für senkrechte und nach ISO 15099 für winkelabhängige Einstrahlung berechnet.

Exemplarisch werden im Folgenden die Validierungen der Gläser aus den Verglasungsaufbauten des Prototypen aus den Spektrometermessungen mit Basacid® Schwarz X40, des Fluidglasaufbaus FGGF und der Referenzszenarien dargestellt.

Validierung ohne Fluidfüllung mit senkrechter Einstrahlung

Im Prototypen für die Spektrometermessungen mit Basacid® Schwarz X40 werden unbeschichtete Floatgläser PLANILUX® von Saint-Gobain mit einer Dicke von 8 mm verwendet. Der Scheibenzwischenraum beim Zweifachaufbau beträgt 2 mm.

⁷² Wenn nicht anders angegeben ist die Reflexion zum Außenraum angegeben.

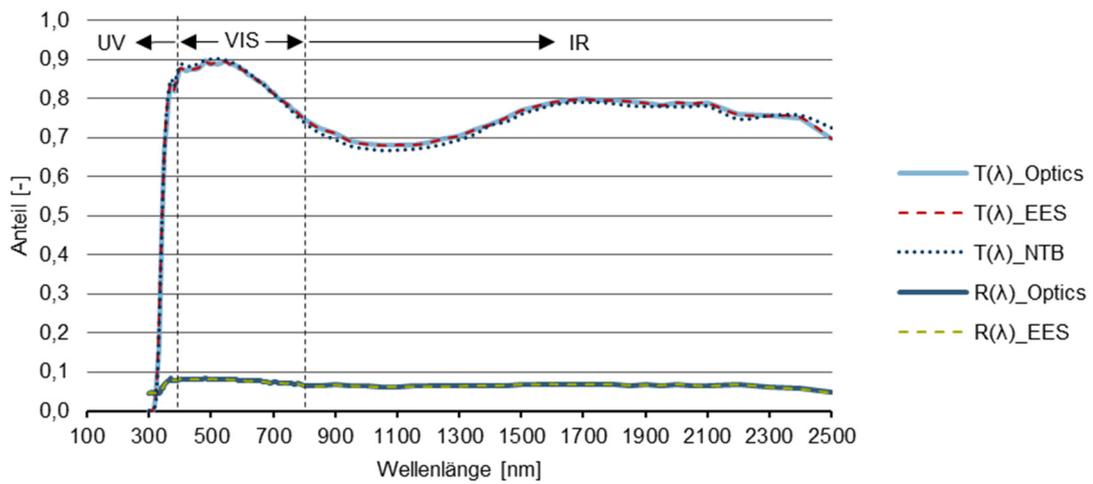


Abbildung 59: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade einer Einfachverglasung aus SSG PLANILUX® 8 mm bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell, Optics und Spektrometermessung NTB

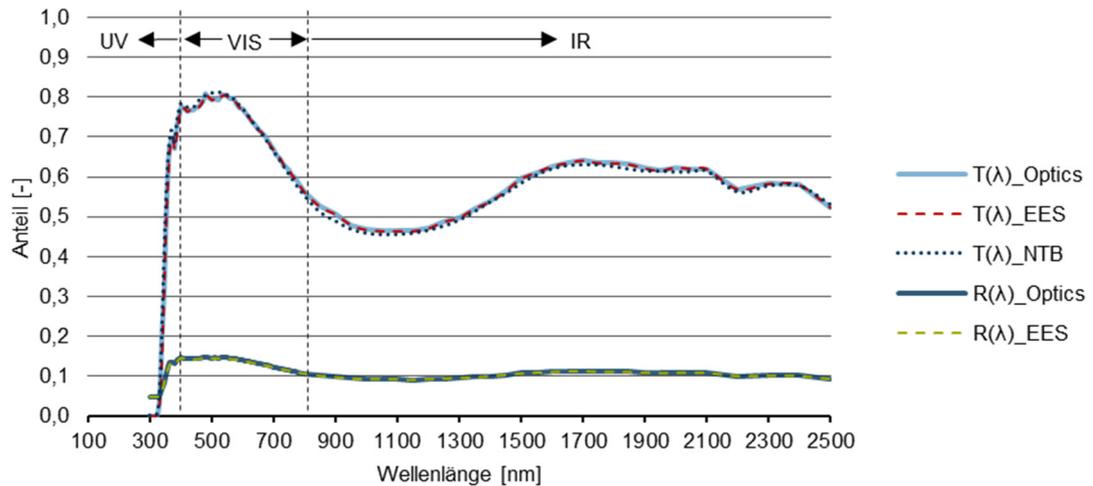


Abbildung 60: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade einer Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell, Optics und Spektrometermessung NTB

		EES (EN 410)	Optics (EN 410)	NTB (EN 410)
SSG PLANILUX® 8 mm				
	T _{vis}	0,884	0,884	0,889
	R _{vis}	0,080	0,080	-
	T _{sol}	0,791	0,791	0,789
	R _{sol}	0,072	0,072	-

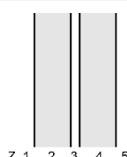
		EES (EN 410)	Optics (EN 410)	NTB (EN 410)
2 x SSG PLANILUX® 8 mm				
	Tvis	0,787	0,787	0,793
	Rvis	0,143	0,143	-
	Tsol	0,641	0,641	0,639
	Rsol	0,120	0,120	-

Tabelle 22: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 von unbeschichteten Gläsern als Einfach- und Zweifachverglasung aus SSG PLANILUX® 8 mm bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell, Optics und Messwerte NTB

Für die Simulationen des Fluidglasaufbaus werden eisenoxidarme Weißgläser verwendet, um im nicht eingefärbten Zustand die Strahlungstransmission in den Raum zu maximieren. Exemplarisch werden hierfür Gläser von Saint-Gobain verwendet. Es werden SSG DIAMANT® 6 mm unbeschichtet bzw. mit der Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N untersucht.

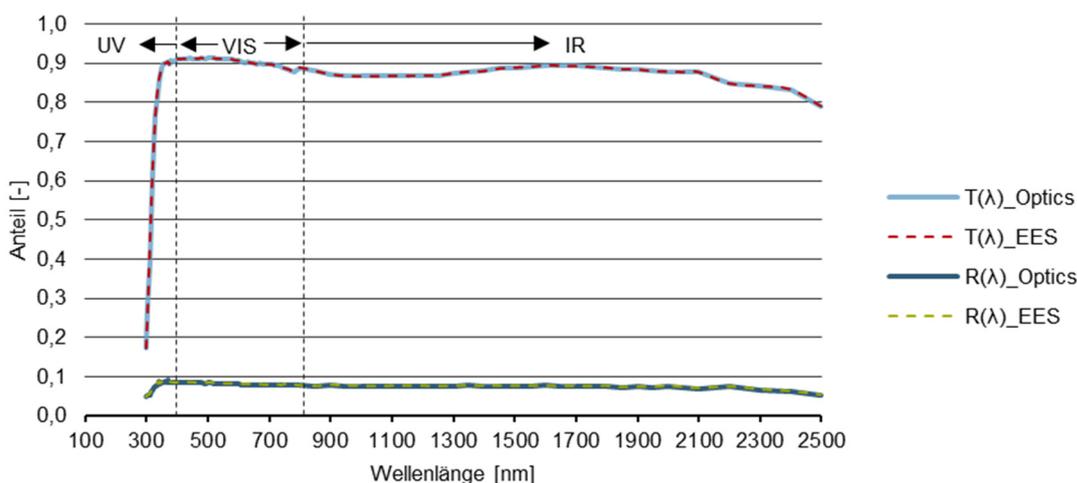


Abbildung 61: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade einer Einfachverglasung aus einmal SSG DIAMANT® 6 mm bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics

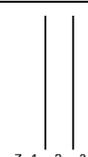
		EES (EN 410)	Optics (EN 410)
	Tvis	0,909	0,909
	Rvis	0,082	0,082
	Tsol	0,889	0,889
	Rsol	0,079	0,079

Tabelle 23: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 von unbeschichteten Einfachverglasungen SSG SSG DIAMANT® 6 mm bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Optics

Die spektralen Transmissions- und Reflexionsgrade für unbeschichtete Gläser als Einfach- oder Mehrfachverglasung stimmen im Strahlungsmodell bei senkrechter Einstrahlung mit den Ausgabewerten aus Optics exakt überein, wie in den Abbildung 59, Abbildung 60 und Abbildung

61 zu sehen ist. Die Werte für spektrale Transmission und Reflexion können dem Anhang 16.6 entnommen werden.

Die visuellen und solaren Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 für unbeschichtete Gläser entsprechen im Strahlungsmodell exakt den allgemein anerkannten Werten aus Optics, wie in Tabelle 22 und Tabelle 23 zu sehen.

Die Messergebnisse für SSG PLANILUX® aus den Spektrometermessungen an der NTB weisen, mit einer maximalen Abweichung beim Lichttransmissionsgrad nach EN 410 von 0,6%, ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung mit den Werten nach Optics auf, wie in Abbildung 59, Abbildung 60 und Tabelle 22 zu sehen ist.

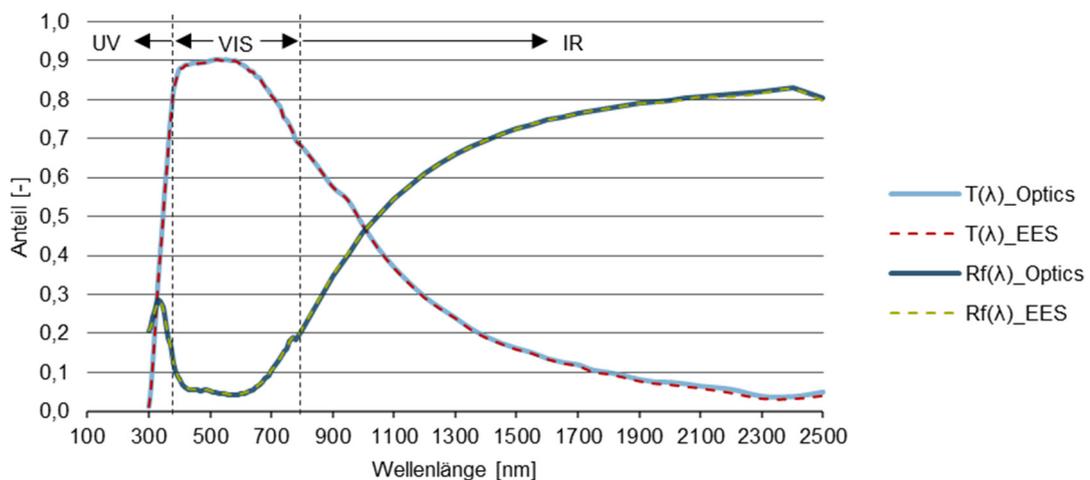


Abbildung 62: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade einer Einfachverglasung aus einmal SSG PLANITHERM® ULTRA N auf DIAMANT® 6 mm Position 1 bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics

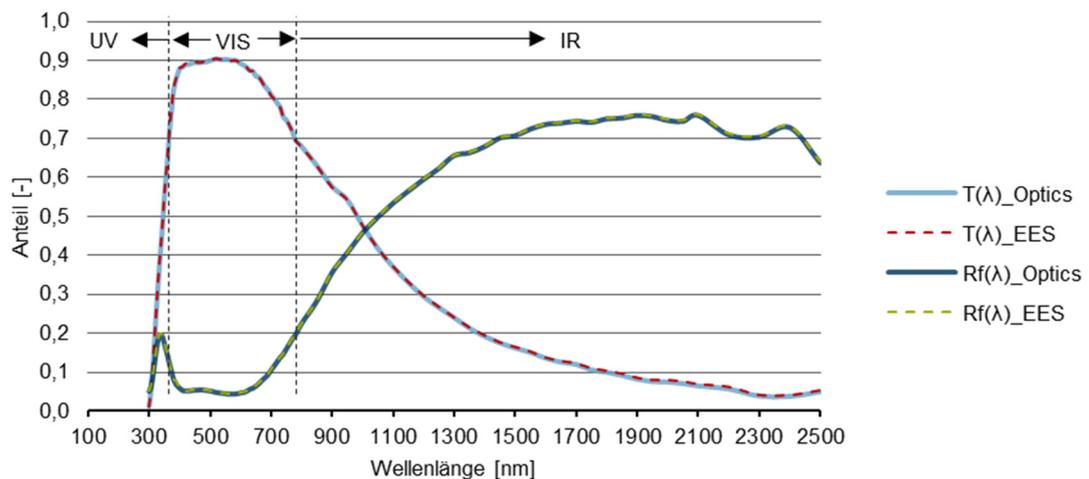


Abbildung 63: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade einer Einfachverglasung aus einmal SSG PLANITHERM® ULTRA N auf DIAMANT® 6 mm Position 2 bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics

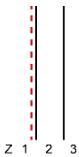
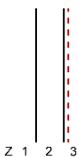
		EES (EN 410)	Optics (EN 410)
SSG PLANITHERM ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos. 1)			
	Tvis	0,898	0,898
	Rvis	0,046	0,046
	Tsol	0,658	0,659
	Rsol	0,258	0,257
SSG PLANITHERM ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos. 2)			
	Tvis	0,898	0,898
	Rvis	0,048	0,048
	Tsol	0,658	0,659
	Rsol	0,256	0,249

Tabelle 24: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 von beschichteter⁷³ Einfachverglasung aus SSG DIAMANT® 6 mm mit Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N auf Position 1 bzw. 2 bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics

Die spektralen Transmissions- und Reflexionsgrade für die in der Fluidglassimulation verwendeten, beschichtete Einfachverglasungen stimmen im Strahlungsmodell bei senkrechter Einstrahlung mit den Ausgabewerten aus Optics weitestgehend überein, wie in Abbildung 62 und Abbildung 63 zu sehen ist. Die Werte für spektrale Transmission und Reflexion können dem Anhang 16.6 entnommen werden. Die visuellen und solaren Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 für diese beschichteten Gläser stimmen im Strahlungsmodell mit den allgemein anerkannten Werten aus Optics ebenfalls weitestgehend überein, wie in Tabelle 24 zu sehen ist. Die maximale Abweichung beträgt 0,07% beim solaren Reflexionsgrad mit Beschichtung auf Position 2.

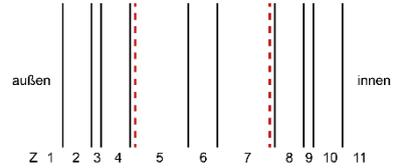
		EES (EN 410)	Optics (EN 410)
Verglasungsaufbau LGGL (FGGF ohne Fluid)			
	Tvis	0,628	0,628
	Rvis	0,242	0,242
	Tsol	0,402	0,404
	Rsol	0,380	0,380

Tabelle 25: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 für den Verglasungsaufbau LGGL (FGGF ohne Fluid) aus SSG DIAMANT® 6 mm ohne bzw. mit Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N auf Position 4 bzw. 7 bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics

⁷³ Gestrichelte Linien in den Zeichnungen für den Verglasungsaufbau stellen Beschichtungen dar.

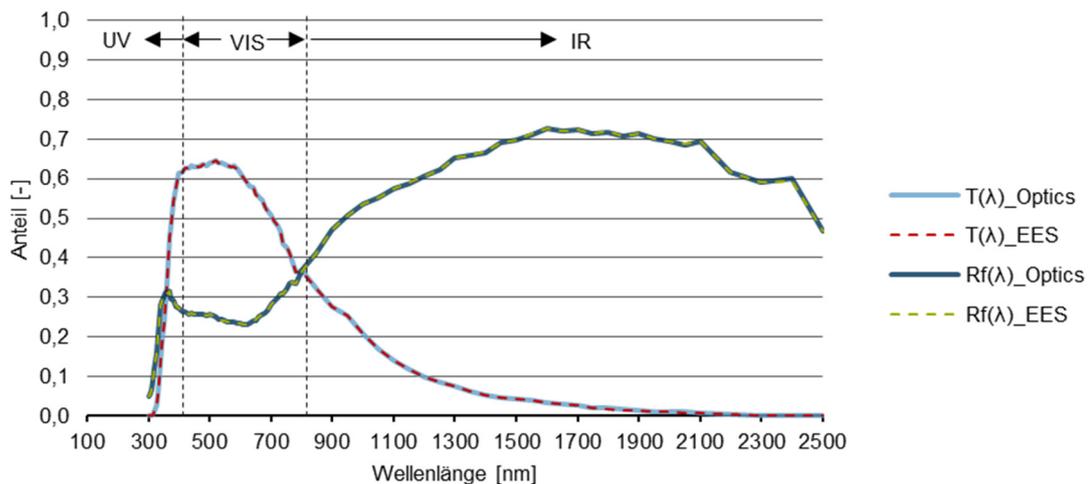


Abbildung 64: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade für den Verglasungsaufbau LGGL (FGGF ohne Fluid) aus SSG DIAMANT® 6 mm ohne bzw. mit Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N auf Position 4 bzw. 7 bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics

Die spektralen Transmissions- und Reflexionsgrade für den Verglasungsaufbau Fluidglas ohne Fluid im SZR stimmen im Strahlungsmodell mit den Ausgabewerten aus Optics bei senkrechter Einstrahlung exakt überein, wie in Abbildung 64 zu sehen ist. Die Werte für spektrale Transmission und Reflexion können dem Anhang 16.6 und entnommen werden.

Die visuellen und solaren Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 für diesen Aufbau sind im Strahlungsmodell nahezu identisch mit den allgemein anerkannten Werten aus Optics, wie in Tabelle 25 zu sehen ist. Das Strahlungsmodell wird für senkrechten Einstrahlung als ausreichend genau für weitere Validierungsschritte eingeschätzt.

Validierung ohne Fluidfüllung mit winkelabhängiger Einstrahlung

Im nächsten Schritt wird die Übereinstimmung der Berechnungen im Strahlungsmodell (EES) für winkelabhängige Einstrahlungen mit den offiziell anerkannten Ausgabewerten aus der Software Window verglichen. Die Ausgabewerte sind in 10° Schritten, von 0°, d.h. senkrechte Einstrahlung, bis 90° Einstrahlungswinkel, angeben. Im Strahlungsmodell werden die spektralen Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade je Einstrahlungswinkel⁷⁴ gemäß ISO 15099 berechnet⁷⁵. In den Normen, z.B. EN 410, ISO 15099 oder ISO 9050, sind winkelabhängige Angaben zu Verglasungen nicht vorgeschrieben. Da in der Realität und in thermischen Gebäudesimulationen das Verhalten der Verglasungen bei schrägem Strahlungseinfall entscheidend ist, wird das Strahlungsmodell diesbezüglich ebenfalls untersucht. Insbesondere ab einem Einstrahlungswinkel von ca. 60° steigt der reflektierte Strahlungsanteil an den Glasoberflächen stark an. Dadurch verringert sich der Anteil der transmittierten Strahlung durch

⁷⁴ Im Strahlungsmodell kann der Einstrahlungswinkel nur bis 89,8° berechnet werden. Die Berechnungen mit 89,8° werden den Angaben in Window für 90° gegenübergestellt.

⁷⁵ Die Berechnungsmethode für die direkte, solare Transmission im Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 2500 nm entspricht ISO 15099 mit den Tabellenwerten für die globale, solare Einstrahlung nach ISO 9845-1:1992 Table 1, Spalte 2.

die Verglasungsschichten deutlich. Dies verringert sowohl die solaren Gewinne im Raum als auch die in die Fluidschichten eintretende Strahlungsintensität.

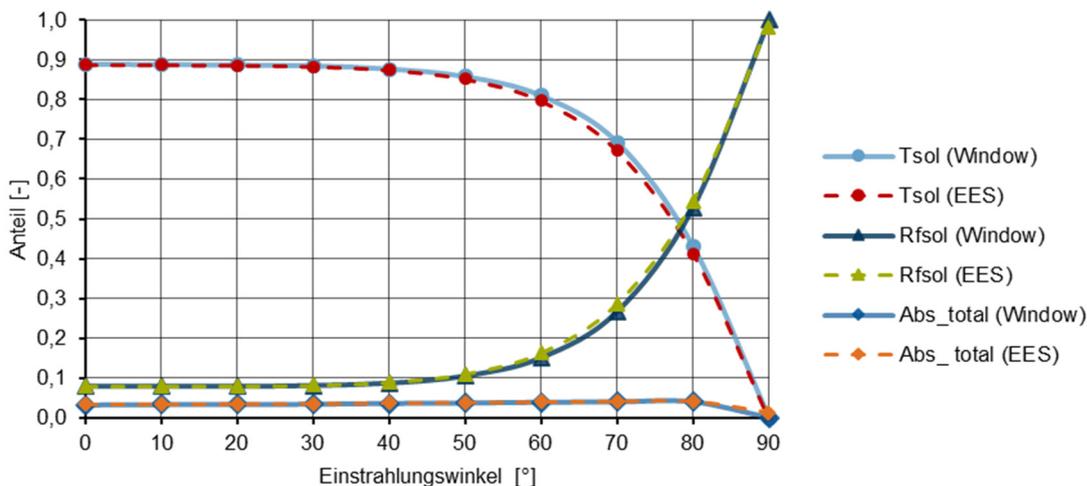


Abbildung 65: Solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade der unbeschichteten Einfachverglasung SSG DIAMANT® 6 mm bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Window

Die Ergebnisse aus dem Strahlungsmodell bei unterschiedlichen Einstrahlungswinkeln für die unbeschichtete Einfachverglasung SSG DIAMANT® 6 mm stimmen mit den Ausgabewerten aus Window gut überein, wie in Abbildung 65 und Tabelle 65 im Anhang 16.6 zu sehen ist⁷⁶. Abweichungen bei der Transmission von - 0,1%, d.h. im Strahlungsmodell transmittiert 0,1% weniger Strahlung in den Innenraum, sind bei einer senkrechten Einstrahlung gegeben, auch wenn bei der Validierung mit Optics nach EN 410 keine Abweichungen auftreten. Eine entsprechende gegenläufige Abweichung von + 0,1% ist bei der Absorption zu beobachten. Beim Reflexionsgrad gibt es keine Abweichung bei senkrechter Einstrahlung. Bis zu einem Einstrahlungswinkel von 20° bleiben diese geringfügigen Abweichungen bestehen. Ab ca. 50° nehmen die Abweichungen beim Transmissions- und Reflexionsgrad deutlich zu. Die maximalen Abweichungen des Reflexionsgrades treten bei einem Einstrahlungswinkel von 60° mit 1,9% bzw. des Transmissionsgrades bei 70° mit -2,1% auf. Die mittlere Abweichung bei der solaren Transmission beträgt - 0,7% bei der Reflexion 0,6 % und bei der Absorption 0,1 %.

⁷⁶ Die tabellarischen Aufstellungen zu allen Grafiken in diesem Kapitel befinden sich im Anhang 16.6.

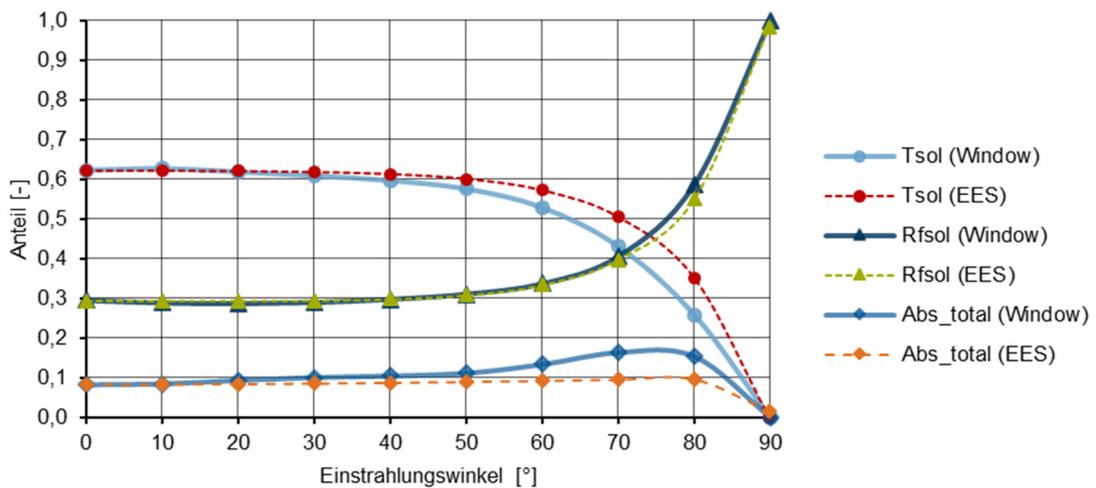


Abbildung 66: Solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade der Einfachverglasung SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos.1) bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Window

Wie in Abbildung 66 (siehe auch Tabelle 66 im Anhang 16.6) zu erkennen ist, ist die Übereinstimmung des Strahlungsmodells mit Window bei beschichteten Verglasungen deutlich schlechter als bei unbeschichteten Verglasungen. Bis 30° Einstrahlungswinkel ist die Übereinstimmung noch gut, bei größeren Einstrahlungswinkeln steigt die Abweichung beim Transmissions- und dem Absorptionsgrad jedoch deutlich an. Die maximale Abweichung des Transmissionsgrades von 9,4 % ist bei einem Einstrahlungswinkel von 80° zu beobachten. Die Abweichung bei der Absorption steigt ab 30° stark an, bis zum Maximum von 6,8% bei 70° Einstrahlungswinkel. Der Verlauf der Absorption bei beschichteten Gläsern entspricht im Strahlungsmodell dem von unbeschichteten Gläsern. Das Strahlungsmodell bildet den Einfluss der Beschichtungen bei steilen Einstrahlungswinkeln nicht ab. Bei der Einfachverglasung SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm mit Beschichtung auf Pos. 2 entsprechen die Abweichungen in etwa den Abweichungen wie bei Beschichtung auf Pos. 1, siehe Anhang 16.6. Wie in Abbildung 67 (siehe auch Tabelle 68 im Anhang 16.6) zu sehen ist, entspricht der Verlauf der Abweichung für den Gesamtaufbau dem Verlauf für die beschichtete Einfachverglasung. Die Abweichungen sind jedoch geringer, und die maximalen Abweichungen sind bei einem Einstrahlungswinkel von 70° zu beobachten. Die maximale Abweichung beträgt 7,5% für den totalen Absorptionsgrad aller Glasschichten bzw. 6% bei der ersten beschichteten Verglasung von außen (Zone 4). Der Transmissionsgrad weicht maximale 4,1%, der Reflexionsgrad 3,4% ab.

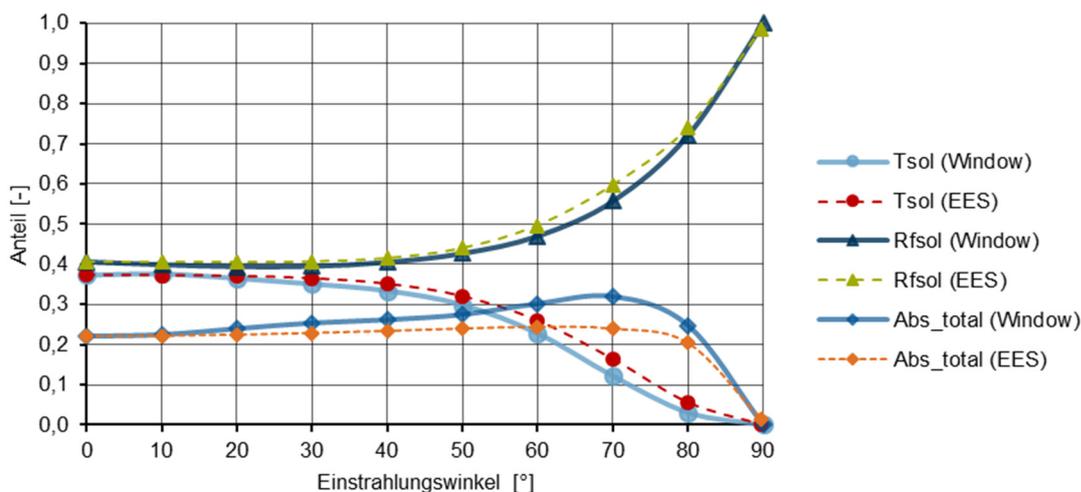


Abbildung 67: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 der Fünffachverglasung LGGL (FGGF ohne Fluid) aus SSG DIAMANT® 6 mm ohne bzw. mit Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N auf Position 4 bzw. 7 bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Window

Fazit der Validierung ohne Fluidfüllung

Die im Strahlungsmodell berechneten solaren Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade bei senkrechter Einstrahlung weisen eine sehr gute Übereinstimmung mit den offiziellen Angaben nach Optics auf. Das Strahlungsmodell wird für senkrechte Einstrahlung als ausreichend genau angesehen. Bei winkelabhängiger Einstrahlung weisen die Berechnungen im Strahlungsmodell bei unbeschichteten Gläsern ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den offiziell akzeptierten Werten aus Window auf. Bei beschichteten Gläsern weichen die Ergebnisse ab einem Einstrahlungswinkel von ca. 50% zunehmend ab. Der Einfluss der Beschichtung wird bei steigenden Winkel nicht ausreichend genau abgebildet. Dies ist voraussichtlich auf die fehlende Modellierung der Interferenzen an den dünnen Beschichtungsschichten zurückzuführen. Da im Rahmen der Arbeit keine Herstellerangaben zum Aufbau der Schichten vorliegen, kann das Strahlungsmodell diesbezüglich nicht verbessert werden (Rubin et al., 1999, 269, 272). Die Abweichungen bei der für das Fluidglas vorgesehene Fünffachverglasung ohne Fluidfüllung liegen die Abweichungen beim solaren Transmissions- und Reflexionsgrad bei maximal ca. 4%, die des Absorptionsgrads bei maximal ca. 8% bei 70° Einstrahlwinkel. Mit insgesamt ca. 50% überwiegt der Anteil der Reflexion dieser Verglasung bei einem Einstrahlwinkel von 60°. Nur etwa 20% der solaren Strahlung werden in den Raum transmittiert. Da die Abweichungen bei der Reflexion relativ gering sind, ist die in den Glasaufbau eindringende Strahlung ausreichend genau berücksichtigt. Die in den beschichteten Gläsern (Z4 und Z8) absorbierte Strahlung wird im Strahlungsmodell niedriger berechnet, die Transmission in den Raum dafür höher. Da der Einfluss der Fluide in Z3 und Z9 wie in den Spektrometernmessungen gesehen v.a. im eingefärbten Zustand mit bis zu ca. 80% reduzierter solarer Transmission sehr hoch ist, wird davon ausgegangen, dass das Modell für die Berechnungen der Glaseigenschaften auch bei winkelabhängiger Einstrahlung ausreichend genau ist, um mit den Validierungen mit Fluidfüllung fortzufahren.

6.1.2 Validierung mit klarer Fluidfüllung

Für den Aufbau des Prototypen der Spektrometermessungen an der NTB – Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8mm mit 2 mm Scheibenzwischenraum (LIL) – liefert das Strahlungsmodell bei senkrechter Einstrahlung ohne Fluidfüllung exakt die Werte aus Optics, wie in Abbildung 60 und Tabelle 22 zu sehen ist. Die Transmissionsmessungen an der NTB weisen nur geringe Abweichungen auf. Im nächsten Schritt wird im Strahlungsmodell klares Wasser im Scheibenzwischenraum modelliert und mit den Ergebnissen der Spektrometermessungen verglichen. In das Strahlungsmodell werden die spektralen Literaturwerte nach Hale (Hale & Query, 1973, S. 557) für die Brechungsindizes $n(\lambda)$ und die Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ von Wasser eingesetzt und die spektralen Transmissions-, Reflexions-, und Absorptionsgrade berechnet. Die fehlenden Wellenlängenzwischenschritte in den Literaturwerten werden kubisch interpoliert mit der Software Cubic Spline (SRS1 Software, 2016)⁷⁷. Als zusätzlicher Vergleich werden auf einem zweiten Weg die Transmissionsmessergebnissen der NTB in das Strahlungsmodell eingesetzt und daraus die Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ berechnet, um damit wiederum die spektralen Transmissions-, Reflexions-, und Absorptionsgrade für den Gesamtaufbau zu ermitteln. Auch bei dieser Methode werden die Literaturwerte nach Hale für die Brechungsindizes $n(\lambda)$ eingesetzt.

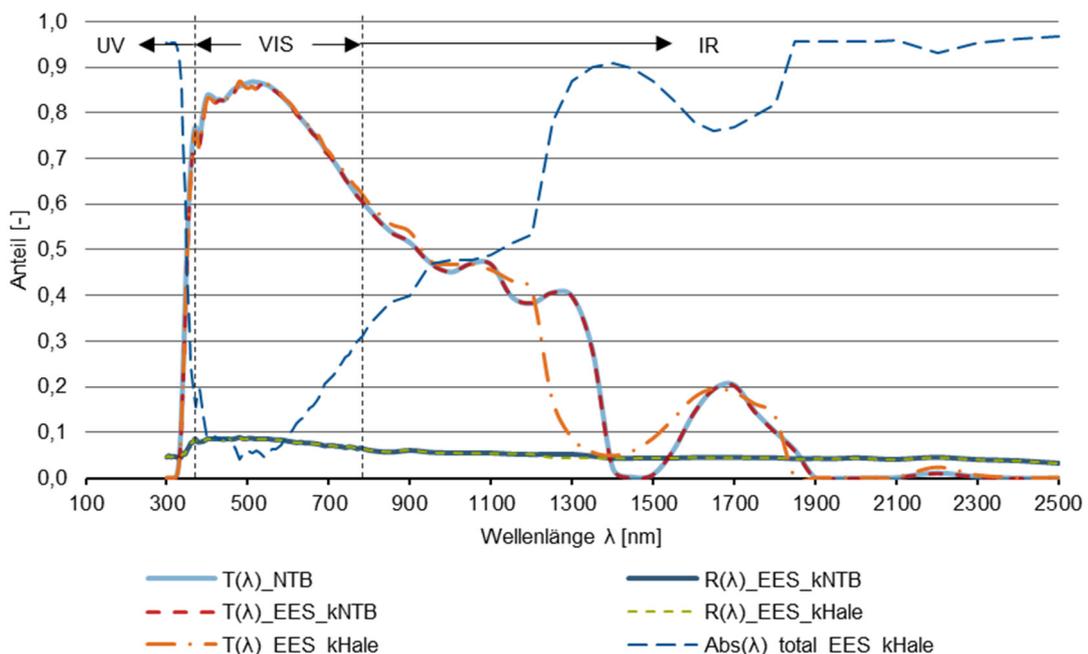


Abbildung 68: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade bei senkrechter Einstrahlung einer Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm mit klarem Wasser im 2 mm SZR; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Spektrometermessung NTB (Quelle: Eigene Darstellung z.T. mit Werten NTB)

⁷⁷ Alle kubischen Interpolationen im Rahmen dieser Arbeit wurden mit der Software SRS1 Cubic Spline for Excel 2.5.1 von SRS1 Software, L.L.C. durchgeführt.

	LwL_EES_Hale (EN 410)	LWL_EES_NTb (EN 410)	LwL_NTb (EN 410)	
2 x SSG PLANILUX® 8 mm mit Wasser im 2 mm SZR				
	Tvis	0,846	0,843	0,846
	Rvis	0,085	0,084	
	Tsol	0,610	0,612	0,615
	Rsol	0,069	0,069	
	Abs_total	0,321	0,319	
	Abs_Z2	0,135	0,135	
	Abs_Z3	0,102	0,097	
	Abs_Z4	0,084	0,086	

Tabelle 26: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade und solare Absorptionsgrade nach EN 410 einer Zweifachverglasung aus SSG PLANILUX® 8 mm mit klarem Wasser im 2 mm SZR bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Messwerte NTB

Die Validierungen des Strahlungsmodells mit den Messergebnissen aus den Spektrometermessungen an der NTB (LwL_NTb) weisen eine gute Übereinstimmung auf. Die Abweichungen für die Transmissionsgrade bei den Berechnungen mit den Literaturwerten für Wasser (LwL_EES_Hale) betragen für das solare Spektrum ca. 0,51%, für das visuelle Spektrum ca. 0,026% gegenüber den Messergebnissen. Die Abweichungen bei der Vergleichsrechnung mit den Transmissionsergebnissen aus den Spektrometermessungen (LwL_EES_NTb) betragen sowohl für das visuelle als auch für das solare Spektrum ca. 0,3% gegenüber den Messergebnissen. Das Strahlungsmodell wird aufgrund der guten Übereinstimmung auch mit Fluidfüllung bei senkrechter Einstrahlung als ausreichend genau für die weitere Bearbeitung angesehen.

Da bei den Spektrometermessungen nur die Transmission, nicht aber die Reflexionen und die Absorption gemessen werden konnten und Messfehler nicht ausgeschlossen werden können, wird im weiteren Verlauf mit den allgemein anerkannten Literaturwerten für die Extinktionskoeffizienten und die Brechungsindizes von Wasser weiter gearbeitet.

Fazit der Validierung mit Fluidfüllung

Für die weiteren Untersuchungen und Simulationen werden die beiden Fluidschichten mit den Literaturwerten für klares Wasser in den vorgesehenen Gesamtaufbau, wie in Tabelle 27 zu sehen, implementiert.

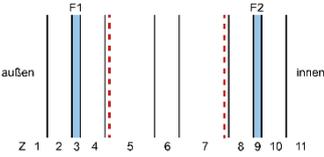
	Zonen (Z)			
	Nr.	Beschreibung	Herstellerbezeichnung	Dicke [mm]
	Z2	Weißglas	SSG DIAMANT®	6
	Z3	Fluid (F1) (Wasser klar/eingefärbt)	Einfärbung: Xfast® Schwarz 0050	2/4/6
	Z4	Weißglas mit Low-E-Beschichtung (Pos. 4)	SSG PLANITHERM ULTRA N DIAMANT® ⁷⁸	6
	Z5	Gas		12
	Z6	Weißglas	SSG DIAMANT®	6
	Z7	Gas		12
	Z8	Weißglas mit Low-E-Beschichtung (Pos. 7)	SSG PLANITHERM ULTRA N DIAMANT®	6
	Z9	Fluid (F2) (Wasser klar/eingefärbt)	Einfärbung: Xfast® Schwarz 0050	2/4/6
	Z10	Weißglas	SSG DIAMANT®	6

Tabelle 27: Fluidglasaufbau FGGF

Wie in Abbildung 69 zu sehen ist, beeinflusst das klare Wasser in den beiden Fluidschichten F1 und F2 im Wellenlängenbereich zwischen ca. 360 nm und 900 nm die Transmission und die Reflexion, nicht aber die Absorption. Wie bereits in 5.1.2 diskutiert, reduziert sich die Reflexion an den Grenzflächen bzw. erhöht sich die Transmission in diesem Wellenlängenbereich aufgrund der näher beieinander liegenden Brechungsindizes. Auf die Absorption hat Wasser in diesem Bereich keinen Einfluß. Ab ca. 900 nm nimmt die Absorption im klaren Wasser zu. Ab ca. 1300 nm wird ca. 90% der Solarstrahlung im Gesamtaufbau absorbiert. Den größten Einfluss hat dabei das äußere Fluid (F1) in Zone 3 (Z3) mit mind. 80% Absorption. Die dahinter liegenden Zonen haben nur noch geringen Einfluss, auch nicht die innenliegende Fluidschicht (F2). Ab ca. 1300 nm transmittiert mit max. 0,1% nahezu keine Strahlung durch den Gesamtaufbau und lediglich zwischen ca. 5% und 10% der Strahlung werden reflektiert.

⁷⁸ Für die Simulationen wurde die Beschichtung SSG PLANITHERM ULTRA N verwendet, da zu Beginn der Simulationen die Beschichtung SSG PLANITHERM XN in der IGDB noch nicht zur Verfügung stand. Mit der XN-Beschichtung könnte die direkte visuelle Transmission noch um ca. 2% und die solare Transmission um ca. 5% erhöht werden. Im realen Anwendungsfall von raumhohen Fluidglasfassaden müsste jedoch mind. eine VSG-Scheibe eingebaut werden. Diese würde eine Erhöhung der solaren Transmission von nur ca. 3% ermöglichen.

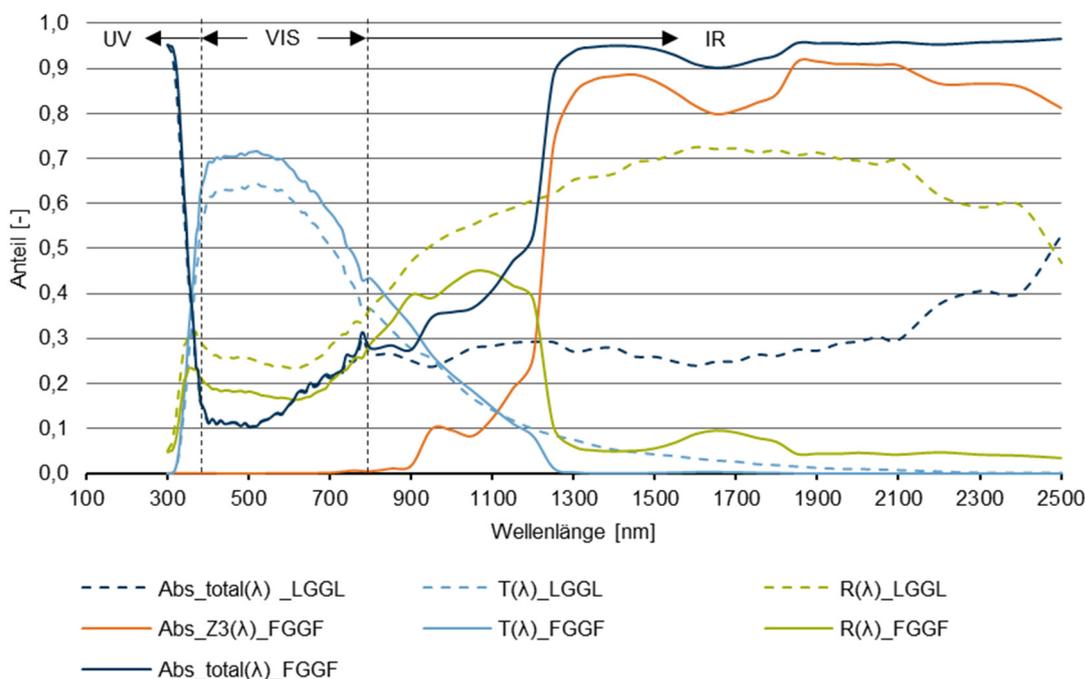


Abbildung 69: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade bei senkrechter Einstrahlung der Verglasungsaufbauten LGGL und FGGF mit klarem Wasser in F1 und F2 im 2 mm SZR; Ausgabewerte Strahlungsmodell

	FGGF (EN 410)	LGGL (EN 410)	
FGGF/LGGL mit 2 mm SZR F1 und F2			
	Tvis	0,698	0,628
	Rvis	0,172	0,242
	Tsol	0,447	0,402
	Rsol	0,223	0,380
	Abs_total	0,331	0,217
	Abs_Z2	0,037	0,044
	Abs_Z3	0,137	-
	Abs_Z4	0,082	0,097
	Abs_Z6	0,018	0,021
	Abs_Z8	0,042	0,047
Abs_Z9	0,005	-	
Abs_Z10	0,009	0,009	

Tabelle 28: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade und solare Absorptionsgrade nach EN 410 der Verglasungsaufbauten FGGF mit klarem Wasser bzw. LGGL; 2 mm SZR Zone 3 und 9; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Wie in Tabelle 28 für senkrechte Einstrahlung zu sehen ist, verbessert das Einführen von klarem Wasser im Scheibenzwischenraum die visuelle und solare Transmission der Fünffachverglasung um ca. 7% bzw. 4%. Die visuelle und solare Reflexion wird um ca. 7% bzw. 16% verringert. Klares

Wasser ist in der Lage ab einem Wellenlängenspektrum von ca. 900 nm ca. 14% der Solarstrahlung zu absorbieren.

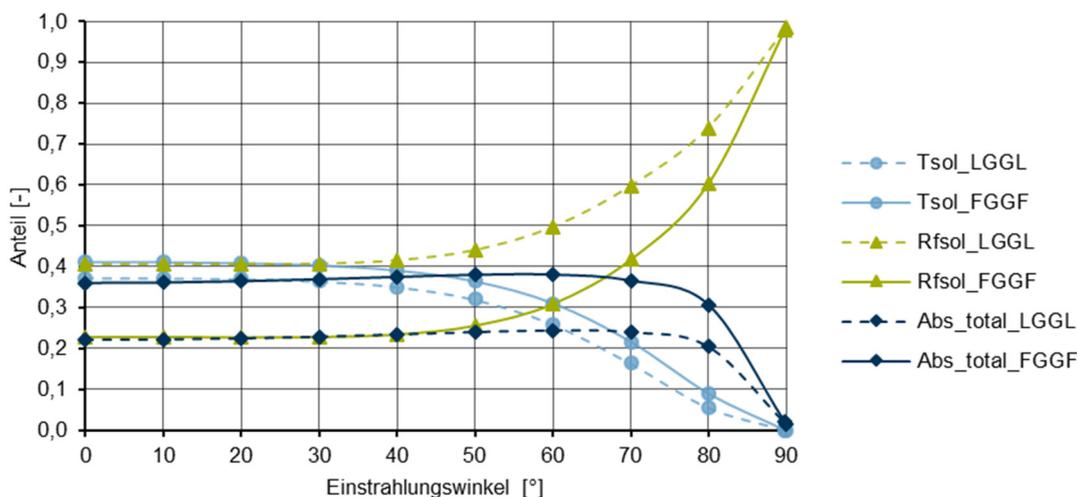


Abbildung 70: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 der Verglasungsaufbauten LGGL und FGGF bei winkelabhängiger Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Wie in Abbildung 70 zu sehen ist, ist der Verlauf der Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade bei winkelabhängiger Einstrahlung beim Gesamtaufbau mit Fluidfüllung (FGGF) vergleichbar dem mit Luft in Zone 3 und Zone 9 (LGGL). Die Transmission und v.a. die Absorption ist bei FGGF bis zu einem Einstrahlungswinkel von 90° durchgängig höher, die Reflexion deutlich geringer als bei LGGL. Auch bei FGGF steigt die Reflexion ab einem Einstrahlungswinkel von 50° stark an und überwiegt ab ca. 70°.

6.1.3 Modellerweiterung eingefärbte Fluidfüllung

Um den Strahlungsdurchgang der Solarstrahlung durch das Fluidglas in den Innenraum variieren und kontrollieren zu können, ist der Einfluss klaren Wassers nicht ausreichend (Stopper et al., 2013, S. 37–38). Aus diesem Grund muss das Wasser reversibel eingefärbt werden.

Eine Validierung des Strahlungsmodells mit eingefärbter Fluidfüllung ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Es stehen keine Herstellerangaben bzw. Literaturwerte für eingefärbte Fluide für diesen Anwendungsfall zur Verfügung. Wie in 5.1.2 beschrieben, wird der Einfluss der Einfärbung durch die Reduktion des spektralen Transmissionsgrads gegenüber klarem Wasser im Strahlungsmodell berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Einfärbung keinen Einfluss auf die Brechungsindizes $n(\lambda)$, sondern nur auf die Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ von Wasser hat.

Aufgrund der guten Übereinstimmung des Strahlungsmodells für Verglasungsaufbauten ohne Fluid bzw. mit klarem Fluid im SZR bei senkrechter Einstrahlung wird davon ausgegangen, dass das Strahlungsmodell den Einfluss der Einfärbung mit dieser Methode abbilden kann.

Wie in 5.1.3 beschrieben, hat sich die Einfärbung mit Xfast® Schwarz 0050 als am geeignetsten herausgestellt. Aus diesem Grund wird diese Einfärbung im weiteren Verlauf untersucht.

Aus den Messergebnissen an der NTB für die spektrale Transmission mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen (siehe Tabelle 12 und Abbildung 45) und der daraus

resultierenden Abweichung gegenüber klarem Wasser werden die Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ je Einfärbungsstufe berechnet. Weitere Einfärbungsschritte werden kubisch interpoliert.

Im Folgenden sind die Einfärbungen mit Xfast® Schwarz 0050 im äußeren Fluid (Z3) bzw. im inneren Fluid (Z9) mit jeweils 2 mm SZR für den Gesamtaufbau FGGF, wie in Tabelle 27 zu sehen, dargestellt. Die dazugehörigen tabellarischen Aufstellungen sind im Anhang 16.6 zu finden.

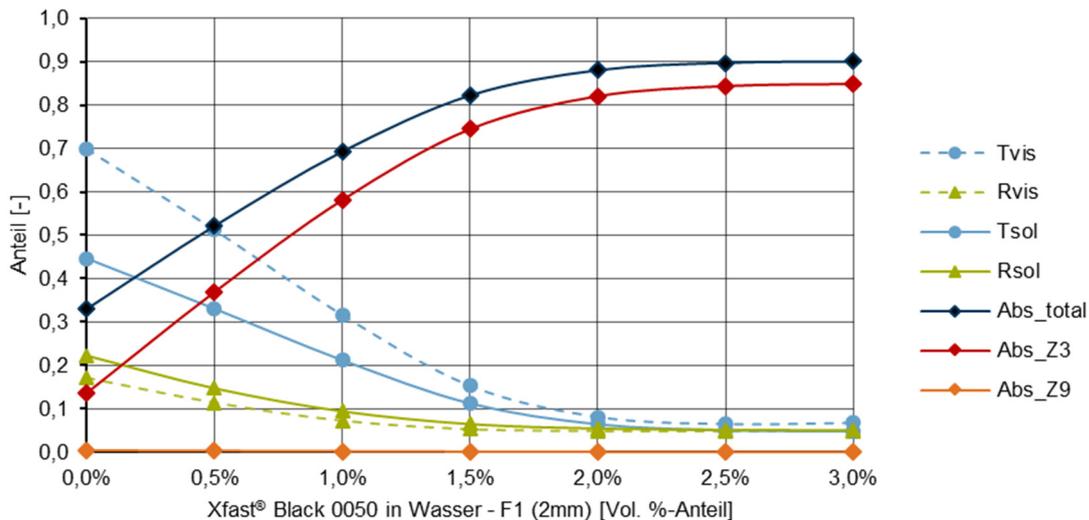


Abbildung 71: Verlauf der Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach EN 410 bei senkrechter Einstrahlung für den Aufbau FGGF mit Einfärbung im äußeren Fluid (Z3) mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen und klarem Wasser im inneren Fluid (Z9); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Durch das Einfärbung des äußeren Fluids (Z3) kann die Absorption im Fluid, d.h. Zone 3 stark erhöht werden, bis zu ca. 85%, wie in Abbildung 71 zu sehen ist. Die visuelle Transmission sinkt bis auf ca. 7%, die solare Transmission bis auf ca. 5%. Die Reflexion nimmt ebenfalls bis auf ca. 5% ab, sowohl für das visuelle als auch das solare Spektrum. Das ist auf die Absorption der rückreflektierten Strahlung in Zone 3 von den dahinter liegenden Grenzflächen zurückzuführen. Im inneren, klaren Fluid in Zone 9 wird so gut wie keine Strahlung absorbiert.

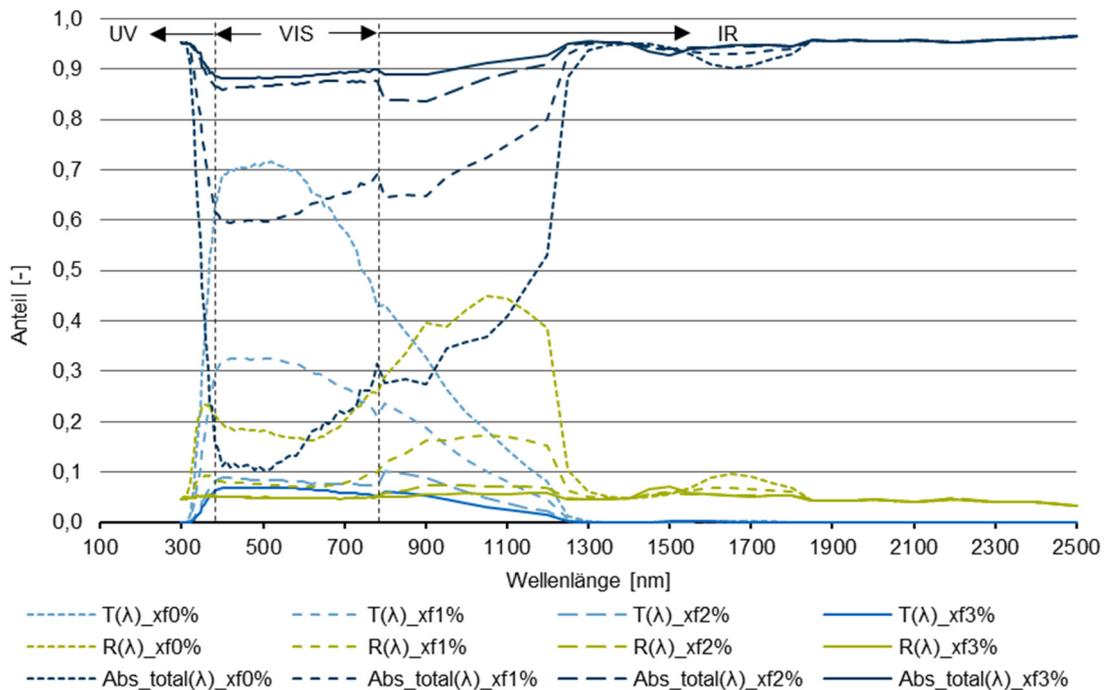


Abbildung 72: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade; Aufbau FGf mit Einfärbung im äußeren Fluid (Z3) mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen; klares Wasser im inneren Fluid (Z9); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

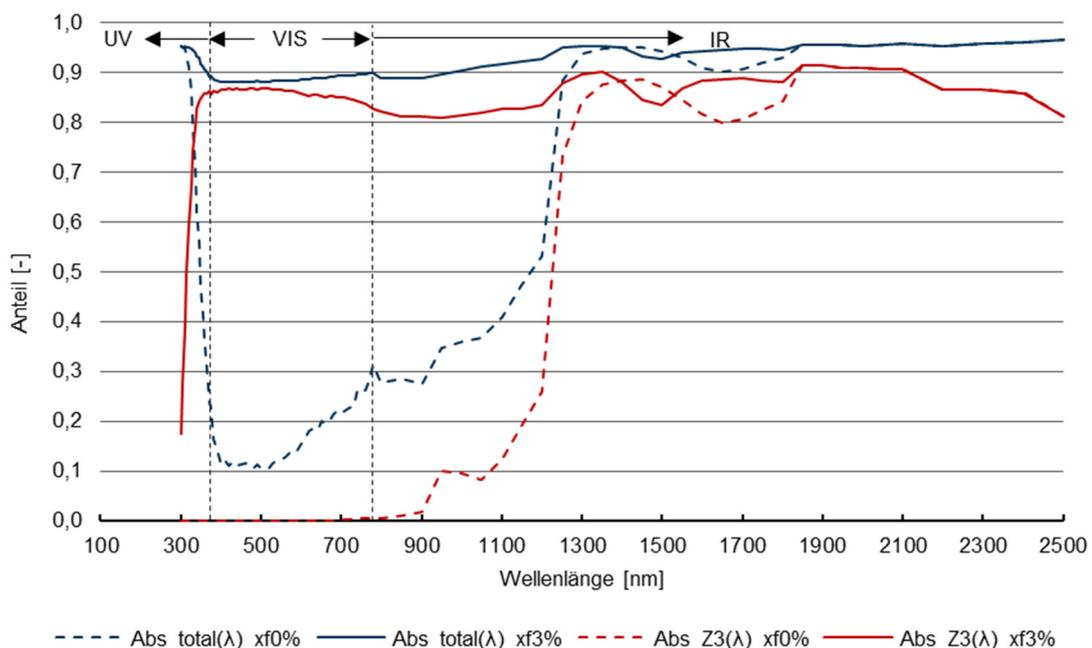


Abbildung 73: Spektrale Absorptionsgrade; Aufbau FGf mit Einfärbung im äußeren Fluid (Z3) mit 0% und 3% Xfast® Schwarz 0050; klares Wasser im inneren Fluid (Z9); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Wie in Abbildung 72 und Abbildung 73 zu sehen ist, ist es möglich mit Xfast® Schwarz 0050 die Absorption im Wellenlängenbereich zwischen 360 nm und 900 nm stark zu beeinflussen. Dies ist

der Bereich in dem keine Absorption durch klares Wasser erfolgt (siehe $Abs_{Z3}(\lambda)_{xf0\%}$)⁷⁹. Die Absorption im visuellen Spektrum ist sehr gleichmäßig mit max. 3% Unterschied, d.h. der Farbeindruck des eingefärbten Fluidglases ist somit wie gewünscht.

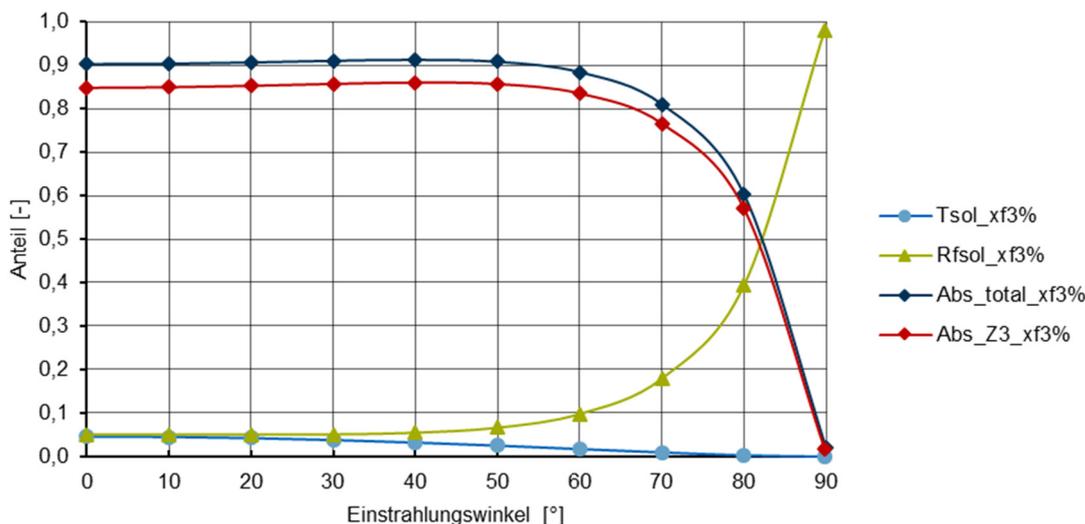


Abbildung 74: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 des Verglasungsaufbaus FGGF mit 3 Vol.-% Xfast® Schwarz 0050 in Z3 und klarem Wasser in Z9; Fluidschichten jeweils 2 mm stark; winkelabhängige Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Wie in Abbildung 74 zu sehen ist, überwiegt der Einfluss der Absorption im äußeren Fluid (Z3) mit ca. 85% bis zu einem Einstrahlungswinkel von 60°. Ab ca. 50° Einstrahlungswinkel steigt die Reflexion an, bis sie ab ca. 82° überwiegt. Die solare Transmission nimmt kontinuierlich von ca. 5% nach ISO 15099 auf 0% ab.

Wird das innere Fluid (Z9) eingefärbt, entsprechen die visuelle und solare Transmission denen bei der Einfärbung von Fluid 1, d.h. die in den Innenraum transmittierte Strahlung kann gleichermaßen beeinflusst werden, wie in Abbildung 75 zu sehen ist. Die Reflexion und vor allem die Absorption in Fluid 2 (Z9) verhalten sich jedoch anders. Die vor Fluid 1 (Z3) liegenden Schichten - Zone 2 bis Zone 8 - beeinflussen den Strahlungsdurchgang stark. In Fluid 2 kann daher nur max. ca. 43% der solaren Strahlung absorbiert werden.

⁷⁹ Die Angabe „_xf0%“ entspricht den Werten für klares Wasser ohne Einfärbung.

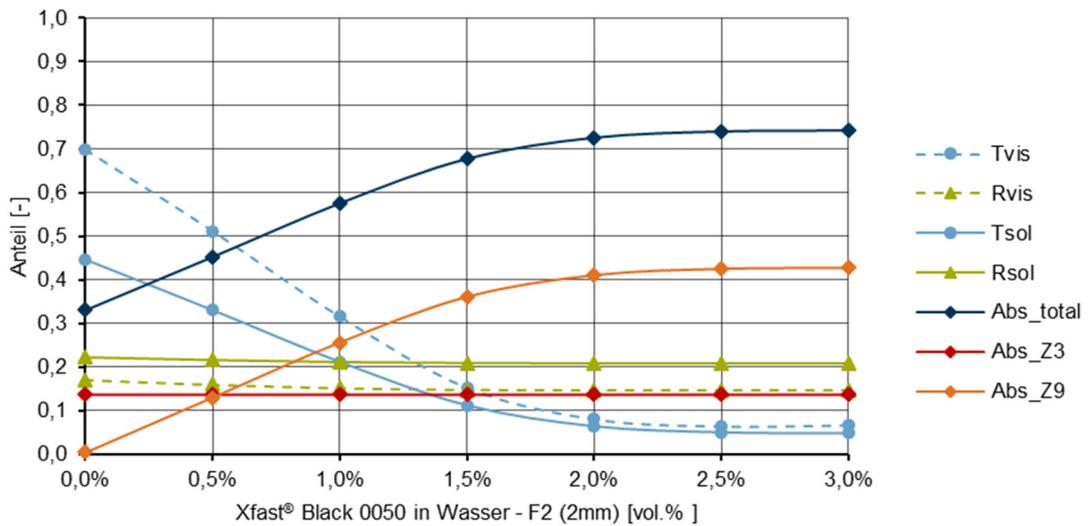


Abbildung 75: Verlauf der Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach EN 410; Aufbau FGGF mit Einfärbung im inneren Fluid (Z9) mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen; klares Wasser im äußeren Fluid (Z3); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

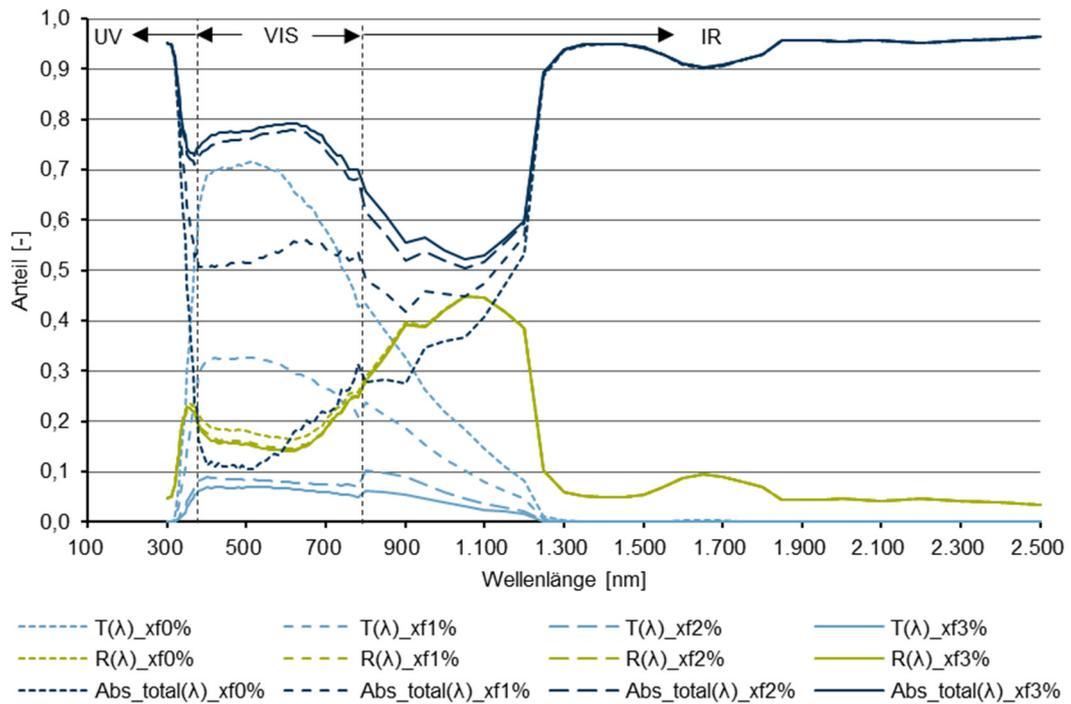


Abbildung 76: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade; Aufbau FGGF mit Einfärbung im inneren Fluid (Z9) mit 0% und 3% Xfast® Schwarz 0050; klares Wasser im äußeren Fluid (Z3); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

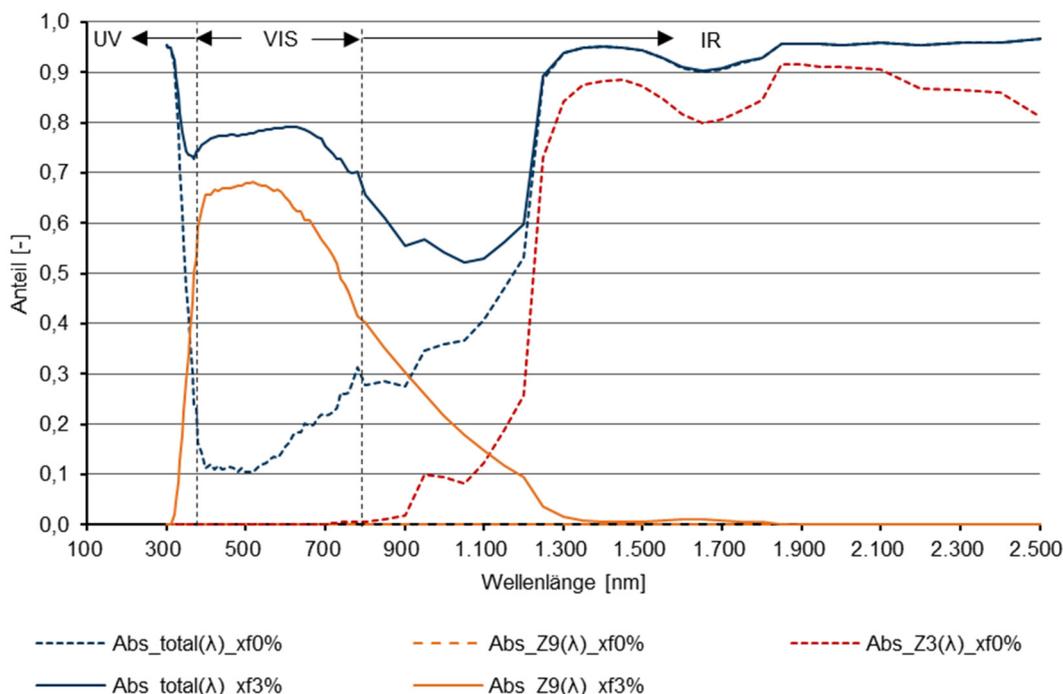


Abbildung 77: Spektrale Absorptionsgrade; Aufbau FGGF mit Einfärbung im inneren Fluid (Z9) mit 0% und 3% Xfast® Schwarz 0050; klares Wasser im äußeren Fluid (Z3); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Wie in Abbildung 76 und Abbildung 77 zu sehen ist, haben die vier Glasscheiben vor Fluid 2 (Z9), durch Reflexion und Absorption, einen großen Einfluss im Wellenlängenbereich bis ca. 900 nm. Ab ca. 900 nm steigt der Einfluss des klaren Wassers in Z3, ab ca. 1300 nm wird der größte Anteil der Strahlung – zwischen ca. 80% und 92% - in Z3 absorbiert. Dieser Strahlungsanteil gelangt nicht mehr bis zum inneren Fluid.

Wie in Abbildung 78 zu sehen ist, überwiegt der Einfluss der Absorption im Gesamtaufbau. Der Anteil der Absorption im eingefärbten, inneren Fluid (Z9) ist mit ca. 40% deutlich geringer als bei der Einfärbung des äußeren Fluids, wie in Abbildung 74 zu sehen ist. Die Absorption nimmt ab einem Einstrahlungswinkel von ca. 60° stark ab. Ab ca. 50° Einstrahlungswinkel steigt die Reflexion an, bis sie ab ca. 75° überwiegt. Die solare Transmission nimmt wie bei Einfärbung von Fluid 1 kontinuierlich von ca. 5% auf 0% ab.

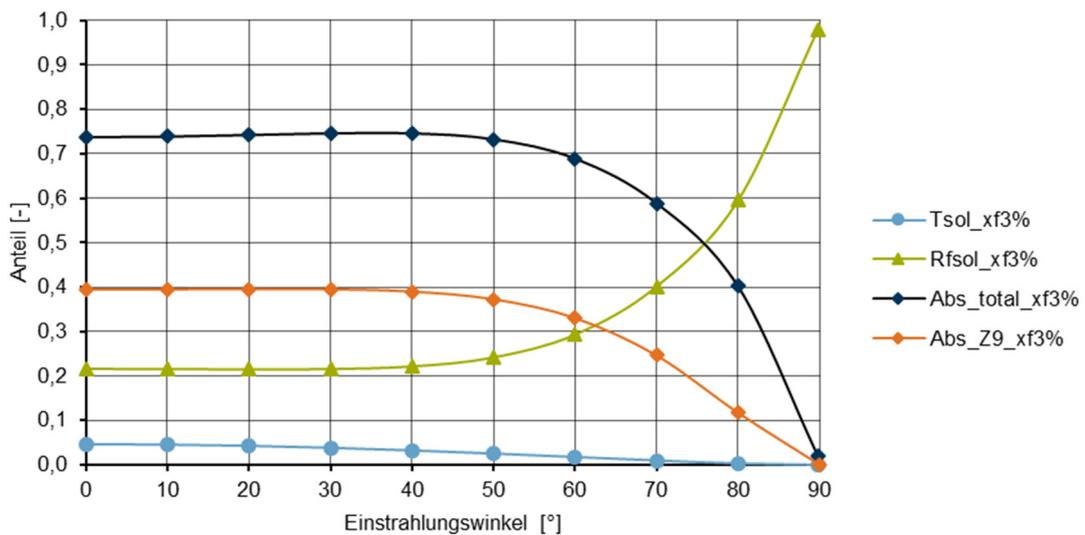


Abbildung 78: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099; Verglasungsaufbaus FGGF mit 3 Vol.-% Xfast® Schwarz 0050 in F2; klares Wasser in F1; Fluidschichten jeweils 2 mm stark; winkelabhängige Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Einfluss der Dicke der Fluidschichten

Im Rahmen der Forschungsprojekte zum Fluidglas wird aufgrund des maximal möglichen Verglasungsdicken von 60 mm für die zur Verfügung stehenden Rahmenprofile die Dicke der Fluidschichten auf jeweils 2 mm festgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird unabhängig davon der Einfluss der Dicke der Fluidschichten mit dem Strahlungsmodell untersucht. Die tabellarischen Aufstellungen zu den Grafiken in diesem Kapitel befinden sich in Anhang 16.6. Eine Erhöhung der Konzentration von Xfast® Schwarz 0050 in Wasser ist im Rahmen der Spektrometermessungen nicht durchgeführt worden. Da wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben, in Wellenlängenbereichen über 1300 nm nicht nachvollziehbare Erhöhungen der Transmission in Teilbereichen des Wellenlängenspektrums gemessen worden sind, kann keine Interpolation über 3 Vol.-% durchgeführt werden.

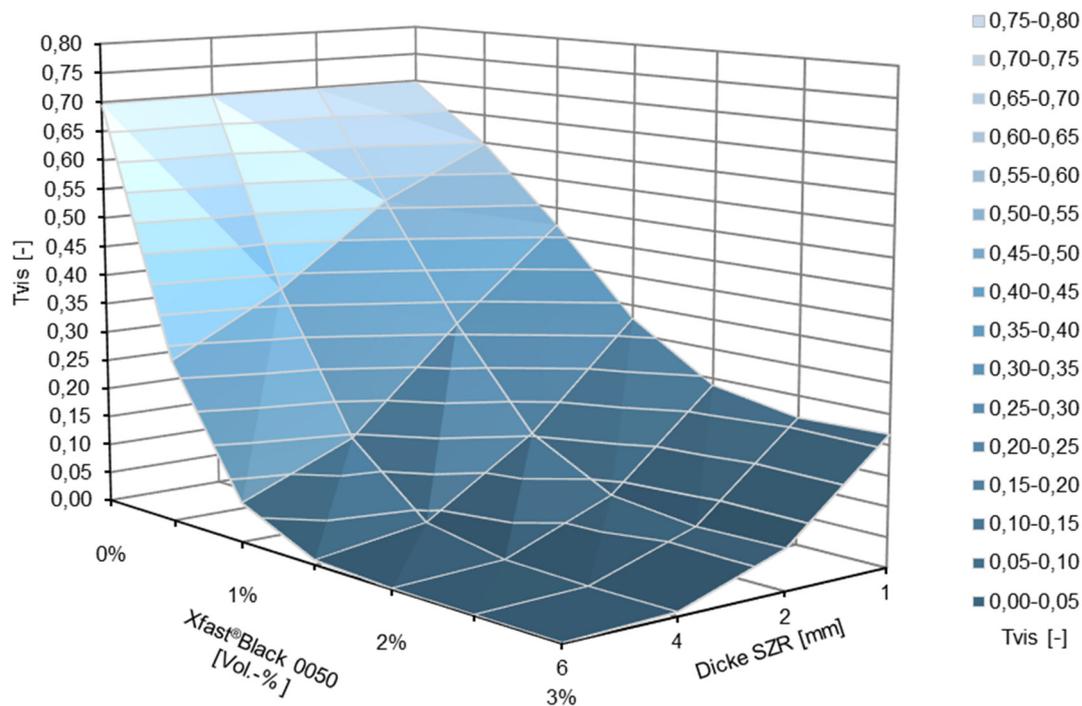


Abbildung 79: Visuelle Transmissionsgrade nach EN410; Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; senkrechte Einstrahlung; Ausgabe Strahlungsmodell

Wie in Abbildung 79 und Tabelle 77 zu sehen ist, beeinflusst die Dicke der Fluidschicht die maximale visuelle Transmission bei einer Füllung mit klarem Wasser unmerklich. In allen vier Variationen⁸⁰ zwischen einem und sechs Millimeter SZR von F1 und F2 liegt die maximale visuelle Transmission bei ca. 70%. Die Erhöhung der Konzentration von Xfast® Schwarz 0050 hat bei allen vier Fluidstärken einen großen Einfluss auf die visuelle Transmission, wobei die Erhöhung des SZR zwischen 1 mm und 4 mm deutliche Reduktionen der visuellen Transmission bewirken. Bei einer weiteren Erhöhung des SZR auf 6 mm sind nur noch geringe Veränderungen zu beobachten.

⁸⁰ In den dargestellten Varianten werden die Dicken der Scheibenzwischenräume F1 und F2 immer analog von 1 bis 6 mm erhöht.

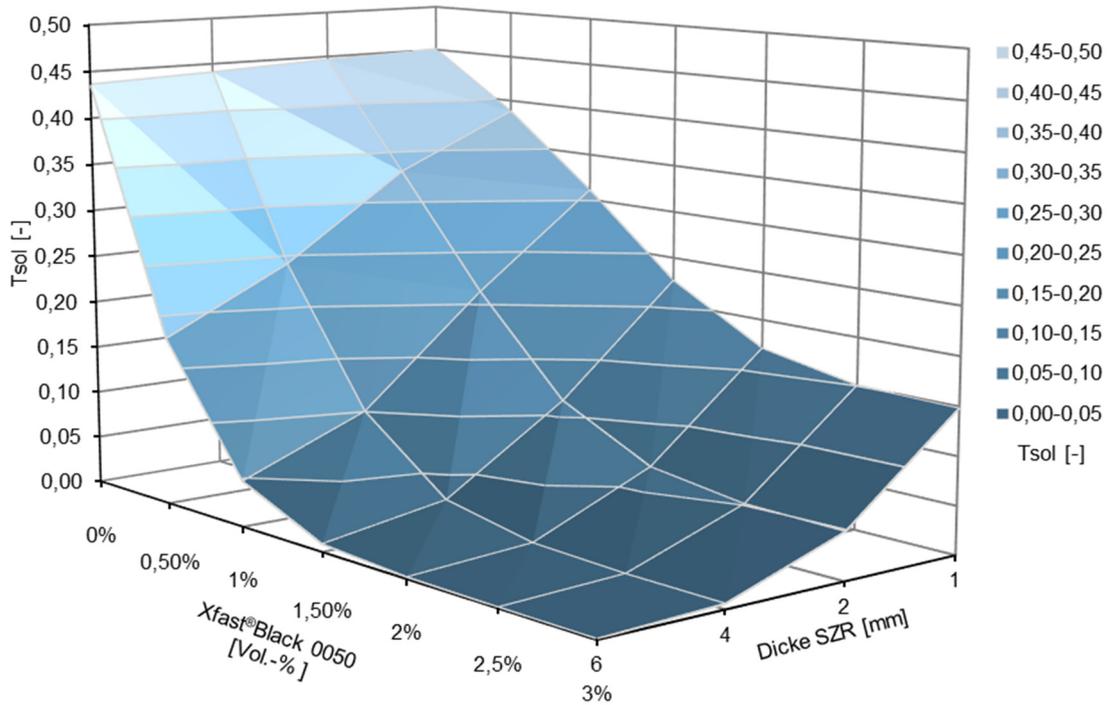


Abbildung 80: Solare Transmissionsgrade nach EN410; Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; senkrechte Einstrahlung; Ausgabe Strahlungsmodell

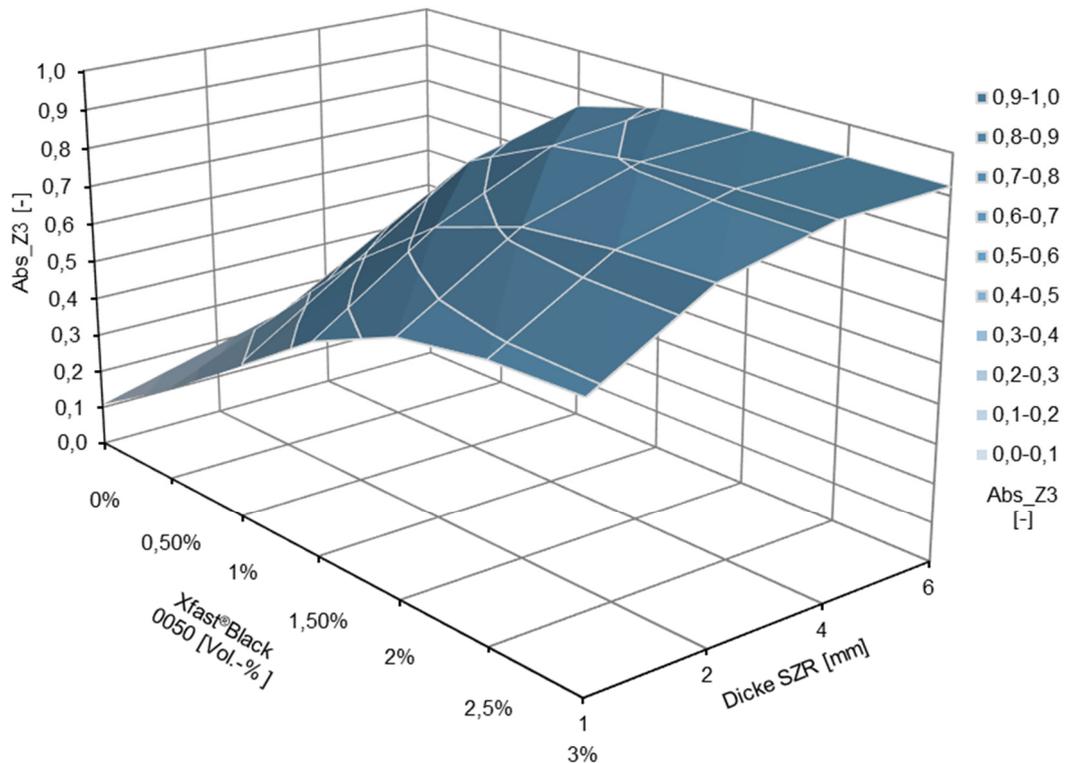


Abbildung 81: Solare Absorptionsgrade nach EN410; Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; senkrechte Einstrahlung; Ausgabe Strahlungsmodell

Für die solare Transmission und die solare Absorption im äußeren Fluid (Z3) sind vergleichbare Verläufe wie bei der visuellen Transmission zu beobachten, wie in Abbildung 80, Abbildung 81, Tabelle 78 und Tabelle 79 zu sehen ist. Für die Variationen bei Einfärbung des inneren Fluids (F2 bzw. Z9) sind die Verläufe identisch, wie in Tabelle 80, Tabelle 81 und Tabelle 82 zu sehen ist.

	FGGF ohne Einfärbung bzw. mit max. Einfärbung F1 oder F2 ⁸¹	
	Klares Wasser	3 Vol.-%
2 mm SZR F1 und F2		
T_{vis}	70%	7%
T_{sol}	45%	5%
4 mm SZR F1 und F2		
T_{vis}	70%	1%
T_{sol}	44%	1%
6 mm SZR F1 und F2		
T_{vis}	70%	0%
T_{sol}	44%	0%

Tabelle 29: Aufstellung der maximalen Transmissionsunterschiede bei klarem und maximal eingefärbtem Fluid mit Xfast® Schwarz 0050 bei variierenden Fluidschichtdicken; Ausgabewerte Strahlungsmodell für senkrechte Einstrahlung nach EN 410

Mit einer Fluidschichtstärke von 2 mm kann mithilfe der Einfärbung mit Xfast® Schwarz 0050 die visuelle Transmission bereits um 63%, die solare Transmission um 40% variiert werden. Mit 6 mm SZR können die visuelle und die solare Transmission vollständig unterbunden werden, wie in Tabelle 29 zu sehen ist.

6.2 Validierung Energiebilanzmodell

Die Validierung des Strahlungsmodells hat eine sehr gute Übereinstimmung für senkrechte Einstrahlung ergeben. Die Strahlungstransmission, -absorption und -reflektion für Verglasungsaufbauten mit und ohne Fluid kann ausreichend genau berechnet werden. Für das Energiebilanzmodell werden die Ergebnisse des Strahlungsmodells für die Absorptionen in den Stoffschichten als Eingabedaten verwendet. In einem ersten Schritt wird die Energiebilanz des Scheibenaufbaus des Fluidglasprototypen aus dem Modellraumprüfstand ohne Fluidfüllung mit

⁸¹ Es wird jeweils nur ein Fluid eingefärbt das andere ist klares Wasser.

der Standardsoftware WINDOW und CALUMEN nach DIN 673 validiert. Im zweiten Schritt wird der Fluidglasaufbau mit Fluidfüllung mit und ohne Einfärbung mit den Messergebnissen aus dem Modellraumprüfstand verglichen.

6.2.1 Validierung ohne Fluidfüllung

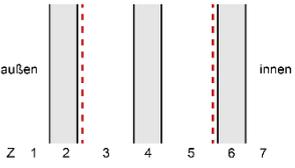
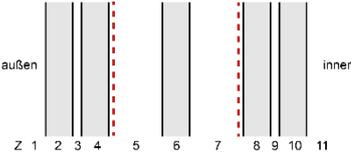
		EES (EN 673)	WINDOW (EN 673)	CALUMEN ⁸² (EN 673)
Verglasungsaufbau TL2kLkTL5 (3-fach-Isolierverglasung Prototyp Modellraumprüfstand)				
	U-Wert [W/m ² K]	0,401	0,411	0,41
Verglasungsaufbau LITL4kLkTL7L (5-fach-Isolierverglasung Prototyp Modellraumprüfstand)				
	U-Wert [W/m ² K]	0,387	0,387	-

Tabelle 30: U-Wert Berechnungen nach DIN 673 der Verglasungsaufbauten des Prototypen Modellraumprüfstand ohne Fluidfüllung

Wie in Tabelle 30 zu sehen ist, ergibt die U-Wert Berechnung im Energiebilanzmodell für die 3-fach-Verglasung im Fluidglasaufbau des Prototypen eine geringfügige Abweichung von ca. 2% gegenüber der Standardsoftware WINDOW und CALUMEN. Die Berechnung der 5-fach-Verglasung mit Luft in Zone 3 und 9 ergibt eine exakte Übereinstimmung.⁸³

6.2.2 Validierung mit Fluidfüllung

Ohne Durchfluss

Eine Validierung des U-Wertes von Fluidglas kann an dieser Stelle nicht durchgeführt werden, da mit Standardsoftware keine Fluidfüllungen in Verglasungen berechnet werden können und mit den zu Verfügung stehen Messeinrichtungen keine U-Wert-Messungen möglich sind. Es wird der im Energiebilanzmodell berechnete U-Wert für den Prototypen im Modellraumprüfstand (FGGF_Modellraumprüfstand) angegeben. Es stellt sich keine Veränderung mit Fluidfüllung ein und es bleibt bei einem U-Wert von 0,387 W/m²K (siehe Tabelle 31).

⁸² Nur bis Dreifachverglasung möglich.

⁸³ Randbedingungen nach DIN 673: Außentemperatur 0°C, Innentemperatur 20°C, keine Einstrahlung. Im EES berechnete Nusselt-Zahlen für 3-fach-Verglasung: Zone 5 Nu = 1,45, Zone 7 Nu = 1,983; bzw. 5-fach-Verglasung: Zone 3 und 9 Nu = 352, Zone 5 Nu = 1,377, Zone 7 Nu = 1,373.

		EES (EN 673)
Verglasungsaufbau FGGF_Modellraumprüfstand (5-fach-Isolierverglasung Prototyp Modellraumprüfstand)		
	U-Wert [W/m²K]	0,3867

Tabelle 31: Im Energiebilanzmodell berechnete U-Wert für das Fluidglas FGGF_Modellraumprüfstand

Mit Durchfluss, ohne Einfärbung

Es werden die Rücklauftemperaturen des äußeren und inneren Flüssigkeitskreislaufs – F1 und F2 - im Energiebilanzmodell berechnet und mit den Messergebnissen verglichen. Dazu werden zuerst im Strahlungsmodell die Absorptionen in den Stoffschichten des Fluidglasaufbaus im Strahlungsmodell berechnet (siehe auch Anhang 16.7). Anschließend werden im Energiebilanzmodell die Randbedingungen aus den Messungen vorgegeben, d.h. 626 W/m² senkrechte Einstrahlung, 1 l/min·m Massenstrom für das innere und äußere Fluid und die gemessenen Temperaturen für den Vorlauf in F1 und F2 und der resultierenden Raumtemperatur.

		FGGF (EN 410)
„FGGF_Modellraumprüfstand“ mit klaren Fluiden in F1 und F2		
	Tvis	0,553
	Rvis	0,270
	Tsol	0,276
	Rsol	0,228
	Abs_total	0,495
	Abs_Z2	0,124
	Abs_Z3	0,120
	Abs_Z4	0,149
	Abs_Z6	0,045
	Abs_Z8	0,040
	Abs_Z9	0,001
	Abs_Z10	0,016

Tabelle 32: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade und solare Absorptionsgrade nach EN 410 des Verglasungsaufbaus „FGGF_Modellraumprüfstand“ mit klaren Fluiden in F1 und F2 im 2 mm SZR bei senkrechter Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Im Energiebilanzmodell werden die Absorptionen in Zonen 2, 3 und 4 zu Absorption Fluid 1 (F1) und Zonen 8, 9 und 10 zu Fluid 2 (F2) zusammengefasst. Es ergibt sich für F1 eine Absorption von 0,392 und für F2 von 0,058.

	T _{sol} [-]	Einstr. [W/m ²]	F1_Vorl. [°C]	F1_Rüchl. [°C]	F2_Vorl. [°C]	F2_Rüchl. [°C]	Raum [°C]
Stationärer Bereich							
Messwerte	0,17	165,72	34,20	36,27	19,18	21,05	27,00
Berechnungen EES	0,28	273,79	34,20	35,32	19,18	20,92	27,00
Abweichungen							
absolut	0,11	108,07	-	- 0,95	-	- 0,13	-
[%]	65,21	65,21	-	- 2,62	-	- 0,62	-

Tabelle 33: FGGF_Modellraumprüfstand ohne Einfärbung mit Kühlung des inneren Fluids (F2); Vergleich Messergebnisse mit Berechnungen

Wie in Tabelle 33 zu sehen ist, weichen die berechneten Werte der solaren Transmission um 0,11 von den Messwerten ab, d.h. es transmittieren 11% der Strahlung mehr in den Innenraum. Die berechnete Rücklauftemperatur für das äußere Fluid ist 0,95°C, d.h. 2,62% geringer als die Messwerte. Beim inneren Fluid liegen die Abweichungen unter 1%⁸⁴. Wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben, liegen Unsicherheiten bei den Messungen vor, u.a. durch Ablagerungen auf den Scheiben im flüssigkeitsführenden Scheibenzwischenraum. Darüber hinaus konnte die Rückreflexion aus dem Raum in den Fluidglasaufbau nicht gemessen werden. Schlägt man die 11% geringere Transmission durch den Fluidglasaufbau F1 dazu, ist die rechnerisch ermittelte Rücklauftemperatur mit 36,23°C nahezu identisch mit den Messergebnissen (Abweichung von - 0,04°C). Die Rücklauftemperatur des inneren Fluids verändert sich dadurch nicht.

	T _{sol} [-]	Einstr. [W/m ²]	F1_Vorl. [°C]	F1_Rüchl. [°C]	F2_Vorl. [°C]	F2_Rüchl. [°C]	Raum [°C]
Stationärer Bereich							
Messwerte	0,17	165,72	34,20	36,27	19,18	21,05	27,00
Berechnungen EES	0,17	165,72	34,20	36,27	19,18	21,02	27,00
Abweichungen							
absolut	0,00	0,00	-	0,00	-	- 0,03	-
[%]	0,00	0,00	-	0,00	-	- 0,14	-

Tabelle 34: FGGF_Modellraumprüfstand ohne Einfärbung mit Kühlung des inneren Fluids (F2); Anpassung Absorption F1 und 20% Rückreflexion aus dem Innenraum; Vergleich Messergebnisse mit Berechnungen

Nimmt man zusätzlich noch eine 20 prozentige Rückreflexionen aus dem Innenraum an, stimmen die Berechnungsergebnisse mit den Messwerten überein (siehe Tabelle 34). Die Absorptionen in F1 beträgt dabei 50,6%, in Zonen 6 4,7 % und F2 6,8%.

⁸⁴ Mit angenommener Windgeschwindigkeit an der Fassade von 0,54 m/s und berechneten Nusselt-Zahlen in den gasgefüllten Scheibenzwischenräumen von Nu_{Zone5} = 1,195 und Nu_{Zone7} = 6,373.

Mit Einfärbung F1 und Kühlung F2

		FGGF (EN 410)
„FGGF_Modellraumprüfstand“ mit 1% Einfärbung F1 und klarem Fluid F2		
<p>Das Diagramm zeigt einen 11-Zonen-Modellraumprüfstand. Die Zonen sind von links nach rechts mit den Nummern 1 bis 11 beschriftet. Zone 1 ist als 'außen' und Zone 11 als 'innen' gekennzeichnet. Zonen 2, 3 und 4 sind als F1 (Einfärbung) markiert, Zonen 8, 9 und 10 als F2 (Kühlung) markiert. Die Zonen sind durch vertikale Linien getrennt, wobei die Trennlinien zwischen F1 und F2 gestrichelt sind.</p>	T _{vis}	0,000
	R _{vis}	0,047
	T _{sol}	0,0239
	R _{sol}	0,0815
	Abs _{total}	0,895
	Abs _{Z2}	0,112
	Abs _{Z3}	0,685
	Abs _{Z4}	0,065
	Abs _{Z6}	0,019
	Abs _{Z8}	0,010
Abs _{Z9}	0,001	
Abs _{Z10}	0,004	

Tabelle 35: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade und solare Absorptionsgrade nach EN 410 des Verglasungsaufbaus „FGGF_Modellraumprüfstand“ mit 1% Basacid X40 eingefärbtem Fluid in F1 und klarem Fluid in F2 im 2 mm SZR bei senkrechter Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Für den Fluidglasaufbau des Modellraumprüfstands mit maximaler Einfärbung im äußeren (1% Basacid X40) und klarem Wasser im inneren Fluidkreislauf ergeben die Berechnungen im Strahlungsmodell eine solare Transmission von 2,4% und eine absolute Absorption von 89,5% (siehe Tabelle 35). In den Zonen 2,3 und 4 (F1) werden davon 86,1%, in Zone 6 1,9% und in den Zonen 8,9 und 10 (F2) 1,5% absorbiert.

	T _{sol} [-]	Einstr. [W/m ²]	F1_Vorl. [°C]	F1_Rüchl. [°C]	F2_Vorl. [°C]	F2_Rüchl. [°C]	Raum [°C]
Stationärer Bereich							
Messwerte	0,0152	15,05	38,21	41,81	16,40	17,79	23,92
Berechnungen EES	0,0239	23,71	38,21	42,45	16,40	17,67	23,92
Abweichungen							
absolut	0,009	8,66	-	0,64	-	- 0,12	-
[%]	57,53	57,53	-	1,53	-	- 0,67	-

Tabelle 36: FGGF_Modellraumprüfstand mit 1% Basacid X40 eingefärbtem Fluid in F1 und klarem Fluid in F2; Vergleich Messergebnisse mit Berechnungen

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Messwerten (siehe Tabelle 36) ergibt für die solare Transmission eine prozentuale Abweichung von ca. 57%. Aufgrund der insgesamt sehr geringen Transmission, sowohl bei der Messung als auch bei der Berechnung, ist die berechnete Transmission absolut nur 0,9% größer. In den Berechnungen transmittiert ca. 8,6 W/m² mehr Strahlung in den Innenraum als in der Messung. Die Rücklauftemperatur von Fluid 1 ist in der Berechnung 0,64°C bzw. 1,53% größer als in der Messung. Die berechnete Rücklauftemperatur von Fluid 2 ist 0,12°C bzw. 0,67% geringer als in der Messung.

Bei Anpassung der solaren Transmission auf 1,52% in der Berechnung durch Erhöhung der Absorption in F1 steigt die Rücklaufemperatur in F2 lediglich auf 42,53°C an. Die Abweichung beträgt dann 1,72%. Die Rücklaufemperatur F2 verändert sich nicht.

	T_{sol} [-]	Einstr. [W/m ²]	F1_Vorl. [°C]	F1_Rüchl. [°C]	F2_Vorl. [°C]	F2_Rüchl. [°C]	Raum [°C]
Stationärer Bereich							
Messwerte	0,0152	15,05	38,21	41,81	16,40	17,79	23,92
Berechnungen EES	0,0152	15,05	38,21	41,81	16,40	17,68	23,92
Abweichungen							
absolut	0,00	0,00	-	0,00	-	- 0,11	-
[%]	0,00	0,00	-	0,00	-	- 0,62	-

Tabelle 37: FGGF_Modellraumprüfstand mit 1% Basacid X40 eingefärbtem Fluid in F1 und klarem Fluid in F2. Modifikation Absorption F1, Rückreflexion 20% und Windgeschwindigkeit 1,3 m/s; Vergleich Messergebnisse mit Berechnungen

Bei Modifikation der Windgeschwindigkeit auf 1,3 m/s und einer Rückreflexion aus dem Innenraum mit 20% erhält man nahezu identische Ergebnisse für Berechnung und Messung (siehe Tabelle 37).

6.2.3 Diskussion und Fazit

Die Validierung des Energiebilanzmodells ohne Fluidfüllung mit Standardsoftware ergibt eine sehr gute Übereinstimmung. Mit Fluidfüllung muss auf Messergebnisse zurückgegriffen werden, da keine Standardsoftware zur Verfügung steht.

Da die Messungen Unsicherheiten aufweisen, z.B. Verunreinigungen auf den Scheiben zum flüssigkeitsführenden Scheibenzwischenraum bzw. Randbedingungen nicht bekannt sind, z.B. Luftströmungen an der Fassade, ist eine fehlerfreie Validierung nicht möglich. Dennoch zeigt der Vergleich der Berechnungen mit den Messergebnissen eine sehr gute Übereinstimmung für die Rücklaufemperaturen der Flüssigkeitskreisläufe. Durch Modifikation der unsicheren Parameter kann eine fast vollständige Übereinstimmung erzielt werden. Es wird daher für die weiteren Betrachtungen davon ausgegangen, dass das Energiebilanzmodell die Realität ausreichend genau abbilden kann⁸⁵.

⁸⁵ Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts „FLUIDGLASS“ wurden am CEA-INES weitere Messungen im Solarprüfstand durchgeführt. Das SimulationX-Modell, das auf den EES-Modellen basiert, wurde mit den Messungen validiert. Die Validierung weist eine gute Übereinstimmung auf (siehe Kapitel 8).

6.3 Zusammenfassung

Mit den beiden Fluidglasmodellen – dem Strahlungs- und dem Energiebilanzmodell – stehen Simulationswerkzeuge zur Verfügung, mit denen das Verhalten von Fluidgläsern berechnet werden kann. Beide Modelle sind validiert und weisen eine hohe Genauigkeit auf. Im weiteren Verlauf werden mit den Modellen Kennwerte für Fluidgläser berechnet (siehe Kapitel 7). Darüber hinaus werden die Fluidglasmodelle in eine dynamische Gebäudesimulation implementiert, um die Auswirkungen bzw. Potentiale von Fluidglasfassaden an unterschiedlichen klimatischen Standorten zu untersuchen (siehe Kapitel 8).

7 Kennwerte von Fluidgläsern

Im weiteren Verlauf wird für die Berechnung der Kennwerte und die Gebäudesimulationen der Gesamtaufbau FGGF mit der Einfärbung Xfast®Schwarz 0050 verwendet (Tabelle 38).

	Zonen (Z)			
	Nr.	Beschreibung	Herstellerbezeichnung	Dicke [mm]
	Z2	Weißglas	SSG DIAMANT®	6
	Z3	Fluid (klar oder eingefärbt)	Einfärbung: Xfast®Schwarz 0050	2
	Z4	Weißglas mit Low-E-Beschichtung (Pos. 4)	SSG PLANITHERM ULTRA N DIAMANT®	6
	Z5	Krypton 100%		12
	Z6	Weißglas	SSG DIAMANT®	6
	Z7	Krypton 100%		12
	Z8	Weißglas mit Low-E-Beschichtung (Pos. 7)	SSG PLANITHERM ULTRA N DIAMANT®	6
	Z9	Fluid (klar oder eingefärbt)	Einfärbung: Xfast®Schwarz 0050	2
	Z10	Weißglas	SSG DIAMANT®	6

Tabelle 38: Fluidglasaufbau FGGF

7.1 Fluidglas als adaptive Verglasung

Bilanzierung des Gesamtenergiedurchlassgrads (g-Wert)

Der g-Wert wird bei Fluidgläsern analog zu DIN EN 410 über die direkte solare Strahlungstransmission und die sekundäre Wärmeabgabe des Verglasungsaufbaus in den Innenraum ermittelt. Die sekundäre Wärmeabgabe in den Innenraum wird über den Wärmestrom zwischen den Zonen 9 und 11 ($\dot{q}_{vZ11nZ9}$) berechnet (siehe Abbildung 82).

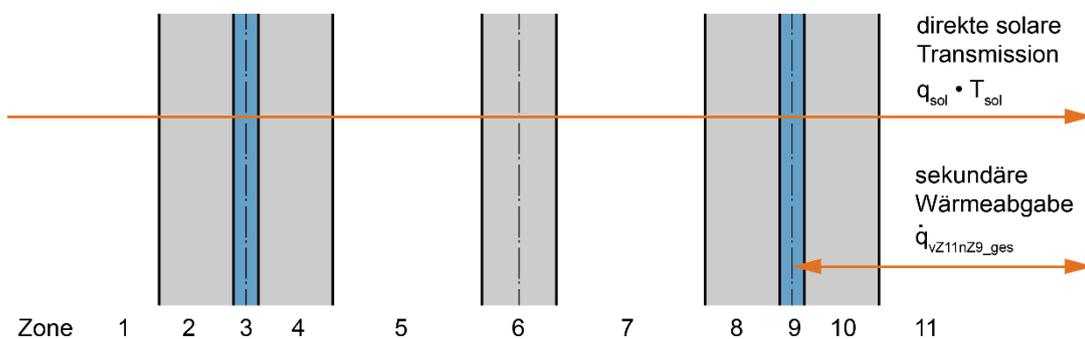


Abbildung 82: Schematische Darstellung des g-Wertes von Fluidgläsern

Zur Vergleichbarkeit mit konventionellen Fassadensystemen wird das Fluidglas ohne Durchfluss angenommen, mit initialen Fluidtemperaturen gemäß der Außen- bzw. der Innenraumtemperatur. Im Betriebszustand von Fluidglas ist die sekundäre Wärmeabgabe abhängig von der Durchflussgeschwindigkeit und der Vorlauftemperatur (F2). Im Kühlfall ist die Wärmestromrichtung vom Innenraum in den Fluidglasaufbau, d.h. der g-Wert wird bei stark eingefärbtem Fluid null bzw. negativ.

Kennwerte Fluidglas

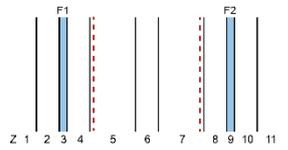
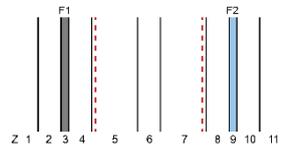
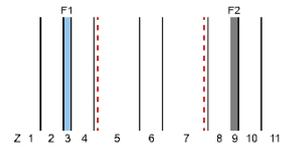
	Fluidglas FGGF klar mit:		
	F1 und F2 klar	F1 max. eingefärbt, F2 klar	F1 klar, F2 max. eingefärbt
			
Tvis	0,698	0,068	0,068
Rvis	0,172	0,048	0,147
Tsol	0,447	0,049	0,049
Rsol	0,223	0,051	0,209
Abs_total	0,331	0,900	0,742
Abs_Z3	0,137	0,848	0,137
Abs_Z9	0,005	0,001	0,428
Tvis Hub	-	0,630	0,630
Tsol Hub	-	0,398	0,398
g-Wert	0,513	0,074	0,499
g-Wert Hub	-	0,438	0,013
S	1,361	0,914	0,136
S*	-	9,381	1,398
U-Wert ⁸⁶ [W/m ² K]	0,428	0,428	0,428

Tabelle 39: Kennwerte von Fluidglas mit 5-fach Aufbau, Weißglas, 2 mm Fluidschichten und Einfärbung xfast® Schwarz 0050

⁸⁶ U-Wert der 3-fach-WSV im Kern der Fluidglases (Z4 bis Z8) = 0,432 W/m²K. T_Amb = 0°C, T_Innenraum = 20°C.

Transparente, thermische Hülle

Im klaren Zustand ist der Einfluss der beiden zusätzlichen Verglasungen und der flüssigkeitsführenden Schichten gegenüber Standard dreifach Wärmeschutzverglasungen sehr gering. Der U-Wert mit ca. $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$, die Lichttransmission mit ca. 70%, die Energietransmission mit ca. 50% und der g-Wert mit ca. 51% sind nahezu gleich hoch.

Fazit transparente, thermische Hülle

Durch die flüssigkeitsführenden Schichten sind die Einflüsse der beiden zusätzlichen Glasscheiben weitgehend kompensiert⁸⁷. Das Fluidglas eignet sich sehr gut als transparentes Verglasungselement.

Adaptive Verglasung

Durch das Einfärben des äußeren bzw. inneren Fluids lassen sich die Licht- und Energietransmission durch die Verglasung deutlich reduzieren. Die Lichttransmission lässt sich um ca. 63% und die direkte Transmission des gesamten solaren Spektrums um ca. 40% reduzieren. Zur Reduktion des Gesamtenergiedurchlassgrads eignet sich nur eine Einfärbung des äußeren Fluids. Hier kann der g-Wert um ca. 43% ebenfalls stark reduziert werden. Beim Einfärben des inneren Fluids ist die sekundäre Wärmeabgabe durch das sich stark aufheizende innere Fluid sehr hoch, sodass sich der g-Wert gegenüber dem klaren Zustand nur um 1% verändert. Dieses unterschiedliche Verhalten wird bei der Steuerung von Fluidgläsern genutzt. In der Kühlperiode kann durch das Einfärben des äußeren Fluids der Gesamtenergiedurchlass in den Raum um ca. 93% reduziert werden⁸⁸. In der Heizperiode kann beim Einfärben des inneren Fluids, trotz stark verminderter Lichttransmission (Blendschutzfunktion), ca. 50% der solaren Energie in den Raum abgegeben und als solare Wärmegewinne genutzt werden.

Fazit adaptive Verglasung

Mit einer Lichttransmission von bis zu ca. 70% ist das Fluidglas mit zwei klaren Flüssigkeitsschichten etwas besser als gängige elektrochromatische Verglasungen. Darüber hinaus ließe sich sowohl die Licht- als auch die direkte Strahlungstransmission im eingefärbten Zustand durch eine Erhöhung der Flüssigkeitsschichtdicken auf bis zu 0% reduzieren. Die Veränderbarkeit der Lichttransmission ($T_{\text{vis-Hub}}$) von 63% bis zu 70% ist damit deutlich höher als bei elektrochromatischen Verglasungen mit derzeit maximal 53% (siehe Tabelle 4 und Tabelle 29).

⁸⁷ Der Brechungsindex von Wasser (ca. 1,3) ist dem von Glas (ca. 1,5) sehr ähnlich. Dadurch ist die Reflexion an den zusätzlichen Grenzflächen sehr gering.

⁸⁸ Bei Fluidschichtdicken von 6 mm kann die solare Transmission vollständig unterbunden werden (siehe Kapitel 6.1.3).

Die dynamische Selektivität von Fluidglas, d.h. das Verhältnis der maximalen Lichttransmission im klaren Zustand zum minimalen g-Wert im maximal abgedunkelten Zustand, liegt mit ca. 9 im Bereich der elektrochromatischen Verglasungen (Econtrol® = ca. 6, Sageglass® = 18). Das Fluidglas ist von seinen Eigenschaften zur Steuerung der Licht- und Energietransmission etwas besser als marktübliche adaptive Verglasungen⁸⁹.

Durchsicht und Farbwiedergabe

Die Fotos von Abbildung 83 bis Abbildung 88 zeigen die Durchsicht durch einen Fluidglasprototyp⁹⁰ mit zwei 4 mm dicken Glasscheiben und einer Fluidschicht von 2 mm Stärke. Die Aufnahmen sind mit geradem Durchblick senkrecht zur Scheibe (Frontalaufnahmen) oder mit schrägem Durchblick (Schrägaufnahmen). In Abbildung 83 ist der halb mit klarem Wasser befüllte Prototyp zu sehen. Der Durchblick durch den wassergefüllten Bereich zeigt keine nennenswerten Unterschiede gegenüber dem luftgefüllten Bereich⁹¹. In den Abbildung 83 bis Abbildung 86 ist zu sehen, dass es weder zu Verzerrungen, Farbveränderungen noch zu anderen optischen Beeinträchtigungen durch die Wasserfüllung kommt. Abbildung 87 und Abbildung 88 zeigen den Prototyp mit leichter bzw. starker Einfärbung. Auch im eingefärbten Zustand werden die Farben unverfälscht wiedergegeben. Allerdings ist eine leichte Lichtstreuung zu beobachten.

Fazit Durchsicht und Farbwiedergabe

Eine verzerrungsfreie Durchsicht durch das Fluidglas ist sowohl im klaren als auch im eingefärbten Zustand gegeben, auch bei schrägem Durchblick. Farben werden auch mit eingefärbtem Fluid neutral wiedergegeben, jedoch kommt es zu unerwünschter Lichtstreuung. Dieser Effekt beeinträchtigt die Durchsicht. Die verwendeten Partikel Xfast® schwarz 0050 sind in dieser Hinsicht nicht ideal. In zukünftigen Forschungsprojekten sollten weitere Einfärbungen untersucht werden. Grundsätzlich eignen sich jedoch flüssigkeitsdurchströmte Gläser sowohl mit klarem als auch mit eingefärbtem Fluid als transparente Fassade.

⁸⁹ Schaltzeiten zur Entfärbung des Fluids können im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. Die Dauer der Einfärbung des Fluids ist abhängig vom Massenstrom im Flüssigkeitskreislauf. Bei einem 1 Meter breiten und 6 Meter hohem Fassadenelement und einem Volumenstrom von 1 l/min. könnte das Fluidglas in ca. 6 Minuten vollständig eingefärbt werden, bei 6 l/min. in einer Minute. Damit liegen die Schaltzeiten für die Einfärbung in etwa bei denen von elektrochromatischen Verglasungen.

⁹⁰ Abmessungen Fluidglasprototyp Breite x Höhe x Dicke = 14 x 22 x 2,1 cm. Der Prototyp wurde an der NTB hergestellt. Fluidfüllung mit abgekochtem, destilliertem Wasser, klar oder eingefärbt mit Xfast® Schwarz 0050.

⁹¹ In allen Aufnahmen ist im unteren Drittel der Verglasung die helle Reflexion der Tischkante zu erkennen.



Abbildung 83: Fluidglasprototyp zur Hälfte mit klarem Wasser befüllt; Frontaufnahme (Foto: Astrid Eckert)

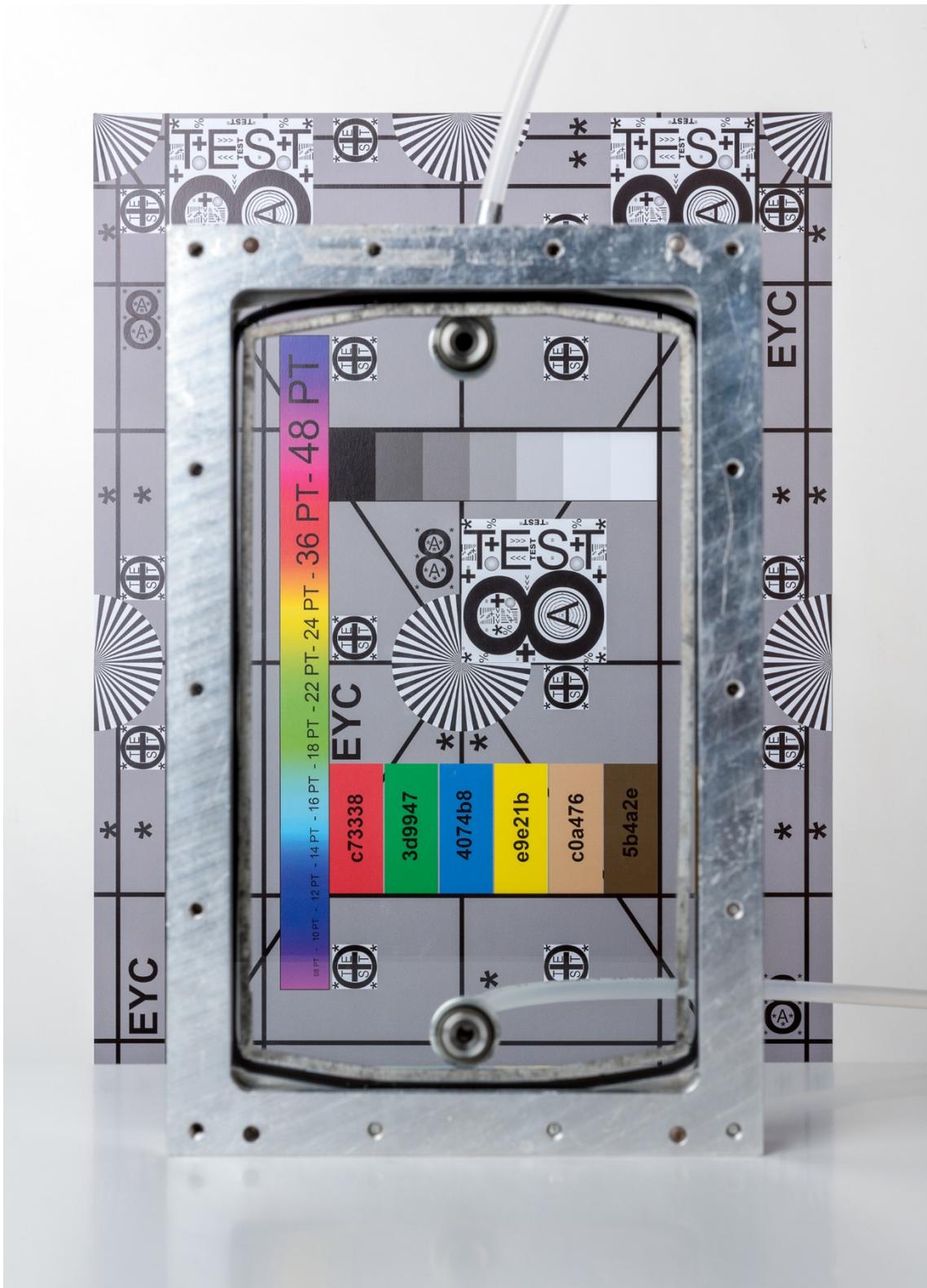


Abbildung 84: Fluidglasprototyp mit klarem Wasser befüllt; Frontalaufnahme (Foto: Astrid Eckert)



Abbildung 85: Fluidglasprototyp mit klarem Wasser befüllt; Schrägaufnahme (Foto: Astrid Eckert)



Abbildung 86: Fluidglasprototyp mit klarem Wasser befüllt; Schrägaufnahme (Foto: Astrid Eckert)

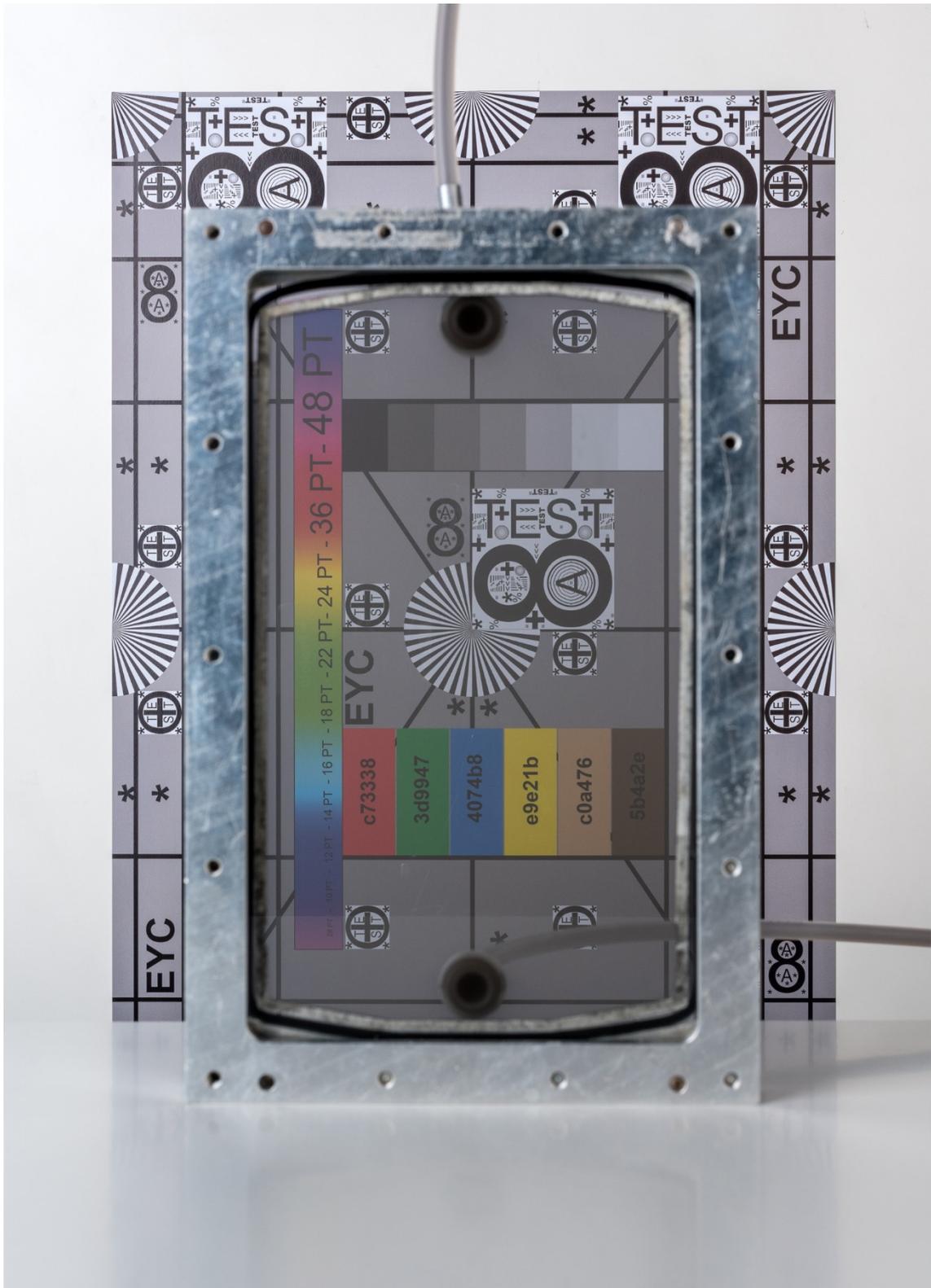


Abbildung 87: Fluidglasprototyp mit leicht eingefärbtem Wasser befüllt; Frontalaufnahme (Foto: Astrid Eckert)



Abbildung 88: Fluidglasprototyp mit stark eingefärbtem Wasser befüllt; Frontalaufnahme (Foto: Astrid Eckert)

7.2 Fluidglas als thermischer Solarkollektor

Die Solarkollektorfunktion des Fluidglases wird sowohl vom äußeren Flüssigkeitskreislauf (F1) als auch vom inneren (F2) übernommen.

7.2.1 Bilanzierung der Solarkollektorfunktion von Fluidglas

Optischer Wirkungsgrad

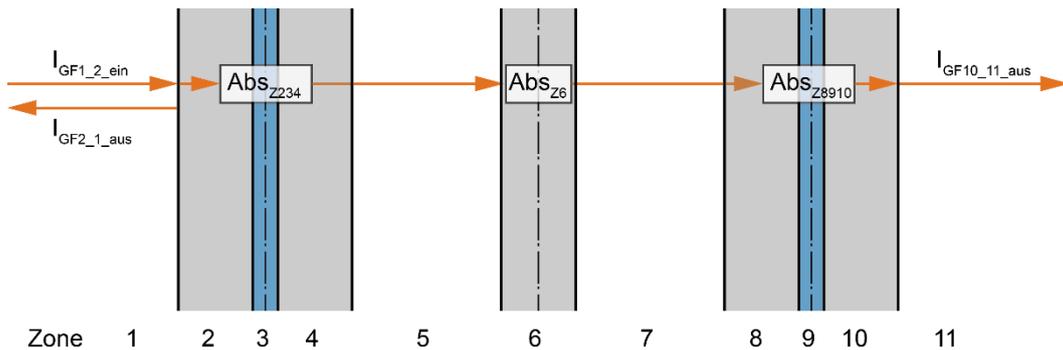


Abbildung 89: Schematische Darstellung der optischen Bilanz der Solarkollektorfunktion von Fluidgläsern

Im Gegensatz zu normalen, opaken Solarkollektoren wird ein Teil der kurzwelligigen Strahlung durch den Solarkollektor in den Innenraum transmittiert. Die optischen Verluste des Fluidglases setzen sich zusammen aus den Verlusten durch Reflexion in den Außenraum $I_{GF2_1_aus}$, Absorption in der mittleren Scheibe (Abs_Z6) und durch Transmission durch den Gesamtaufbau $I_{GF10_11_aus}$ (siehe Abbildung 89). Die in den Zonen 2, 3 und 4 bzw. 8, 9 und 10 absorbierte Strahlung wird dem äußeren bzw. inneren Flüssigkeitskreislauf zugeschlagen. Der optische Wirkungsgrad η_0 berechnet sich aus (siehe auch Kapitel 2.8):

$$\eta_0 = 1 - I_{GF2_1_aus} + I_{GF10_11_aus} + Abs_Z6 \quad (41)$$

Wärmeverluste

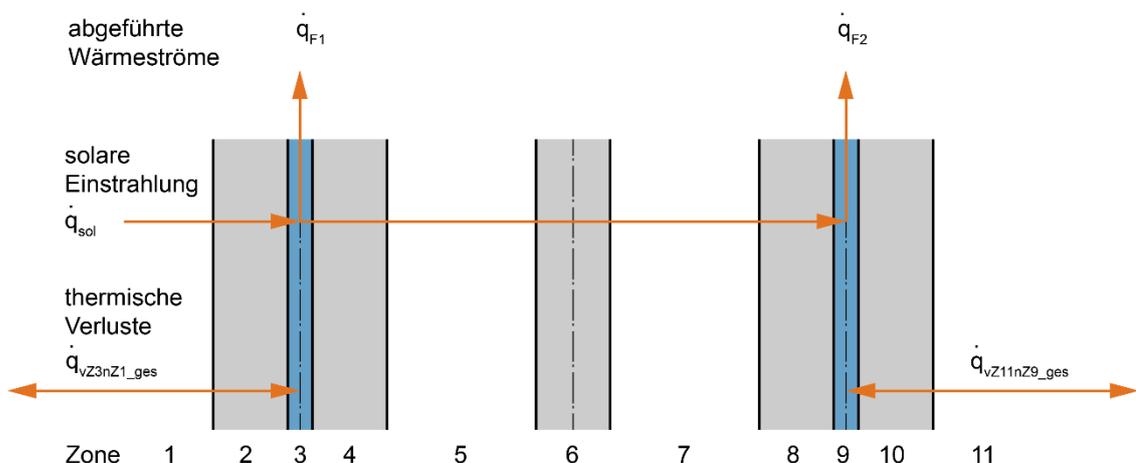


Abbildung 90: Schematische Darstellung der Wärmeströme der Solarkollektorfunktion von Fluidgläsern

Die thermischen Verluste der Solarkollektorfunktion von Fluidgläsern berechnen sich aus den Wärmeverlusten nach außen (\dot{q}_{vZ3nZ1_ges}) bzw. in den Innenraum ($\dot{q}_{vZ11nZ9_ges}$), wie in Abbildung 90 dargestellt⁹².

Kollektoreffizienz

Die Wärmeströme \dot{q}_{F1} und \dot{q}_{F2} stellen die nutzbaren Wärmeströme des Fluidglas-Solarkollektors dar (Kaltschmitt, 2013, S. 181–191):

$$\dot{q}_{Nutz_FG} = \dot{q}_{F1} + \dot{q}_{F2} \quad (42)$$

Der Quotient aus den nutzbaren Wärmeströmen der beiden Flüssigkeitskreisläufe zur initialen Einstrahlung auf das Fluidglas außen \dot{q}_{sol} stellen den Wirkungsgrad η des Kollektors dar:

$$\eta = \frac{\dot{q}_{Nutz_FG}}{\dot{q}_{sol}} \quad (43)$$

7.2.2 Ergebnisse der Solarkollektorfunktion von Fluidglas

Variationen von Schaltzuständen

Es wurden drei unterschiedliche Schaltzustände des Fluidglases simuliert. Variante 1 ist mit klarem Fluid in beiden Flüssigkeitskreisläufen, Variante 2 mit maximaler Einfärbung (3 Vol.-% Xfast) im äußeren Flüssigkeitskreislauf (F1) und Variante 3 mit maximaler Einfärbung im inneren Flüssigkeitskreislauf (F2). Die äußeren und inneren Wärmeübergangskoeffizienten sind mit den Standardwerten nach EN 673 berechnet. Bei Variante 2 wird zusätzlich noch der Einfluss der Windgeschwindigkeit an der Fassade untersucht. Dazu werden die äußeren und inneren Wärmeübergangskoeffizienten gemäß Kapitel 4.2.1 berechnet und die Windgeschwindigkeiten an der Fassade mit 1 m/s bzw. 10 m/s variiert (siehe Tabelle 40).

Variante Fluidglas	F1		F2		Windgeschwindigkeiten		
	klar	eingefärbt	klar	eingefärbt	nach EN 673	1 m/s	10 m/s
Fluidglas V1 (EN 673)	x		x		x		
Fluidglas V2 (EN 673)		x	x		x		
Fluidglas V2 (10 m/s)		x	x				x
Fluidglas V2 (1 m/s)		x	x			x	
Fluidglas V3 (EN 673)	x			x	x		

Tabelle 40: Variationen von Schaltzuständen des Fluidglases als Solarkollektor⁹³

⁹² Im Kühlfall hat das innere Fluid Kollektorgewinne, wenn die Fluidtemperatur niedriger ist als die Innenraumtemperatur.

⁹³ Randbedingungen Berechnungen: 800 W/m² senkrechte Einstrahlung, Außentemperatur 25°C, Innenraumtemperatur gemäß EN 7730 Kategorie A (24,5°C, Sommer), Massenstrom F1 und F2 1 l/min.

Ergebnisse

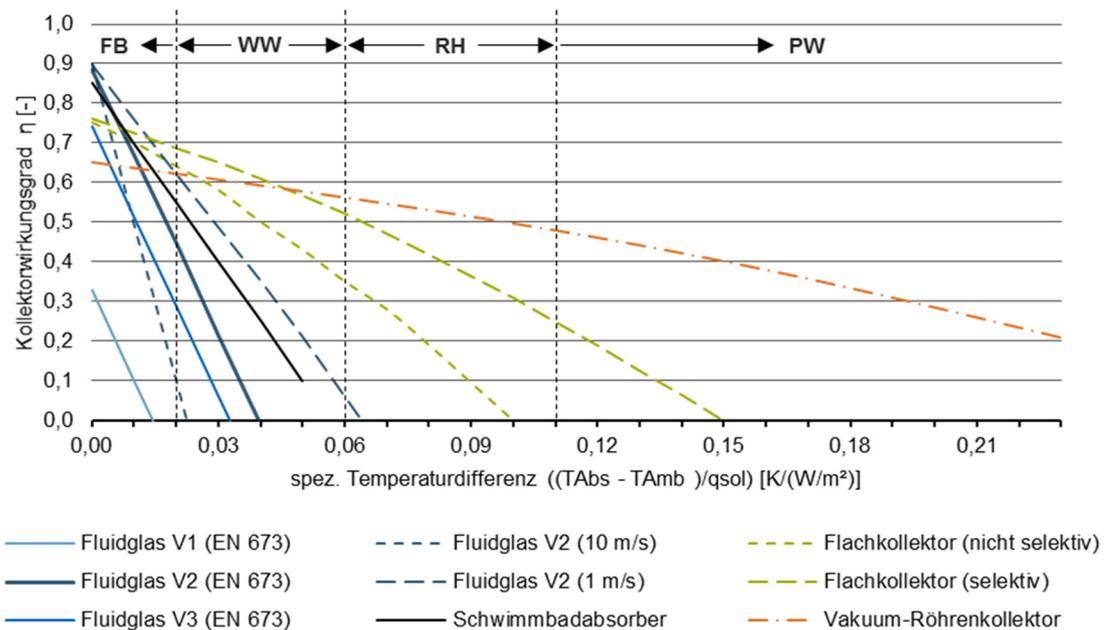


Abbildung 91: Schematische Darstellung des Wirkungsgrads von Fluidgläsern als Solarkollektor; Vergleich zu opaken Standard-Solarkollektoren in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung q_{sol} und der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Absorbertemperatur T_{abs} und Außenlufttemperatur T_{amb} (Vereinfachte Darstellung in Anlehnung an (Kaltschmitt, 2013, Abb. 4.11))⁹⁴

Wie in Abbildung 91 zu sehen ist, hat das Fluidglas mit maximaler Einfärbung des äußeren Fluids (V2) einen sehr hohen optischen Wirkungsgrad⁹⁵ mit ca. 90%. Dies bedeutet, dass lediglich ca. 10% der auf das Fluidglas auftreffenden, kurzwelligen Solarstrahlung nicht im Fluid absorbiert, sondern nach außen reflektiert oder in den Innenraum transmittiert werden. Bei maximaler Einfärbung des inneren Fluids (V3) sinkt der optische Wirkungsgrad auf ca. 70%. Ohne Einfärbung (V1) ist der optische Wirkungsgrad nur noch bei 30%. Bei zunehmender Temperaturdifferenz zwischen Fluidtemperatur (T_{Abs}) und der Außenlufttemperatur (T_{Amb}) nehmen die Kollektorstufenwirkungsgrade von Fluidgläsern stark ab. In Bereichen, ab denen i.d.R. die Nutzung für Brauchwarmwasser sinnvoll ist (0,02 K/Wm²), erreicht Fluidglas im besten Fall (V2) einen Wirkungsgrad von max. 40 bis 60%. Detaillierte Ergebnisse können dem Anhang 16.8 entnommen werden.

Fazit Solarkollektorfunktion

Der optische Wirkungsgrad von Fluidglaskollektoren ist mit ca. 90% bei Einfärbung im äußeren Fluid sehr hoch. Er ist vergleichbar mit dem von Schwimmbadkollektoren ohne Abdeckung und liegt über dem der opaken Referenzkollektoren mit Glasabdeckung (siehe Kapitel 2.8). Wird das innere Fluid eingefärbt, sinkt der optische Wirkungsgrad auf ein vergleichbares Niveau wie das

⁹⁴ FB = Freibaderwärmung; WW = Brauchwarmwasser; RH = Raumheizungsunterstützung, PW = Prozesswärme.

⁹⁵ Die Wirkungsgrade ohne Temperaturdifferenz zwischen mittlerer, Fluidtemperatur $F1$ und Außenlufttemperatur entsprechen in etwa dem optischen Wirkungsgrad.

von abgedeckten, opaken Kollektoren. Ohne Einfärbung ist die Transmission durch das Fluidglas in den Innenraum so hoch, dass der optische Wirkungsgrad weit unter dem der opaken Referenzkollektoren liegt. Bei zunehmender Temperaturdifferenz zwischen Fluidtemperatur und Außenraumtemperatur sinkt der Kollektorwirkungsgrad sehr schnell ab. Das Fluidglas hat einen vergleichbaren Verlauf des Kollektorwirkungsgrades wie der eines Schwimmbadkollektors. I.d.R. wird der Wirkungsgrad noch unter dem eines Schwimmbadkollektors liegen, lediglich bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten (ca. <1 m/s) ist er etwas höher.

Für einen effizienten Kollektorbetrieb von Fluidglas müssen die Temperaturdifferenzen gering gehalten werden. Bei entsprechender Steuerung des Fluidglases, wie in den Simulationen für die Standorte Moskau, München und Riad durchgeführt, liegen die Rücklaufemperaturen zwischen 15°C und 40°C (siehe Kapitel 8.3). Die relativ niedrigen Rücklaufemperaturen aus dem Fluidglas schränken nach heutiger Praxis die Möglichkeiten der Nutzung der solaren Wärmegewinne ein. Entsprechende Temperaturniveaus werden heute typischerweise für die solare Freibadheizung (FB) genutzt, eine Nutzung für Warmwasser (WW), Raumheizungsunterstützung (RH), Prozesswärme (PW) oder solare Kühlung sind nicht möglich oder aktuell nicht wirtschaftlich (vergleiche Kapitel 2.8).

In Kombination mit Wasser-Wasser-Wärmepumpen kann jedoch die durch das Fluidglas gewonnene Umweltwärme auch auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden, wie dies bei Grundwasserwärmepumpen mit Wassertemperaturen von ganzjährig, durchschnittlich ca. 10°C gängig ist. Die Effizienz der Wärmepumpe ist durch Vorlaufemperaturen die über der Außentemperatur liegen gegenüber z.B. Luft-Wasser-Wärmepumpen, die die Außenluft als Wärmequelle nutzen, gesteigert. Aktuelle Untersuchungen zu Niedertemperaturnetzten, mit Fluidtemperaturen zwischen 5°C und 40°C , in Kombination mit Wärmepumpen sehen Potentiale zur ganzjährigen Nutzung niedere Temperaturen für Warmwasserbereitung und zur Heizungsunterstützung (Heissler, Metz, Auer & Nemeth).

Regelt man das Fluidglas auf eine möglichst hohe Rücklauftemperatur, z.B. zur Nutzung für Brauchwarmwasser (WW), sinkt der Wirkungsgrad deutlich ab.

Der Vorteil von Fluidglas gegenüber anderen thermischen Solarkollektoren besteht darin, dass die Fassade vollständig mit Fluidglas ausgestattet werden kann, d.h. es steht ein Maximum an Kollektorfläche zur Verfügung.

7.3 Fluidglas als flächiges Heiz- und Kühlsystem

Für die Berechnung der Heiz- und Kühlleistung von Fluidglas werden die Wärmeströme zwischen dem inneren Fluid und dem Innenraum ($\dot{q}_{vZ11nZ9_ges}$) berücksichtigt (siehe Abbildung 90).

Heizen

Die Vorlauftemperatur des inneren Fluids variieren zwischen der Maximaltemperatur von 35°C und 25°C . Die Raumtemperaturen liegen zwischen 20°C und 24°C . Unter diesen Bedingungen ergeben sich spezifische Heizleistungen zwischen 34 bis 125 W/m^2 Fassadenfläche bei inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i zwischen 7,3 und $8,5$ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ (siehe Tabelle 41).

\dot{m} [l/min·m]	T_Z9_ein [°C]	T_Z9_aus [°C]	T_Z9_Ø [°C]	T_Z11 [°C]	spez. Heizleistung [W/m²]	α_i [W/m²K]	Anteil Strahlung/ Konvektion
5	35,0	34,6	34,8	20	125	8,5	61/39
1	35,0	33,0	34,0	20	117	8,4	61/39
1	35,0	33,5	34,2	24	84	8,3	64/36
1	30,0	28,7	29,3	20	74	8,0	63/37
1	30,0	29,1	29,6	24	42	7,7	63/37
1	25,0	24,3	24,7	20	34	7,3	67/33

Tabelle 41: Heizleistung von Fluidglas⁹⁶

Der Massenstrom hat keinen entscheidenden Einfluss auf den inneren Wärmeübergangskoeffizienten, allerdings ist die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Auslass geringer.

Kühlen

Zum Kühlen sind die Vorlauftemperaturen des inneren Flüssigkeitskreislaufs auf minimal 18°C beschränkt. Die Raumtemperatur schwankt zwischen 23°C und 26°C. Unter diesen Bedingungen ergeben sich spezifische Kühlleistungen zwischen 34 bis 60 W/m² bei inneren Wärmeübergangskoeffizienten α_i zwischen 7,2 und 7,7 W/m²K.

\dot{m} [l/min·m]	T_Z9_ein [°C]	T_Z9_aus [°C]	T_Z9_Ø [°C]	T_Z11 [°C]	spez. Heizleistung [W/m²]	α_i [W/m²K]	Anteil Strahlung/ Konvektion
5	18,0	18,2	18,1	26	60	7,7	64/36
1	18,0	18,9	18,4	26	58	7,7	64/36
1	18,0	18,5	18,3	23	34	7,2	67/33

Tabelle 42: Kühlleistung von Fluidglas⁹⁷

Der Massenstrom hat auch im Kühlfall keinen entscheidenden Einfluss auf den inneren Wärmeübergangskoeffizienten, die durchschnittliche Fluidtemperatur bleibt jedoch etwas konstanter.

Fazit Heizen

Mit niedrigen Vorlauftemperaturen von 25 - 30°C sind die Heizleistungen von Fluidglas mit bis zu 74 W/m² vergleichbar mit anderen flächigen Heizsystemen. Mit der maximalen Vorlauftemperatur von 35°C sind die Heizleistungen mit bis zu 125 W/m² deutlich höher (vergleiche Kapitel 2.9).

⁹⁶ Standort München: T_Z1 = -16°C, keine Einstrahlung, Windgeschwindigkeit = 3 m/s, Vorlauftemperatur F1 = 0°C. Fassadenhöhe 1 m.

⁹⁷ Standort München: T_Z1 = 32°C, keine Einstrahlung, Windgeschwindigkeit = 3 m/s, Vorlauftemperatur F1 = 32°C. Fassadenhöhe 1 m.

Aufgrund der geringen Speichermasse der inneren Glasscheibe reagiert das Fluidglassystem sehr schnell und ist damit nicht so träge wie z.B. Bauteilaktivierungen oder Fußbodenheizungen. Die geringen Vorlauftemperaturen und die geringe Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf mit maximal 2 K lassen eine effiziente Nutzung von regenerativen Energiequellen, z.B. Grundwasser mit Wärmepumpen, zur Heizung zu (siehe (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 176)).

Fazit Kühlen

Die Kühlleistung von Fluidglas ist mit 34 - 60 W/m² vergleichbar mit anderen flächigen Kühlsystemen, z.B. Fußboden- und Wandkühlsystemen. Kühlleistungen von Kühldecken liegen jedoch mit bis zu 120 W/m² deutlich darüber (vergleiche Kapitel 2.9).

Da beim Fluidglas moderate Vorlauftemperaturen zum Kühlen ausreichen und die Temperaturdifferenzen zwischen Vor- und Rücklaufemperatur des Fluids gering sind, eignet sich Fluidglas auch im Kühlfall für eine effiziente Nutzung von regenerativen Energiequellen. Grundwasser könnte z.B. ohne weiteren Energieaufwand zur Reduktion des Temperaturniveaus direkt zum Kühlen genutzt werden (siehe (Hausladen, 2003, S. 129)). Die Raumluft muss voraussichtlich entfeuchtet werden, um Kondensatbildung an der Glasoberfläche zu verhindern.

Ein Vorteil von Fluidglas gegenüber anderen flächigen Heiz- und Kühlsystemen, z.B. Bauteilaktivierung, Fußboden-, Wand- und Deckenheizung bzw. -kühlung, besteht darin, dass Glasflächen nicht in Konkurrenz zu anderen Funktionen stehen, z.B. Akustikelemente, Regale oder Schränke.

Ein Nachteil von Fluidgläsern besteht wiederum darin, dass die Heiz- und Kühlleistung von der Fassadenfläche abhängt. Wird die Fluidglasfläche reduziert, reduziert sich auch die entsprechende Leistung. In weiteren Untersuchungen müssen die Mindestfassadenflächen im Verhältnis zur Nutzfläche bestimmt werden. Darüber hinaus können nur Räume, die an der Fassade liegen, mit Fluidglas beheizt oder gekühlt werden. Für innenliegende Räume muss ein zusätzliches Wärme- bzw. Kälteübergabesystem integriert werden.

7.4 Wärmeströme zwischen den Zonen

Um die Wärmeströme zwischen den Zonen darzustellen, werden exemplarisch zwei Extremwittersituationen, Heizen in Moskau und Kühlen in Riad, und zwei moderate Situationen für Heizen und Kühlen in München berechnet. Von besonderem Interesse ist dabei, wie viel der Heiz- bzw. Kühlleistung des inneren Fluids (F2) dem Raum zur Verfügung steht bzw. Verluste nach außen sind. Die Heiz- und Kühlleistung des inneren Fluids (Z9) an den Innenraum (Z11) wird durch den Wärmestrom $\dot{q}_{vZ9nZ11}$ abgebildet, die Verluste an die mittlere Scheibe (Z6) durch den Wärmestrom \dot{q}_{vZ6nZ9} .

In den folgenden Darstellungen (und Tabelle 89 im Anhang 16.8) werden folgende Abkürzungen verwendet:

\dot{q}_{sol}	solar Einstrahlungsleistung senkrecht auf die Fassade, [W/m ²]
\dot{q}_{aZ234}	Absorbierte Strahlungsleistung in Zonen 2,3 und 4, [W/m ²]
\dot{q}_{aZ6}	Absorbierte Strahlungsleistung in Zone 6, [W/m ²]
\dot{q}_{aZ8910}	Absorbierte Strahlungsleistung in Zonen 8,9 und 10, [W/m ²]
\dot{q}_{vZ1nZ3}	Wärmestrom (gesamt) von Zone 1 (Außenraumluf) nach Zone 3 (äußeres Fluid), [W/m ²] ⁹⁸
\dot{q}_{vZ3nZ6}	Wärmestrom (gesamt) von Zone 3 nach Zone 6 (mittlere Scheibe), [W/m ²]
\dot{q}_{vZ6nZ9}	Wärmestrom (gesamt) von Zone 6 nach Zone 9 (inneres Fluid), [W/m ²]
$\dot{q}_{vZ9nZ11}$	Wärmestrom (gesamt) von Zone 9 nach Zone 11 (Innenraumluf), [W/m ²]
\dot{q}_{F1}	abgeführter Wärmestrom durch das äußere Fluid (F1), [W/m ²]
\dot{q}_{F2}	abgeführter Wärmestrom durch das innere Fluid (F2), [W/m ²]
\dot{m}_{F1}	Massenstrom äußeres Fluid (F1), [l/min·m]
\dot{m}_{F2}	Massenstrom inneres Fluid (F2), [l/min·m]
T_{F1_ein}	Einlasstemperatur äußeres Fluid (F1), [°C]
T_{F1_aus}	Auslasstemperatur äußeres Fluid (F1), [°C]
T_{F2_ein}	Einlasstemperatur inneres Fluid (F2), [°C]
T_{F2_aus}	Auslasstemperatur inneres Fluid (F2), [°C]
$T_{Z1\ bis\ Z11}$	Temperaturen in den Schichten von außen nach innen ⁹⁹

⁹⁸ In den Abbildungen wird bei der Bezeichnung die Richtung des Wärmestroms berücksichtigt, d.h. bei einer Wärmestromrichtung von außen nach innen (i.d.R. in der Kühlperiode) \dot{q}_{vZ1nZ3} , bei der Wärmestromrichtung von innen nach außen (i.d.R. in der Heizperiode) \dot{q}_{vZ3nZ1} . In der tabellarischen Darstellung sind die Zonen immer von außen nach innen benannt. Die Richtung des Wärmestroms wird durch das Vorzeichen gekennzeichnet.

⁹⁹ Die Temperaturangaben in den Zonen sind in der Mitte zwischen Ein- und Auslaß (mittlerer Höhe).

Extremesituation Heizen

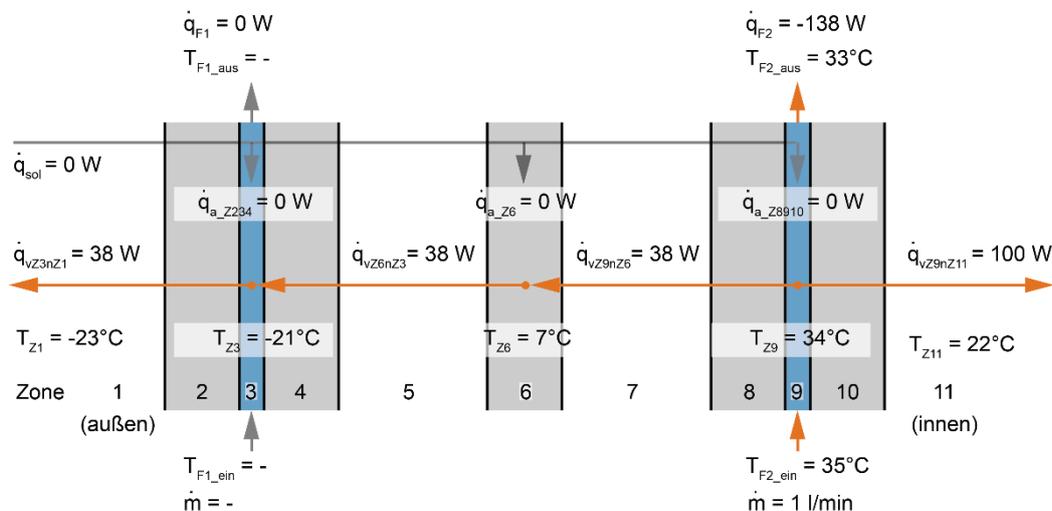


Abbildung 92: Schematische Darstellung der Wärmeströme zwischen den Zonen; 1m² FGGF; F1 klar, F2 klar; Moskau, Nord; 14.02.2013, 19 Uhr; Heizen; Ergebnisse aus EES-Fluidglasmodellen

In Abbildung 92 ist ein Extremheizfall am Standort Moskau bei -23°C Außenlufttemperatur ohne solare Einstrahlung dargestellt. Der äußere Fluidkreislauf ist ausgeschaltet¹⁰⁰, der innere wird mit 1 l/min·m betrieben. Die Innenraumluft wird auf 22°C, mit einer Vorlauftemperatur des inneren Fluids von 35°C, aufgeheizt. Dabei gehen 28% der Heizleistung an den Außenraum verloren, 72% der Leistung wird an den Innenraum abgegeben.

Moderate Situation Heizen

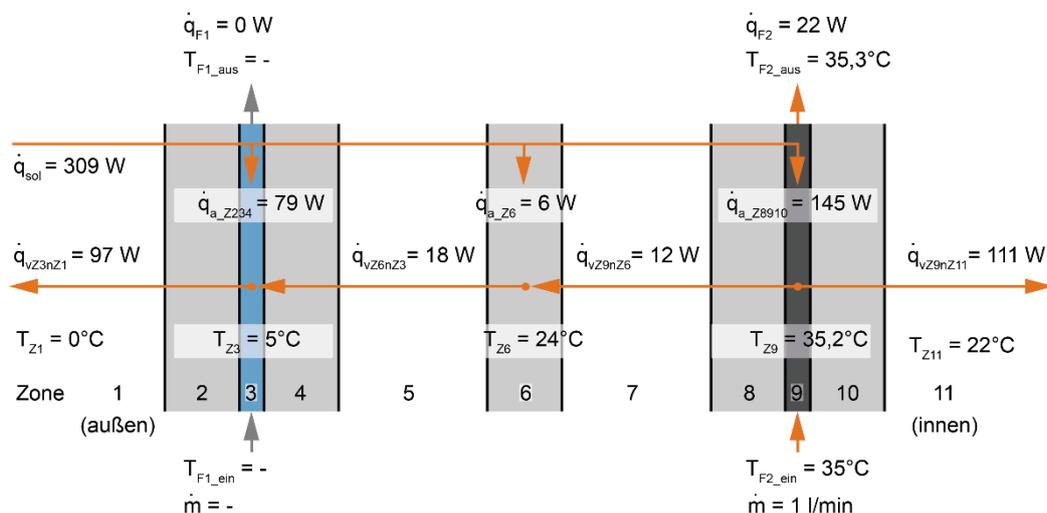


Abbildung 93: Schematische Darstellung der Wärmeströme zwischen den Zonen; 1m² FGGF; F1 klar, F2 max. eingefärbt (3 Vol.-% Xfast); München, Süd; 12.02.2013, 13 Uhr; Heizen; Ergebnisse aus EES-Fluidglasmodellen

¹⁰⁰ Aus diesem Grund sind in Abbildung 92 weder die Vor- und Rücklauftemperaturen noch der Massenstrom im äußeren Fluid angegeben (-). Gleiches gilt für und Abbildung 93.

In Abbildung 93 ist ein moderater Heizfall am Standort München bei 0°C Außenlufttemperatur und einer solaren Einstrahlung von 309 W/m² auf die Fassade dargestellt. Der äußere Fluidkreislauf ist ausgeschaltet, der innere wird mit 1 l/min·m betrieben. Das innere Fluid ist maximal eingefärbt. Die Innenraumluft wird auf 22°C, mit einer Vorlauftemperatur des inneren Fluids von 35°C, aufgeheizt. Das innere Fluid wird zusätzlich durch die absorbierte Solarstrahlung mit 145 W/m² erwärmt. In diesem Fall gehen nur 10% der Heizleistung an den Außenraum verloren, 90% der Leistung wird an den Innenraum abgegeben.

Moderate Situation Kühlen

In Abbildung 94 ist der Extremkühlfall am Standort München bei 32°C Außenlufttemperatur und einer solaren Einstrahlung von 853 W/m² auf die Fassade dargestellt. Im Verhältnis zu dem folgenden Kühlfall in Riad kann diese Situation als moderat bezeichnet werden. Die beiden Fluidkreisläufe werden mit 1 l/min·m betrieben. Das äußere Fluid ist maximal eingefärbt und hat eine Vorlauftemperatur von 20°C. Die Innenraumluft wird auf 24,5°C, mit einer Vorlauftemperatur des inneren Fluids von 18°C, gekühlt. Das innere Fluid wird durch die absorbierte Solarstrahlung mit 6 W/m² erwärmt. 10% der Kühlleistung muss für den Abtransport der Wärmegewinne aus dem Außenraum aufgebracht werden, 90% der Leistung kühlt die Innenraumluft.

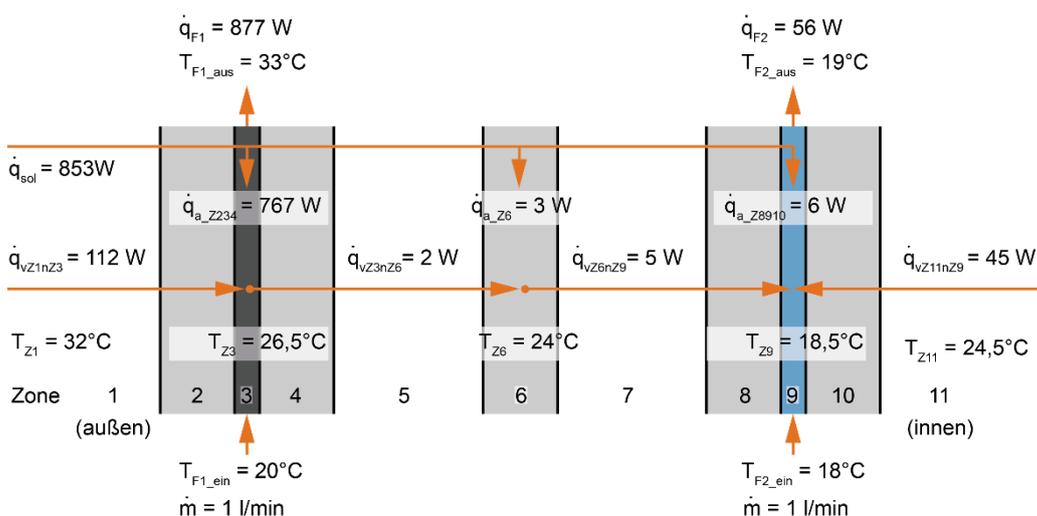


Abbildung 94: Schematische Darstellung der Wärmeströme zwischen den Zonen; 1m² FGGF; F1 max. eingefärbt (3 Vol.-% Xfast), F2 klar; München, West; 09.07.2013, 17 Uhr; Kühlen; Ergebnisse aus EES-Fluidglasmodellen

Extremsituation Kühlen

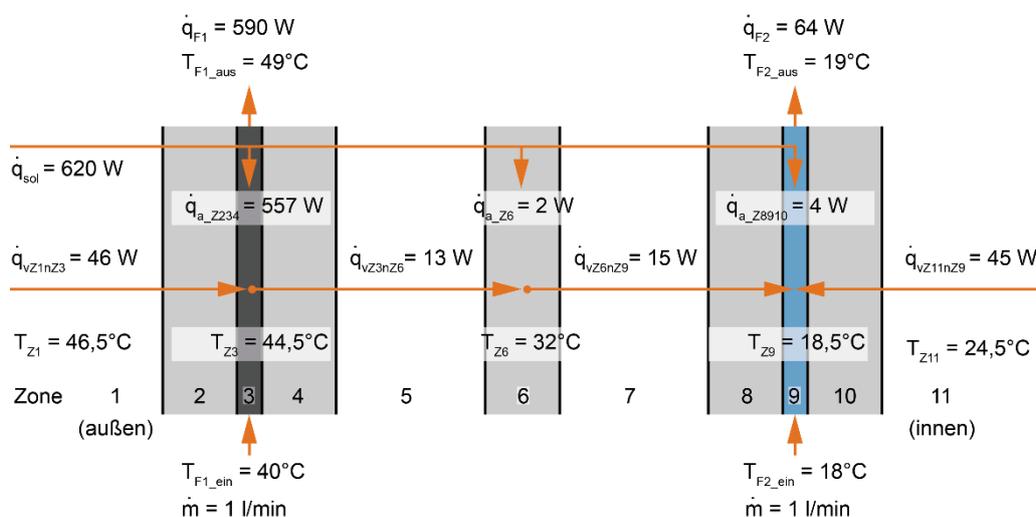


Abbildung 95: Schematische Darstellung der Wärmeströme zwischen den Zonen; 1m² FGGF; F1 max. eingefärbt (3 Vol.-% Xfast), F2 klar; Riad, West; 29.07.2013, 15 Uhr; Kühlen; Ergebnisse aus EES-Fluidglasmodellen

In Abbildung 95 ist der Extremkühlfall am Standort Riad bei 46,5°C Außenlufttemperatur und einer solaren Einstrahlung von 620 W/m² auf die Fassade dargestellt. Die beiden Fluidkreisläufe werden mit 1 l/min·m betrieben. Das äußere Fluid ist maximal eingefärbt und hat eine Vorlauftemperatur von 40°C. Die Innenraumluft wird auf 24,5°C, mit einer Vorlauftemperatur des inneren Fluids von 18°C, gekühlt. Das innere Fluid wird durch die absorbierte Solarstrahlung mit 4 W/m² erwärmt. 25% der Kühlleistung muss für den Abtransport der Wärmegewinne aus dem Außenraum aufgebracht werden, 75% der Leistung kühlt die Innenraumluft. (Alle Ergebnisse sind auch in Tabelle 89 im Anhang 16.8 tabellarisch dargestellt).

Fazit Wärmeströme

Bei zunehmenden Temperaturunterschieden zwischen dem äußeren und dem inneren Fluid steigen die Verluste des inneren Fluids an den Außenraum stark an. Trotz der beiden Low-E-Beschichtungen der Verglasung und der Kryptongasfüllung stellt sich ein nicht zu vernachlässigender Wärmestrom zwischen dem inneren und dem äußeren Fluid ein. Bei extremen Heiz- und Kühlfällen gehen dadurch ca. ¼ der Leistung des inneren Fluids an den Außenraum verloren. Für den Heizfall wurde die Extremsituation in Moskau, für den Kühlfall die in Riad exemplarisch dargestellt. Bei moderateren klimatischen Bedingungen, z.B. in München, sind die Verluste nach außen mit ca. 10% der Heiz- und Kühlleistung deutlich geringer. In jedem Fall muss die thermische Trennung zwischen den Fluidschichten möglichst gut sein, um die Wärmeübertragung zu minimieren. Bei moderaten Temperaturen im äußeren Fluid kann die Effizienz der Heiz- und Kühlfunktion des inneren Fluids erhöht werden. Dies sollte bei der Steuerung des Massenstroms und der Vorlauftemperatur des äußeren Fluidkreislaufs berücksichtigt werden.

7.5 Hinweise Langzeitstabilität des Fluids

Grundsätzlich ist es erstrebenswert, eine möglichst lange Nutzung der Fluide und Einfärbungen zu erreichen. Lebenszyklusanalysen des Fluidglases, die von der TUM im Rahmen des EU-Projekts „FLUIDGLASS“ erstellt wurden, haben gezeigt, dass ein erheblicher Anteil des Energieaufwands und der Umweltauswirkungen in der Herstellung der Frostschutzmittel für das Fluid liegen. Das Fluid sollte daher einen möglichst geringen Anteil von Frostschutzmittel beinhalten und möglichst selten ausgetauscht werden. Die Langzeitstabilität des Fluids und der Einfärbung ist jedoch nicht vergleichbar kritisch wie bei anderen adaptiven Verglasungen, da im Fall von Fluidglas die Flüssigkeiten ausgetauscht werden können und damit nicht über die gesamte Lebensdauer der Verglasungen (ca. 30 Jahre) stabil sein müssen.

7.6 Hinweis Fluidglas ohne Fluidfüllung

Um im Winterbetrieb auf Frostschutzmittel im äußeren Fluid verzichten zu können und keine Absorption im NIR-Bereich im äußeren Fluid zu haben, müsste der äußere flüssigkeitsdurchströmte Scheibenzwischenraum vollständig entleert werden. Wie in Abbildung 96 zu sehen ist, ist dies aus ästhetischen Gründen nicht möglich. Es bleiben Wasser bzw. Kondensat und ggf. Ablagerungen an den Scheiben zurück, die Durchsicht ist damit nicht mehr gegeben. Eine vollständige Trocknung des Systems ist zumindest bei den aktuellen Prototypen nicht möglich.



Abbildung 96: Entleerter Fluidglas Prototyp im Modellraumprüfstand der TUM (Foto: Heinrich Kleeberger)

7.7 Pumpenstrombedarf

Als Grundlage für die Gebäudesimulationen werden die möglichen Volumenströme im Fluidglassystem und die daraus resultierenden Druckverluste ermittelt. Darauf basierend, wird der Pumpenstrombedarf überschlägig berechnet, um grundsätzlich dessen Relevanz auf den Energiebedarf eines Büroraums mit Fluidglasfassade abschätzen zu können.

Der Pumpenstrombedarf wird bei der Berechnung des Nutzenergiebedarfs sowohl bei einem Raum mit Fluidglasfassade als auch bei vergleichbaren Büroräumen mit konventionellen Heiz- und Kühlsystemen jedoch nicht berücksichtigt.¹⁰¹

Für die folgenden Berechnungen wird nur eine flüssigkeitsführende Schicht untersucht. Bei einer Gesamtbilanzierung müssten beide Fluidschichten – äußeres und inneres Fluid – berücksichtigt werden.

Vorgaben aus der Heizungstechnik

In Heizungssystemen werden die Rohrdurchmesser so gewählt, dass die Fließgeschwindigkeiten nicht über 1 m/s liegen, für Heizkörperanschlüsse zwischen 0,1 m/s und 0,4 m/s. Größere Fließgeschwindigkeiten führen zu höheren Stromkosten, Geräuschentwicklung und Erosionserscheinungen. I.d.R. werden keine kleineren Heizungsrohre als DN 10 mit einem Innendurchmesser von 13,5 mm verwendet. (Burkhardt, Kraus & Ziegler, 2006, S. 301)

Ausgangslage Fluidglas

Die Planung des Flüssigkeitskreislaufs, der an die Fluidglaselemente angeschlossen werden würde, liegt zum aktuellen Zeitpunkt nicht vor. Aus diesem Grund werden die Berechnungen für den erwartenden Druckverlust nur für die Fluidglasfassaden und die Anschlüsse direkt am Glaselement durchgeführt. Als Datenbasis werden die Abmessungen des Einzelbüro-Typraums nach VDI mit einer Grundfläche von 17,5 m² und die aktuellen Prototypen aus dem EU-Projekt „FLUIDGLASS“ herangezogen (siehe Abbildung 97 und Abbildung 98). Als Fluid wird reines Wasser, bei 30°C und einem Druck von 0,981 bar, ohne zusätzliche Additive angenommen¹⁰².

¹⁰¹ Der Hilfsenergiebedarf (Strom) für Pumpen müsste bei der Berechnung der End- und Primärenergie berücksichtigt werden.

¹⁰² Der Pumpenstrombedarf würde sich bei einem Gemisch, z.B. mit Frostschutzmittel erhöhen, da die Viskosität des Fluids zunimmt.

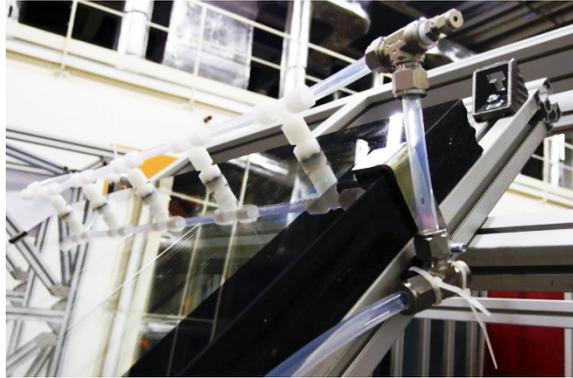


Abbildung 97: Foto oberer Anschluss Fluidglaskreislauf am Fluidglas Prototyp auf dem Solarprüfstand am CEA-Ines (Quelle: (Riche, Feichter & Gstoehl, 2015, S. 12)

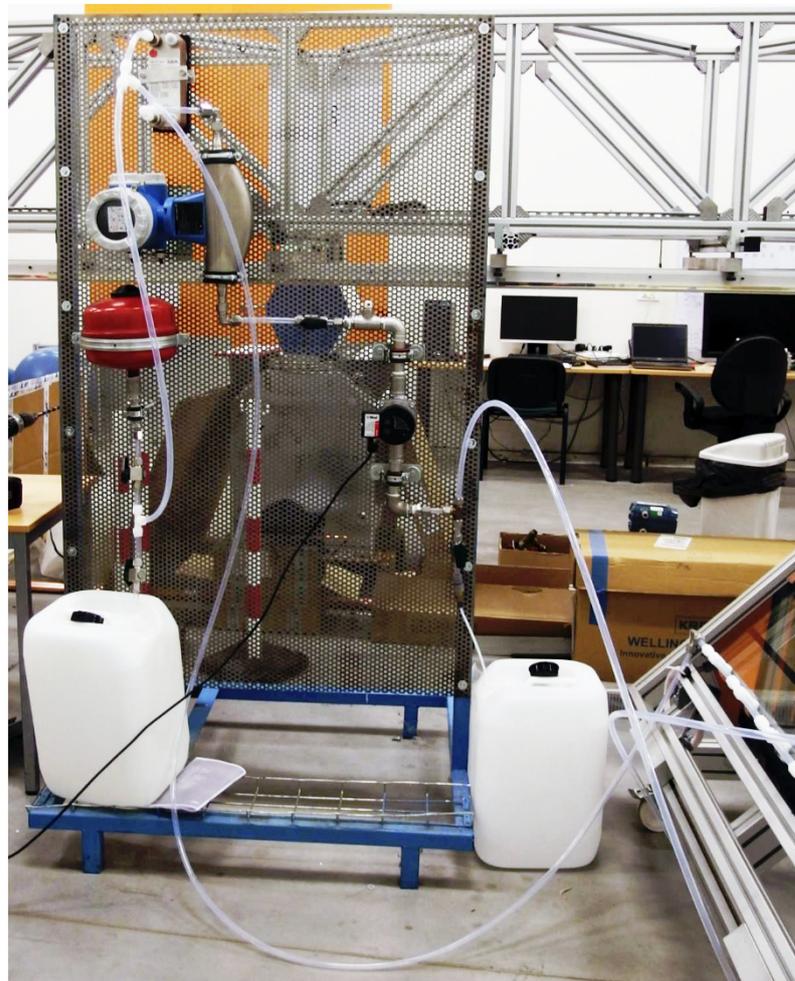


Abbildung 98: Foto Fluidglaskreislauf und unterer Anschluss Fluidglaskreislauf am Fluidglas Prototyp auf dem Solarprüfstand am CEA-Ines (Quelle: (Riche, Feichter & Gstoehl, 2015, S. 14)

Die Fluidglasfassade für den gewählten Einzelbürraum hat eine Fassadenhöhe von 3,0 m und eine Fassadenbreite von 3,5 m. Sie wird in drei raumhohe Fluidglaselemente mit einer Breite von ca. 1,15 m aufgeteilt. Der Achsabstand der Ein- bzw. Auslässe beträgt 17,5 cm.

Daraus ergeben sich pro flüssigkeitsführender Schicht 6 Ein- und 6 Ausläufe (siehe Abbildung 32 und Abbildung 99)¹⁰³.

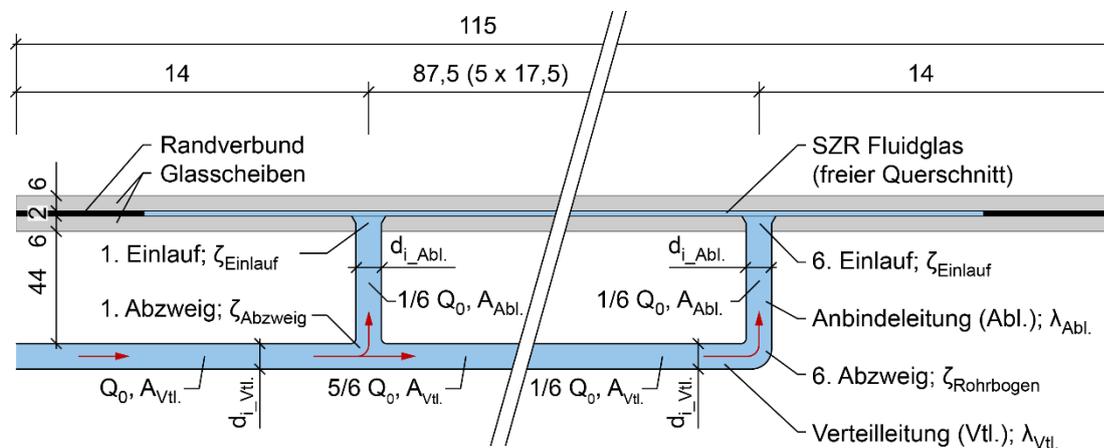


Abbildung 99: Detail Horizontalschnitt Fluidgaselement mit Rohrleitungen und Anschlüssen; Vorlauf (Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben NTB.)¹⁰⁴

Die Ein- und Ausläufe sind senkrecht zur Glasebene angeordnet. An jedem Ein- und Auslauf ist eine Anbindeleitung angebracht, die über einen Abzweig-T-Stück bzw. ein Rohrbogen am letzten Ein-/Auslauf – an die Verteilleitung angeschlossen wird (Abbildung 99). In den aktuellen Prototypen sind die Rohrleitungen aus Kunststoff (Polyvinylidenfluorid (PVDF)) mit einem Innendurchmesser d_i von 10 mm (siehe (Riche, Feichter, Gstoehl, Mayer & Mayer, 2015, S. 6–9).

Die Scheibenzwischenräume der flüssigkeitsführenden Schichten sind jeweils 2 mm tief und 1,05 m breit. Das Fluidgaselement wird mit einem durchschnittlichen Druck von einem Bar betrieben, dabei herrscht im unteren Bereich ein leichter Überdruck, im oberen Bereich leichter Unterdruck (minimal ca. 0,5 bar) (Telian & Moisi, 31.11.2013 / 2013, S. 8). Die bisherigen Prototypen wurden mit Volumenströmen von 1 l/min pro Meter Fluidglasbreite betrieben. In den Gebäudesimulationen werden auch höhere Volumenströme simuliert und entsprechend bei den Untersuchungen der Druckverluste berücksichtigt.

Der vorgegebene Volumenstrom Q_0 im Fluidgaselement herrscht auch in den Verteilleitungen bis zum ersten Abzweig zu den Anbindeleitungen vor. Es wird vereinfacht angenommen, dass sich in den sechs Anbindeleitungen jeweils ein Sechstel des Volumenstroms einstellt. In den

¹⁰³ Die linearen Abstandhalter im flüssigkeitsdurchströmten Scheibenzwischenraum sind in den Berechnungen für die Druckverluste bzw. den Pumpenstrombedarf nicht berücksichtigt.

¹⁰⁴ Dargestellt ist der Vorlauf zum Fluidgaselement. Die Anschlüsse für den Rücklauf sind analog dazu ausgeführt, jedoch ändert sich die Fließrichtung. Dadurch unterscheiden sich die Einzelverluste für den Vor- und den Rücklauf voneinander.

Verteilungen nach dem ersten Abzweig reduziert sich der Volumenstrom daher jeweils um ein Sechstel.

Die Fließgeschwindigkeit v wird wie folgt berechnet (Hakenesch, S. 37):

$$v = \frac{Q}{A} \quad (44)$$

mit

v mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

Q Volumenstrom [m³/s]

A Querschnittsfläche [m²]

Die Fließgeschwindigkeit ist demnach in der Verteilleitung bis zum ersten Abzweig (Vorlauf) bzw. ab dem letzten Abzweig (Rücklauf) am größten und darf die maximale Fließgeschwindigkeit von 0,4 m/s nicht überschreiten.

Pumpenleistung

Die erforderliche elektrische Pumpenleistung P_{el} wird aus der Förderhöhe h_F bzw. dem Gesamtdruckverlust¹⁰⁵ Δp_{ges} und dem Gesamtwirkungsgrad η_{ges} der Pumpe wie folgt berechnet (Freimann, 2009, S. 91):

$$P_{el} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot h_F}{\eta_{ges}} = \frac{Q \cdot \Delta p_{ges}}{\eta_{ges}} \quad (45)$$

mit

ρ Dichte des Fluid [kg/m³]

g Fallbeschleunigung 9,81 m/s²

Q Volumenstrom [m³/s]

h_F Förderhöhe [m]

η_{ges} Gesamtwirkungsgrad der Pumpe [%]

Als Gesamtwirkungsgrad η_{ges} der Umwälzpumpe, d.h. hydraulischer und elektrischer Wirkungsgrad, werden 30% angenommen (Benke & Unterpertinger, S. 6). Die erforderliche Pumpenleistung wird auf den Volumenstrom in der Rohrleitung des Rücklaufs bezogen.

Für eine worst case Abschätzung des möglichen Pumpenstrombedarfs werden die maximalen, jährlichen Betriebsstunden von 3250 Std./a des inneren Fluidglaskreislaufs für Heizen oder Kühlen gemäß DIN V 18599 (DIN V 18599-10, S. 33) für den Einzelbüroraum mit 10,5 m² Fluidglasfläche und 17,5 m² Grundfläche herangezogen. Die tatsächlichen Betriebsstunden werden in den Gebäudesimulationen ermittelt.

¹⁰⁵ Siehe Berechnung Förderhöhe.

Förderhöhe

Die Förderhöhe wird über den Druckverlust Δp berechnet (Hakenesch, S. 20):

$$h_F = \frac{\Delta p_{ges}}{\rho \cdot g} \quad (46)$$

Im geschlossenen Fluidglassystem kann analog zu einem Heizungssystem die geodätische Höhe, d.h. die Höhe des Fluidglaselements, vernachlässigt werden. Für die Förderhöhe sind lokale Einzeldruckverluste Δp_e und leitungsängenabhängige, kontinuierliche Druckverluste durch Rohrreibung Δp_r ausschlaggebend. (Benke & Unterpertinger, S. 4)

Gesamtdruckverlust

Der Gesamtdruckverlust Δp_{ges} im System wird über die Addition der gesamten Einzelverluste $\sum \Delta p_e$ und der Rohrreibungsverluste $\sum \Delta p_r$ berechnet:

$$\Delta p_{ges} = \sum \Delta p_e + \sum \Delta p_r \quad (47)$$

Einzelverluste

Die Einzelverluste Δp_e an den Düsenbändern, den Ein- bzw. Auslässen und den T-Stücken bzw. Rohrbögen werden mittels eines lokalen, dimensionslosen Verlustbeiwerts ζ berechnet (Freimann, 2009, S. 82)¹⁰⁶:

$$\Delta p_e = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (48)$$

Die verwendeten Verlustbeiwerte sind im Anhang 16.9 aufgeführt.

Reibungsverluste

Nach der Darcy-Weisbach Gleichung werden die Rohrreibungsverluste Δp_r in den Teilstrecken – Rohrleitungen und freier Fluidglasquerschnitt – berechnet¹⁰⁷:

$$\Delta p_r = \lambda \cdot \frac{l}{d_h} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2} \quad (49)$$

mit

- λ Reibungsbeiwert [-]
- l Abschnittslänge [m]

¹⁰⁶ In der Quelle werden Verlusthöhen berechnet, hier die Druckverluste nach diesem Prinzip.

¹⁰⁷ Es werden nur die Leitungslängen in der Breite des Fluidglaselements berechnet. Weitere Leitungsführungen inkl. eventueller Bögen und andere Einzeldruckverluste werden nicht berücksichtigt, da diese zum aktuellen Zeitpunkt nicht feststehen. Die Leitungsführungen für das Fluidglaselement stellen einen vereinfachten Ansatz dar, der in Zukunft optimiert werden könnte.

D_h hydraulischer Durchmesser des Rohrs¹⁰⁸ bzw. des Fluidglaselements [m]

v mittlere Fließgeschwindigkeit [m/s]

Reynoldszahl

Zur Berechnung des Reibungsbeiwerts λ muss die Strömungsart – laminar oder turbulent – über die Reynoldszahl Re bestimmt werden. Eine laminare Strömung liegt vor, wenn der Wert unterhalb der kritischen Reynoldszahl Re_{krit} von 2300 liegt. Die Reynoldszahl wird grundsätzlich wie folgt berechnet (Idelchik, 1986, S. 57–87):

$$Re = \frac{v \cdot D_h}{\vartheta} \quad (50)$$

mit

ϑ kinematische Viskosität des Fluids [m²/s]

Für runde Rohrquerschnitte wird der Reibungsbeiwert λ vereinfacht nach (Idelchik, 1986, S. 79) berechnet:

$$\begin{array}{lll} Re < 2000:^{109} & 2000 \leq Re \leq 4000: & Re > 4000: \\ = \frac{64}{Re} & \lambda = 0,04 & \lambda = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,64)^2} \end{array} \quad (51)$$

Für nicht runde Querschnitte kann der Reibungsbeiwert λ_{rec} mit einem Korrekturfaktor k_{non-c} wie folgt berechnet werden (Idelchik, 1986, S. 64–87):

$$\lambda_{non-c} = k_{non-c} \cdot \lambda \quad (52)$$

Der Korrekturfaktor ist abhängig vom Verhältnis Tiefe durch Breite und variiert von 0,89 für quadratische Querschnitte bis zu 1,50 bei sehr schmalen Querschnitten. Für das Fluidglaselement mit einem sehr schmalen rechteckigen Querschnitt wird der ungünstigste Faktor von 1,5 angenommen:

$$\lambda_{non-c} = \frac{1,5 \cdot 64}{Re} \quad (53)$$

Der hydraulische Durchmesser D_h von nicht runden Rohrquerschnitten wird über die Querschnittsfläche A und den benetzten Umfang U bzw. die Breite B und Tiefe T (entspricht beim Fluidglas dem SZR) wie folgt berechnet:

$$D_h = \frac{A}{U} = \frac{2 \cdot B \cdot T}{B + T} \quad (54)$$

¹⁰⁸ Bei runden Querschnitten wird der Rohrdurchmesser verwendet.

¹⁰⁹ Siehe Hagen-Poiseuille Gesetz.

Es wird von hydraulisch glatten Leitungen ausgegangen und die Wandrauheit vernachlässigt (Idelchik, 1986, S. 59–65).

Berechnungen Druckverluste und Pumpenstrombedarf

Fließgeschwindigkeiten und Leitungsdurchmesser

Die Fließgeschwindigkeiten sowohl im Fluidglaselement als auch in den Rohrleitungen sollen gemäß der Grundlagen aus der Heizungstechnik max. 0,4 m/s betragen.

Im Fluidglaselement wird darüber hinaus eine laminare Strömung angestrebt, um einerseits die Druckverluste möglichst gering zu halten und andererseits keine optisch störenden Turbulenzen beim Ein- bzw. Entfärben zu erhalten.

Beim untersuchten Fluidglaselement mit einem SZR von 0,002 m und einer Breite von 1,05 m, d.h. einem hydraulischen Durchmesser von 0,004 m, könnten Volumenströme von bis zu 48 l/min·m erfolgen, um eine Fließgeschwindigkeit von 0,4 m/s nicht zu überschreiten¹¹⁰. Die Strömung würde erst ab einem Volumenstrom von 59 l/min turbulent werden (siehe Tabelle 43).

Volumenstrom		Fließgeschwindigkeit	Reynoldszahl
[l/min·m]	[m³/s]	[m/s]	[-]
1	1,75E-05	0,0083	41
9	1,58E-05	0,0750	371
10	1,75E-04	0,0833	413
20	3,50E-04	0,1667	826
48	8,40E-04	0,4000	1983
56	9,80E-04	0,4667	2313

Tabelle 43: Fließgeschwindigkeiten und Reynoldszahlen in Abhängigkeit der Volumenströme im Fluidglaselement; SZR 0,002 m, Breite 1,05 m

Zur Dimensionierung der Rohrleitungen des Flüssigkeitskreislaufs, der an die Fluidgläser angeschlossen wird, werden die Fließgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von variierenden Rohrdurchmessern und Volumenströmen berechnet. Als Basisvariante wird der Flüssigkeitskreislauf des Prototypen im Solarprüfstand vom CEA-INES mit einem Innendurchmesser d_i von 10 mm angenommen (siehe Abbildung 97). Weitere Rohrquerschnitte werden analog zu DIN 8062 Tabelle 1 variiert (DIN 8062, S. 6).

¹¹⁰ Bei den Berechnungen werden die Abstandhalter im Scheibenzwischenraum vernachlässigt. Es wird ein freier Querschnitt angenommen.

	Kunststoffrohre Prototyp	Kunststoffrohre gemäß DIN 8062 Tabelle 1			
Außendurchmesser d [mm]	12	16	25	32	40
Innendurchmesser d_i [mm]	10	13,6	22	28,8	36,8

Tabelle 44: Rohrdurchmesser von Kunststoffrohren nach DIN 8062 bzw. Herstellerangaben

Der Volumenstrom Q_0 in der Verteilleitung ist bis zum ersten Abzweig am größten. Aus diesem Grund wird für die Bemessung der Rohrdurchmesser dieser ungünstigste Fall herangezogen. In den Anbindeleitungen können die Rohrdurchmesser deutlich geringer gewählt werden, da nur ein Sechstel des Volumenstroms anfällt (siehe Tabelle 45).

		Verteilleitung bis zum ersten Abzweig				Anbindeleitungen			
		Innendurchmesser d_i [mm]				Innendurchmesser d_i [mm]			
		10	22	28,8	36,8	10 13,6			
Volumenstrom Q_0		Fließgeschwindigkeit				Volumenstrom	Fließgeschwindigkeit		
[l/min·m]	[m³/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m³/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
1	1,8E-05	0,22	0,05	0,03	0,02	2,9E-06	0,04	0,02	
2	3,5E-05	0,45	0,09	0,05	0,03	5,8E-06	0,07	0,04	
3	5,3E-05	0,67	0,14	0,08	0,05	8,8E-06	0,11	0,06	
4	7,0E-05	0,89	0,18	0,11	0,07	1,2E-05	0,15	0,08	
5	8,8E-05	1,11	0,23	0,13	0,08	1,5E-05	0,19	0,10	
6	1,1E-04	1,34	0,28	0,16	0,10	1,8E-05	0,22	0,12	
7	1,2E-04	1,56	0,32	0,19	0,12	2,0E-05	0,26	0,14	
8	1,4E-04	1,78	0,37	0,21	0,13	2,3E-05	0,30	0,16	
9	1,6E-04	2,01	0,41	0,24	0,15	2,6E-05	0,33	0,18	
10	1,8E-04	2,23	0,46	0,27	0,16	2,9E-05	0,37	0,20	
15	2,6E-04	3,34	0,69	0,40	0,25	4,4E-05	0,56	0,30	
20	3,5E-04	4,46	0,92	0,54	0,33	5,8E-05	0,74	0,40	

Tabelle 45: Fließgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Volumenströme und Leitungsquerschnitte in den Rohrleitungen (fett gedruckte Zahlen entsprechen zu hohen Fließgeschwindigkeiten)

Wie in Tabelle 45 zu sehen ist, kann ein Fluidglaskreislauf mit einem Innendurchmesser von 10 mm nur mit einem Volumenstrom von 1 l/min·m betrieben werden. Bei höheren Volumenströmen müssen die Durchmesser in der Verteilleitung vergrößert werden, damit die vorgegebene Fließgeschwindigkeit von 0,4 m/s nicht überschritten wird. Bei Verteilleitungen mit 22 mm Innendurchmesser können Volumenströme von bis zu 9 l/min·m, mit 28,8 mm bis zu 15 l/min·m und mit 36,8 mm bis zu 24 l/min·m gefahren werden. Die Anbindeleitungen können mit 10 mm Innendurchmesser bis zu 10 l/min·m und mit 13,6 mm bis zu 20 l/min·m verwendet werden.

Druckverluste und Pumpenstrombedarf

Die Berechnung der Druckverluste erfolgt für zwei Varianten. Die erste Variante entspricht den aktuellen Prototypen mit Verteil- und Anbindeleitungen mit einem Innendurchmesser von 10 mm.

Für diesen Fall wird der Volumenstrom mit einem Liter pro Minute pro Meter Breite Fluidglaselement berechnet. Die zweite Variante soll Volumenströme von bis zu 20 l/min·m Fließgeschwindigkeit von 0,4 m/s nicht überschreiten. Daraus ergeben sich Verteilungen mit einem Innendurchmesser von 36,8 mm und Anbindeleitungen mit 13,6 mm.

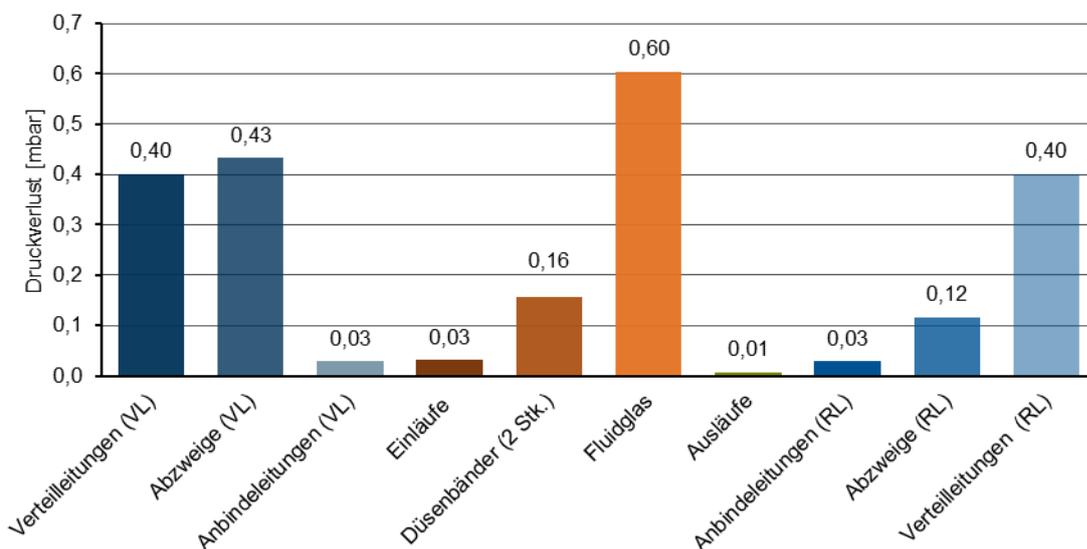


Abbildung 100: Druckverluste [mbar] im Fluidglassystem (Variante 1); Volumenstrom 1 l/min·m; Rohrleitungen 10 mm Innendurchmesser¹¹¹

Der Druckverlust bei Variante 1 bei einem Fluidglaselement mit der Breite von 1,05 m und einer Höhe von 3,0 m beträgt 2,2 mbar. Für die gesamte Fassade, d.h. 3 Fluidglaselemente, beträgt der Druckverlust 6,6 mbar. Bei einem Gesamtwirkungsgrad der Umwälzpumpe von 30% und 3250 Betriebsstunden pro Jahr würde sich der Pumpenstrombedarf auf ca. 0,126 kWh/a für die gesamte Fassade belaufen. Umgerechnet auf die Bürogrundfläche von 17,5 m² ergäbe sich ein spezifischer Pumpenstrombedarf von ca. 0,01 kWh/m²a (siehe Tabelle 92).¹¹² Der Pumpenstrombedarf für die Fluidglasfassade spielt daher für die Energiebilanz des Büroraums bei einem Volumenstrom von 1 l/min·m keine entscheidende Rolle.¹¹³

Wie in Abbildung 100 zu sehen ist, ist der Einfluss des Fluidglaselements (freier Querschnitt) auf den Druckverlust am höchsten. Bei einem Innendurchmesser von 10 mm sind jedoch die Druckverluste in den Verteilungen und den Abzweigen im Vorlauf annähernd gleich groß.

Erhöht man die Rohrleitungsquerschnitte gemäß Variante 2, ist der Druckverlust im Fluidglassystem aufgrund der geringeren Druckverluste in den Rohrleitungen deutlich geringer.

¹¹¹ VL = Vorlauf, RL = Rücklauf; Fluidglas = freier Querschnitt des Fluidglaselements ohne Abstandhalter.

¹¹² Bei Wassertemperaturen von 20°C würde der Strombedarf auf 0,008 kWh/m²a ansteigen, bei 40°C auf 0,0066 kWh/m²a minimal sinken.

¹¹³ Würde man anstelle von reinem Wasser bei 30°C ein Gemisch aus 70% Wasser und 30% Propylenglycol bei 30°C verwenden, würde der jährliche Strombedarf auf ca. 0,014 kWh/m²a ansteigen. In Klimazonen mit Außentemperaturen unter 0°C muss im äußeren Fluid ein Frostschutzmittel eingesetzt werden um Einfrieren zu verhindern.

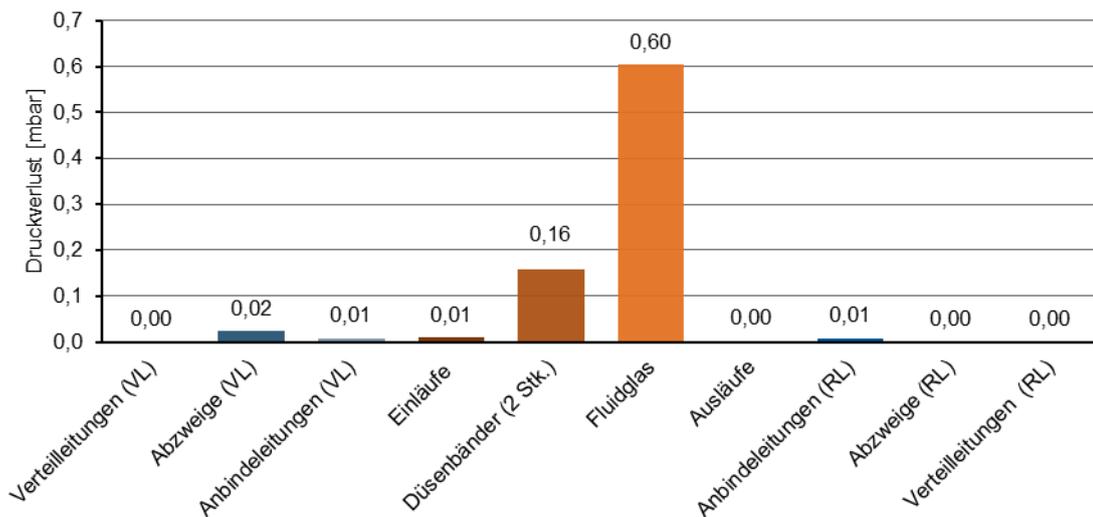


Abbildung 101: Druckverluste [mbar] im Fluidglassystem; Volumenstrom 1 l/min·m; Verteilungen 36,8 mm, Anbindeleitungen 13,6 mm Innendurchmesser (Variante 2)

Bei einem Volumenstrom von 1 l/min·m beträgt der Druckverlust für ein Fluidglaselement inkl. Rohrleitungssystem bei 0,82 mbar (siehe Abbildung 101).

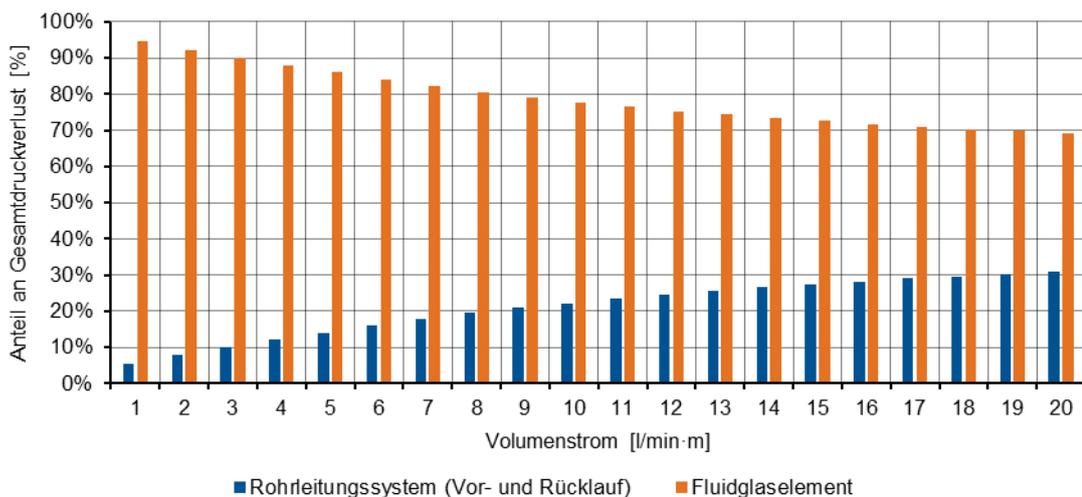


Abbildung 102: Verteilung der Druckverluste in der Fluidglasfassade (Variante 2) bei variierenden Volumenströmen¹¹⁴

Der Anteil des Fluidglaselements (freier Querschnitt Fluidglas, Ein-/Ausläufe und Düsenbänder) am Gesamtdruckverlust in der Fluidglasfassade beträgt ca. 95% bei einem Volumenstrom von 1 l/min·m. Bei ansteigenden Volumenströmen nimmt der Anteil des Fluidglaselements am Gesamtdruckverlust kontinuierlich ab. Bei einem Volumenstrom von 20 l/min·m liegt dieser nur noch bei ca. 69% (siehe Abbildung 102).

¹¹⁴ Rohrleitungssystem = Verteil- und Anbindeleitungen und Abzweige für Vor- und Rücklauf; Fluidglaselement = Ein- und Ausläufe, Düsenbänder und Fluidglas (freier Querschnitt).

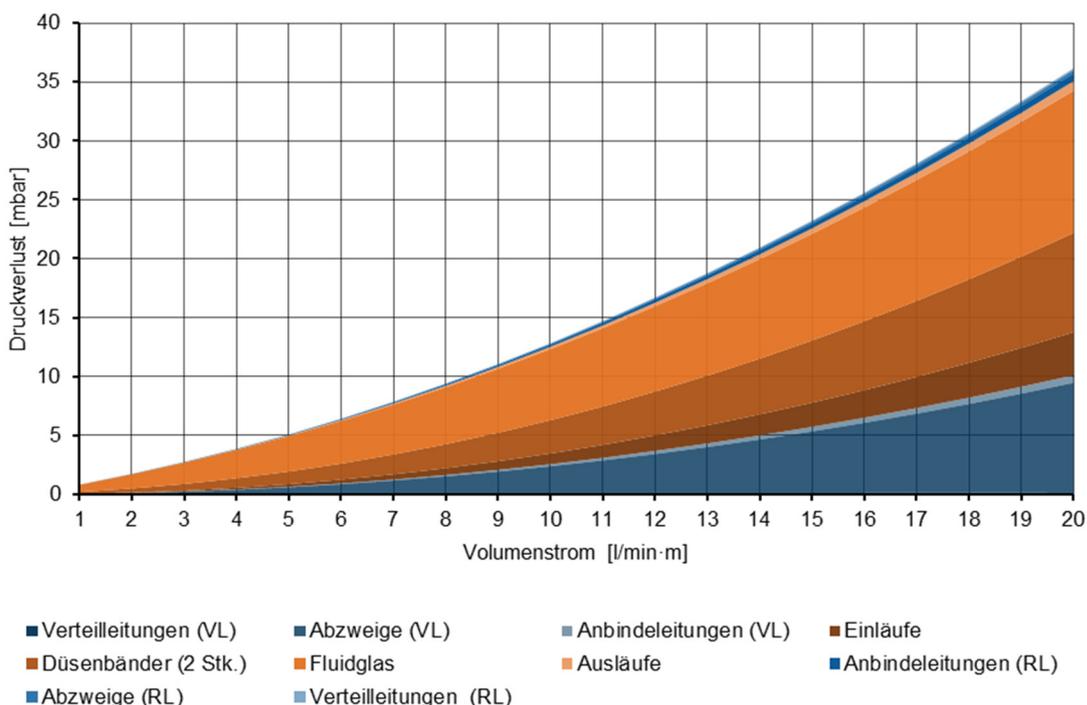


Abbildung 103: Druckverluste [mbar] für ein Fluidglaselement (1,05 m breit, 3,0 m hoch) in Abhängigkeit vom Volumenstrom (1 bis 20 l/min·m); inkl. Rohrleitungen (Variante 2)

Im Rohrleitungssystem wird bei zunehmenden Volumenströmen der Einfluss der Abzweige im Vorlauf relevant. Die Druckverluste steigen quadratisch mit den Volumenströmen bzw. den Fließgeschwindigkeiten an. Der Druckverlust pro Fluidglaselement steigt von 0,82 mbar bei einem Volumenstrom von 1 l/min·m auf 36,17 mbar bei 20 l/min·m an (siehe Abbildung 103).

Für die gesamte Fluidglasfassade steigt der Druckverlust von 2,5 mbar auf 108,5 mbar an.

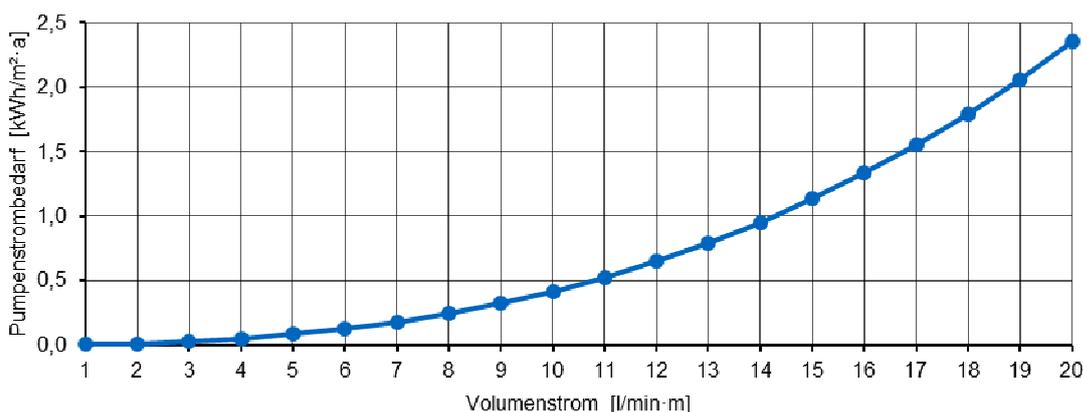


Abbildung 104: Jährlicher, spezifischer Pumpenstrombedarf für die Fluidglasfassade in Abhängigkeit vom Volumenstrom (1 bis 20 l/min·m), bezogen auf 17,5 m² Bürofläche (Variante 2)

Umgerechnet auf die Bürogrundfläche ergibt sich ein jährlicher, spezifischer Pumpenstrombedarf von ca. 0,003 kWh/m²·a bei einem Volumenstrom von 1 l/min·m. Dieser steigt ebenfalls quadratisch an und beträgt bei 20 l/min·m 2,4 kWh/m²·a (siehe Abbildung 104).

Alle Werte für Variante 1 und 2 sind im Anhang 16.9 nachzulesen.

Fazit Pumpenstrombedarf

Das Rohrleitungssystem der Fluidglasfassade muss so dimensioniert werden, dass die Volumenströme Fließgeschwindigkeiten unterhalb der Vorgaben aus der Heizungstechnik einhalten¹¹⁵. Im freien Querschnitt des Fluidglaselements sind Volumenströme bis zu 56 l/min·m möglich. Der jährliche, spezifische Pumpenstrombedarf mit $< 0,5 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ spielt bei Volumenströmen unter ca. 10 l/min·m in der Gesamtenergiebilanz des Raumes eine sehr geringe Rolle. Bei größeren Volumenströmen mit $> 19 \text{ l/min}\cdot\text{m}$ kann sich je nach Betriebsstunden ein relevanter Strombedarf von ca. $2 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ergeben. Dieser kann bis zu der Hälfte des Strombedarfs für die künstliche Beleuchtung belaufen (vergleiche Kapitel 2.5.5). Es ist zu beachten, dass der angegebene Strombedarf nur für eine flüssigkeitsführende Schicht angegeben ist. Bei der Fluidglasfassade müssen beide Fluidschichten berücksichtigt und die Fließgeschwindigkeiten im inneren und äußeren Fluid möglichst langsam gewählt werden.

¹¹⁵ Das berechnete Rohrleitungssystem hat strömungstechnische Optimierungspotentiale, die an dieser Stelle nicht weiter untersucht wurden.

8 Gebäudesimulationen

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit von Fluidglasfassaden an klimatisch unterschiedlichen Standorten werden dynamisch-thermische Gebäudesimulationen in Moskau, München und Riad durchgeführt. Es wird ein Einzelbüroraum mit Fluidglasfassade mit der Software SimulationX simuliert (siehe Abbildung 105). Der Einzelbüroraum hat, gemäß des Typraums nach der VDI-Richtlinie 2078 Tabelle 3 bzw. Bild 4, 3,5 m Raumbreite, 5,0 m Raumtiefe, 3,0 m Raumhöhe und eine mittlere thermische Speicherkapazität (Raumtyp M „mittel“) (VDI-Richtlinie VDI 2078, S. 32–34). Die Fluidglasfassade besteht aus drei raumhohen Fluidglaselementen gemäß Abbildung 18.

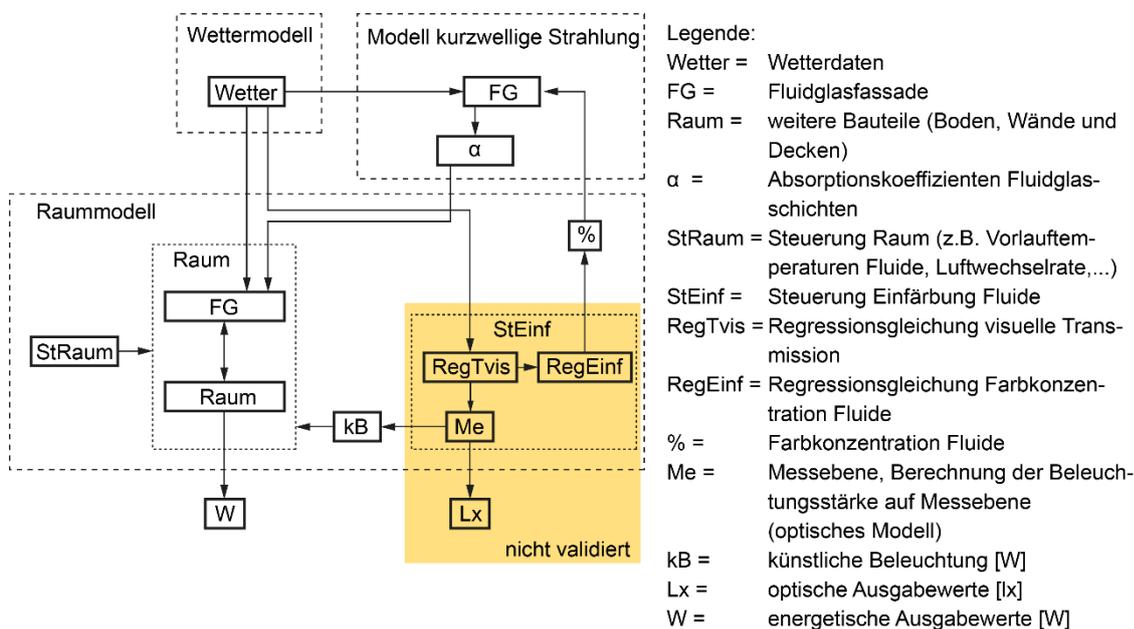


Abbildung 105: Schematischer Aufbau der Simulation eines Einzelbüroraums mit Fluidglasfassade in SimulationX

SimulationX – Fluidglasmodell

Die beiden in der Software EES modellierten Fluidglasmodelle – das Strahlungs- und das Energiebilanzmodell (siehe Kapitel 4) – wurden in der Modellierungssprache Modelica (*Modelica*) in die Software SimulationX (*SimulationX 3.6*) übertragen¹¹⁶. Im Gegensatz zu den EES-Modellen wird in SimulationX die Absorption der Solarstrahlung für alle Schichten des Fluidglasaufbaus separat berechnet, das Fluidglaselement in der Höhe in mehrere Segmente aufgeteilt und die Wärmespeicherkapazität von Fluid, Glas und Gas berücksichtigt. Zusätzlich wurde eine Steuerungsstrategie (siehe Kapitel 8.2) implementiert, um die Fluidglasfassade in einer dynamisch-thermischen Jahressimulation betreiben zu können. Das in SimulationX modellierte Fluidglas wurde im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „Fluidglass“ mit den

¹¹⁶ durch Shan Hua vom Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) der Technischen Universität München.

Messergebnissen aus dem Solarprüfstand vom CEA-Ines validiert (siehe Anhang 16.12). Die Validierung zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulations- und den Messergebnissen.

IBPSBuilding Bibliothek

Für die Gebäudesimulation wurden Elemente aus der IBPSBuilding Bibliothek in SimulationX verwendet¹¹⁷. Die Bibliothek enthält Komponenten zur thermisch-energetischen Gebäudesimulation. Sie wurde um ein optisches Modell zur Berechnung der Beleuchtungsstärke und das Fluidglasmodell ergänzt¹¹⁸.

Einfärbungssteuerung und Simulationsablauf

Für die Einfärbungssteuerung in SimulationX wurden Tageslichtsimulationen in Dialux (*DIALux evo*) und Simulationen in SimulationX durchgeführt und daraus zwei Regressionsgleichungen für die Steuerung entwickelt. In den Tageslichtsimulationen wurde der Einzelbüroraum mit einer Vollverglasung an den drei Standorten Moskau, München und Riad mit unterschiedlichen Sonnenhöhen und variierenden visuellen Transmissionsgraden der Verglasung simuliert. Es wurde die jeweilige senkrechte Beleuchtungsstärke auf der Außen- und Innenseite der Fassade und die horizontale Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene ermittelt. Aus den Ergebnissen wurde eine Regressionsgleichung erstellt, die den benötigten visuellen Transmissionsgrad der Verglasung zur Erreichung des gewünschten Zielwerts der Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene berechnet. Wie in Abbildung 105 zu sehen ist, wurde die Regressionsgleichung in SimulationX implementiert (RegTvis). In SimulationX wurden Simulationen durchgeführt, um die benötigten Einfärbungsstufen der Fluidglasfassade zur Erreichung des erforderlichen visuellen Transmissionsgrads der Fassade in Abhängigkeit vom Einstrahlungswinkel zu bestimmen. Daraus wurde eine zweite Regressionsgleichung erstellt und in SimulationX implementiert (RegEinf). Die Regressionsgleichung steuert die Einfärbungskonzentration des äußeren bzw. inneren Fluids. Die gewählte Farbkonzentration wird an das Fluidglasmodell (FG) übergeben und der kurzweilige Strahlungsbereich simuliert. Die Absorptionskoeffizienten der einzelnen Schichten des Fluidglasaufbaus werden berechnet und an das Raummodell übermittelt.

Über das optische Modell in SimulationX – Messebene (Me) – wird die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene ermittelt und ausgegeben. Unterschreitet die Beleuchtungsstärke 300 Lux, wird eine künstliche Beleuchtung mit 10 W/m² zugeschaltet und als thermische Gewinne im Raummodell berücksichtigt. Im Raummodell werden die Energiebedarfe, Energiegewinne und die Temperaturen berechnet und ausgegeben. Dabei werden neben den thermischen

¹¹⁷ IBPS steht für „Implementing a Building Performance Simulation“. In der gleichnamigen Lehrveranstaltung vom Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen (ENPB) der Technischen Universität München wurden, unter der Leitung von Dr. Manual Lindauer und Shan Hua nach dem Konzept von Prof. Dr.-Ing. Christoph van Treeck, von Studierenden Teilmodelle entwickelt und zur IBPSBuilding Bibliothek zusammengefügt. Die Bibliothek wurde in der Open-Source-Software OpenModelica (Open Source Modelica Consortium) entwickelt und von Fabian Reuß, im Rahmen seiner Masterarbeit an der TUM, erfolgreich validiert (Reuß, 2015).

¹¹⁸ von Shan Hua, TUM

Eigenschaften der Bauteile (Boden, Wände und Decken des Einzelbüroraums), die Wetterdaten und die Eigenschaften der Fluidgläser je nach Einfärbungskonzentration berücksichtigt. Darüber hinaus wird das Fluidglas und der Raum gesteuert (StRaum), d.h. die Vorlauftemperatur, die Massenströme der Fluidschichten und die Luftwechselraten.

Die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene wird zur Abschätzung des visuellen Komforts in Kapitel 8.3 herangezogen. Im Rahmen der Arbeit konnte das optische Modell nicht validiert werden. Die Simulationsergebnisse für die Beleuchtungsstärke sollten in weiteren Untersuchungen überprüft werden

8.1 Bilanzierung

In Abbildung 106 sind die Systemgrenzen für die Bilanzierung der thermischen Simulationen dargestellt.

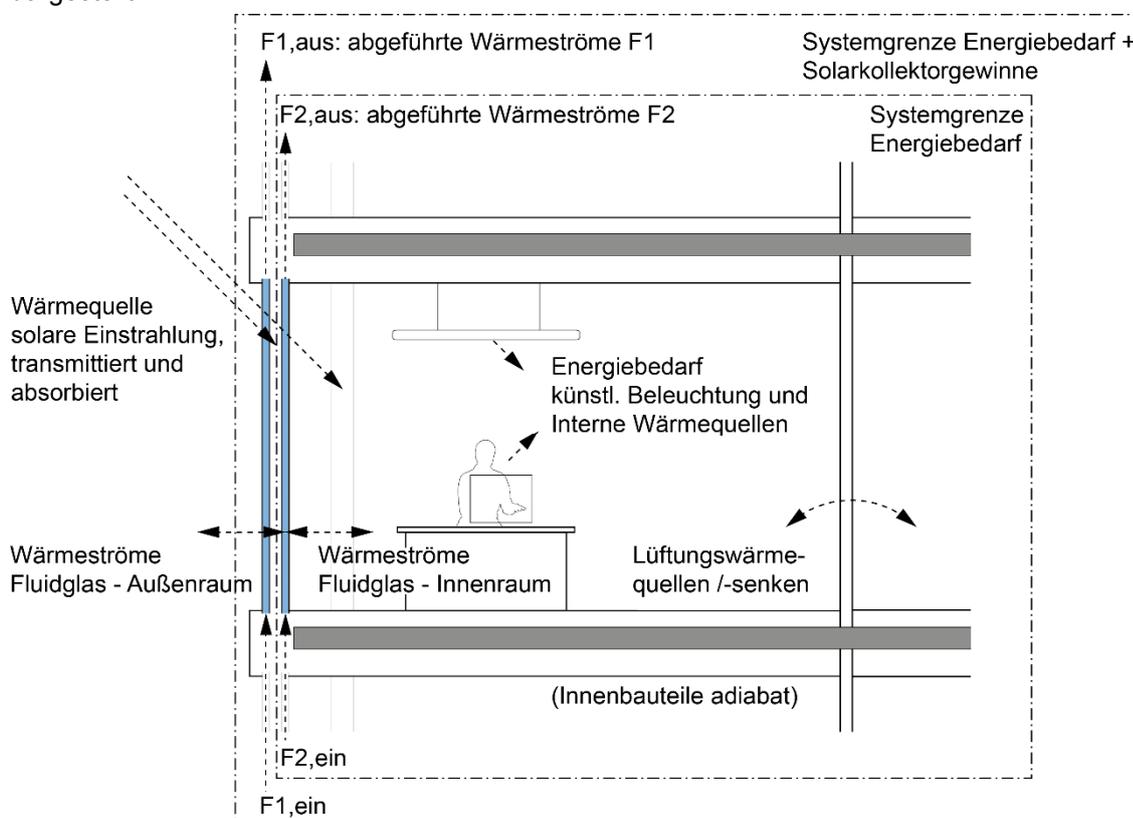


Abbildung 106: Schematische Darstellung der Bilanzierung des Fluidglasraums in der thermischen Simulation

In der Bilanzierung des Heizwärme- und Kühlkältebedarfs sind folgende Einflüsse berücksichtigt:

- die direkte solare Strahlungstransmission und der in den Fluidglasschichten absorbierte Strahlungsanteil
- die Wärmeströme zwischen der Fluidglasfassade und dem Außenraum
- die Wärmeströme zwischen der Fluidglasfassade und dem Innenraum
- die abgeführten Wärmeströme durch das innere Fluid (F2)
- der Strombedarf für die künstliche Beleuchtung
- die internen Wärmegevinne durch die Beleuchtung, Geräte und Menschen

- die Lüftungswärmeverluste und –gewinne

Bei den ermittelten Energiebedarfen handelt es sich um den Nutzenergiebedarf im Raum. Leitungs- und Anlagenverluste und der Pumpenstrombedarf sind nicht berücksichtigt.

Die Bilanzierung der Solarkollektorgewinne berücksichtigt zusätzlich die abgeführten Wärmeströme durch das äußere Fluid (F1).

8.2 Steuerungsstrategie

Um das Fluidglas in einer dynamischen Jahressimulation betreiben zu können, wird eine Steuerungsstrategie in SimulationX implementiert. Bei den Fluidgläsern mit zwei flüssigkeitsführenden Schichten (FGGF) können die Farbkonzentrationen, die Vorlauftemperaturen und die Massenströme der äußeren (F1) und der inneren Fluidschicht (F2) separat gesteuert werden. Im Rahmen der Arbeit konnte keine komplexe Optimierung in die Simulationen integriert werden. Es wurde eine vereinfachte, sequentielle Steuerungsstrategie entwickelt, um die Wirkungsweise von Fluidglasfassaden untersuchen zu können.

Komfort-Modus

Die implementierte, sequentielle Steuerungsstrategie hat das übergeordnete Ziel, einen möglichst guten visuellen und thermischen Komfort innerhalb der Nutzungszeit einzuhalten. Untergeordnet sollen auch der Energiebedarf für Heizen und Kühlen minimiert und die solaren Energiegewinne maximiert werden.

Wie in Abbildung 107 zu sehen ist, wird im ersten Schritt unterschieden, ob der Zeitschritt innerhalb oder außerhalb der Nutzungszeit liegt, da nur innerhalb der Nutzungszeit Komfortanforderungen vorliegen. Im nächsten Schritt wird zwischen Heiz- und Kühlperiode unterschieden. In der Kühlperiode wird das äußere Fluid (F1) eingefärbt, in der Heizperiode das innere Fluid (F2). Außerhalb der Nutzungszeit können die solaren Gewinne maximiert werden, indem das jeweilige Fluid maximal eingefärbt wird, um eine maximale Absorption der Solarstrahlung zu erreichen. Der Durchfluss der Fluidkreisläufe wird eingeschaltet, wenn solare Gewinne möglich sind. Für F1 ist dies der Fall, wenn die äußere Oberflächentemperatur der Fluidglasfassade (T_{glas_a}) größer oder gleich ist wie die Außenlufttemperatur (T_{amb}) und größer als die eingestellte Vorlauftemperatur des äußeren Fluids ($T_{\text{F1_ein_soll}}$). Für F2 ist dies der Fall, wenn die innere Oberflächentemperatur der Fluidglasfassade (T_{glas_i}) größer ist als die Vorlauftemperatur des inneren Fluids ($T_{\text{F2_ein_soll}}$).

Innerhalb der Nutzungszeit wird zunächst die Farbkonzentration des inneren Fluids (in der Heizperiode) oder des äußeren Fluids (in der Kühlperiode) so eingestellt, dass der Zielwert der Beleuchtungsstärke auf Arbeitsebene erreicht, d.h. der visuelle Komfort eingehalten wird. Unterschreitet die Beleuchtungsstärke auf Arbeitsebene 300 Lux, wird die künstliche Beleuchtung zugeschaltet. Im nächsten Schritt wird der thermische Komfort für den Heiz- bzw. den Kühlfall optimiert. Die Soll-Temperaturen für die operative Raumtemperatur entsprechen den Komfortkategorien A nach ISO 7730 (siehe Tabelle 2). Bei Kühlbedarf wird der Durchfluss des inneren Fluids mit einer Vorlauftemperatur von 18°C eingeschaltet, bei Heizbedarf mit 35°C oder 26°C. Zur Maximierung der thermischen Energiegewinne wird, analog zu Zeiten außerhalb der

Nutzung, der Massenstrom des äußeren Fluids eingeschaltet, wenn solare Gewinne möglich sind.

Die Durchflüsse des inneren bzw. äußeren Fluidkreislafs können unabhängig voneinander an- oder ausgeschaltet werden. Die Massenströme sind jedoch voreingestellt und können in der Jahressimulation nicht variabel gesteuert werden. Die Vorlauftemperaturen für F1 und F2 haben jeweils für den Heiz- und Kühlfall unterschiedliche vorgegebene Werte, können jedoch ebenfalls nicht variabel gesteuert werden. Weitere Randbedingungen der Gebäudesimulation, wie z.B. erhöhte Nachtlüftung, sind dem Anhang 16.11 zu entnehmen.

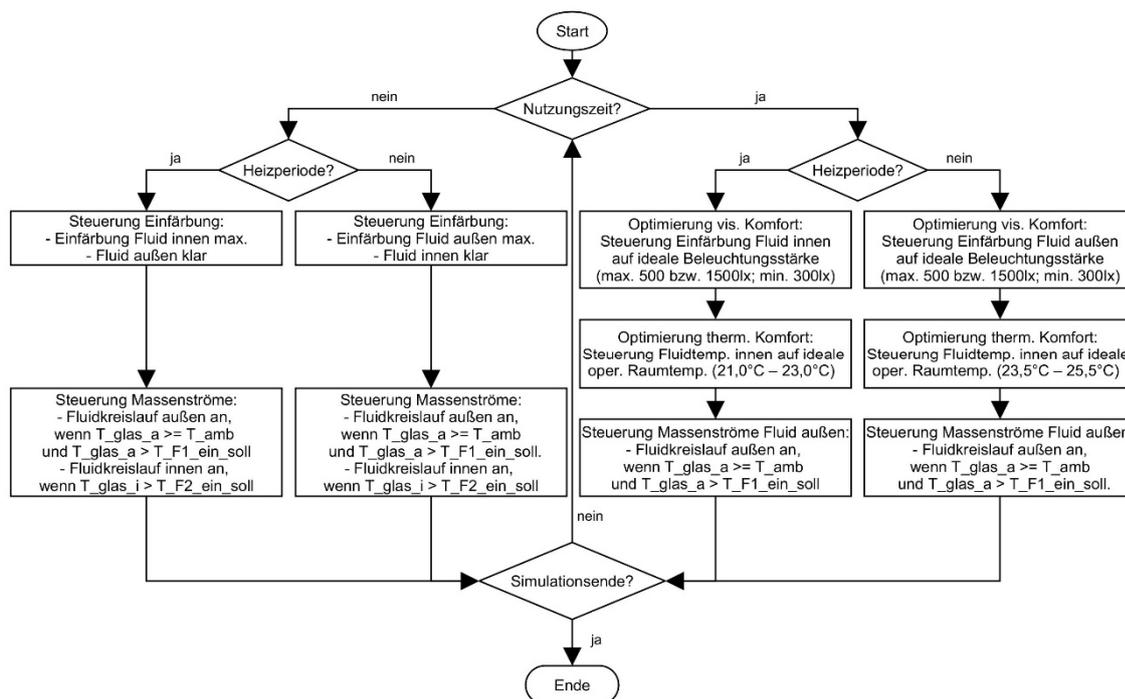


Abbildung 107: Vereinfachtes Flussdiagramm der Steuerungsstrategie Fluidglas

In weiteren Untersuchungen sollte eine Optimierung der Steuerung erfolgen. Es wäre u.a. sinnvoll, eine Gebäudetechnik und Primärenergiefaktoren an dem jeweiligen Standort in die Simulation zu implementieren, damit über den Nutzenergiebedarf hinausgehend der End- und Primärenergiebedarf simuliert werden kann. Es könnte eine Optimierung nach minimalem Primärenergiebedarf erfolgen, bei der die Wärme-/ Kälteerzeugung für die Vorlauftemperaturen und die Einfärbung auf den Strombedarf für künstliche Beleuchtung, Lüftung und Pumpen abgestimmt wird. Sollte Fluidglas in einem realen Gebäude eingebaut werden, müsste zusätzlich noch die Eingriffnahme des Nutzers mit einer Übersteuerung der automatischen Steuerung möglich sein.

8.3 Simulationsergebnisse

Die Jahressimulationen wurden an den drei Standorten Moskau, München und Riad mit unterschiedlichen klimatischen Situationen, durchgeführt. Der Einzelbüroraum mit einer Fassade aus drei raumhohen Fluidglaselementen (siehe Abbildung 18) wird jeweils mit der

Fassadenorientierung nach Norden, Süden oder Westen simuliert. Die Einfärbungskonzentration des inneren oder äußeren Fluids (F1 oder F2) wird gemäß der Steuerungsstrategie aus Kapitel 8.2 variabel geschaltet, ebenso die Vorlauftemperatur von F1. Die Durchflüsse von F1 und F2 werden an oder ausgeschaltet, mit fixierten Massenströmen. Die Vorlauftemperatur für das äußere Fluid wird jeweils für die Heiz- bzw. Kühlperiode festgelegt. An allen Standorten wird der Fluidglasaufbau FGGF mit Weißgläsern, zwei Low-E-Beschichtungen und Xfast Einfärbung simuliert, gemäß Tabelle 38. Weitere Randbedingungen sind dem Anhang 16.11 zu entnehmen.

Es werden folgende Simulationsergebnisse betrachtet:

- die Beleuchtungsstärke auf Arbeitsebene zur Bestimmung des visuellen Komforts
- die operative Raumtemperatur in der Heiz- und Kühlperiode zur Bestimmung des thermischen Komforts
- der Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen und für die künstliche Beleuchtung zur Beurteilung der Energieeffizienz (Bilanzierung gemäß Abbildung 106)
- die thermischen Energiegewinne für das äußere und innere Fluid und die jeweiligen Rücklauftemperaturen zur Beurteilung der jährlichen Energiebilanz (Bilanzierung gemäß Abbildung 106¹¹⁹)

8.3.1 Moskau

Der Einfärbungsgrad des Fluids wird auf den Zielwert von 1500 Lux Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene gesteuert.

Visueller Komfort - Beleuchtungsstärke auf Arbeitsebene¹²⁰

Beleuchtungsstärke	Nord	Süd	West
< 300 lx	15%	14%	15%
300 - 500 lx	3%	3%	3%
500 - 2000 lx	48%	68%	57%
2000 - 4000 lx	19%	10%	16%
> 4000 lx	14%	4%	9%

Tabelle 46: Häufigkeiten der Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene innerhalb der Nutzungszeit; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung¹²¹

Wie in Tabelle 46 zu sehen ist, liegt bei allen Orientierungen in über 70% der Nutzungszeit die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene zwischen 300 und 4000 Lux. Der visuelle Komfort ist in diesen Fällen eingehalten. Eine Überschreitung der gewünschten maximalen

¹¹⁹ Der Pumpenstrombedarf wird bei den Jahressimulationen nicht berücksichtigt.

¹²⁰ Alle Ergebnisse für die Beleuchtungsstärke stammen aus einem nicht validierten optischen Modul in SimulationX. Die Ergebnisse sollten in weiteren Forschungsarbeiten überprüft werden.

¹²¹ Alle Simulationsergebnisse sind Ausgabewerte aus SimulationX.

Beleuchtungsstärke von 4000 Lux erfolgt nach Norden in 14%, nach Süden nur in 4% und nach Westen in 9% der Nutzungszeit. In 14 - 15% der Nutzungszeit wird die Mindestbeleuchtungsstärke von 300 Lux unterschritten.

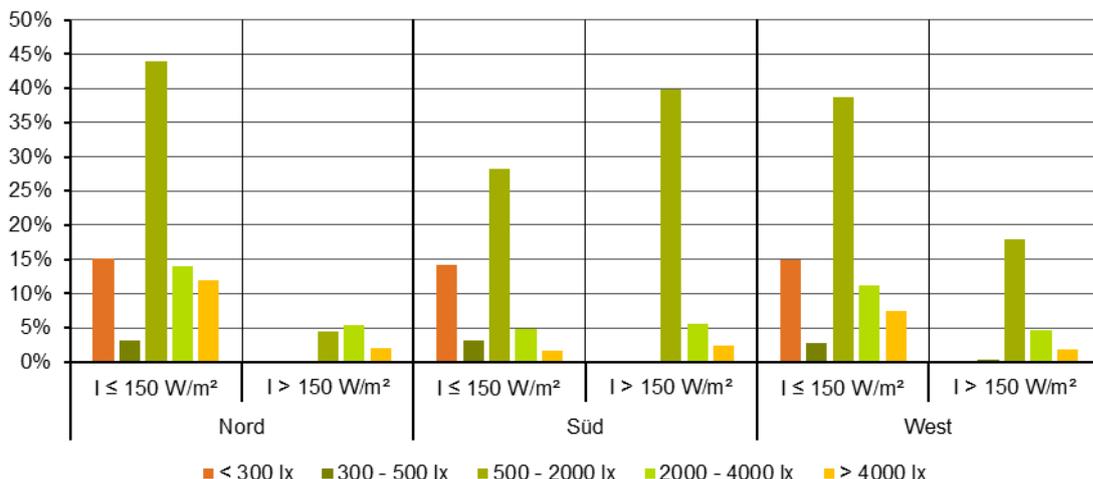


Abbildung 108: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [Ix] auf Arbeitsebene bei globaler Einstrahlung (I) auf die Fassade unter bzw. über 150 W/m²; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung

Wie in Abbildung 108 zu sehen ist, ist die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene nur in den Fällen unter 300 Lux, wenn die globale Einstrahlung auf die Fassade unter 150 W/m² liegt. Abbildung 109 zeigt, dass das Fluidglas zu diesen Zeitpunkten nicht eingefärbt ist und somit die Einfärbung hier richtig gesteuert wird. Der visuelle Komfort kann daher in diesen Fällen nicht erfüllt werden, weil die Beleuchtungsstärke im Außenraum nicht ausreichend ist.

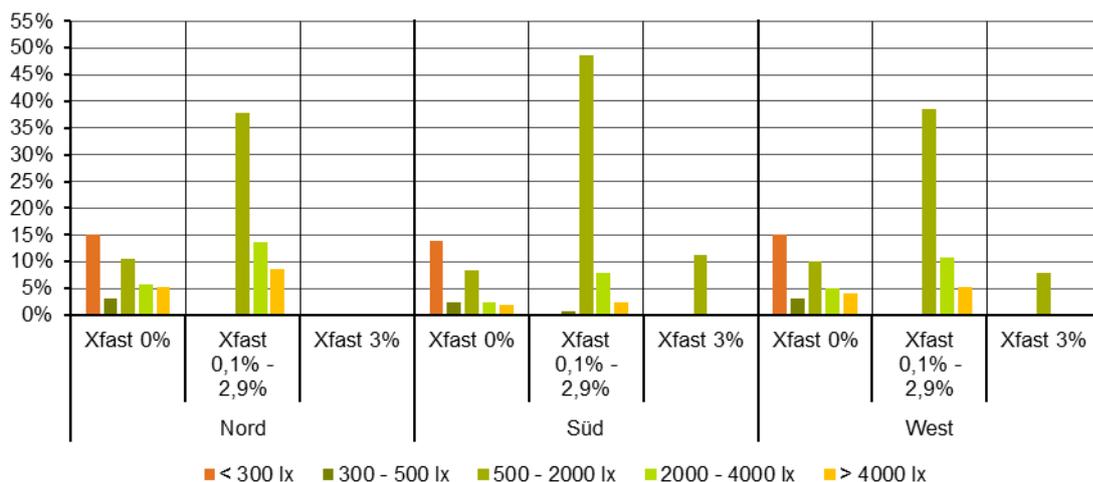


Abbildung 109: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [Ix] auf Arbeitsebene je Einfärbungsgrad des Fluid mit Xfast. Moskau, Nord-, Süd- und Westorientierung

Wie in Abbildung 109 zu sehen ist, funktioniert die Einfärbungssteuerung für die Nutzungszeiten, in denen die Beleuchtungsstärke von 4000 Lux überschritten wird, nicht einwandfrei. Bei allen Orientierungen kommt es zu Überschreitungen, wenn die Einfärbung unter der maximalen Einfärbung von 3% liegt. Bei maximaler Einfärbung liegt die Beleuchtungsstärke zwischen 500

und 2000 Lux. Insbesondere nach Norden müsste die Einfärbung in 14% der Nutzungszeit höher sein. Hier wird maximal bis ca. 2,9 vol-% eingefärbt (siehe auch Tabelle 47).

Einfärbung [%]	Nord	Süd	West
0	40%	29%	37%
0,1 – 2,9	60%	60%	55%
3	0%	11%	8%

Tabelle 47: Häufigkeiten der Einfärbungskonzentrationen innerhalb der Nutzungszeit; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung

Fazit visueller Komfort

Der visuelle Komfort auf der Arbeitsebene wird in über 70% der Nutzungszeit bei allen Orientierungen eingehalten. Bei ausreichender Helligkeit im Außenraum könnte in allen Fällen bei optimaler Steuerung, d.h. wenn ausreichend stark eingefärbt würde, der visuelle Komfort eingehalten werden. Die aktuelle Steuerung berücksichtigt insbesondere den Einfluss der Diffusstrahlung nicht ausreichend genau, was sich vor allem im Norden auswirkt¹²². Dadurch kommt es zu Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene über 4000 Lux bei einer Einfärbung unter 3%.

Thermischer Komfort

Der Massenstrom des äußeren Fluids (F1) beträgt 1 l/min·m, der des inneren Fluids (F2) 3 l/min·m. Die Vorlauftemperaturen für den äußeren Flüssigkeitskreislauf (F1) sind für die Heizperiode auf 15°C und für die Kühlperiode auf 20°C festgelegt¹²³. Die Vorlauftemperatur für den inneren Flüssigkeitskreislauf (F2) beträgt 18°C im Kühlfall und 35°C im Heizfall. Für den Heizfall wurde zusätzlich eine Vorlauftemperatur F2 von 26°C untersucht (siehe Abbildung 154).

¹²² Die entwickelten Regressionsgleichungen zur Steuerung der Einfärbungskonzentration stellen eine Vereinfachung dar. Sie wurden auf die direkte Einstrahlung optimiert, um Blendung zu verhindern.

¹²³ Der Massenstrom des äußeren Flüssigkeitskreislaufs ist ausgeschaltet, wenn die Umgebungstemperatur unter der Vorlauftemperatur liegt.

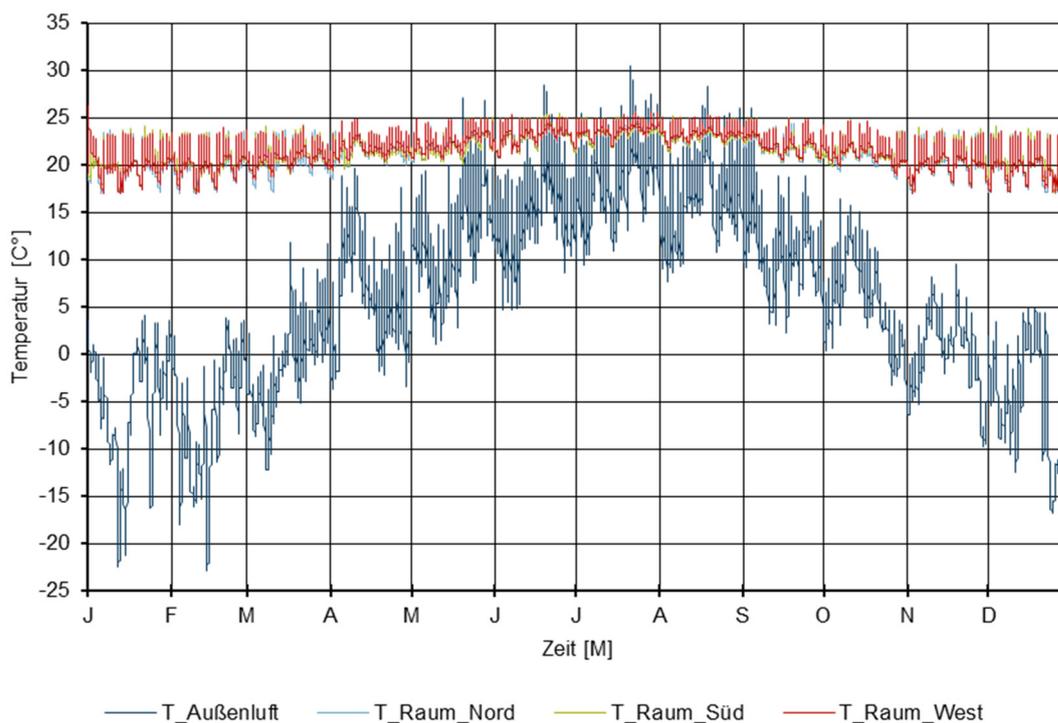


Abbildung 110: Jahresverläufe der Außenluft- und der operativen Raumtemperaturen; 8760 Std.; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung

In Abbildung 110 sind die Jahresverläufe in 8760 Stundenschritten der Außenluft und der operativen Raumtemperaturen des Einzelbürraums, nach Norden, Süden und Westen orientiert, dargestellt. Die Außenlufttemperatur zeigt sehr ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen zwischen ca. -23°C und 30°C . Im Gegensatz dazu liegen die operativen Raumtemperaturen ganzjährig zwischen ca. 17°C und ca. 26°C ¹²⁴.

¹²⁴ Außerhalb der Nutzungszeit lässt die Fluidglassteuerung minimale operative Temperaturen von 16°C zu. Eine Temperaturobergrenze ist nicht festgelegt. Das äußere oder das innere Fluid ist außerhalb der Nutzungszeit immer maximal eingefärbt.

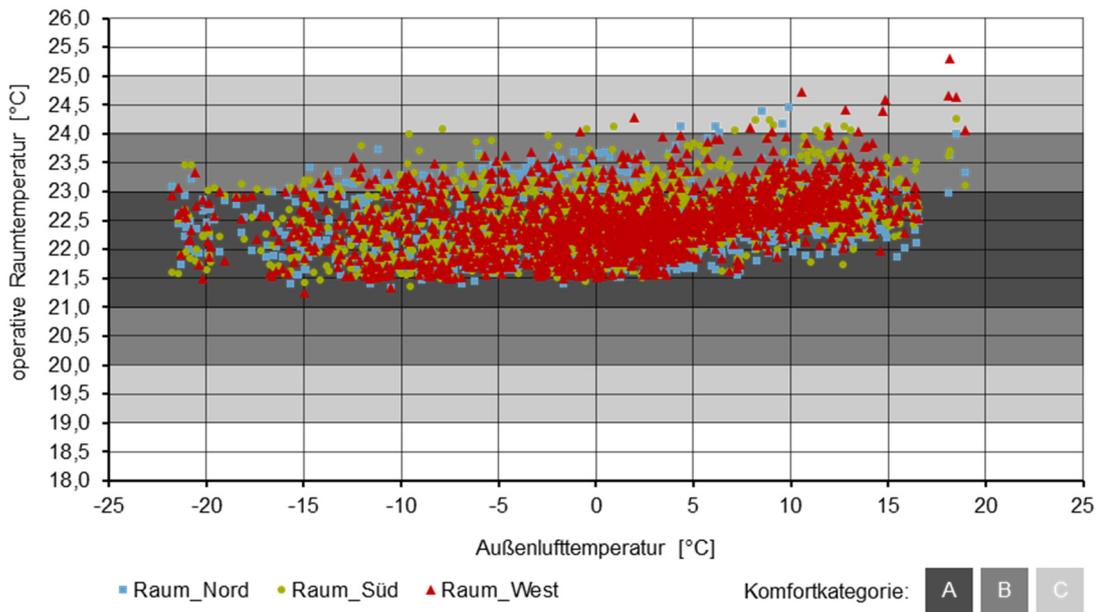


Abbildung 111: Operative Raumtemperaturen in der Heizperiode; Nutzungszeit; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung

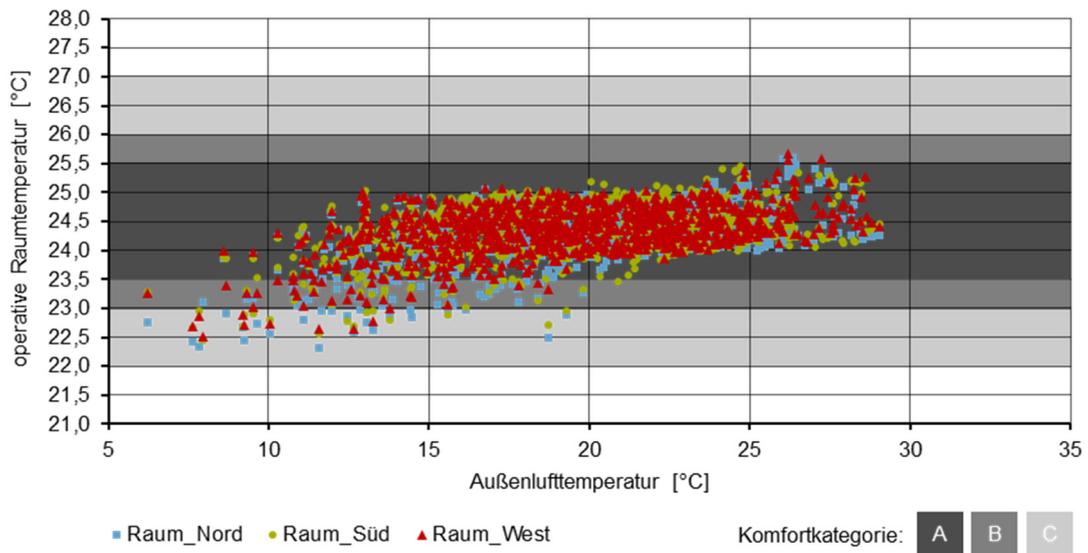


Abbildung 112: Operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode; Nutzungszeit; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung

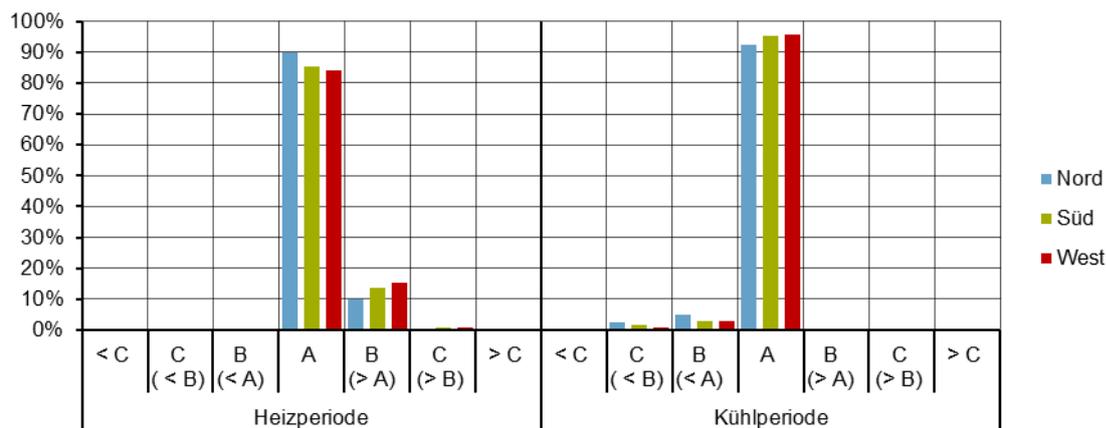


Abbildung 113: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche in der Heiz- und Kühlperiode; Nutzungszeit; Moskau, Nord-, Süd- und Westorientierung

In der Heizperiode¹²⁵ wird zu keinem Zeitpunkt eine operative Raumtemperatur von 21°C unterschritten, wie in Abbildung 111 und Abbildung 113 zu sehen ist. Bei allen Orientierungen wird in über 83% der Nutzungszeit der Komfortbereich A eingehalten, in nahezu allen anderen Fällen der Komfortbereich B (siehe auch Tabelle 96 im Anhang).

In der Kühlperiode wird nur in max. 0,3% der Nutzungszeit eine operative Raumtemperatur von 25,5°C überschritten, wie in Abbildung 112 und Abbildung 113 zu sehen ist. Bei allen Orientierungen wird in über 90% der Nutzungszeit der Komfortbereich A eingehalten. Bei Außenlufttemperaturen, die unterhalb 21°C liegen, werden in maximal 7% der Nutzungszeit die operativen Raumtemperaturen von 23,5°C unterschritten. Es wird somit nur der Komfortbereich B bzw. C eingehalten.

Fazit thermischer Komfort

Der thermische Komfort ist bei allen Orientierungen sowohl in der Heiz-, als auch in der Kühlperiode sehr gut. Es wird in mindestens 80% der Nutzungszeit der maximale Komfortbereich A eingehalten, in nahezu allen anderen Fällen der Komfortbereich B. In der Heizperiode wird die gewünschte operative Raumtemperatur z.T. leicht überschritten, in der Kühlperiode z.T. leicht unterschritten¹²⁶. Die Heiz- und Kühlleistungen der Fluidglasfassade sind am Standort Moskau ausreichend. Die Abweichungen vom Komfortbereich A sind auf die vereinfachte Steuerungsstrategie zurückzuführen. Insbesondere außerhalb der Heizperiode kommt es bei Außentemperaturen unter 21°C zur Unterschreitung der gewünschten operativen Raumtemperatur. Durch eine optimierte Steuerung könnten diese Abweichungen vom maximalen

¹²⁵ Die Nutzungszeit in der Heizperiode beträgt 1750 Stunden, in der Kühlperiode 981 Stunden.

¹²⁶ In der Heizperiode kommt es durch die Einfärbung des inneren Fluids, und damit der Absorption der Solarstrahlung innerhalb der thermischen Hülle, zu hohen Fluidtemperaturen des inneren Fluids. Durch die Erhöhung des Massenstroms von 1 auf 3 l/min·m wird der Effekt verringert, er ist aber dennoch messbar (siehe Abbildung 111 und Abbildung 113). In der Kühlperiode wird, aufgrund der vereinfachten Steuerungsstrategie, bei zu geringen Außentemperaturen gekühlt. Dies führt zu zu geringen Innenraumtemperaturen (siehe Abbildung 112 und Abbildung 113). Die gleichen Effekte gelten auch für die Simulationen am Standort München (siehe Kapitel 8.3.2).

Komfort behoben werden. In der Heizperiode kommt es bei allen Außentemperaturen z.T. zu höheren operativen Raumtemperaturen als für den Komfortbereich A gewünscht. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass in der Heizperiode das innere Fluid eingefärbt wird und dieses sich bei hoher Einfärbungskonzentration und solarer Einstrahlung stark erwärmt¹²⁷. Durch eine Erhöhung des Massenstroms im inneren Fluid kann diese Situation optimiert werden¹²⁸.

Für die Extremsituation im Heizfall, der nordorientierte Einzelbüroraum in Moskau, wurde untersucht, ob eine reduzierte Vorlauftemperatur von 26° ausreichend wäre wie in Abbildung 151 bis Abbildung 154 im Anhang 16.13.1 zu sehen ist.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Heizleistung ausreichend ist, um den Komfortbereich B einzuhalten. Dabei kommt es seltener zu operativen Raumtemperaturen über 23°C als mit der maximal zulässigen Vorlauftemperatur von 35°C. Es treten jedoch auch Temperaturen unter dem Komfortbereich A, d.h. unter 21°C, auf, was mit einer Vorlauftemperatur von 35°C nicht der Fall ist.

Wie in Abbildung 117 und Abbildung 154 im Anhang 16.13.1 zu sehen ist, liegen die Rücklauftemperaturen des inneren Flüssigkeitskreislaufs in der Heizperiode zwischen 30 und 34°C bei einer Vorlauftemperatur von 35°C, bzw. zwischen 23 und 26°C bei einer Vorlauftemperatur von 26°C. In der Kühlperiode liegen die Rücklauftemperaturen zwischen 18 und 20°C bei einer Vorlauftemperatur von 18°C. Die mittlere, innere Oberflächentemperatur der Fluidglasfassade liegt in etwa bei dem Mittelwert zwischen Vor- und Rücklauftemperatur. In der Heizperiode ist die Temperaturdifferenz zwischen der gewünschten operativen Raumtemperatur und der Fluidglasfassadentemperatur zwischen 7 und 12 K, bzw. bei 26°C Vorlauftemperatur nur zwischen 0 und 3 K. In der Kühlperiode ist innere Oberflächentemperatur der Fluidglasfassade zwischen 3,5 und 5,5 K geringer als die gewünschte operative Raumtemperatur. Strahlungstemperaturasymmetrien können damit fast vollständig unterbunden werden (siehe auch Kapitel 2.4.2). Ein Kaltluftabfall an der Fassade in der Heizperiode oder Wärmestrahlung von der Fassade an den Nutzer in der Kühlperiode können ebenfalls verhindert werden.

Energiebedarf

Der spezifische jährliche Heizwärmebedarf liegt je nach Orientierung zwischen 21 und 27 kWh/m²a, der Kühlkältebedarf zwischen 11 und 14 kWh/m²a, wie in Abbildung 114 zu sehen ist. Der Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung liegt bei allen Orientierungen bei ca. 6 kWh/m²a (siehe Abbildung 147). Die monatlichen Verläufe des Energiebedarfs können Abbildung 144 bis Abbildung 146 im Anhang 16.13.1 entnommen werden.

¹²⁷ Beispiel München Südorientierung am 22.3.2013 um 12 Uhr: Einlasstemp. F2 = 18°C, Auslasstemp. F2 = 24,7°C, Einfärbung F2 = 3%, Globalstrahlung horizontal = 570 W/m²; Außenlufttemperatur = 2,9°C, operative Raumtemp. = 24,1°C.

¹²⁸ Der Zusammenhang wird am Standort München erläutert, da hier die Auswirkungen noch deutlicher zu erkennen sind (siehe auch Tabelle 98 und Tabelle 100 im Anhang 16.13.2).

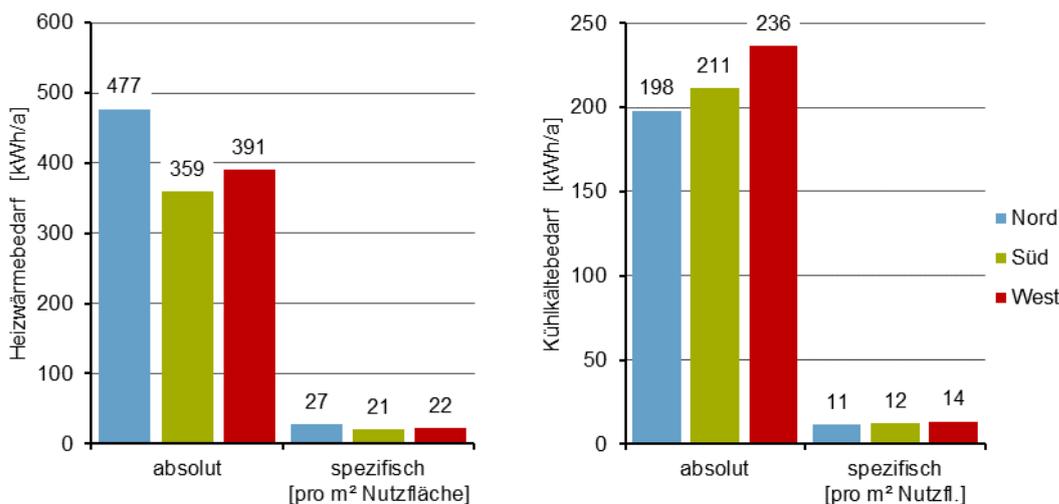


Abbildung 114: Heizwärmebedarf (links) und Kühllkältebedarf (rechts) für einen Einzelbüroraum (jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]); Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung

Energiegewinne

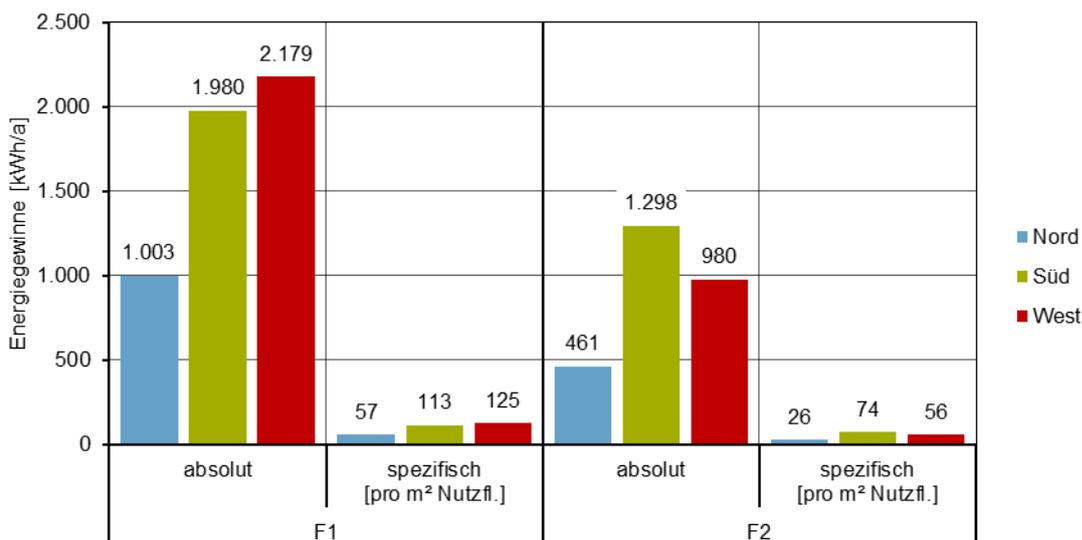


Abbildung 115: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (links: F1, rechts: F2 Einzelbüroraum; jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]); Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung

Die Fluidglasfassade verzeichnet ganzjährig thermische Energiegewinne¹²⁹. Die spezifischen jährlichen Energiegewinne, bezogen auf die 17,5 m² Büronutzfläche, liegen je nach Orientierung für den äußeren Fluidkreislauf (F1) zwischen 57 bis 125 kWh/m²a für den inneren Fluidkreislauf (F2) zwischen 26 bis 56 kWh/m²a (siehe Abbildung 115)¹³⁰. Für F1 sind die Gewinne bei Westorientierung am höchsten, für F2 bei Südorientierung. Wie in Abbildung 148 bis Abbildung

¹²⁹ Zu thermischen Energiegewinnen kommt es, wenn die Rücklauftemperatur des Fluids höher ist als die Vorlauftemperatur. Dies trifft sowohl für den äußeren Flüssigkeitskreislauf (F1) als auch für den inneren Flüssigkeitskreislauf (F2) zu.

¹³⁰ Die jährlichen spezifischen Energiegewinne (F1 und F2) bezogen auf die 10,5 m² Fassadenfläche betragen: Norden ca. 140 kWh/m²a, Süden ca. 322 kWh/m²a und Westen ca. 301 kWh/m²a.

150 im Anhang 16.13.1 zu sehen ist, können mit F2 ganzjährig thermische Gewinne realisiert werden mit maximalen Werten in den Übergangszeiten März, April und September, Oktober. Von Mai bis August übersteigen die thermischen Gewinne aus F1 die aus F2 deutlich.

Rücklauftemperaturen Fluide

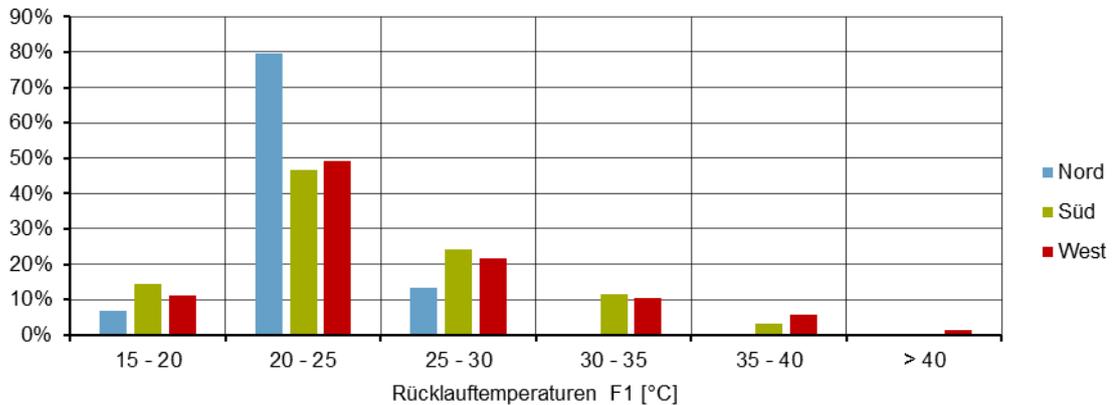


Abbildung 116: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des äußeren Fluids (F1) in der Heiz- und Kühlperiode; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung

In ca. 90% der Fälle liegt die Rücklauftemperatur des äußeren Fluids (F1) bei max. 30°C. Nur im Süden und Westen erreicht die Rücklauftemperatur in etwas mehr als 10% der Fälle eine Temperatur von 30 bis 40°C. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Auslasstemperatur von F1 beträgt im Norden ca. 10 K, im Süden ca. 20 K und im Westen ca. 24 K (siehe Tabelle 108 im Anhang 16.13.4).

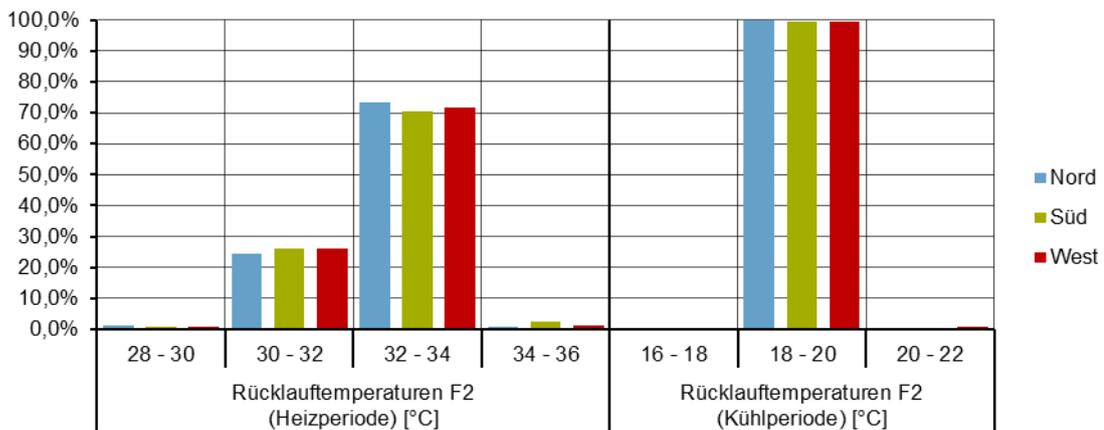


Abbildung 117: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des inneren Fluids (F2) in der Heiz- und Kühlperiode; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung

Wie in Abbildung 117 zu sehen ist, sinkt die Rücklauftemperatur des inneren Fluids (F2) in der Heizperiode in mind. 70% der Fälle max. um 1 bis 3K unter die Vorlauftemperatur und in nahezu allen anderen Fällen um maximal 5 K. In der Kühlperiode steigt in fast 100% der Fälle die Rücklauftemperatur um maximal 2 K gegenüber der Vorlauftemperatur an.

Fazit Energiebedarf, Energiegewinne und Rücklauftemperaturen

Der berechnete spezifische jährliche Heizwärmebedarf von 21 – 27 kWh/m²a für den Einzelbüroraum in Moskau mit Fluidglasfassade und mechanischer Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung kann als gering eingeordnet werden, verglichen mit typischen Werten für den Heizwärmebedarf in Moskau von ca. 15 – 60 kWh/m²a (vergleiche Kapitel 2.6.1). Der Kühllastbedarf von 11 – 14 kWh/m²a ist ebenfalls gering. Zudem ist die benötigte Vorlauftemperatur von 18°C zum Kühlen sehr moderat. I.d.R. können dafür natürliche Wärmesenken/-quellen, z.B. Erdreich bzw. Grundwasser, genutzt werden. Bei einer durchschnittlichen jährlichen Erdreichtemperatur von 6°C in 10 – 12 m Tiefe kann über Grundwasser oder Erdsonden ohne zusätzlichen Energieaufwand zur Vorkonditionierung die benötigte Vorlauftemperatur bereitgestellt werden. Die Vorlauftemperatur von ca. 26 – 35°C zum Heizen ist ebenfalls moderat und kann über die natürlichen Wärmequellen, in Kombination mit z.B. Grundwasser-Wärmepumpen, mit einem hohen Wirkungsgrad bereitgestellt werden (Hausladen et al., 2012, S. 56).

Die Temperaturdifferenzen zwischen dem Rück- und dem Vorlauf des inneren Flüssigkeitskreislaufs sind darüber hinaus gering. In der Heizperiode kühlt sich das Fluid um max. 5 K ab, in der Kühlperiode erwärmt sich das Fluid nur um max. 2 K.

Die jährlichen thermischen Energiegewinne durch die Fluidglasfassade sind bilanziell höher als der Energiebedarf für Heizen und Kühlen. Im Norden kann ca. das 2-fache, im Süden das ca. 6-fache und im Westen das ca. 5-fache an thermischer Energie gewonnen werden als für die Raumkonditionierung benötigt wird (siehe Tabelle 109 im Anhang 16.13.4). Die Fluidtemperaturen sind jedoch mit 15 bis max. 40°C relativ niedrig (siehe Kapitel 2.8). Inwiefern die thermischen Gewinne weiter genutzt werden können, muss im Rahmen von weiterführenden Untersuchungen geprüft werden.¹³¹

8.3.2 München

Der Einfärbungsgrad des Fluids wird auf den Zielwert von 1500 Lux Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene gesteuert, analog zur Steuerung für Moskau.

Visueller Komfort - Beleuchtungsstärke auf Arbeitsebene

Wie in Tabelle 48 zu sehen ist, liegt bei allen Orientierungen in über 76% der Nutzungszeit die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene zwischen 300 und 4000 Lux. Der visuelle Komfort ist in diesen Fällen eingehalten. Ebenfalls bei allen Orientierungen wird in 9 - 10% der Nutzungszeit

¹³¹ Im Rahmen der Arbeit wird die Gegenüberstellung der Energiegewinne mit dem Energiebedarf nicht weiter untersucht. V.a. der zeitliche Verlauf des Energieangebots und die Temperaturniveaus gegenüber dem Energiebedarf müsste in weiteren Untersuchungen näher betrachtet werden. Darüber hinaus müssten die Potentiale zur Nutzung der thermischen Solargewinne im Gebäude, z.B. für die Warmwasserbereitung oder zur Heizungsunterstützung, in Kombination mit der Gebäudetechnik detailliert untersucht werden. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „FLUIDGLASS“ konnte in Simulationen nachgewiesen werden, dass über ein Niedertemperatur-Nahwärmenetz (Anergienetz) umliegende Wohngebäude im Quartier mit überschüssiger Wärme aus den Fluidgläsern versorgt und diese mit Wärmepumpen zur Warmwasserbereitung oder zur Heizungsunterstützung genutzt werden können (Yan, Hua und Stopper (S. 105) und Baumgärtner, Krasovsky, Stopper und Grabe, 2017, S. 215-216)).

die Mindestbeleuchtungsstärke von 300 Lux unterschritten. Eine Überschreitung der gewünschten maximalen Beleuchtungsstärke von 4000 Lux erfolgt nach Norden in 14%, nach Süden nur in 7% und nach Westen in 8% der Nutzungszeit.

Beleuchtungsstärke	Nord	Süd	West
< 300 lx	10%	9%	10%
300 - 500 lx	2%	2%	2%
500 - 2000 lx	53%	68%	61%
2000 - 4000 lx	21%	14%	18%
> 4000 lx	14%	7%	8%

Tabelle 48: Häufigkeiten der Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene innerhalb der Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

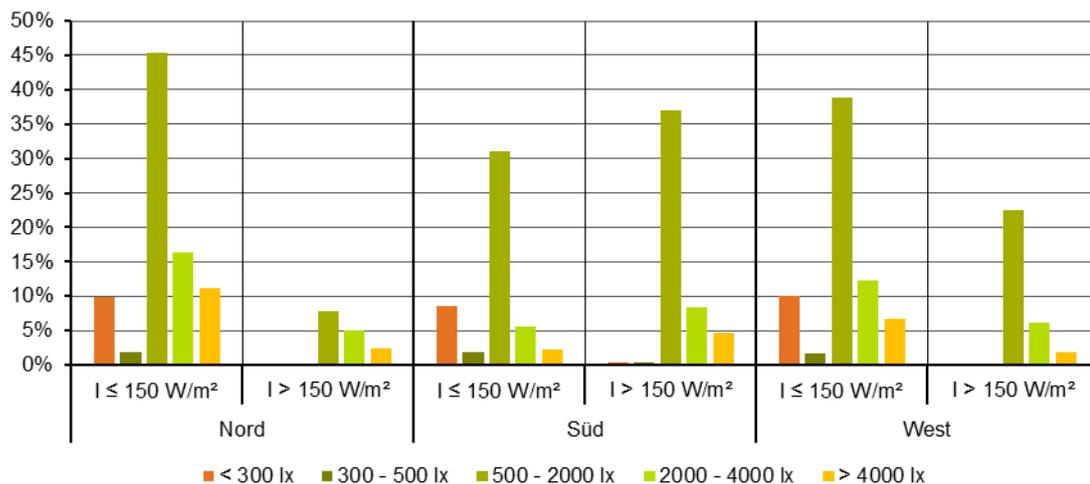


Abbildung 118: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [lx] auf Arbeitsebene bei globaler Einstrahlung (I) auf die Fassade unter bzw. über 150 W/m²; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

Wie in Abbildung 118 zu sehen ist, ist die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene nur in den Fällen unter 300 Lux, wenn die globale Einstrahlung auf die Fassade unter 150 W/m² liegt. Abbildung 119 zeigt, dass das Fluidglas zu diesen Zeitpunkten nicht eingefärbt ist und somit die Einfärbung hier richtig gesteuert wird. Der visuelle Komfort kann daher in diesen Fällen nicht erfüllt werden, weil die Beleuchtungsstärke im Außenraum nicht ausreichend ist.

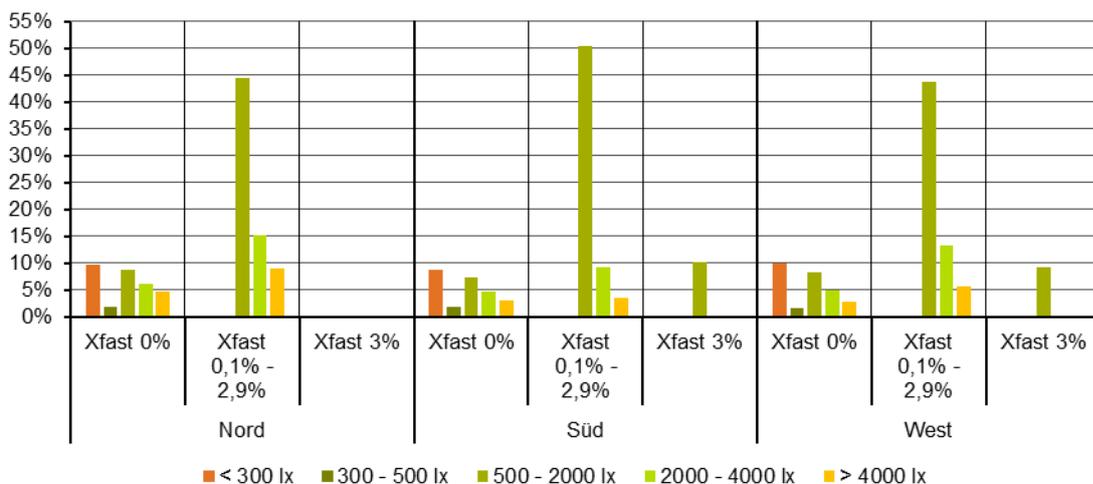


Abbildung 119: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [lx] auf Arbeitsebene je Einfärbungsgrad des Fluid mit Xfast; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

Wie in Abbildung 119 zu sehen ist, funktioniert die Einfärbungssteuerung für die Nutzungszeiten, in denen die Beleuchtungsstärke von 4000 Lux überschritten wird, nicht einwandfrei. Bei allen Orientierungen kommt es zu Überschreitungen, wenn die Einfärbung unter der maximalen Einfärbung von 3% liegt. Bei maximaler Einfärbung liegt die Beleuchtungsstärke zwischen 500 und 2000 Lux. Insbesondere nach Norden müsste die Einfärbung in 14% der Nutzungszeit höher sein. Hier wird maximal bis ca. 1,9 vol-% eingefärbt (siehe auch Tabelle 49). Die aktuelle Steuerung berücksichtigt in München, wie in Moskau, den Einfluss der Diffusstrahlung nicht ausreichend genau.

Einfärbung [%]	Nord	Süd	West
0	31%	26%	28%
0,1 – 2,9	69%	64%	63%
3	0%	10%	9%

Tabelle 49: Häufigkeiten der Einfärbungskonzentrationen innerhalb der Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

Fazit visueller Komfort

Die Ergebnisse für die Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene in München sind ähnlich wie die am Standort Moskau. Der visuelle Komfort auf der Arbeitsebene wird in über 76% der Nutzungszeit bei allen Orientierungen eingehalten. Bei ausreichender Helligkeit im Außenraum könnte in allen Fällen bei optimaler Steuerung, d.h. wenn ausreichend stark eingefärbt würde, der visuelle Komfort eingehalten werden.

Thermischer Komfort

Der Massenstrom und die Vorlauftemperaturen für das innere und äußere Fluid entsprechen den Einstellungen für den Standort Moskau.

Der Massenstrom des äußeren Fluids (F1) beträgt $1 \text{ l/min}\cdot\text{m}$, der des inneren Fluids (F2) $3 \text{ l/min}\cdot\text{m}$. Die Vorlauftemperaturen für den äußeren Flüssigkeitskreislauf (F1) sind für die Heizperiode auf 15°C und für die Kühlperiode auf 20°C festgelegt¹³². Die Vorlauftemperatur für den inneren Flüssigkeitskreislauf (F2) beträgt 18°C im Kühlfall und 35°C im Heizfall.

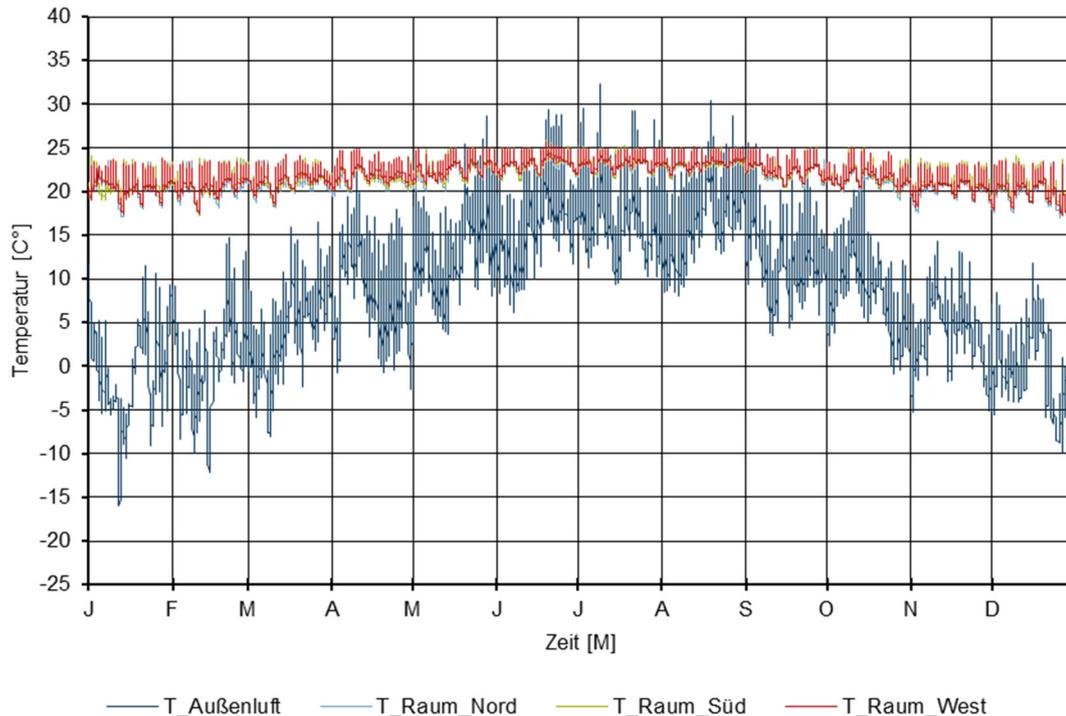


Abbildung 120: Jahresverläufe der Außenluft- und der operativen Raumtemperaturen; 8760 Std.; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

In Abbildung 120 sind die Jahresverläufe in 8760 Stundenschritten der Außenluft und der operativen Raumtemperaturen des Einzelbürraums nach Norden, Süden und Westen orientiert dargestellt. Die Außenlufttemperatur zeigt ausgeprägte jahreszeitliche Schwankungen zwischen ca. -16°C und 32°C . Im Gegensatz dazu liegen die operativen Raumtemperaturen ganzjährig zwischen ca. 17°C und ca. 26°C ¹³³.

¹³² Der Massenstrom des äußeren Flüssigkeitskreislaufs ist ausgeschaltet, wenn die Umgebungstemperatur unter der Vorlauftemperatur liegt.

¹³³ Außerhalb der Nutzungszeit lässt die Fluidglassteuerung minimale operative Temperaturen von 16°C zu. Eine Temperaturobergrenze ist nicht festgelegt. Das äußere oder das innere Fluid ist außerhalb der Nutzungszeit immer maximal eingefärbt.

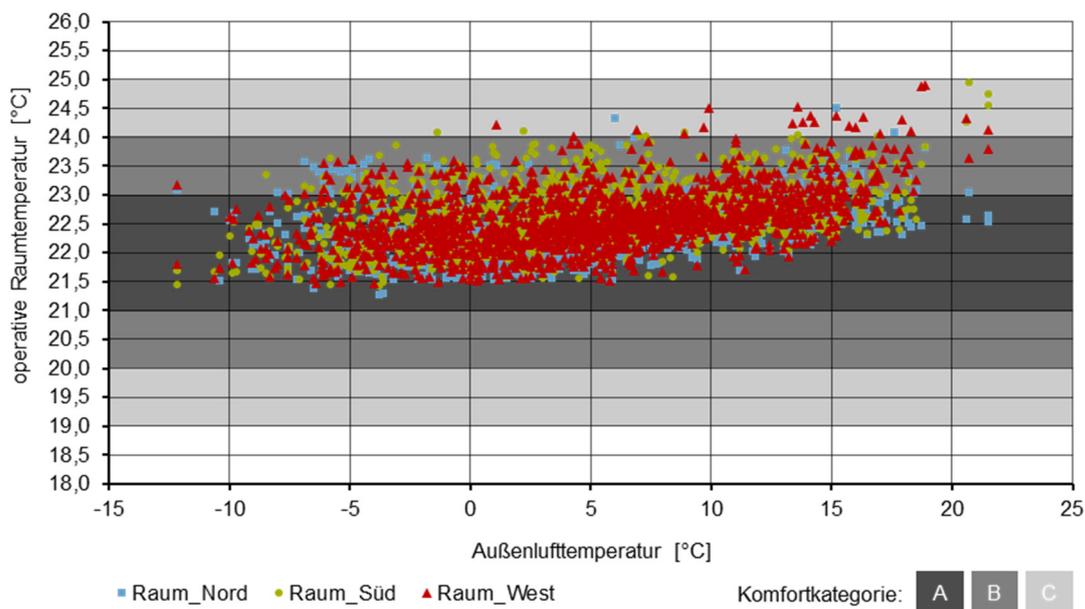


Abbildung 121: Operative Raumtemperaturen in der Heizperiode; Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

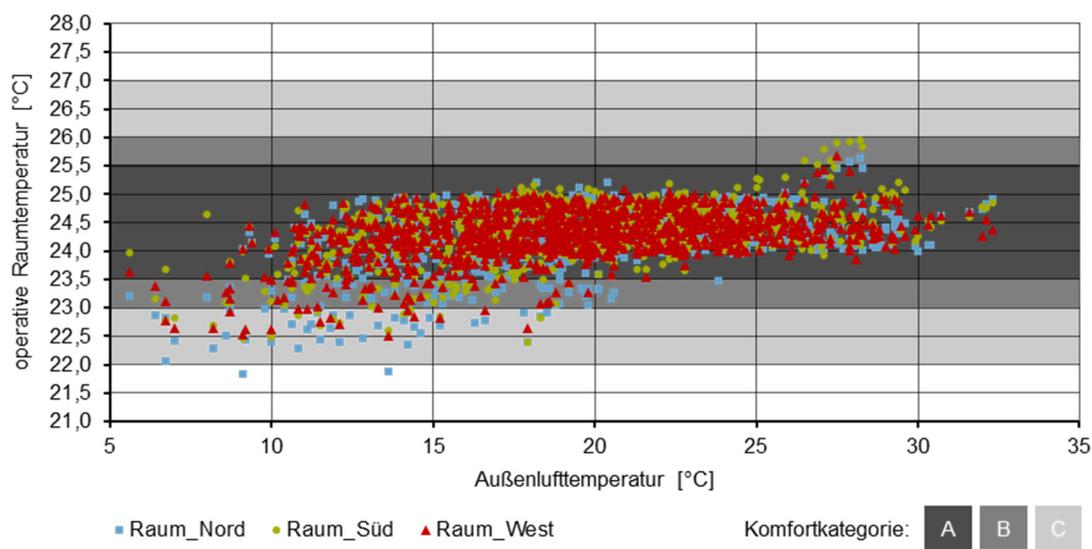


Abbildung 122: Operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode; Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

Für den thermischen Komfort zeigt sich ein ähnliches Bild wie am Standort Moskau. In der Heizperiode¹³⁴ wird zu keinem Zeitpunkt eine operative Raumtemperatur von 21°C unterschritten, wie in Abbildung 121 und Abbildung 123 zu sehen ist. Bei allen Orientierungen wird in über 80% der Nutzungszeit der Komfortbereich A eingehalten, in nahezu allen anderen Fällen der Komfortbereich B (siehe auch Tabelle 98 im Anhang 16.13.2).

¹³⁴ Die Nutzungszeit in der Heizperiode beträgt 1615 Stunden, in der Kühlperiode 1117 Stunden.

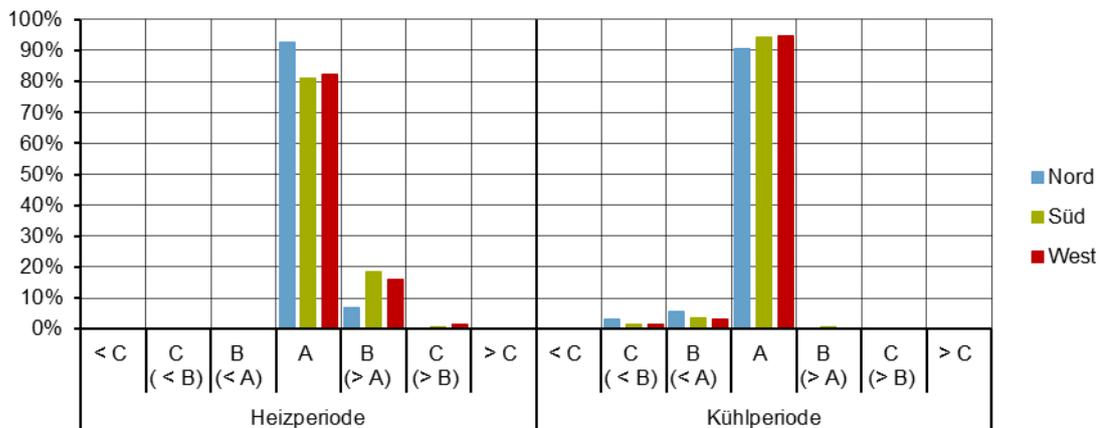


Abbildung 123: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche in der Heiz- und Kühlperiode; Nutzungszeit; München, Nord-, Süd- und Westorientierung

In der Kühlperiode wird nur in max. 0,7% der Nutzungszeit eine operative Raumtemperatur von 25,5°C überschritten, wie in Abbildung 122 und Abbildung 123 zu sehen ist. Bei allen Orientierungen wird in über 90% der Nutzungszeit der Komfortbereich A eingehalten. Bei Außenlufttemperaturen, die unterhalb 21°C liegen, wird in maximal 9% der Nutzungszeit die operativen Raumtemperaturen von 23,5°C unterschritten und somit nur der Komfortbereich B oder C eingehalten.

Fazit thermischer Komfort

Der thermische Komfort ist in München, analog zum Standort Moskau, bei allen Orientierungen sowohl in der Heiz-, als auch in der Kühlperiode sehr gut. Es wird in mindestens 80% der Nutzungszeit der maximale Komfortbereich A eingehalten, in nahezu allen anderen Fällen der Komfortbereich B. In der Heizperiode wird die gewünschte operative Raumtemperatur z.T. leicht überschritten, in der Kühlperiode z.T. leicht unterschritten¹³⁵. Die Heiz- und Kühlleistungen der Fluidglasfassade sind auch am Standort München ausreichend. Die Abweichungen vom Komfortbereich A könnten auch in München durch eine optimierte Steuerung behoben werden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass auch in München eine Reduktion der Vorlauftemperatur von 35°C auf 26°C im Heizfall ausreichend wäre, da dies für den extremen Heizfall in Moskau mit Nordorientierung nachgewiesen wurde (siehe Kapitel 8.3.1).

Es wurden zusätzlich Simulationen für einen südorientierten Büroraum in München mit einem geringeren Massenstrom von 1 l/min·m im inneren Fluid (F2) durchgeführt (siehe Abbildung 162 bis Abbildung 165 und Tabelle 100 im Anhang 16.13.2). Der thermische Komfort in der Kühlperiode ist nahezu identisch mit dem bei einem Massenstrom von 3 l/min·m. Im Kühlfall könnte der Massenstrom entsprechend reduziert werden. Im Heizfall kommt es dagegen zu deutlichen Komforteinbußen. In ca. 40% der Nutzungszeit wird der Komfortbereich überschritten und in ca. 6% sogar der Komfortbereich C. Durch den Enthalpiestrom werden weniger solare

¹³⁵ Vergleiche Fazit für den thermischen Komfort in Moskau (Kapitel 8.3.1).

Gewinne im inneren Fluid abgeführt und der Raum zu stark erwärmt. Im Heizfall sind daher Massenströme ≥ 3 l/min·m erforderlich.

Wie am Standort Moskau liegen in München die Temperaturdifferenz zwischen der gewünschten operativen Raumtemperatur und der Fluidglasfassadentemperatur in der Heizperiode zwischen 7 und 12 K¹³⁶ und in der Kühlperiode zwischen 3,5 und 5,5 K (siehe Abbildung 127). Strahlungstemperaturasymmetrien können damit fast vollständig unterbunden werden (siehe auch Kapitel 2.4.2). Ein Kaltluftabfall an der Fassade in der Heizperiode oder Wärmestrahlung von der Fassade an den Nutzer in der Kühlperiode können ebenfalls verhindert werden.

Energiebedarf

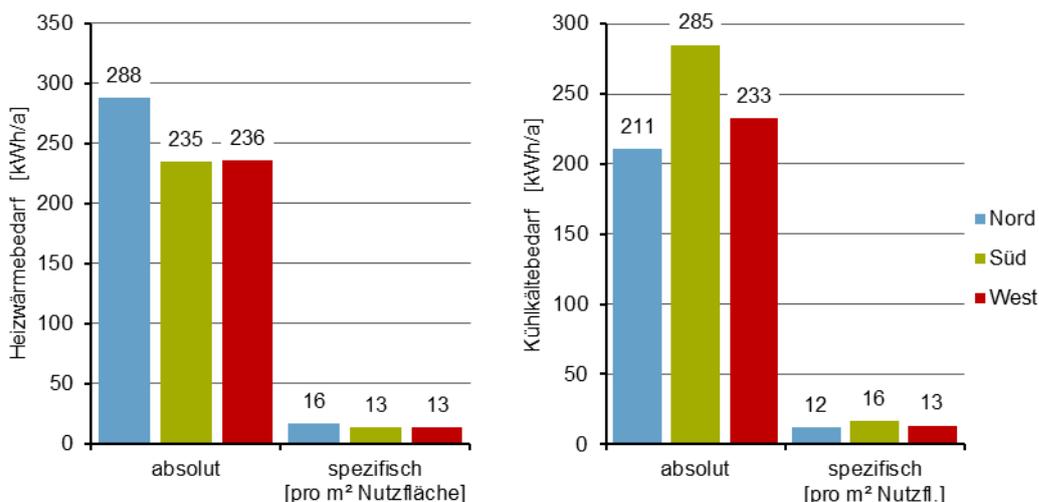


Abbildung 124: Heizwärmebedarf (links) und Kühlkältebedarf (rechts) für einen Einzelbüroraum (jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]); München; Nord-, Süd- und Westorientierung

Der spezifische jährliche Heizwärmebedarf liegt je nach Orientierung zwischen 13 und 16 kWh/m²a, der Kühlkältebedarf zwischen 12 und 16 kWh/m²a, wie in Abbildung 124 zu sehen ist. Der Energiebedarf für künstliche Beleuchtung liegt bei allen Orientierungen bei ca. 5 kWh/m²a (siehe Abbildung 158 im Anhang 16.13.2). Die monatlichen Verläufe des Energiebedarfs können Abbildung 155 bis Abbildung 157 im Anhang 16.13.2 entnommen werden.

Energiegewinne

Die Fluidglasfassade verzeichnet auch in München ganzjährig thermische Energiegewinne. Die spezifischen jährlichen Energiegewinne, bezogen auf die 17,5 m² Büronutzfläche, liegen je nach Orientierung für den äußeren Fluidkreislauf (F1) zwischen 55 bis 113 kWh/m²a, für den inneren Fluidkreislauf (F2) zwischen 29 bis 94 kWh/m²a (siehe Abbildung 125)¹³⁷. Für F1 sind die Gewinne bei Westorientierung am höchsten, für F2 bei Südorientierung. Wie in Abbildung 159

¹³⁶ Durch reduzierte Vorlauftemperaturen in der Heizperiode könnten diese analog zu Moskau auf 0 – 3 K verbessert werden.

¹³⁷ Die jährlichen spezifischen Energiegewinne (F1 und F2) bezogen auf die 10,5 m² Fassadenfläche betragen: Norden ca. 139 kWh/m²a, Süden ca. 326 kWh/m²a und Westen ca. 297 kWh/m²a.

bis Abbildung 161 im Anhang 16.13.2 zu sehen ist, können mit F2 ganzjährig thermische Gewinne realisiert werden, mit F1 von März bis Oktober. Insbesondere bei Südorientierung stellen sich ganzjährig hohe Energiegewinne ein. Die monatlichen Energiegewinne liegen immer über ca. 10 kWh/m². Der Maximalwert bei F2 wird im März mit ca. 25 kWh/m² erreicht, bei F1 im August mit ca. 40 kWh/m².

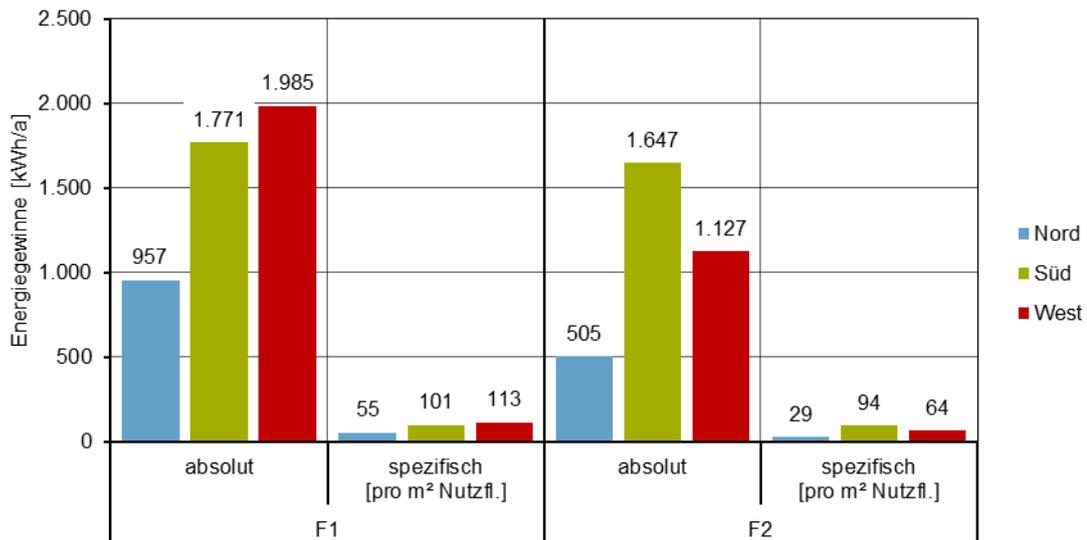


Abbildung 125: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (links: F1, rechts: F2 Einzelbüroraum; jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]); München; Nord-, Süd- und Westorientierung

Rücklauftemperaturen Fluide

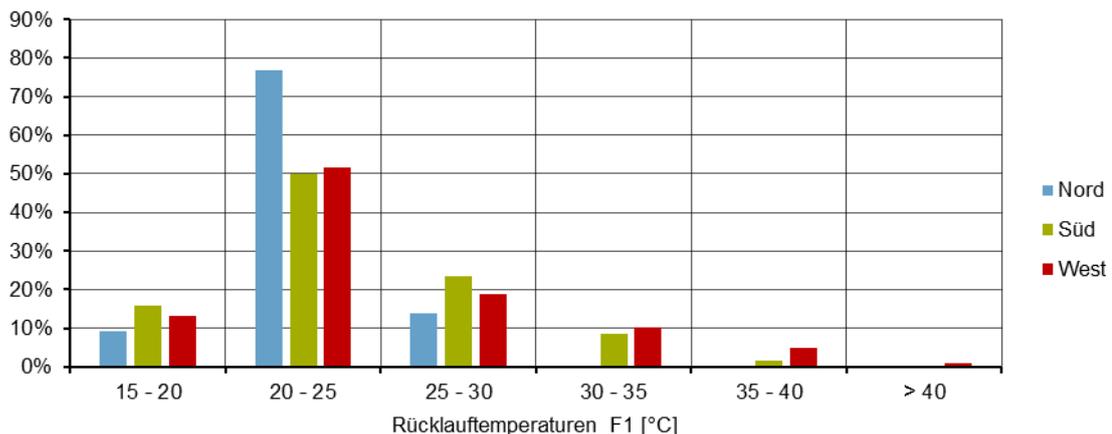


Abbildung 126: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des äußeren Fluids (F1) in der Heiz- und Kühlperiode; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

In ca. 90% der Fälle liegt die Rücklauftemperatur des äußeren Fluids (F1) bei max. 30°C. Nur im Süden und Westen erreicht die Rücklauftemperatur in etwas mehr als 10% der Fälle eine Temperatur von 30 bis 40°C. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Auslasstemperatur von F1 beträgt im Norden ca. 8 K, im Süden ca. 18 K und im Westen ca. 24 K (siehe Tabelle 108 im Anhang 16.13.4).

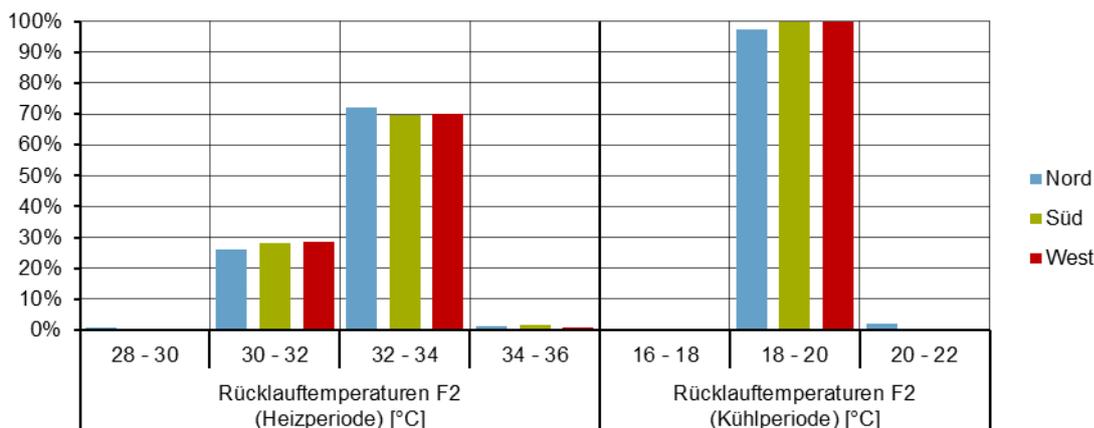


Abbildung 127: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des inneren Fluids (F2) in der Heiz- und Kühlperiode; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

Wie in Abbildung 127 zu sehen ist, sinkt die Rücklauftemperatur des inneren Fluids (F2) in der Heizperiode in ca. 70% der Fälle max. um 1 bis 3K unter die Vorlauftemperatur und in nahezu allen anderen Fällen um maximal 5 K. In der Kühlperiode steigt in fast 100% der Fälle die Rücklauftemperatur um maximal 2 K gegenüber der Vorlauftemperatur an.

Fazit Energiebedarf, Energiegewinne und Rücklauftemperaturen

Der berechnete spezifische jährliche Heizwärmebedarf von 13 – 16 kWh/m²a für den Einzelbüroraum in München mit Fluidglasfassade und mechanischer Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung kann als sehr gering eingeordnet werden, verglichen mit typischen Werten für den Heizwärmebedarf in München von ca. 15 – 40 kWh/m²a (vergleiche Kapitel 2.6.2). Der Kühlkältebedarf von 12 – 16 kWh/m²a ist ebenfalls gering. Zudem ist, wie in Moskau, die benötigte Vorlauftemperatur von 18°C zum Kühlen sehr moderat und kann ohne zusätzlichen Energieaufwand zur Vorkonditionierung aus natürliche Wärmesenken/-quellen, z.B. Grundwasser bereitgestellt werden¹³⁸. Die Vorlauftemperatur von ca. 26 – 35°C zum Heizen ist ebenfalls moderat und kann über die natürlichen Wärmequellen, in Kombination mit z.B. Grundwasser-Wärmepumpen, mit einem hohen Wirkungsgrad bereitgestellt werden (Hausladen et al., 2012, S. 72).

Wie in Moskau sind auch am Standort München die Temperaturdifferenzen zwischen dem Rück- und dem Vorlauf des inneren Flüssigkeitskreislaufs gering. In der Heizperiode kühlt sich das Fluid um max. 5 K ab, in der Kühlperiode erwärmt sich das Fluid nur um max. 2 K.

Die jährlichen thermischen Energiegewinne durch die Fluidglasfassade sind bilanziell höher als der Energiebedarf für Heizen und Kühlen. Die Überschüsse sind noch etwas größer als in Moskau. Im Norden kann ca. das 3-fache, im Süden und Westen das ca. 7-fache an thermischer Energie gewonnen werden, als für die Raumkonditionierung benötigt wird (siehe Tabelle 109 im Anhang 16.13.4). Die Fluidtemperaturen sind jedoch auch in München mit 15 bis max. 40°C relativ niedrig (siehe Kapitel 2.8).

¹³⁸ Die durchschnittliche jährliche Erdreichtemperatur beträgt ca. 9°C in 10 – 12 m (siehe Kapitel 2.6.2).

8.3.3 Riad

Der Einfärbungsgrad des Fluids wird am Standort Riad niedriger als in Moskau und München auf den Zielwert von 500 Lux Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene gesteuert.

Visueller Komfort - Beleuchtungsstärke auf Arbeitsebene

Wie in Tabelle 50, Abbildung 128 und Abbildung 129 zu sehen ist, liegt bei allen Orientierungen in über 90% der Nutzungszeit die Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene zwischen 300 und 4000 Lux. Der visuelle Komfort ist in diesen Fällen für Tageslichtversorgung eingehalten. Eine Überschreitung der gewünschten maximalen Beleuchtungsstärke von 4000 Lux erfolgt nicht. In lediglich 2 - 3% der Nutzungszeit wird die Mindestbeleuchtungsstärke von 300 Lux unterschritten.

Beleuchtungsstärke	Nord	Süd	West
< 300 lx	2%	3%	2%
300 - 500 lx	58%	43%	44%
500 - 2000 lx	38%	53%	53%
2000 - 4000 lx	2%	1%	2%
> 4000 lx	0%	0%	0%

Tabelle 50: Häufigkeiten der Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene innerhalb der Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

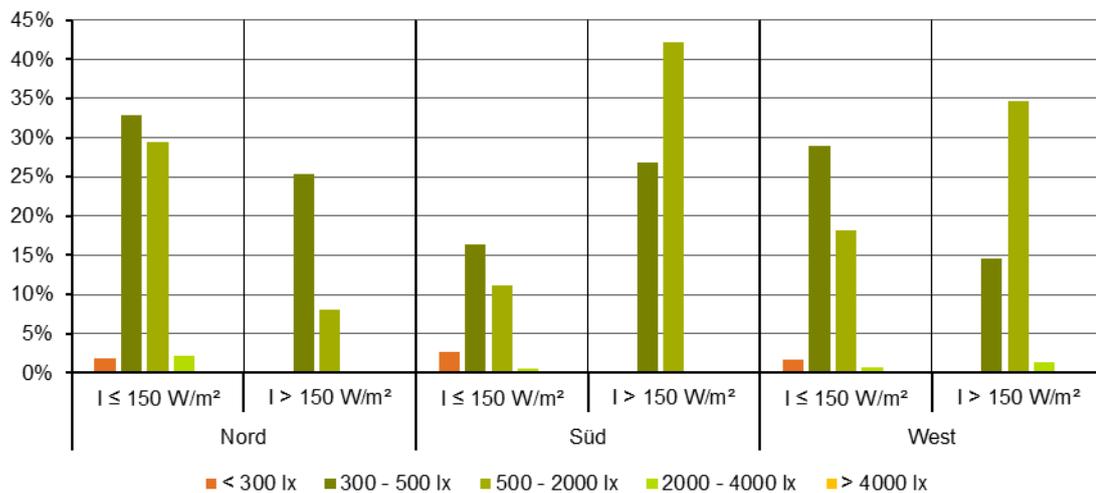


Abbildung 128: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [lx] auf Arbeitsebene bei globaler Einstrahlung (I) auf die Fassade unter bzw. über 150 W/m²; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

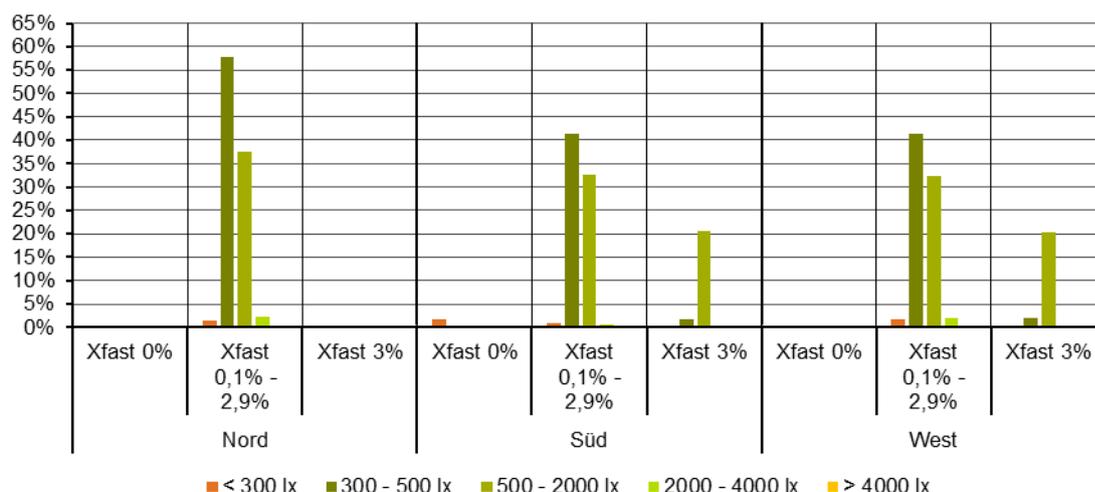


Abbildung 129: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [lx] auf Arbeitsebene je Einfärbungsgrad des Fluid mit Xfast. Riad, Nord-, Süd- und Westorientierung

Einfärbung [%]	Nord	Süd	West
0	1%	2%	0%
0,1 – 2,9	99%	76%	78%
3	0%	22%	22%

Tabelle 51: Häufigkeiten der Einfärbungskonzentrationen innerhalb der Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

Wie in Tabelle 51 zu sehen ist, muss in Riad in mind. 98% der Nutzungszeit das Fluid eingefärbt werden. Nach Süden und Westen in ca. 20% der Fälle sogar maximal.

Fazit visueller Komfort

Die Einfärbung des Fluids funktioniert sehr gut. Es gibt keine Beleuchtungsstärken über 4000 Lux auf der Arbeitsebene. Allerdings liegt die Beleuchtungsstärke sehr häufig zwischen 300 und 500 Lux auf der Arbeitsebene und ist damit sehr niedrig. V.a. auch in der Raumtiefe müsste künstliche Beleuchtung eingeschaltet werden. Bei einer Steuerung mit höheren Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene wie in den Simulationen für Moskau und München, sind die solaren Wärmegewinne jedoch so hoch, dass der thermische Komfort nicht eingehalten werden kann. Im Sinne eines optimalen thermischen Komforts wäre es jedoch sinnvoller, mehr Tageslicht in den Raum transmittieren zu lassen und dabei höhere Kühllasten durch den solaren Eintrag in Kauf zu nehmen¹³⁹. Dafür müsste mit einer zusätzlichen Kühlung der erhöhte Kühlbedarf kompensiert werden, um den thermischen Komfort zu garantieren¹⁴⁰.

¹³⁹ Im Rahmen weiterer Forschungsprojekte sollte dieser Sachverhalt untersucht werden.

¹⁴⁰ Wie im Folgenden zu sehen ist, wird auch mit den aktuell simulierten, hohen Einfärbungskonzentrationen eine zusätzliche Kühlung mit geringer Leistung benötigt, um den thermischen Komfort einzuhalten,

Thermischer Komfort

Der Massenstrom des äußeren Fluids (F1) beträgt 6 l/min·m, der des inneren Fluids (F2) 18 l/min·m. Die Vorlauftemperaturen für den äußeren Flüssigkeitskreislauf (F1) sind für die Heizperiode auf 15°C und für die Kühlperiode auf 30°C festgelegt¹⁴¹. Die Vorlauftemperatur für den inneren Flüssigkeitskreislauf (F2) beträgt 18°C im Kühlfall und 35°C im Heizfall. Es wurden zusätzliche Simulationen mit variierenden Massenströmen in F1 und F2 und unterschiedlichen Vorlauftemperaturen in F1 untersucht (siehe Tabelle 104 bis Tabelle 107 und Abbildung 174 bis Abbildung 177 im Anhang 16.13.3).

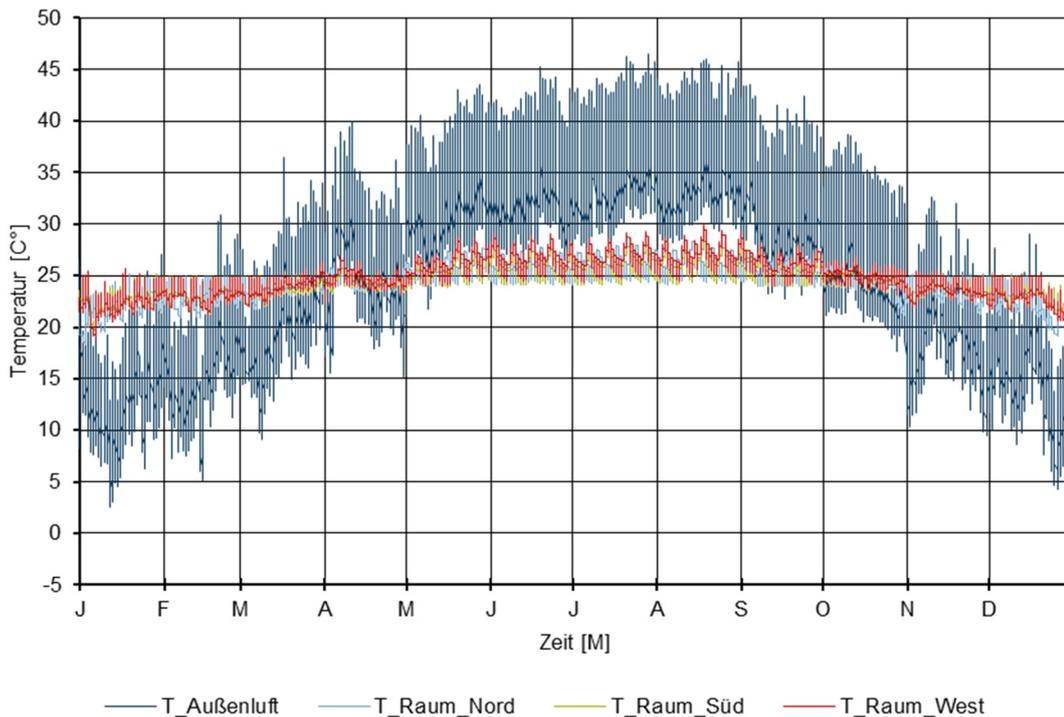


Abbildung 130: Jahresverläufe der Außenluft- und der operativen Raumtemperaturen; 8760 Std.; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

In Abbildung 130 sind die Jahresverläufe in 8760 Stundenschritten der Außenluft und der operativen Raumtemperaturen des Einzelbürraums nach Norden, Süden und Westen orientiert dargestellt. Die Außenlufttemperatur ist ganzjährig frostfrei mit sehr hohen sommerlichen Temperaturen. Die Werte liegen zwischen ca. 2,6°C und 46,5°C. Die operativen Raumtemperaturen liegen ganzjährig zwischen ca. 18°C und max. 30°C¹⁴².

¹⁴¹ Der Massenstrom des äußeren Flüssigkeitskreislaufs ist ausgeschaltet, wenn die Umgebungstemperatur unter der Vorlauftemperatur liegt.

¹⁴² Außerhalb der Nutzungszeit lässt die Fluidglassteuerung minimale operative Temperaturen von 16°C zu. Eine Temperaturobergrenze ist nicht festgelegt. Das äußere oder das innere Fluid ist außerhalb der Nutzungszeit immer maximal eingefärbt.

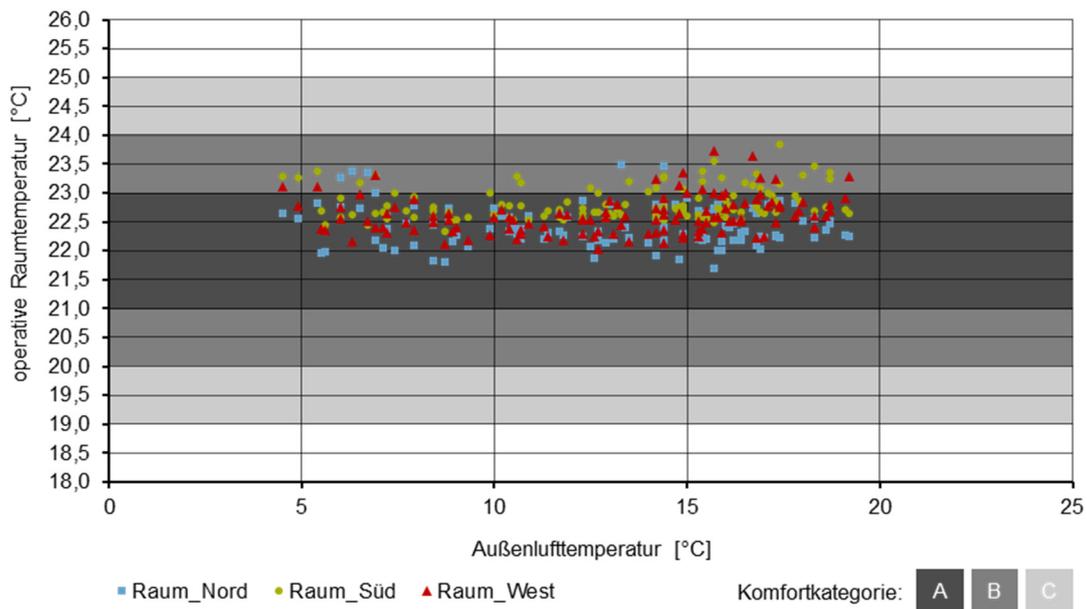


Abbildung 131: Operative Raumtemperaturen in der Heizperiode; Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

Nur 120 Stunden schaltet das Fluidglas auf den Heizperiodenmodus, d.h. das innere Fluid (F2) wird eingefärbt. In den Nutzungsstunden mit Heizmodus kann der Komfortbereich A bei Nordorientierung in 95% eingehalten werden, nach Süden in ca. 73% und nach Westen in ca. 88%. In den restlichen Nutzungsstunden wird der Komfortbereich B eingehalten (siehe Abbildung 131 und Tabelle 101 im Anhang 16.13.3).

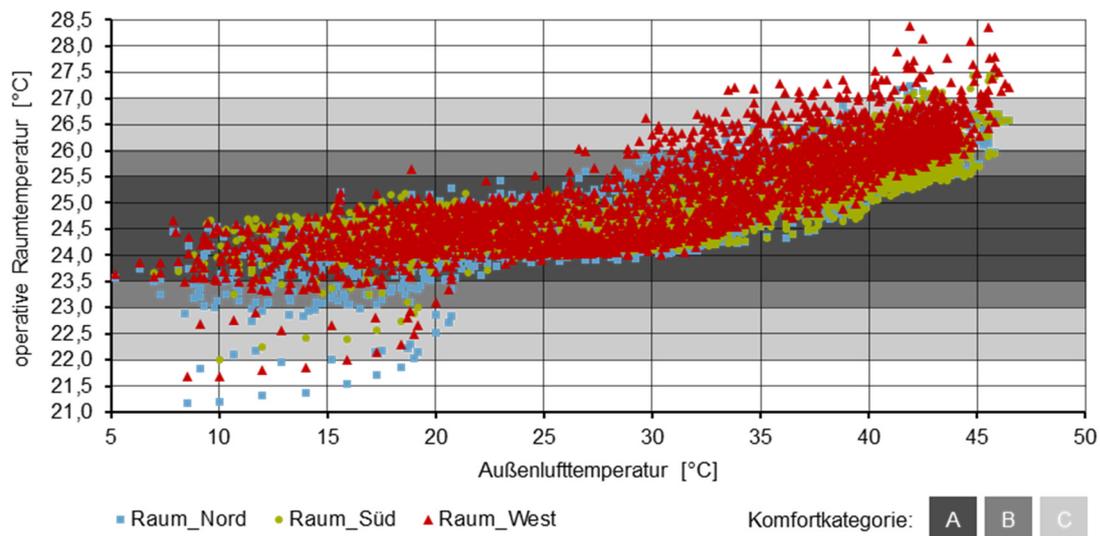


Abbildung 132: Operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

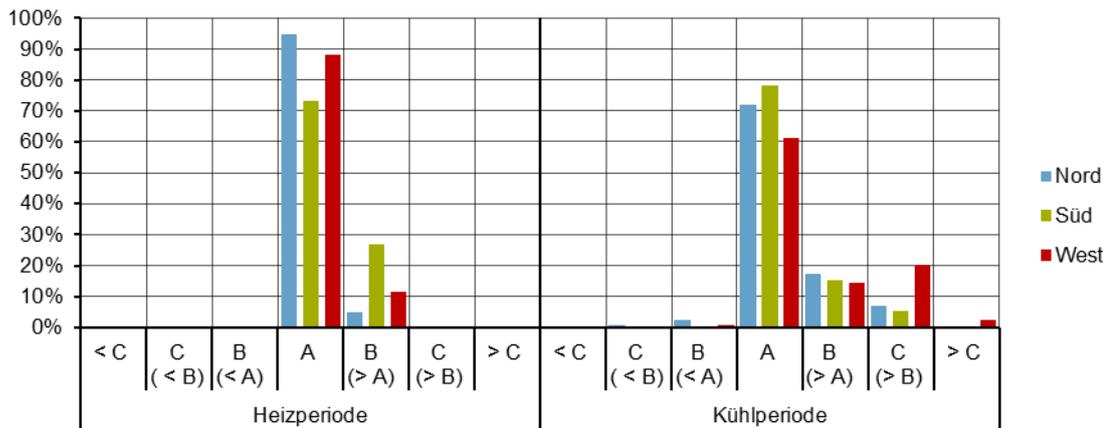


Abbildung 133: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche in der Heiz- und Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

In 2616 Std. im Jahr schaltet das Fluidglas auf den Kühlperiodenmodus, d.h. das äußere Fluid (F1) wird eingefärbt und das innere Fluid (F2) bei Bedarf gekühlt. Wie in Abbildung 132 und Abbildung 133 zu sehen ist, kann insbesondere nach Westen, mit niedrigen Sonnenstandshöhen, der thermische Komfort nicht über den Komfortbereich C verbessert werden. Der Komfortbereich A wird in ca. 60%, B in ca. 15%, C in ca. 20% der Nutzungszeit eingehalten. In 2,6% der Fälle liegt die operative Raumtemperatur über 27°C. Nach Süden kann aufgrund der steilen Sonnenstandshöhen und der gut funktionierenden Einfärbung bei direkter Einstrahlung in 78% der Fälle der Komfortbereich A eingehalten werden. In 5,4% der Fälle ist nur der Komfortbereich C eingehalten und in 0,5% der Fälle der Komfortbereich C überschritten.

Nach Norden ist der thermische Komfort geringfügig schlechter als nach Süden. Dies ist auf die nicht einwandfrei funktionierende Steuerung der Einfärbung bei diffuser Strahlung zurückzuführen¹⁴³. Hier wird in ca. 72% der Fälle der Komfortbereich A, in ca. 17% B, in ca. 7% der Fälle C eingehalten. In ca. 7% der Nutzungszeit übersteigt die operative Raumtemperatur 27°C (siehe auch Tabelle 102 im Anhang 16.13.3).

Fazit thermischer Komfort

Trotz der starken Einfärbung und damit der Minimierung der solaren Wärmegewinne ist der thermische Komfort in Riad nicht so gut wie an den Standorten Moskau und München. Auch mit sehr hohen Massenströmen im inneren Fluidkreislauf von bis 18 l/min·m kann nur der Komfortbereich C eingehalten werden. Die Kühlleistung der Fluidglasfassade allein ist für den Standort Riad voraussichtlich nicht ausreichend. Aus Komfortgründen wäre es sinnvoll eine zusätzliche Kühlung einzuplanen, auch um höhere Tageslichteinträge zu ermöglichen. Die zusätzlich benötigte Kühlleistung könnte gering sein und z.B. über die Zuluft eingebracht werden. Wie in Abbildung 137 zu sehen ist, sind die Rücklauftemperaturen des inneren Flüssigkeitskreislaufs in der Kühlperiode nicht höher als 20°C. Die innere Oberflächentemperatur der Fluidglasfassade stellt sich entsprechend mit ca. 18 – 20°C ein und liegt damit ca. 3,5 bis 5,5

¹⁴³ Die entwickelten Regressionsgleichungen zur Steuerung der Einfärbungskonzentration stellen eine Vereinfachung dar. Sie wurden auf die direkte Einstrahlung optimiert, um Blendung zu verhindern.

K unter der gewünschten operativen Raumtemperatur. Es kommt zu keiner Wärmeabstrahlung von der Fassade an den Nutzer, d.h. zu keinen erhöhten Strahlungstemperaturasymmetrien (siehe auch Kapitel 2.4.2).

Wie in Tabelle 104 bis Tabelle 107 und Abbildung 174 bis Abbildung 177 im Anhang 16.13.3 zu sehen ist, wurden zusätzliche Simulationen mit variierenden Massenströmen in F1 und F2 und unterschiedlichen Vorlauftemperaturen in F1 untersucht. Mit Massenströmen wie in Moskau und München – äußeres Fluid (F1) 1 l/min · m, inneres Fluid (F2) 3 l/min · m – wird nach Norden und Süden der Komfortbereich C eingehalten. Nach Westen kommt es in 17% der Nutzungszeit zu Temperaturen über 27°C. Der Komfortbereich C kann mit diesen Massenströmen nach Westen nicht eingehalten werden (siehe Abbildung 173 und Tabelle 103 im Anhang 16.13.3). Bei einer deutlichen Erhöhung der Massenströme – F1 mit 2 l/min · m und F2 mit 10 l/min · m – wird im Westen der Komfortbereich C eingehalten. Für das äußere Fluid (F1) wird in diesen Fällen von einer Vorlauftemperatur von 35°C ausgegangen. Dies entspricht in etwa der durchschnittlichen nächtlichen Außenlufttemperatur in den heißesten Sommermonaten Juli und August¹⁴⁴.

Die Simulationsvarianten zeigen, dass der Einfluss des Massenstroms des äußeren Fluids einen geringen Einfluss auf den thermischen Komfort im Innenraum hat (siehe Abbildung 174 im Anhang 16.13.3). Eine Erhöhung des Massenstroms des inneren Fluids hat wiederum einen sehr großen Einfluss (siehe Abbildung 175 im Anhang 16.13.3). Bereits ab 3 l/min · m kann im Süden der Komfortbereich C eingehalten werden.

Der Einfluss der Vorlauftemperatur des äußeren Fluids ist zwar relativ gering, hat jedoch positive Auswirkungen bei der Reduzierung von operativen Raumtemperaturen über 26°C (siehe Abbildung 177 und Tabelle 107 im Anhang 16.13.3). Bei Vorlauftemperaturen von 40°C kommt es in 9,5% der Nutzungszeit zu operativen Raumtemperaturen zwischen 26 und 27°C (Komfortbereich C) und in 0,7% der Nutzungszeit zu Temperaturen über 27°C (> Komfortbereich C). Reduziert man die Vorlauftemperatur auf 30°C¹⁴⁵, kommt es nur in 0,4% der Nutzungszeit zu Überschreitungen des Komfortbereichs C und in 5,4% zu Komfortbereich C.

Energiebedarf

Der spezifische Heizwärmebedarf im Januar beträgt nach Norden ca. 0,7 kWh/m²a und nach Westen ca. 0,35 kWh/m²a. Südorientierte Räume haben keinen Heizwärmebedarf. Außer im Januar bei Nord- und Westorientierung besteht ganzjährig ausschließlich Kühlkältebedarf, mit einem monatlichen Maximum im Juli von 20 – 22,5 kWh/m² (siehe Abbildung 166 bis Abbildung 168 im Anhang 16.13.3). Der spezifische jährliche Kühlkältebedarf liegt zwischen 119 kWh/m²a im Norden und 140 kWh/m²a im Westen. Der Energiebedarf für künstliche Beleuchtung ist bei

¹⁴⁴ Der Tagesdurchschnitt der Außenlufttemperatur beträgt im Juli und August ca. 38°C.

¹⁴⁵ In diesem Fall muss dem äußeren Fluid Wärme entzogen werden. Dies kann entweder über eine Nutzung, z.B. für Brauchwarmwasser, oder durch eine effiziente nächtliche Rückkühlung erfolgen. In Riad kann aufgrund des klaren Nachthimmels und der geringen Luftfeuchtigkeit mit einer adiabaten Kühlung rückgekühlt werden.

allen Orientierungen mit ca. 2 bis 3 kWh/m²a sehr gering (siehe Abbildung 169 im Anhang 16.13.3).

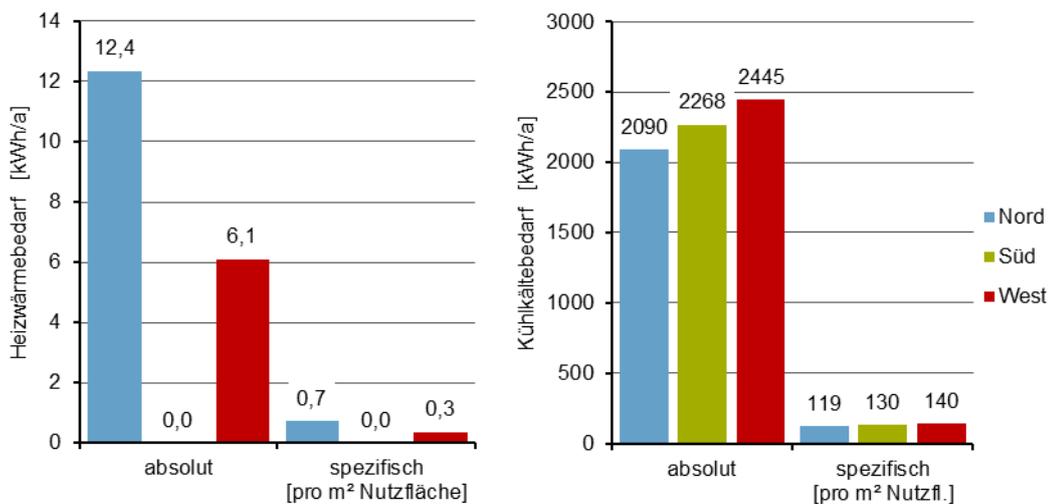


Abbildung 134: Heizwärmebedarf (links) und Kühlkältebedarf (rechts) für einen Einzelbüroraum (jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]); Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

Energiegewinne

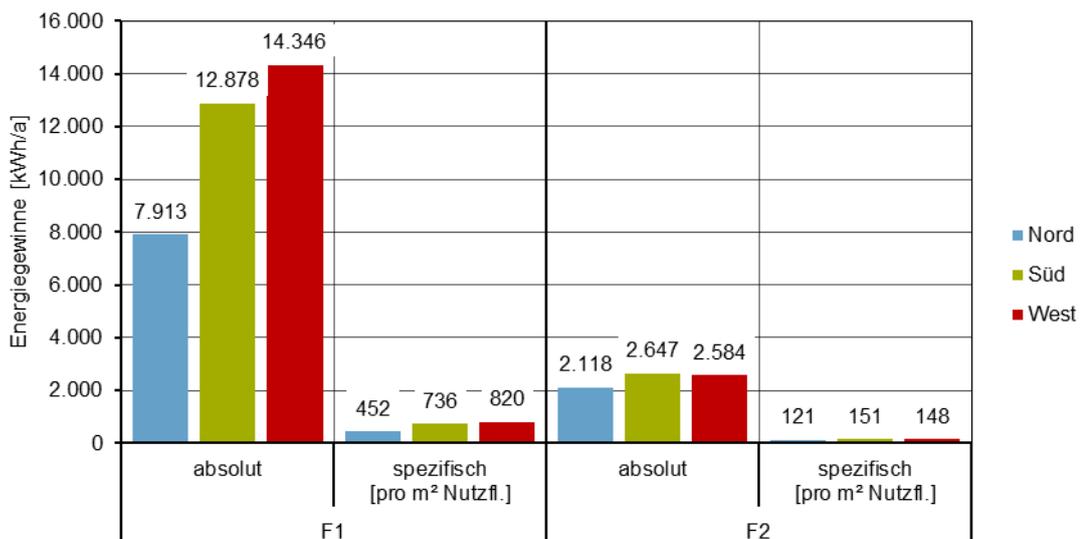


Abbildung 135: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (links: F1, rechts: F2 Einzelbüroraum; jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]); Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

Die Fluidglasfassade verzeichnet in Riad ganzjährig sehr hohe thermische Energiegewinne. Die spezifischen jährlichen Energiegewinne, bezogen auf die 17,5 m² Büronutzfläche, liegen je nach Orientierung für den äußeren Fluidkreislauf (F1) zwischen 452 kWh/m²a im Norden bis zu 820 kWh/m²a im Westen, für den inneren Fluidkreislauf (F2) zwischen 121 kWh/m²a im Norden, bis 151 kWh/m²a im Süden (siehe Abbildung 135)¹⁴⁶. Wie in Abbildung 170 bis Abbildung 172 im

¹⁴⁶ Die jährlichen spezifischen Energiegewinne (F1 und F2), bezogen auf die 10,5 m² Fassadenfläche, betragen: Norden ca. 956 kWh/m²a, Süden ca. 1478 kWh/m²a und Westen ca. 1612 kWh/m²a.

Anhang 16.13.3 zu sehen ist, können ganzjährig thermische Gewinne realisiert werden, mit maximalen Werten im Juli bei Nord- und Westorientierung bzw. im August bei Südorientierung von bis zu ca. 250 kWh pro Nutzfläche und Monat. Aufgrund der überwiegenden Einfärbung des äußeren Fluids sind die Energiegewinne in F1 deutlich höher als in F2.

Rücklauftemperaturen Fluide

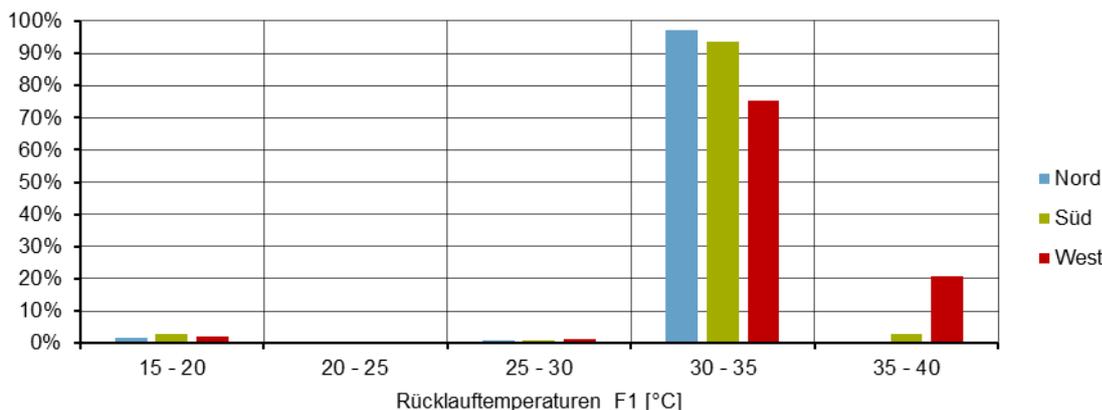


Abbildung 136: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des äußeren Fluids (F1) in der Heiz- und Kühlperiode; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

Bis auf wenige Fälle beträgt die Rücklauftemperatur des äußeren Fluids (F1) mindestens 30°C. Im Norden und Süden liegt sie in über 90% zwischen 30 und 35°C, im Westen steigt sie in 20% auf 35 bis 40°C an. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Auslasstemperatur von F1 beträgt im Norden ca. 5 K, im Süden ca. 6 K und im Westen ca. 9 K (siehe Tabelle 108 im Anhang 16.13.4).

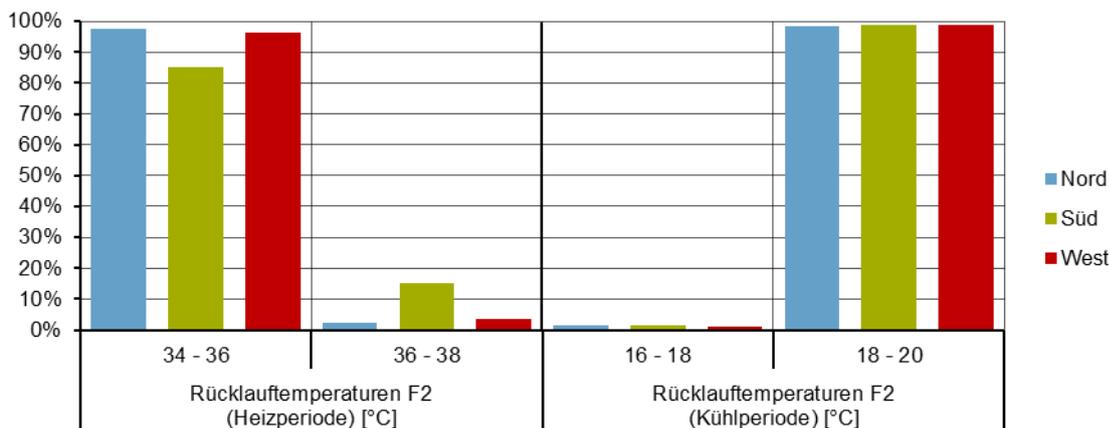


Abbildung 137: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des inneren Fluids (F2) in der Heiz- und Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

Wie in Abbildung 137 zu sehen ist, liegt die Rücklauftemperatur des inneren Fluids (F2) in der Heizperiode in mind. 80% der Fälle zwischen 34 und 36°C und weicht damit von der Vorlauftemperatur um 1 bis -1K ab. Nach Süden steigt sie in ca. 15% der Nutzungszeit um 1 bis 3 K an. In der Kühlperiode steigt in fast 100% der Fälle die Rücklauftemperatur um maximal 2 K gegenüber der Vorlauftemperatur an.

Fazit Energiebedarf, Energiegewinne und Rücklauftemperaturen

Der Heizwärmebedarf in Riad ist vernachlässigbar gering. Der berechnete spezifische jährliche Kühllältebedarf von 119 – 140 kWh/m²a für den Einzelbüroraum in Riad mit Fluidglasfassade und mechanischer Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung kann als sehr gering eingeordnet werden, verglichen mit einem typischen Kühllältebedarf in Riad von ca. 150 – 200 kWh/m²a (vergleiche Kapitel 2.6.3). Die benötigte Vorlauftemperatur von 18°C zum Kühlen ist sehr moderat. Aufgrund der ganzjährig hohen Außenlufttemperaturen und einer durchschnittlichen jährlichen Erdreichtemperatur von ca. 27°C in 10 – 12 m Tiefe kann die benötigte Vorlauftemperatur jedoch nicht durch das Erdreich bereitgestellt werden. In Riad kann aufgrund des klaren Nachthimmels und der geringen Luftfeuchtigkeit mit einer adiabaten Kühlung effizient rückgekühlt werden. Die relativ niedrigen Rücklauftemperaturen von ca. 30 - 40°C sind zu niedrig, um sie für solare Kühlung nutzen zu können (Hausladen et al., 2012, S. 120).

Die Temperaturdifferenzen zwischen dem Rück- und dem Vorlauf des inneren Flüssigkeitskreislaufs sind, wie in Moskau und München, auch in Riad gering. In der Kühlperiode erwärmt sich das Fluid nur um max. 2 K.

Die jährlichen thermischen Energiegewinne durch die Fluidglasfassade sind bilanziell höher als der Energiebedarf für Heizen und Kühlen. Im Norden kann ca. das 5-fache, im Süden und Westen das ca. 7-fache an thermischer Energie gewonnen werden als für die Raumkonditionierung benötigt wird (siehe Tabelle 109 im Anhang 16.13.4). Die Fluidtemperaturen sind jedoch mit 15 bis max. 40°C relativ niedrig (siehe Kapitel 2.8).

8.4 Zusammenfassung

Es wurden dynamisch-thermische Simulationen für einen Einzelbüroraum mit einer Fluidglasfassade und mechanischer Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung an den drei Standorten Moskau, München und Riad, jeweils nach Norden, Süden und Westen orientiert, durchgeführt.

Der visuelle Komfort ist hinsichtlich der Beleuchtungsstärke auf Arbeitsebene an allen drei Standorten sehr gut. Die Reduktion der visuellen Transmission durch die Einfärbung des Fluid ist ausreichend, um die Beleuchtungsstärke unter 4000 Lux zu halten. Es kommt z.T. zu höheren Beleuchtungsstärken bei Schaltzuständen, an denen das Fluid nicht maximal eingefärbt ist. Dies ist auf Ungenauigkeiten bei der Steuerung der Einfärbung zurückzuführen. Durch eine optimierte Steuerung könnten diese Fehler behoben werden. Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, führt jedoch die starke Abdunkelung zu relativ niedrigen Beleuchtungsstärken in der Raumtiefe. In weiteren Untersuchungen sollten geeignete Maßnahmen untersucht werden, z.B. transparentere Tageslichtzonen im oberen Fassadenbereich oder unterschiedliche Einfärbungen der Fassadenelemente (siehe Abbildung 29). Dabei muss jedoch der thermische Komfort und der Energiebedarf mit berücksichtigt werden.

Der thermische Komfort ist bezüglich der operativen Raumtemperatur an den Standorten Moskau und München sehr gut. Durch eine verbesserte Steuerung der Einfärbung, der Massenströme und der Vorlauftemperaturen könnte der thermische Komfort weiter optimiert werden. Die Heiz- und Kühlleistungen sind an diesen Standorten ausreichend. In Riad kann der Komfortbereich C

eingehalten werden. Ein optimaler Komfort wird nicht erreicht, da die Kühlleistung der Fluidgläser nicht ausreichend ist. Durch eine zusätzliche Kühlung mit geringer Leistung, z.B. über die Zuluft, könnte der Komfort optimiert werden. Die innere Oberflächentemperatur der Fluidglasfassade kann sowohl in der Heiz- als auch in der Kühlperiode an allen drei Standorten und Orientierungen durch die Vorlauftemperatur so gesteuert werden, dass die Temperaturunterschiede gegenüber der optimalen operativen Raumtemperatur sehr gering sind. Unangenehme Strahlungstemperaturasymmetrien können dadurch vermieden werden.

Der spezifische Nutzenergiebedarf eines Einzelbüroraums mit Fluidglasfassade und mechanischer Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung ist an allen drei Standorten und Orientierungen gering, insbesondere in München und v.a. Riad. Im Vergleich zu typischen Energiebedarfen an den drei Standorten können die Fluidglas-Büroräume als energieeffizient eingeordnet werden.

Die thermischen Energiegewinne übersteigen an allen drei Standorten in der Jahresbilanz den Energiebedarf für Heizen und Kühlen um das 2 bis 7-fache. Die Nutzung dieser Gewinne, z.B. für Warmwasser oder Heizungsunterstützung im Gebäude, sollte in weiteren Untersuchungen genauer betrachtet werden. Gebäude mit zusätzlichen Nutzungen zur Büronutzung, z.B. Wohnen, Hotel oder Wellness, die einen ganzjährigen Warmwasserbedarf haben, sollten dabei im Fokus stehen.¹⁴⁷

¹⁴⁷ Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „Fluidglass“ konnte nachgewiesen werden, dass am Standort München ein mit einer Fluidglasfassade ausgerüstetes Bürohochhaus über ein Niedertemperatur-Nahwärmenetz die thermischen Gewinne an benachbarte Wohngebäude abgeben kann. Die Gewinne können über eine Wärmepumpe sinnvoll für Warmwasser und zum Heizen der Wohngebäude genutzt werden (Baumgärtner et al., 2017, S. 215-216).

9 Zusammenfassung und Fazit

Aufbau der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ein validiertes Simulationsmodell für flüssigkeitsdurchströmte Glasfassadenelemente mit reversibler Einfärbung zu erstellen, mit diesem Kennwerte von Fluidgläsern zu ermitteln und mittels dynamisch-thermischen Simulationen die Anwendbarkeit an unterschiedlichen Standorten zu überprüfen.

In der Software EES wurden zwei aufeinander aufbauende Simulationsmodelle für Fluidgläser entwickelt (siehe Kapitel 4). Mit dem ersten Modell, dem Strahlungsmodell, wird der Weg der kurzwelligigen, elektromagnetischen Strahlung, der Solarstrahlung, durch den mit klarer oder eingefärbter Flüssigkeit gefüllte Fluidglasaufbau abgebildet. Dabei werden die in den Außenraum zurück reflektierten, im Fluidglasaufbau absorbierten und in den Innenraum transmittierten Strahlungsanteile berechnet. Im zweiten Modell, dem Energiebilanzmodell, wird die Energiebilanz des Fluidglases mit dem Außen- und dem Innenraum und die durch die Flüssigkeitskreisläufe abgeführte Energie bestimmt.

Es wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt (siehe Kapitel 5). Mit Hilfe von Spektrometermessungen wurde die wellenlängenabhängige Strahlungstransmission durch das Fluidglas ohne bzw. mit klarem und eingefärbtem Fluid, mit Messungen in einem Modellraumprüfstand das thermische Verhalten von Fluidglasfassaden und dem dahinter liegenden Raum untersucht.

Mit den erhaltenen Messergebnissen konnten die beiden Fluidglasmodelle erfolgreich validiert werden (siehe Kapitel 6).

Mit den entwickelten Simulationsmodellen wurden Kennwerte für die folgenden, im Fluidglas integrierten, Funktionen bestimmt (siehe Kapitel 7):

- adaptive Verglasung mit transparenter, thermischer Trennung und variablem Sonnen- und Blendschutz
- transparentes, flächiges Heiz- und Kühlsystem
- transparenter Solarkollektor

Die Ergebnisse wurden mit dem Stand der Technik entsprechender Systeme verglichen und eingeordnet.

Die beiden in der Software EES modellierten Fluidglasmodelle wurden in der Modellierungssprache Modelica in die Software SimulationX übertragen. Basierend auf den erarbeiteten Grundlagen (siehe Kapitel 2) und Kennwerten wurde eine Steuerungsstrategie für Fluidglasfassaden entwickelt und implementiert. Mit SimulationX konnten exemplarisch dynamisch-thermische Gebäudesimulationen eines Einzelbüroraums mit Fluidglasfassade an den Standorten Moskau, München und Riad in jeweils drei Orientierungen -Nord, Süd und West- durchgeführt werden. Dabei wurde die Auswirkung der Fluidglasfassade auf den dahinterliegenden Raum, d.h. auf den Nutzerkomfort und den Energiebedarf, und die potentiellen thermischen Energiegewinne an klimatisch unterschiedlichen Standorten untersucht (siehe Kapitel 8).

Ergebnisse und Erkenntnisse

Es wurden unterschiedliche Aufbauvarianten von Fluidgläsern dargestellt (siehe Kapitel 3.2). Für die Bestimmung der Kennwerte und für die Gebäudesimulationen wurde ein Aufbau mit zwei flüssigkeitsführenden Schichten – eine außerhalb und eine innerhalb der thermischen Hülle (3-fach-Wärmeschutzverglasung) – ausgewählt, da dieser die maximalen Funktionsmöglichkeiten aufweist. Der Fluidglasaufbau besteht i.d.R. aus fünf 6 mm starken Weißgläsern mit zwei Low-E-Beschichtungen (Pos. 4 und 7), zwei 12 mm starken Scheibenzwischenräumen mit Krypton-Gasfüllung und zwei 2 mm starken flüssigkeitsdurchströmten Scheibenzwischenräumen mit reversibel einfärbbaren Flüssigkeiten.

Fluidglas als adaptive Verglasung

Die ersten Forschungsfragen waren:

- Kann Fluidglas mittels reversibel einfärbbaren Flüssigkeiten die Transmission der Solarstrahlung in den Innenraum kontrollieren, d.h. kann die visuelle und solare Transmission und der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) gesteuert werden?
- Kann der visuelle Komfort durch Fluidglasfassaden gewährleistet werden?

Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts „FLUIDGLASS“ konnte durch die Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB) eine Einfärbung gefunden werden, die sich in vielen Belangen als geeignet herausgestellt hat. Es handelt sich um Eisenoxid-Nanopartikel Xfast® schwarz 0050 von BASF. Spektrometermessungen haben gezeigt, dass beim Einfärben des Fluids mit Xfast® das gesamte solare Wellenlängenspektrum zwischen 300 und 2500 nm gleichmäßig beeinflusst werden kann (siehe Kapitel 5.1). Das Verhalten dieser Einfärbung wurde modelliert und in den Simulationen untersucht.

Simulationen mit variierenden Fluidschichtstärken zwischen 1 und 6 mm und unterschiedlichen Einfärbungskonzentrationen mit Xfast® zwischen 0 und 3 Vol.-% haben gezeigt, dass sich die visuelle und solare Transmission durch die Fluidgläser und die Absorption in den Fluidschichten durch die Einfärbung stark beeinflussen lassen (siehe Kapitel 6.1.3). Mit klarem Fluid ist die visuelle Transmission mit ca. 70% und die solare Transmission mit ca. 45% so hoch wie bei einer marktüblichen 3-fach-Wärmeschutzverglasung. Dabei hat die Fluidschichtstärke bei klarem Fluid kaum Einfluss auf die Transmission. Färbt man das Fluid maximal mit 3 Vol.-% Xfast® ein, kann mit einer Fluidschichtstärke von 2 mm die visuelle Transmission auf ca. 7%, die solare Transmission auf ca. 5% reduziert werden. Bei einer Erhöhung der Fluidschichtstärke auf 6 mm kann die Transmission vollständig unterbunden werden¹⁴⁸. Der solare Absorptionsgrad in der maximal eingefärbten Fluidschicht bei 2 mm SZR beträgt ca. 85%, bei 6 mm ca. 92%. Der überwiegende Teil der Solarstrahlung kann demzufolge im Fluid absorbiert werden. Der U-Wert hängt maßgeblich von den Low-E-Beschichtungen und den gasgefüllten Scheibenzwischenräumen der Standardverglasung des Fluidglasaufbaus ab. Die zusätzlichen Scheiben und die Fluidschichten haben keinen nennenswerten Einfluss. Mit marktüblichen 3-fach-Wärmeschutz-

¹⁴⁸ (T_{vis} und $T_{\text{sol}} = 0,07\%$)

verglasungen, die aktuell als transparente, thermische Wärmedämmung in den Fluidgläsern eingesetzt werden, können U-Werte von ca. $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht werden. Der g-Wert des Fluidglases ohne Durchfluss beträgt mit klarem Fluid ca. 0,5. Durch das Einfärben des äußeren Fluids kann dieser auf ca. 0,07 deutlich reduziert werden. Wird das innere Fluid eingefärbt, verändert sich der g-Wert gegenüber dem klaren Zustand nur unwesentlich, da die im inneren Fluid absorbierte Solarstrahlungsenergie als sekundäre Wärmeabgabe überwiegend in den Innenraum abgegeben wird. Das unterschiedliche Verhalten je nach Einfärbung des inneren oder des äußeren Fluids kann gezielt eingesetzt werden. Im Kühlfall wird das äußere Fluid eingefärbt, damit die solaren Wärmeeinträge stark reduziert werden. Im Heizfall wird das innere Fluid eingefärbt, damit trotz starker Reduktion der solaren Transmission hohe solare Wärmegewinne für den Innenraum bereitgestellt werden. Dies wurde in der Steuerungsstrategie für die Gebäudesimulationen umgesetzt (siehe Kapitel 8.2).¹⁴⁹

Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass Fluidgläser mit klarer und eingefärbter Fluidfüllung, d.h. auch mit aktiviertem Sonnen- und Blendschutz, eine verzerrungsfreie und farbneutrale Durchsicht ermöglichen. Bei eingefärbtem Fluid kommt es mit den verwendeten Partikel jedoch zu unerwünschter Lichtstreuung. Dieser Effekt beeinträchtigt die Durchsicht etwas (siehe Kapitel 7.1). Abgesehen davon kann das Fluidglas als sehr gute adaptive Verglasung mit transparenter, thermischer Trennung und variablem Sonnen- und Blendschutz eingeordnet werden. Der Transmissionsunterschied zwischen klarem und abgedunkeltem Zustand im visuellen Spektrum (Tvis-Hub) von 63% bis zu 70% ist bei Fluidglas besser als bei elektrochromatischen Verglasungen mit maximal 53%.

Im Gegensatz zu anderen adaptiven Sonnen- und Blendschutzsystemen verhindert Fluidglas jedoch nicht nur die Überhitzung des Innenraums, sondern nutzt die Solarstrahlung als regenerative Wärmequelle. Ein normaler Sonnen- und Blendschutz, auch ein adaptives System, wird i.d.R. bei relativ geringer solarer Einstrahlung auf die Fassade¹⁵⁰ aktiviert und verhindert damit die Transmission der Solarstrahlung in den Innenraum. Die Energie geht an den Außenraum „verloren“. Bei Fluidgläsern wird mit eingefärbter Flüssigkeit die Solarstrahlung zu über 80% absorbiert und steht dann als Umweltwärmequelle zur Verfügung. Sie kann über das Wärmeträgermedium, d.h. das Fluid, an einen beliebigen Ort transportiert und weiter genutzt werden.

In den Gebäudesimulationen konnte nachgewiesen werden, dass an den drei Standorten Moskau, München und Riad mit Fluidglasfassaden ein sehr guter visueller Komfort auf der Arbeitsebene eingehalten werden kann¹⁵¹. Die Reduktion der visuellen Transmission durch die

¹⁴⁹ Es ist anzumerken, dass der statische g-Wert im Betrieb von Fluidglasfassaden keine Rolle spielt. Die sekundäre Wärmeabgabe ist beim Fluidglas abhängig von der Durchflussgeschwindigkeit und der Vorlauftemperatur des inneren Flüssigkeitskreislaufs. Im Kühlfall, mit Vorlauftemperaturen unter der Raumtemperatur, ist die Wärmestromrichtung vom Innenraum in den Fluidglasaufbau, d.h. der g-Wert wird bei stark eingefärbtem Fluid null bzw. negativ.

¹⁵⁰ ab ca. $150 - 200 \text{ W/m}^2$

¹⁵¹ Wie in Kapitel 2.4.1 dargestellt liegt die optimale Beleuchtungsstärke bei $1500 - 2000 \text{ Lux}$ auf der Arbeitsebene, wobei Werte bis 4000 Lux als nicht störend wahrgenommen werden.

Einfärbung des Fluids ist ausreichend, um die Beleuchtungsstärke unter 4000 Lux zu halten¹⁵². Es ist jedoch anzumerken, dass insbesondere am Standort Riad bei nach Westen orientierten Fassaden das Fluidglas sehr häufig stark abgedunkelt werden muss, um den thermischen Komfort einzuhalten. Dies führt zu sehr geringen Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene und besonders in der Raumtiefe.

Mit diesen Ergebnissen können die ersten Forschungsfragen überwiegend positiv beantwortet werden:

- Mit Fluidgläsern kann die Transmission der Solarstrahlung in den Innenraum und der Gesamtenergiedurchlass kontrolliert werden.
- Der visuelle Komfort im Innenraum hinter Fluidglasfassaden ist überwiegend gut.
- Fluidgläser können als gute adaptive Verglasung mit transparenter, thermischer Trennung und variablem Sonnen- und Blendschutz eingeordnet werden.

Fluidglas als Heiz- und Kühlsystem

Weitere Forschungsfragen, die das thermische Verhalten von Fluidgläsern betreffen, waren:

- Kann die Heiz- bzw. Kühlfunktion der Fluidglasfassade mit moderaten Vorlauftemperaturen betrieben werden, d.h. ist die Fluidglasfassade ein flächiges Niedertemperatur-Heiz- und Kühlsystem?
- Kann die innere Oberflächentemperatur von Fluidglas nach Bedarf gesteuert und die Innenraumtemperatur damit kontrolliert werden, d.h. ist die Heiz- und Kühlleistung der Fluidglasfassade ausreichend und kann der thermische Komfort gewährleistet werden?
- Können die Transmissionswärmeverluste vom Innenraum zum Außenraum bzw. die Transmissionswärmegewinne vom Außenraum in den Innenraum, mit Fluidglas effektiv kontrolliert werden, d.h. sind die Energieverluste beim Heizen und Kühlen direkt an der Fassade so gering, dass Gebäude mit Fluidglasfassade einen niedrigen Energiebedarf aufweisen?

Zur Beurteilung des thermischen Komforts wurden Anhaltswerte und Gestaltungskriterien nach DIN EN ISO 7730 herangezogen. Für die operativen Raumtemperaturen wurden in den dynamisch-thermischen Simulationen für die Steuerungsstrategie die Zielwerte der Komfortkategorie A vorgegeben, d.h. ein maximaler Komfortanspruch. Zulässig sind für Büroneubauten Kategorie B und sanierte Büros Kategorie C. Aus den Vorgaben für die Strahlungsasymmetrie gegenüberliegender Wände wurden die minimal und maximal zulässigen Innenoberflächen von Fluidglasfassaden und die Vorlauftemperaturen des inneren Flüssigkeitskreislaufs von min. 18°C bzw. max. 35°C abgeleitet (siehe Kapitel 2.4.2). Fluidglas kann damit als flächiges Niedertemperatur-Heiz- und Kühlsystem eingeordnet werden. Fluidglas hat eine maximale Heizleistung von 120 W/m² und eine maximale Kühlleistung von 60 W/m² (siehe Kapitel 7.3). In kalten und gemäßigten Klimazonen, d.h. Moskau und München, ist die

¹⁵² Es kommt z.T. zu höheren Beleuchtungsstärken bei Schaltzuständen, an denen das Fluid nicht maximal eingefärbt ist. Dies ist auf Ungenauigkeiten bei der Steuerung der Einfärbung zurückzuführen.

Leistung ausreichend, um einen optimalen thermischen Komfort zu gewährleisten. Auch bei auf 26°C reduzierten Vorlauftemperaturen ist die Heizleistung noch ausreichend, um einen guten thermischen Komfort zu erreichen. Zusätzlich zu dem guten Innenraumkomfort, durch gleichmäßige Oberflächentemperaturen im Raum und der überwiegenden Wärmeabgabe des Fluidglases durch Strahlung, ermöglichen die moderaten Vorlauftemperatur die Nutzung lokaler Umweltwärmequellen.

Bei der Kühlfunktion sind in kühlen und gemäßigten Klimazonen, z.B. Moskau und München, ebenfalls sehr moderate Vorlauftemperaturen von 18°C ausreichend, um einen sehr guten Innenraumkomfort einzuhalten. Die Kühlung sollte in diesen Klimazonen über lokale Umweltwärmesenken ohne zusätzlichen Energieaufwand zum Kühlen möglich sein, z.B. mit Grundwasser. In sehr heißen Klimazonen, z.B. Riad, ist die Kühlleistung von Fluidglasfassaden nicht ausreichend, um einen guten Komfort zu erreichen, insbesondere bei der kritischen Orientierung nach Westen. Hier müsste eine zusätzliche Kühlung mit geringer Leistung eingesetzt werden. Dies könnte über die Zuluft erfolgen und mit einer erforderlichen Entfeuchtung kombiniert werden. Grundsätzlich scheint die Anwendung von Fluidglas in sehr heißen Klimazonen, z.B. Riad, weniger sinnvoll als in gemäßigteren und kalten Standorten, da das Fluid sehr stark abgedunkelt werden muss, die Belichtung des Innenraums dadurch eingeschränkt wird und trotzdem die Kühlleistung der Fluidglasfassade alleine nicht ausreicht (siehe Kapitel 8.3).

Aktuell kommt es in kalten und gemäßigten Klimazonen im Winter zu etwas zu warmen und im Sommer zu etwas zu kalten operativen Raumtemperaturen. Dies könnte durch eine optimierte Steuerungsstrategie behoben werden.

Der Temperaturunterschied zwischen der Vor- und Rücklauftemperatur des inneren Flüssigkeitskreislaufs ist gering. Im Heizfall sinkt die Temperatur um maximal 5 Kelvin ab, im Kühlfall steigt sie maximal um 2 Kelvin an. Die mittlere, innere Oberflächentemperatur der Fluidglasfassade entspricht der Mitteltemperatur zwischen Vor- und Rücklauf.

Bei moderateren klimatischen Bedingungen, z.B. in München, sind die Verluste des inneren Fluids an das äußere Fluid, d.h. an den Außenraum, relativ gering. Ca. 10% der Heiz- und Kühlleistung gehen verloren. Bei zunehmenden Temperaturunterschieden zwischen dem äußeren und dem inneren Fluid steigen die Verluste stark an. Bei extremen Heiz- und Kühlfällen geht dadurch ca. $\frac{1}{4}$ der Leistung verloren. Bei der Steuerung des äußeren Fluidkreislaufs sollte darauf geachtet werden, dass der Temperaturunterschied des äußeren Fluids zum inneren nicht zu extrem wird. Dies kann über die Vorlauftemperatur und den Massenstrom geregelt werden. Die thermische Trennung zwischen den Fluidschichten muss, wie im aktuellen Aufbau mit einem U-Wert von ca. 0,4 - 0,5 W/m²K, möglichst gut sein, um die Wärmeübertragung zu minimieren (siehe Kapitel 7.4). Die dynamisch-thermischen Gebäudesimulationen in allen drei Klimazonen haben gezeigt, dass Büroräume mit Fluidglasfassade einen niedrigen Energiebedarf für Heizen, Kühlen und für die künstliche Beleuchtung aufweisen (siehe Kapitel 8.3).

Ein Vorteil von Fluidglas gegenüber anderen flächigen Heiz- und Kühlsystemen, z.B. Bauteilaktivierung, Fußboden-, Wand- und Deckenheizung bzw. -kühlung, besteht darin, dass Glasflächen nicht in Konkurrenz zu anderen Funktionen stehen, z.B. Akustikelemente, Regale oder Schränke. Darüber hinaus bietet Fluidglas bei Sanierungen von Bestandsgebäuden die Möglichkeit, flächige Niedertemperatur-Heiz- und Kühlsysteme über den Austausch der Fassade

nachzurüsten. Damit kann der thermische Komfort der Gebäude gesteigert und die Nutzung von lokalen, regenerativen Umweltwärmequellen und -senken ermöglicht werden.

Mit diesen Ergebnissen können die Forschungsfragen überwiegend positiv beantwortet werden:

- Die Fluidglasfassade ist ein flächiges Niedertemperatur-Heiz- und Kühlsystem, das mit moderaten Vorlauftemperaturen betrieben werden kann.
- Über die Vorlauftemperaturen des inneren Flüssigkeitskreislaufs kann die innere Oberflächentemperatur der Fluidglasfassade nach Bedarf gesteuert und die Innenraumtemperatur kontrolliert werden. In kalten und gemäßigten Klimazonen ist die Heiz- und Kühlleistung der Fluidglasfassade ausreichend, um einen sehr guten Komfort zu gewährleisten. In heißen Klimazonen ist die Kühlleistung von Fluidglas alleine nicht ausreichend und muss durch eine zusätzliche Kühlung mit geringer Leistung ergänzt werden.
- Durch das Einfärben des Fluids können die Transmissionswärmegewinne effektiv gesteuert werden. Die Transmissionswärmeverluste vom Innenraum zum Außenraum hängen stark von den klimatischen Außenbedingungen ab, können aber durch eine gute thermische Trennung und die Steuerung des äußeren Flüssigkeitskreislaufs beeinflusst werden. In allen Klimazonen weisen Büroräume mit Fluidglasfassade einen niedrigen Energiebedarf auf.

Fluidglas als transparenter Solarkollektor

Die Forschungsfragen zur Solarkollektorfunktion von Fluidglas waren:

- Kann innerhalb der Fluidglasfassade die auftreffende Solarstrahlung absorbiert und mit dem Flüssigkeitskreislauf abgeführt werden, d.h. kann Fluidglas als Solarkollektor betrieben werden und sind die thermischen Gewinne von Fluidglasfassaden höher als deren Verluste?

Der optische Wirkungsgrad von Fluidglaskollektoren ist mit ca. 90% bei Einfärbung im äußeren Fluid sehr hoch. Er ist vergleichbar mit dem von Schwimmbadkollektoren ohne Abdeckung und liegt über dem der opaken Referenzkollektoren mit Glasabdeckung (siehe Kapitel 7.2.2). Ohne Einfärbung ist die Transmission durch das Fluidglas in den Innenraum so hoch, dass der optische Wirkungsgrad weit unter dem von opaken Standardkollektoren liegt. Bei zunehmender Temperaturdifferenz zwischen Fluidtemperatur und Außenraumtemperatur sinkt der Kollektorwirkungsgrad sehr schnell ab. Das Fluidglas hat einen vergleichbaren Verlauf des Kollektorwirkungsgrades wie der eines Schwimmbadkollektors. Für einen effizienten Kollektorbetrieb von Fluidglas müssen die Temperaturdifferenzen gering gehalten werden. Bei entsprechender Steuerung des Fluidglases, wie in den Simulationen für die Standorte Moskau, München und Riad durchgeführt, liegen die Rücklauftemperaturen zwischen 15°C und 40°C (siehe Kapitel 8.3). Die relativ niedrigen Rücklauftemperaturen aus dem Fluidglas schränken nach heutiger Praxis die Möglichkeiten der Nutzung der solaren Wärmegewinne ein. Entsprechende Temperaturniveaus werden heute typischerweise für die solare Freibadheizung (FB) genutzt, eine Nutzung für Warmwasser (WW), Raumheizungsunterstützung (RH), Prozesswärme (PW) oder solare Kühlung sind nicht möglich oder aktuell nicht wirtschaftlich

(vergleiche Kapitel 2.8). In Kombination mit Wasser-Wasser-Wärmepumpen kann jedoch die durch das Fluidglas gewonnene Umweltwärme auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden, wie dies bei Grundwasserwärmepumpen mit Wassertemperaturen von ganzjährig durchschnittlich ca. 10°C gängig ist. Diese Umweltwärmequelle kann sowohl im Gebäude als auch über ein Niedertemperaturnahwärmenetz in benachbarten Gebäuden weiter verwendet werden. Für die Wärmenutzung wäre es sowohl innerhalb des Gebäudes als auch innerhalb des Quartiers sinnvoll, unterschiedliche Nutzungen zu kombinieren. Nutzungen mit Warmwasserbedarf zu Sonnenscheinzeiten sollten vorliegen, z.B. Wohnen, Hotels und Wellness. Dies ist in aktuellen Hochhausprojekten üblich, z.B. im Hochhauskomplex „Raffles City“ von UNStudio in Hangzhou, China (van Berkel, Pfau & Piber, 2017).

Der Vorteil von Fluidglas gegenüber anderen thermischen Solarkollektoren besteht darin, dass die Fassade vollständig mit Fluidglas ausgestattet werden kann, ohne die Sichtverbindungen und den Tageslichteintrag einzuschränken. Damit steht ein Maximum an Kollektorfläche zur Verfügung. Hochhäuser bieten in dieser Hinsicht enormes Flächenpotential.

Die dynamisch-thermischen Simulationen haben gezeigt, dass die thermischen Energiegewinne an allen drei Standorten in der Jahresbilanz den Energiebedarf für Heizen und Kühlen um das 2 bis 7-fache übersteigen.

Die Forschungsfrage kann ebenfalls überwiegend positiv beantwortet werden:

- Durch das Einfärben des äußeren Fluids können ca. 85% der kurzwelligen Solarstrahlung im Fluid absorbiert werden. Werden die Fluidkreisläufe so gesteuert, dass die Temperaturdifferenz zwischen Fluidtemperatur und Außenraumtemperatur gering ist, können die thermischen Gewinne mit geringen Verlusten abgeführt werden. An allen drei Standorten sind die thermischen Gewinne bilanziell höher als der Energiebedarf.

Beantwortung der Hypothese

Die eingangs aufgestellte Hypothese kann größtenteils bestätigt werden:

Mit flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden können die Energieflüsse zwischen natürlichem Außenraum und künstlichem Innenraum effektiv kontrolliert werden. Die in den Innenraum transmittierende solare Einstrahlung kann mit Fluidgläsern gezielt gesteuert und gleichzeitig die innere Oberfläche der Fassade auf der gewünschten Temperatur gehalten werden. Die zum Heizen und Kühlen benötigten Temperaturdifferenzen zwischen dem Heiz- und Kühlmedium im Fluidglaskreislauf und dem Innenraum können dabei für die Gebäudeklimatisierung gering sein. Dadurch kann in jeder Klimazone ein guter visueller Komfort erreicht werden. Der thermische Komfort ist in kalten und gemäßigten Klimazonen sehr gut. In heißen Klimazonen ist die Kühlleistung von Fluidglas alleine nicht ausreichend und muss durch eine zusätzliche Kühlung mit geringer Leistung ergänzt werden. Der Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung und die Gebäudeklimatisierung können gering gehalten und lokale, regenerative Energiequellen genutzt werden. Darüber hinaus können mit flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden nennenswerte thermische Energiegewinne erzielt werden.

10 Ausblick

Die theoretischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit zu Energiebedarf, Energieangebot und Komfort haben sehr vielversprechende Ergebnisse für die Anwendung von Fluidglas an Hochhäusern mit einem großen Verglasungsanteil in unterschiedlichen Klimazonen gezeigt. In weiteren theoretischen Untersuchungen sollten folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Aktuell wurde ein Einzelbüroraum mit Fluidglasfassade simuliert. Zukünftige Untersuchungen des visuellen und thermischen Komforts sollten darüber hinaus Räume mit größerer Raumtiefe, z.B. Großraumbüros, mit einschließen.
- Die Fluidglasfassade wurde in den Simulationen mit einem Fassadenanteil von fast 100% angenommen und damit der Extremfall simuliert. In weiteren Untersuchungen sollte der optimale Flächenanteil von Fluidglas untersucht werden. Dabei ist zu beachten, dass eine Reduktion der Fluidglasfläche einerseits die solaren Einträge und die Transmissionsverluste reduziert, andererseits aber auch die solaren Gewinne und die Heiz- und Kühlleistung verringert.
- Über die Betrachtungen eines Einzelbüroraums hinaus sollten Gesamtgebäude untersucht werden. Die thermische Konditionierung von innenliegenden Räumen ohne Fluidglasfassade muss dabei mit betrachtet werden. Die Fluidglasfassade muss in ein Gebäudetechnikkonzept integriert werden. Die Berücksichtigung der Energieversorgung des Gebäudes mit Wärme und Strom ermöglicht eine Berechnung des End- und Primärenergiebedarfs. Dabei muss auch der Energiebedarf für das Be- und Entfeuchten der Zuluft berücksichtigt werden. Besonders vielversprechend erscheinen dabei Gebäude mit gemischter Nutzung (z.B. Wohnen, Hotel, Wellness) mit ganzjährigem Warmwasserbedarf.
- Aktuell wurde in den Simulationen eine vereinfachte, sequentielle Steuerung der Fluidglasfassade verwendet. Im weiteren Verlauf sollte eine Optimierung der Steuerungsstrategie erfolgen. Im Zusammenhang mit der Gebäudetechnik kann ein Optimierungsalgorithmus entwickelt werden, der z.B. nach maximalem Komfort, minimalem Primärenergiebedarf oder geringsten Kosten optimiert.
- Die Tageslichtsimulationen haben gezeigt, dass eine gleichmäßige Einfärbung einer raumhohen Verglasung negative Auswirkungen auf die Belichtung in der Raumtiefe hat. In weiteren Untersuchungen könnten Kombinationen von Fluidglasfassaden mit Lichtlenksystemen im oberen Fassadenbereich untersucht werden.
- Der Brüstungsbereich der Fassade hat wiederum keinen entscheidenden Einfluss auf die Tageslichtverfügbarkeit im Raum und die Sichtverbindung nach außen. Hier könnte die Kombination mit semitransparenten Photovoltaikmodulen im Fluidglasaufbau untersucht werden. Damit könnte neben den solarthermischen Wärmegewinnen auch die Stromerzeugung realisiert werden.
- Die aktuellen Simulationen haben gezeigt, dass mit Fluidglas die Solarstrahlung in der Fassade absorbiert und die hierbei entstehende Wärme abgeführt werden kann. Damit kann die Oberflächentemperatur der Gebäudehülle gesteuert werden. In weiteren Untersuchungen könnten die Auswirkungen von Fluidglasfassaden auf

das städtische Mikroklima untersucht werden. Durch ein gezieltes Absenken der Fassadentemperaturen kann möglicherweise der „Urban Heat Island Effekt“ verringert werden. Darüber hinaus kann durch die Nutzung der Abwärme zusätzlich entstehende Wärme für die Warmwasserproduktion eingespart werden.

Parallel zu den theoretischen Untersuchungen wurde in den letzten Jahren in verschiedenen Forschungsprojekten, auch unter meiner Beteiligung, die technische Umsetzung vorangetrieben. In diesem Zusammenhang möchte ich v.a. auf die im Rahmen des EU-Forschungsprojekt „FLUIDGLASS“ erfolgreich umgesetzten Prototypen mit automatischer, reversibler Einfärbung für die Glasstec 2016 und den Testcontainer hinweisen. Für deren Umsetzung waren v.a. die Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs (NTB) in Zusammenarbeit mit Mayer Glastechnik aus Feldkirch und der Hoval AG aus Vaduz verantwortlich. Die praktische Umsetzung stellt jedoch nach wie vor eine große Herausforderung dar. Bei der weiteren Entwicklung müssen folgende Themen intensiv bearbeitet werden:

- Alle Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass Fluidgläser ohne adaptive Einfärbung aus energetischer Sicht keinen Sinn machen. Aus diesem Grund können Fluidgläser nur mit integriertem adaptivem Überhitzungsschutz sinnvoll betrieben werden. Eine der größten Herausforderung stellt jedoch die reversible Einfärbung von Fluidgläsern dar. Es muss eine technisch einwandfreie und ästhetisch ansprechende Lösung gefunden werden. Bei den aktuell verwendeten Partikeln kommt es neben den optischen Streueffekten zu Ablagerungen an der Glasoberfläche. Im Rahmen des EU-Projekts FLUDGLASS wurden unterschiedliche Beschichtungen der Glasoberflächen getestet. Die Ablagerungen konnten dadurch vermindert werden. Die Dauerhaftigkeit der Beschichtungen über die gesamte Lebensdauer von ca. 30 Jahren der Fassade konnte noch nicht nachgewiesen werden. Zukünftige Untersuchungen sollten beschichtete Partikel, die nicht agglomerieren und an der Glasoberfläche anhaften, weiter untersuchen. Diese könnten ohne Fassadenaustausch bei Wartungszyklen ausgetauscht werden. Dabei müssen negative Umweltauswirkungen und zu hohe Kosten ausgeschlossen werden.
- Die zweite große Herausforderung bleiben die Abstandhalter im flüssigkeitsdurchströmten Scheibenzwischenraum. Aus ästhetischen Gründen wären minimale, punktförmige Abstandhalter den aktuellen linearen Abstandhaltern vorzuziehen, analog zu Abstandhaltern bei Vakuum-Isolierverglasungen. Bislang konnten jedoch keine geeigneten Befestigungsmethoden gefunden werden. Dies müsste in weiteren Entwicklungen forciert werden.
- Neben den Ablagerungen der Farbstoffe und Partikel an der Glasoberfläche kam es in den experimentellen Untersuchungen zu Verunreinigungen der Flüssigkeiten (siehe Kapitel 5.2.3). Dies war überwiegend auf Fehler beim Betrieb des Prototyps zurück zu führen. Das Langzeitverhalten von Fluidgläsern muss in weiteren Untersuchungen eingehend betrachtet werden, auch unter Berücksichtigung der Einfärbungen und unter Einsatz weitere Additive, z.B. Frostschutzmittel. Neben

Verschmutzungen ist dabei auch eine mögliche Glaskorrosion durch die Flüssigkeiten im Scheibenzwischenraum auszuschließen.

- Für eine weitere Abschätzung ist es unabdingbar, dass Gebäude mit Fluidglasfassaden über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts „FLUIDGLASS“ wurden durch die Technische Universität München bereits Lebenszyklusanalysen durchgeführt. Dabei hat sich aus energetischer Sicht und hinsichtlich der Treibhauspotentiale neben der Verglasung das Fluid und v.a. die darin enthaltenen Frostschutzmittel als besonders kritisch herausgestellt. Es muss bei weiteren Entwicklungen unbedingt auf eine möglichst lange Nutzungsdauer der Flüssigkeiten geachtet werden, damit die negativen Effekte in der Herstellungsphase nicht die positiven in der Nutzungsphase überwiegen. Darüber hinaus ist in der weiteren Entwicklung verstärkt darauf zu achten, dass keine für Menschen, Tiere und die Umwelt kritischen Baustoffe eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang ist, neben dem Einsatz von Sand für die Glasherstellung, ein besonderer Augenmerk auf die verwendeten Nanopartikel zu legen.
- Bei zukünftigen Fluidglasaufbauten könnten Kombinationen mit anderen innovativen Glasprodukten untersucht werden. Besonders interessant könnte dabei die Kombination mit Vakuum Isolierverglasung (VIG) sein, um einen extrem schlanken Verglasungsaufbau zu erhalten. Auch eine Kombination mit anderen variochromen Verglasungen könnte interessant sein. Dadurch könnte die aktuell noch nicht optimale Einfärbung obsolet werden. Die klaren Flüssigkeitsschichten von Fluidglas könnten zum Abführen der absorbierten Wärme und zum Heizen und Kühlen verwendet werden.
- Aus architektonischer Sicht ist die Einsatzmöglichkeit von Fluidglas als ebenes, rechteckiges, vertikales Verglasungselement stark eingeschränkt. In aktuellen Hochhausfassaden werden häufig gekrümmte und oder nicht rechtwinklige Gläser eingesetzt. Dies sollte in den weiteren Fluidglasentwicklungen berücksichtigt werden, um Planern größere Gestaltungsmöglichkeiten zu bieten.

Sollte es zukünftig gelingen, Fluidglas zu einem marktfähigen Produkt zu entwickeln, könnte es einen Beitrag dazu leisten, Gebäude mit einem großen Verglasungsanteil zu „nZEB“ zu machen. Sowohl Neubauten als auch nachgerüstete Bestandsgebäude könnten damit einen geringen Energiebedarf aufweisen und diesen zu einem großen Teil durch lokale, regenerative Energiequellen decken.

11 Literaturverzeichnis

- Alamdari, F. & Hammond, G. P. (1983). Improved data correlations for buoyancy-driven convection in rooms. *Building Services Engineering Research and Technology*, 4 (3), 106–112. <https://doi.org/10.1177/014362448300400304>
- ASHRAE 55, 2013 (2013). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- Augustesen, C. & Brandi, U. (2005). *Tageslicht, Kunstlicht. Grundlagen ; Ausführung ; Beispiele* (Edition Detail, 1. Aufl.). München: Inst. für Internationale Architektur-Dokumentation.
- Bartenbach, C. (2009). *Handbuch für Lichtgestaltung. Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen*. Wien: Springer.
- BASF Corporation (Hrsg.). (2015a). *Safety Data Sheet Basacid Black X40 liquid* (Version: 2.0). New Jersey, USA. Zugriff am 15.12.2015. Verfügbar unter http://worldaccount.basf.com/wa/NAFTA/Catalog/FunctionalPolymers/doc4/BASF/PRD/30060884/.pdf?urn=urn:documentum:ProductBase_EU:09007af88009a505.pdf
- BASF Corporation (Hrsg.). (2015b). *Safety Data Sheet Xfast Black 0050* (Version: 3.0). New Jersey, USA. Zugriff am 15.12.2015. Verfügbar unter http://worldaccount.basf.com/wa/NAFTA/Catalog/FunctionalPolymers/doc4/BASF/PRD/30262353/.pdf?urn=urn:documentum:ProductBase_EU:09007af8800bafc6.pdf
- BASF SE (Hrsg.). (2011). *Xfast Black 0050* (EVP 03106). Ludwigshafen, Germany.
- Baumgärtner, L., Krasovsky, R. A., Stopper, J. & Grabe, J. von. (2017). Evaluation of a solar thermal glass façade with adjustable transparency in cold and hot climates. *Energy Procedia*, 122, 211–216. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.347>
- Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2010 - 06). *Effiziente Energienutzung in Bürogebäuden. Planungsleitfaden; Klima schützen, Kosten senken; mit Sonderteil "10 Gebote" für energieeffiziente Bürogebäude* (2. inhaltl. unveränd. Aufl.). Augsburg: LfU.
- Beck, H. (2012, 1. Dezember). *Experimentelle Untersuchung, Modellierung und Validierung einer Energiebilanz bei fluiddurchströmten Glasfassadenelementen zur aktiven Energietransmissionskontrolle*. Bachelorarbeit, Technische Universität München. München.
- Benke, G. & Unterpertinger, F. *Technologieleitfaden Umwälzpumpen* (MA 27, EU-Strategie und Wirtschaftsentwicklung, Hrsg.). Wien. Zugriff am 06.02.2017. Verfügbar unter <https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energieplanung/sep/pdf/umwaelzpumpen-tech.pdf>
- Berdahl, P. & Martin, M. (1984). Emissivity of clear skies. *Solar Energy*, 32 (5), 663–664. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(84\)90144-0](https://doi.org/10.1016/0038-092X(84)90144-0)
- Bigalke, U., Zhang, Y., Kunde, J., Schmitt, M., Zeng, Y., Discher, H. et al. (12/2014). *Der dena-Gebäudereport 2015. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudesektor* (Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Hrsg.). Berlin. Zugriff am 23.09.2016. Verfügbar unter <http://www.dena.de/publikationen/gebaeude/broschuere-dena-gebaeudereport-2015.html>
- Böing, F. (2013). *Energiebilanzierung eines Raumes mit fluiddurchströmten Glasfassadenelementen*. Bachelorarbeit, Technische Universität München. München.

- Bundesbauministerium. (2013). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Büro- und Verwaltungsgebäude*. BNB_BN 3.1.5, Version V 2011_1 (Bundesbauministerium, Hrsg.). Berlin: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR); Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V. (DGNB). Zugriff am 01.04.2015. Verfügbar unter https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebaeude/neubau/v_2011_1/BNB_BN2011-1_315.pdf
- Bundesministerium für Arbeit und Soziales. (2010). Raumtemperatur. ASR A3.5. In *Technische Regeln für Arbeitsstätten*. Zugriff am 30.04.2015. Verfügbar unter <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/ASR.html>
- Bundesministerium für Arbeit und Soziales. (2011 - 04). ASR A3.4 "Beleuchtung". ASR A3.4. In *Technische Regeln für Arbeitsstätten*. Zugriff am 30.04.2015. Verfügbar unter <http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Arbeitsstaetten/ASR/ASR.html>
- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz. (1996). Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit an Bildschirmgeräten (Bildschirmarbeitsverordnung - BildscharbV). BildscharbV. Zugriff am 20.09.2016. Verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bildscharbv/gesamt.pdf>
- Burkhardt, W., Kraus, R. & Ziegler, F. J. (2006). *Projektierung von Warmwasserheizungen. Mit 99 Tabellen* (7., überarb., erw. und aktualisierte Aufl.). München: Oldenbourg.
- Cakir, G. (2015). *Bericht "Tageslichtnutzung und Sonnenschutzmaßnahmen an Büroarbeitsplätzen - Erarbeitung eines Informationsmaterials". Tageslichtnutzung und Sonnenschutzmaßnahmen an Büroarbeitsplätzen*. Erarbeitung eines Informationsmaterials (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Hrsg.). Dortmund/Berlin/Dresden. Zugriff am 30.04.2015. Verfügbar unter <http://www.baua.de/de/Publikationen/Fachbeitraege/F2122.html>
- Cappel, C., Streicher, W., Hauer, M., Lichtblau, F., Szuder, T., Kuhn, T. et al. (2015). »AKTIFAS« *FASSADENINTEGRIERTE SOLARTHERMIE: BESTA NDSAUFNABME UND ENTWICKLUNG ZUKUNFTSFÄHIGER KONZ EPTE* (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Hrsg.). Freiburg. Zugriff am 01.06.2017. Verfügbar unter http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-3494959.pdf
- Carbonari, A., Fioretti, R., Naticchia, B. & Principi, P. (2012). Experimental estimation of the solar properties of a switchable liquid shading system for glazed facades. *Energy and Buildings*, 45, 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.022>
- Carmody, J. (2004). *Window systems for high-performance buildings*. New York: W.W. Norton & Co.
- Davis, M. (1981). *A wall for all seasons* (RIBA Journal, Hrsg.) (88 (2)).
- DIALux evo (Version 5.5.0.24451) [Computer software]. Lüdenscheid: Dial GmbH. Verfügbar unter <https://www.dial.de/de/software/dialux/download/>
- DIN 6169-1. *Farbwiedergabe*. (1976) (Stand der abgedruckten Normen: Januar 1976). Teil 1: Allgemeine Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DIN EN 673. *Glas im Bauwesen - Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) - Berechnungsverfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 6946 (2008-04). *Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 8062 (2009-10). *Rohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid (PVC-U) - Maße*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 410 (2011-04). *Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen*; . Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dreher, P. (2009). *Variabler Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) von Fassaden*. Dissertation, Technische Universität München. München.
- Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Hoboken: Wiley.
- Eberle, D. (2005). *Wasserdurchströmte Fassadenelemente* (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich ETH, Hrsg.). Zürich.
- Econtrol. *Innovative Technik in Zahlen* (EControl-Glas GmbH & Co. KG, Hrsg.). Plauen. Zugriff am 24.03.2016. Verfügbar unter http://www.econtrol-glas.de/fileadmin/user_upload/Downloads/STU/Innovative_Technik_Zahlen.jpg
- Eiband, W. (2004, 2. August). *Modellraumprüfstand mit dynamischer Simulation klimatischer Einflussfaktoren zur Untersuchung von Raumheizsystemen*. Dissertation, Technische Universität München. München. Zugriff am 05.08.2015. Verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/doc/601583/601583.pdf>
- Emaar Properties PJSC. (2016). *Burj Khalifa*. Zugriff am 17.08.2016. Verfügbar unter <http://www.burjkhalifa.ae>
- Engineering Equation Solver (EES) [Computer software]. Madison, WI 53744, USA: F-Chart Software. Verfügbar unter <http://www.fchart.com/ees/>
- Europäische Kommission (Europäische Kommission, Hrsg.). (2015). *Pariser Übereinkommen*. Zugriff am 30.11.2015. Verfügbar unter https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_de
- Europäische Kommission (Europäische Kommission, Hrsg.). (2017). *Energieeffizienz von Gebäuden*. Zugriff am 30.11.2017. Verfügbar unter <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>
- Europäisches Parlament. (2002). Richtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates. In *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft* (L1/65-L1/71). Zugriff am 09.09.2016. Verfügbar unter http://www.enev-online.de/epbd/eu_richtlinie_gesamtenergieeffizienz_gebaeude_2002.12.16_deutsch.pdf
- Europäisches Parlament. (2010). Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD). Richtlinie 2010/31/EU. Zugriff am 30.11.2017. Verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>

- European Parliament. (2010). *Directive on the energy performance of buildings. Directive 2010/31/EU*. Zugriff am 05.02.2018. Verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>
- Flachglas MarkenKreis GmbH. (2017). *Glashandbuch 2017* (Flachglas MarkenKreis GmbH, Hrsg.). Gelsenkirchen. Zugriff am 11.06.2017. Verfügbar unter <http://catalog.flachglas-markenkreis.de/ContentRedirect.aspx?dokument=6dd41015-b1b6-4f2c-9c87-54fd0c499352>
- Freimann, R. (2009). *Hydraulik für Bauingenieure. Grundlagen und Anwendungen*. München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser Verl.
- Gantert, F. (2011). *Aufbau eines flüssigkeitsdurchströmten Glasfassadenelements zur Klimatisierung von Innenbereichen; Messungen der Lichttransmission und Temperatur der Fassade*. 1. Forschungspraxis, Technische Universität München. München.
- Gartner (Josef Gartner GmbH, Hrsg.). (2017). *Integrierte Fassaden*. Verfügbar unter <http://josefgartner.permasteelisagroup.com/de/about-gartner/products-services/integrated-steel-fa%C3%A7ades/>
- Garzia, F. (2012). *Modeling and simulation of fluidized glazing elements for office buildings*. Masterarbeit, Technische Universität München; Politecnico di Milano. München.
- Gesimat GmbH. *Thermochrome Verbundgläser. Gesimat TC* (Gesimat GmbH, Hrsg.). Berlin. Zugriff am 15.06.2017. Verfügbar unter <http://www.gesimat.de/data/produktinformation-TC.pdf>
- Giménez Molina, C. (2011). *Alternativas para la mejora de la eficiencia energética de los acristalamientos: los vidrios dinámicos*. Dissertation, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Madrid, Spanien.
- GlassX AG. (2005). *GLASSXcrystal. Das Glas, das speichert, wärmt und kühlt*. Zürich. Zugriff am 05.12.2017. Verfügbar unter www.glassx.ch
- Haase, W. (2004). *Adaptive Strahlungstransmission von Verglasungen mit Flüssigkristallen*, Universität Stuttgart. Stuttgart. Zugriff am 14.06.2017. Verfügbar unter <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/208>
- Hakenesch, P. *Fluidmechanik. Kapitel 4: Strömung von Fluiden, Teil 3* (Hochschule München, Hrsg.). Zugriff am 26.01.2017.
- Hale, G. M. & Querry, M. R. (1973). Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- μ m Wavelength Region. *Applied Optics*, 12 (3), 555. <https://doi.org/10.1364/AO.12.000555>
- Hausladen, G. (2003). *Einführung in die Bauklimatik. Klima- und Energiekonzepte für Gebäude* (Angewandte Bauphysik). Berlin: Ernst.
- Hausladen, G. (2005). *ClimaDesign. Lösungen für Gebäude, die mit weniger Technik mehr können*. München: Callwey.
- Hausladen, G., Liedl, P. & Saldanha, M. d. (2012). *Klimagerecht Bauen. Ein Handbuch*. Basel: Birkhäuser.
- Hausladen, G., Saldanha, M. d. & Liedl, P. (2006). *ClimaSkin. Konzepte für Gebäudehüllen, die mit weniger Energie mehr leisten*. München: Callwey.

- Hausladen, G. & Tichelmann, K. (2009). *Ausbau Atlas. Integrale Planung, Innenausbau, Haustechnik* (1. Aufl.). München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T. & Zeumer, M. (2007). *Energie Atlas. Nachhaltige Architektur*. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Hegger, M., Hartwig, J. & Keller, M. (2012). *Wärmen und Kühlen. Energiekonzepte, Prinzipien, Anlagen* (Scale, Bd. 2). Basel: Birkhäuser.
- Heissler, K. M., Metz, J., Auer, T. & Nemeth, I. Increasing the Utilization of Local Energy Potentials through Low Temperature District Heating Networks. In *Proceedings of 33rd PLEA International Conference* (Volume III, S. 4579–5486). Zugriff am 04.10.2017. Verfügbar unter <https://plea2017.net/#programmes-container>
- Hellma (Hellma GmbH & Co. KG, Hrsg.). (2016). *Produktkatalog BestCeller 2016. Optische Komponenten für die UV/VIS/NIR Spektroskopie*. Zugriff am 29.09.2017. Verfügbar unter <http://www.hellma-analytics.com/assets/adb/9b/9b4a470028e2a2a0.pdf>
- Hentschel, H.-J. (1994). *Licht und Beleuchtung. Theorie und Praxis der Lichttechnik* (4., neubearb. Aufl.). Heidelberg: Hüthig.
- Hermann, M., Hube, W. & Platzer, W. (2003). Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (Anmelder), DE 103 51 023 A1 2005.06.16Deutschland.
- Hermanns, M., Hernández Ramos, J. A. & del Ama Gonzales, Fernando. (2010). *Ventajas de los acristalamientos IntelliGlass en fachadas, cubiertas y particiones interiores* (Hueco Arquitectura, Hrsg.).
- Hernández Ramos, J. A., Hermanns, M., Gonzales del Ama, F. & Hernández Jiménez, C. J. (2008). Universidad Politecnica de Madrid (Anmelder), WO 2008102031A1.
- Herzog, T., Krippner, R. & Lang, W. (2004). *Fassaden-Atlas* (1. Aufl.). Basel [u.a.]: Birkhäuser [u.a.].
- Herzog, T., Krippner, R. & Lang, W. (2016). *Fassaden Atlas* (Edition Detail, Zweite Auflage). München: Institut für Internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG.
- Heschong, L. (2003). *Windows and Offices: A Study of Office Worker Performance and the Indoor Environment* (California Energy Commission, Hrsg.). Zugriff am 20.09.2016. Verfügbar unter <http://www.energy.ca.gov/2003publications/CEC-500-2003-082/CEC-500-2003-082-A-09.PDF>
- Hessabi, I. (2004). Hessabi, Iradj (Anmelder), US20030352553 20030129.
- Heusing, S. & Aegert, M. A. (Juni 2014). *Stand der Anwendung der Elektrochromie in der Architektur* (INM - Leibniz-Institut für Neue Materialien gGmbH, Hrsg.). Saarbrücken: INM - Leibniz-Institut für Neue Materialien gGmbH. Zugriff am 15.06.2017.
- Hindrichs, D. U. & Daniels, K. (2007). *Plusminus 20°/40° latitude. Sustainable building design in tropical and subtropical regions*. Stuttgart: Edition A. Menges.
- Hohenstein, H. (2016). *Energy efficient building skins with Vacuum Glass. a Status Report 7.4.2016* (Dr. Hohenstein Consultancy, Hrsg.).
- Hube, W., Platzer, W. & Schwarz, D. (2004). Entwicklung eines flüssigkeitsdurchströmten Fassadensystems zur Solarenergiekontrolle und -nutzung. 12. bis 14. Mai 2004 ; [Ort:

- Bildungszentrum der Hanns-Seidel-Stiftung, Kloster Banz, Bad Staffelstein]. In H. Müller-Steinhagen (Hrsg.), *14. Symposium Thermische Solarenergie. 12. bis 14. Mai 2004 ; [Ort: Bildungszentrum der Hanns-Seidel-Stiftung, Kloster Banz, Bad Staffelstein]* (S. 342–347). Regensburg: OTTI-Energie-Kolleg.
- Idelchik, I. E. (1986). *Handbook of hydraulic resistance* (2. ed., rev. and augmented.). Washington: Hemisphere Publishing Corp; Springer.
- Incropera, F. P. (2013). *Principles of heat and mass transfer* (7. ed.). Hoboken, NJ: John Wiley.
- ISO 9845-1 (1992-10). *Solarenergie; Referenzwerte für spektrale, solare Bestrahlungsstärke am Boden bei unterschiedlichen Empfangsbedingungen; Teil 1: Direkte Sonnenstrahlung auf normale Empfangsebene und hemisphärische Sonnenstrahlung für Luftmassen 1,5*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- ISO 15099 (2003). *Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Sonnenschutzvorrichtungen - Detaillierte Berechnungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Kaltschmitt, M. (2013). *Erneuerbare Energien. Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte* (SpringerLink : Bücher, 5. erweiterte Aufl.). Berlin: Springer Vieweg.
- Kasten, F. & Czeplak, G. (1980). Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, 24 (2), 177–189. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(80\)90391-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(80)90391-6)
- Kleist, H. v. (1801). *Brief an das Stiftsfräulein Wilhelmine v. Zenge Hochwürden und Hochwohlgeboren zu Frankfurt a. O.* Berlin.
- Knaack, U. (2007). *Façades. Principles of construction*. Basel: Birkhäuser.
- Knissel, J. (1999). *Energieeffiziente Büro- und Verwaltungsgebäude. Hinweise zur primärenergetischen und wirtschaftlichen Optimierung* (1. Aufl.). Darmstadt: IWU.
- Köppen, W. & Geiger, R. (1954). *Klima der Erde (Climate of the earth). Wall Map 1:16 Mill.* Gotha: Klett-Perthes. Verfügbar unter http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pics/Geiger_1954_Map.jpg
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B. & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), 259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Krippner, R., Lang, W. & Schittich, C. (2006). *Im Detail: Gebäudehüllen* (Im Detail, 2., erw. Aufl.). München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation.
- Kühlke, D. (2011). *Optik. Grundlagen und Anwendungen; mit ... Tabellen, Beispielen und Aufgaben mit Lösungen* (3., überarb. Aufl.). Frankfurt am Main: Deutsch.
- Kwang, S. K. (2004). Korea Houghton Corporation (Anmelder), US 6,701,681 B2.
- Lang, W. (2000, 18. Juli). *Typologische Klassifikation von Doppelfassaden und experimentelle Untersuchung von dort eingebauten Lamellensystemen aus Holz zur Steuerung des Energiehaushaltes hoher Häuser unter besonderer Berücksichtigung der Nutzung von Solarenergie*. Dissertation, Technische Universität München. München.
- Langeheinecke, K., Jany, P. & Thieleke, G. (Hrsg.). (2008). *Thermodynamik für Ingenieure. Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium ; mit 57 Tabellen* (7., verbesserte und ergänzte

- Auflage). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.
<https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9482-3>
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (2013) Optics (Version 6.0) [Computer software].
Verfügbar unter <http://windows.lbl.gov/software/Optics/optics.html>
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (2016a) International Glazing Database IGDB (Version 18.2) [Computer software]. Verfügbar unter <https://windows.lbl.gov/materials/igdb/>
- Lawrence Berkeley National Laboratory. (2016b) Window (Version 7.4) [Computer software].
Verfügbar unter https://windows.lbl.gov/software/window/7/index_7_4_8.html
- Lemaitre, C. (2012). *Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude. DGNB Handbuch für nachhaltiges Bauen ; Version 2012* (Sonderausg. gebundene Losebl.-Sammlung). Stuttgart.
- DIN EN 12464-1 (2011-08). *Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Liedl, P. (2010). *Interaktion Klima-Mensch-Gebäude. Planungswerkzeuge für die Konzeptphase von Verwaltungsgebäuden in unterschiedlichen Klimaregionen im Kontext von Energie und Raumklima basierend auf einer detaillierten Klimanalyse*. Dissertation, Technische Universität München. Technische Universität München.
- Maurer, C., Pflug, T., Di Lauro, P., Hafner, J., Knez, F., Jordan, S. et al. (2012). Solar Heating and Cooling with Transparent Façade Collectors in a Demonstration Building. *Energy Procedia*, 30, 1035–1041. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.116>
- McKee, F. B. (1982). McKee, Frederick Brian (Anmelder), 0075464A1.
- McKee, F. B. (McKee, F. B., Hrsg.). (2007). *Glazing & Cladding, Facades, Curtain Wall Natural Environmental Control of Low Energy buildings*. Zugriff am 10.05.2007. Verfügbar unter www.mckeefluidizedglazing.co.uk
- Meteonorm [Computer software].
- Modelica [Computer software]. Linköping, Schweden: Modelica Association. Verfügbar unter <https://www.modelica.org>
- Molter, P. (2016). *Technikintegration in offenen Fassadensystemen. Entwicklung eines mehrfachfunktionalen Fassadenmoduls mit dem Schwerpunkt der exemplarischen Bewertung eines Bausteins im ganzheitlichen Kontext*. Dissertation, Technische Universität München. München. Zugriff am 17.08.2016. Verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1254651>
- Munari Probst, Maria Cristina. (2012). *Solar Energy Systems in Architecture. Integration Criteria and Guidelines* (International Energy Agency - Solar Heating and Cooling Programme, Hrsg.). International Energy Agency - Solar Heating and Cooling Programme. Zugriff am 22.10.2015. Verfügbar unter <http://task41.iea-shc.org/data/sites/1/publications/T41DA2-Solar-Energy-Systems-in-Architecture-28March20131.pdf>
- Nadtochiy, O. V. (2008). Nadtochiy, Oleksandr Volodymyro (Anmelder), WO 2008111924A1.
- DIN EN 14501 (2006-02). *Abschlüsse – Thermischer und visueller Komfort – Leistungsanforderungen und Klassifizierung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- DIN V 18599-10 (2011-12). *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN V 18599-2 (2011-12). *Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 7730 (2006-05). *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*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 15251 (2007-08). *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN 12665 (2011-09). *Licht und Beleuchtung – Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 5031-7 (1984-01). *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 5035-7 (2004-08). *Beleuchtung mit künstlichem Licht - Teil7: Beleuchtung von Räumen mit Bildschirmarbeitsplätzen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Open Source Modelica Consortium OpenModelica [Computer software]. Verfügbar unter <https://www.openmodelica.org>
- Oppliger, D. (2009). *Datenblätter Fluide*. Dokumentation Messungen, NTB Innterstaatliche Hochschule für Technik Buchs. Buchs.
- Oppliger, D., Stopper, J., Bertsch, S. & Schwarz, D. (2009). *Forschungsprojekt: Fluiddurchströmte Fassaden*. Zwischenbericht, Hochschule Liechtenstein; NTB Innterstaatliche Hochschule für Technik Buchs. Liechtenstein.
- Papst Franziskus. (05 - 2015). *Enzyklika Laudato Si'. über die Sorge für das gemeinsame Haus* (Libreria Editrice Vaticana, Hrsg.). Vatikan: Der Heilige Stuhl. Zugriff am 30.11.2017. Verfügbar unter http://w2.vatican.va/content/francesco/de/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html
- Polifke, W. & Kopitz, J. (2009). *Wärmeübertragung. Grundlagen, analytische und numerische Methoden* (Ing-Maschinenbau, 2. aktual. Aufl.). München u.a: Pearson Studium.
- Reeder, B., Loftness, V., Holtz, M., Masterson, J. & Clagett, J. (1979). *A Survey of Passive Solar Buildings* (AIA Research Corporation, Hrsg.). Washington: U.S. Departement of Housing and Urban Development; U.S. Departement of Energy. Zugriff am 29.09.2016. Verfügbar unter <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=umn.31951002837198d;view=1up;seq=1>
- Relux. (2017) Relux Desktop (Version 2017.1.9.0) [Computer software]. Münchenstein, Schweiz: Relux Informatik AG. Verfügbar unter <http://relux.com/de/downloads.html>

- Renz, J. (2013, 5. August). *Einfärbungen bei flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden zur Energietransmissionskontrolle*. Bachelorarbeit, Technische Universität München. München.
- Reuß, F. (2015). *Validierung des thermischen Rechenkerns einer Modelica-Bibliothek zur energetisch-thermischen Gebäudesimulation und Implementierung wesentlicher Komponenten der Heizungstechnik*. Masterarbeit, Technische Universität München. München.
- Riche, F., Feichter, G. & Gstoehl, D. (2015, 28. Februar). *Deliverable: D4.3. Functional prototype for lab-testing (up to 2.5 m x 1 m) including fluid circuit and test infrastructure* (Universität Liechtenstein, Hrsg.).
- Riche, F., Feichter, G., Gstoehl, D., Mayer, M. & Mayer, C. (2015, 25. Februar). *Deliverable: D2.5. Two functional prototypes of the collector for labscale testing (approx. size up to 2.5 m x 1 m)* (Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB & Mayer Glastechnik MGT, Hrsg.).
- Riley, T., Bergdoll, B., Magnago Lampugnani, V. & Mies van der Rohe, L. (Hrsg.). (2001). *Mies in Berlin. Ludwig Mies van der Rohe ; die Berliner Jahre 1907 - 1938 ; [anlässlich der Ausstellung "Mies in Berlin" im Museum of Modern Art, New York, 21. Juni bis 11. September 2001 ... vom 14. Dezember 2001 bis 10. März 2002 im Alten Museum der Staatlichen Museen zu Berlin und vom 30. Juli bis 29. September 2002 in der Fundación La Caixa in Barcelona]*. München: Prestel.
- Rubin, M., Powles, R. & Rottkay, K. von. (1999). Models for the angle-dependent optical properties of coated glazing materials. *Solar Energy*, 66 (4), 267–276.
[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00029-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00029-8)
- Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH. *SSG COOL-LITE. Beschichtetes Sonnenschutzglas*. Zugriff am 24.05.2016. Verfügbar unter <http://de.saint-gobain-glass.com/product/2576/ssg-cool-lite>
- Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH. *SSG PLANITHERM. Beschichtetes niedrig-emissives Glas*. Zugriff am 09.08.2016. Verfügbar unter <http://de.saint-gobain-glass.com/product/2590/ssg-planitherm>
- Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH (Hrsg.). (2006). *Memento. Glashandbuch*. Aachen. Zugriff am 15.07.2015. Verfügbar unter http://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCIQFjAAahUKEwib5pnC69zGAhWwF9sKHf93DSw&url=http%3A%2F%2Fdelta-glas.ch%2Findex.php%2Fglashandbuch.html%3Ffile%3Dfiles%2Fcto_layout%2Fimg%2F04123_de_Memento.pdf&ei=HyqmVdvaO7Cv7Ab_77XgAg&usg=AFQjCNF0rnr5UDPIZZ2PNf8a0anvsj1_A&bvm=bv.97653015,d.ZGU
- Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH. (2014a). *SSG DIAMANT. Extra klares Glas*. Aachen. Zugriff am 26.11.2015. Verfügbar unter <http://de.saint-gobain-glass.com/downloads/broschueren>
- Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH. (2014b). *SSG PLANICLEAR. Ein neuer Maßstab für transparentes Glas*. Aachen. Zugriff am 26.11.2015. Verfügbar unter <http://de.saint-gobain-glass.com/downloads/broschueren>

- Schlomann, B., Kleeberger, H., Hardi, L., Geiger, B., Pich, A. & Roser, A. (Februar 2015). *Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013. Schlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)* (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik (IfE), GfK Retail and Technology GmbH & IREES GmbH, Hrsg.). Karlsruhe, München, Freiburg. Zugriff am 23.09.2016. Verfügbar unter http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/x/de/projekte/Schlussbericht-GHD_2006-2013_Februar2015_final.pdf
- Schoof, J. (Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, Hrsg.). (2014). *Haus ohne Heizung: Bürogebäude von Baumschlager Eberle in Lustenau*. Verfügbar unter <http://www.detail.de/artikel/haus-ohne-heizung-buerogebaeude-von-baumschlager-eberle-in-lustenau-11703/>
- Schröder, G. & Treiber, H. (2007). *Technische Optik. Grundlagen und Anwendungen* (Vogel-Fachbuch: Kamprath-Reihe, 10., erw. Aufl.). Würzburg: Vogel.
- Schuster, H. (2006, 19. Juli). *Tageslichtsysteme im Spiegel der Nutzer. Zur Nutzerakzeptanz von Sonnenschutz- und Lichtlenksystemen in Büroräumen*. Dissertation, Universität Dortmund. Dortmund.
- Schwarz, D. (1998). Schwarz, Dietrich (Anmelder), WO98/51973.
- Seemann, R. (1982). Seemann, Robert (Anmelder), US4347835.
- SimulationX 3.6 (Version 3.6) [Computer software]. Dresden: ITI Gesellschaft für ingenieurtechnische. Verfügbar unter <http://www.iti.de/simulationx/>
- Spindler, K. (Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Hrsg.). *Grundlagen der Wärmeübertragung. Erzwungene Konvektion*, Universität Stuttgart. Zugriff am 04.03.2017. Verfügbar unter http://www.itw.uni-stuttgart.de/dokumente/Lehre/waermeuebertragung/3_Erzwungene_Konvektion.pdf
- Spinnler, M. (2014). *Skriptum zur Vorlesung. Solar Engineering*, München.
- SRS1 Software, L. L. (2016) SRS1 Cubic Spline for Excel 2.5.1 (Version 2.5.1.1) [Computer software]. Verfügbar unter <http://www.srs1software.com/SRS1CubicSplineForExcel.aspx>
- Stopper, J., Boeing, F. & Gstöhl, D. (2013). Fluid glass façade elements: Influences of dyeable liquids within the fluid glass façade. *Advanced Building Skins, Conference Proceedings of the 8th ENERGY FORUM, 2013* (8), 35–38. Zugriff am 09.04.2015.
- Stopper, J., Ritter, V. & Gstöhl, D. (2014). Verschattung und Raumtemperierung mit flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden. Modulating light and temperature with fluidglass facades. *DETAIL Green, 1, 2014*, 58–60. Zugriff am 09.04.2015.
- Su, K. K. (2003). Su, Keng Kuei (Anmelder), EP20020012045 20020531.
- Tabellenblatt zu Plancksches Strahlungsgesetz (Version 2008) [Computer software]: Carl-Engler-Schule. Verfügbar unter www.carl-engler-schule.de/culm/culm/culm2/th_physik/simulation/planck.xls
- DIN 5034-1 (2011-07). *Tageslicht in Innenräumen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- Telian, M. & Moisi, M. (31.11.2013 / 2013). *Deliverable: D1.2. List of quantitative requirements with respect to the overall building system including the façade system* (Hoval Aktiengesellschaft, Hrsg.). Liechtenstein.
- The Emissions Gap Report. A UN Environment Synthesis report.* (2017) [Europe]: United Nations Environment Programme (UNEP).
- Tinoco Cavalheiro, J. R. & Sousa Tavares da Fonseca, Mário Alexandr. (2008). Universidade do Porto (Anmelder), WO 2008075286A2.
- UNEP DTIE Sustainable Consumption & Production Branch. (2009). *Buildings and Climate Change. Summary for Decision-Makers* (United Nations Environment Programme, Hrsg.). Paris. Zugriff am 23.09.2016. Verfügbar unter <http://www.unep.org/sbci/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>
- Universität Bayreuth, Bollinger & Grohmann Consulting GmbH, ETEM Bulgaria AD, HTCO GmbH, Savior Venture Capital, Fraunhofer Gesellschaft eV et al. (Hrsg.). (2017). *Industrial Development of Water Flow Glazing Systems (InDeWaG)*. Zugriff am 05.12.2017. Verfügbar unter <http://www.indewag.eu/>
- Van Berkel, B., Pfau, H. & Piber, A. (UNStudio, Hrsg.). (2017). *Raffles City, Hangzhou, Zhejiang, China*. Zugriff am 19.12.2017. Verfügbar unter <https://www.unstudio.com/en/page/384/raffles-city>
- Van Treeck, C. (2011). *Building Energy Modeling and Simulation. Lecture Notes*, Technische Universität München. München.
- VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung. (05/2001). *Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation - Gebäudesimulation. Grundlagen*. VDI -Richtlinie (VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, Hrsg.) (VDI 6020 Blatt 1). Düsseldorf. Zugriff am 08.04.2015. Verfügbar unter http://www.vdi.de/richtlinie/vdi_6020_blatt_1-anforderungen_an_rechenverfahren_zur_gebaeude_und_anlagensimulation_gebaeudesimulation/
- VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung. (08/2002). *Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung - Grundlagen*. VDI -Richtlinie (VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, Hrsg.) (VDI 6011 Blatt 1). Düsseldorf. Zugriff am 08.04.2015. Verfügbar unter http://www.vdi.de/richtlinie/vdi_6011_blatt_1-optimierung_von_tageslichtnutzung_und_kuenstlicher_beleuchtung_grundlagen/
- VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung. (06/2015). *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*. VDI -Richtlinie (VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (GBG), Hrsg.) (VDI 2078). Düsseldorf. Zugriff am 20.03.2016. Verfügbar unter <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/bauen-und-gebaeudetechnik/fachbereiche/technische-gebaeudeausruestung/richtlinienarbeit/richtlinienreihe-vdi-2078-berechnung-der-kuehllast-und-raumtemperaturen-von-raeumen-und-gebaeuden-vdi-kuehllastregeln/>
- VDI-Richtlinie, VDI 2078 (07-1996). *Berechnung der Kühllast klimatisierter Räume*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

- VDI-Wärmeatlas. (2006) (10., bearb. und erw. Aufl.). Berlin: Springer.
- Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.). (März 2009). *Raumluftechnik Bürogebäude (VDI-Lüftungsregeln)* (VDI 3804). Düsseldorf. Zugriff am 19.09.2016. Verfügbar unter <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/bauen-und-gebaeudetechnik/fachbereiche/technische-gebaeudeausruestung/richtlinienarbeit/vdi-3804/>
- Vetrotech Saint-Gobain International AG. (2015). *Sageglass Climaplus Classic. 42.1ec-12-4*. Flamatt, Schweiz. Zugriff am 10.06.2017. Verfügbar unter <https://www.sageglass.com/de/resources>
- ViS Verband innenliegender Sicht- und Sonnenschutz e.V. (2014). *Optimale Lichtbedingungen für Bildschirmarbeitsplätze durch innenliegenden Sicht- und Sonnenschutz*. Wuppertal. Zugriff am 05.10.2017. Verfügbar unter <http://www.vis-online.org>
- Willey, R. R. *Practical Design of Optical Thin Films, Fourth Edition*: Lulu.com.
- Woods, L. (1972). Pilkington Brothers Limited (Anmelder), 1424533Großbritannien.
- Yan, L., Hua, S. & Stopper, J. Implementation of buildings with fluid-flown glass façade on district level. In *6th Colloquium of the Munich School of Engineering* (p. 105). <https://doi.org/10.14459/2015md1305104>

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Funktionskonzepts von flüssigkeitsdurchströmten Glasfassaden (links: Kühlfall, rechts: Heizfall)	22
Abbildung 2: Transparente Fassade mit integriertem Sonnen- und Blendschutz, Solarthermie, Photovoltaik und Heiz- und Kühlsystem als Schnittstelle zwischen Außen- und Innenraum; Einflüsse auf den Nutzerkomfort und den Energiebedarf des Gebäudes (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an (Hausladen et al., 2006, S. 151), (Lang, 2000, S. 16), (DIN EN ISO 7730), (DIN EN 410); (Lemaitre, 2012, S. 235–302))	24
Abbildung 3: Normierte relative spektrale Verteilung der Globalstrahlung S_{λ} (Quelle: Eigene Darstellung nach EN 410 Tabelle 2)	26
Abbildung 4: Solare Einstrahlung in 88 Wellenlängenschritten (Quelle: Eigene Darstellung nach ISO 9845-1)	27
Abbildung 5: Gewichtung des visuellen Spektrums gemäß EN 410 Tabelle 1 (Quelle: Eigene Darstellung nach EN 410)	27
Abbildung 6: Strahlungsspektren idealer schwarzer Körper mit den Temperaturen von 5800 K (Sonne), 353 K (ca. 80°C), 308 K (ca. 35°C) und 291 K (ca. 18°C) bei einer Umgebungstemperatur von 300 K (Quelle: Eigene Darstellung mit (<i>Tabellenblatt zu Plancksches Strahlungsgesetz</i>))	28
Abbildung 7: Weltkarte der Köppen-Geiger Klimaklassifikationen (Quelle: Standorte ergänzt in (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf & Rubel, 2006))	37
Abbildung 8: Jahresverläufe der globalen Einstrahlung (I) auf die Horizontale und die vertikalen Fassaden und die Außenlufttemperatur (T) (monatliche Durchschnittswert); Jahresdurchschnittstemperatur (blaue, horizontale Linie); Moskau (Quelle: eigene Grafik aus Wetterdaten Meteonorm)	39
Abbildung 9: Jahresverläufe der globalen Einstrahlung (I) auf die Horizontale und die vertikalen Fassaden und die Außenlufttemperatur (T) (monatlicher Durchschnittswert); Jahresdurchschnittstemperatur (blaue, horizontale Linie); München (Quelle: eigene Grafik aus Wetterdaten Meteonorm)	40
Abbildung 10: Jahresverläufe der globalen Einstrahlung (I) auf die Horizontale und die vertikalen Fassaden und die Außenlufttemperatur (T) (monatlicher Durchschnittswert); Jahresdurchschnittstemperatur (blaue, horizontale Linie); Riad (Quelle: eigene Grafik aus Wetterdaten Meteonorm)	42
Abbildung 11: Anforderungen und Funktionszonen von mehrschichtigen, transparenten Fassaden (links: serielle Anordnung; Mitte: Funktionszonen; rechts: Optimierung der Schichten nach Funktionszonen) (Eigene Grafik in Anlehnung an (Hausladen, 2005, S. 88–91))	44
Abbildung 12: Strahlungsdurchgang durch eine Einfachverglasung	45
Abbildung 13: Wärmeübertragung bei Wärmeschutzverglasungen (Glasmitte)	46
Abbildung 14: Typologische Übersicht adaptiver Verglasungen	48
Abbildung 15: Typologische Übersicht fassadenintegrierter, thermischer Solarkollektoren	52

Abbildung 16: Semi-transparente, solarthermische Kollektoren; links: Flachkollektor mit gebogenem Absorber (Quelle: (Maurer et al., 2012, S. 1037)); rechts: Vakuum-Röhrenkollektor (Quelle: (Molter, 2016, S. 41)).....	52
Abbildung 17: Kennlinienverläufe (schematisch) opaker Solarkollektortypen in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung q_{sol} und der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Absorbertemperatur T_{abs} und Außenlufttemperatur T_{amb} (Quelle: Eigene Darstellung nach (Kaltschmitt, 2013, Abb. 4.11)).....	53
Abbildung 18: Visualisierung eines Einzelbüroraums mit Vollverglasung (Fluidglas ohne Einfärbung) bei bedecktem Himmel	56
Abbildung 19: Verlauf des Tageslichtquotienten in Raummitte in einem Einzelbüroraum mit Vollverglasung (Fluidglas ohne Einfärbung) bei bedecktem Himmel.....	57
Abbildung 20: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierende Transmissionsgraden (T_{vis}) der Verglasung bei klarem Himmel; Vollverglasung mit gleichen Transmissionsgraden je Fassadenelement.....	59
Abbildung 21: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierende Transmissionsgraden (T_{vis}) – 7% bis 1% - der Verglasung bei klarem Himmel; Vollverglasung mit gleichen Transmissionsgraden je Fassadenelement.....	59
Abbildung 22: Visualisierung eines Einzelbüroraums mit Vollverglasung bei klarem Himmel; drei raumhohe, vertikale Fassadenelemente mit unterschiedlichen Transparenzgraden	60
Abbildung 23: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierenden Transmissionsgraden (T_{vis}) der Verglasung bei klarem Himmel; drei raumhohe, vertikale Fassadenelemente mit unterschiedlichen Transparenzgraden	61
Abbildung 24: Beleuchtungsstärke im Einzelbüro bei asymmetrischen Transmissionsgraden in der Fassade; Innenansicht	61
Abbildung 25: Visualisierung eines Einzelbüroraums mit Vollverglasung bei klarem Himmel; Fassadeneinteilung in drei übereinander liegende Zonen mit vereinfachtem Lichtlenkschwert.	62
Abbildung 26: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierenden Transmissionsgraden (T_{vis}) der Verglasung bei klarem Himmel; Fassadeneinteilung in drei übereinander liegende Zonen mit vereinfachtem Lichtlenkschwert	62
Abbildung 27: Visualisierung eines Einzelbüroraums mit Vollverglasung bei klarem Himmel; Fassadeneinteilung in zwei übereinander liegende Zonen mit vereinfachtem Lichtlenkschwert.....	63
Abbildung 28: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierende Transmissionsgraden (T_{vis}) der Verglasung bei klarem Himmel; Fassadeneinteilung in zwei übereinander liegende Zonen mit vereinfachtem Lichtlenkschwert	64
Abbildung 29: Gegenüberstellung unterschiedlicher Fassadenvarianten; Beleuchtungsstärkeverlauf mit variierten Transmissionsgraden.....	64
Abbildung 30: Systemkonzept der flüssigkeitsdurchströmten Glasfassade in der Kühl- (links) bzw. Heizperiode (rechts)	67
Abbildung 31: Darstellung einer raumhohen, vertikalen Fluidglasfassade mit Flüssigkeitskreisläufen (links: Ansicht, rechts: Schnitt).....	68

Abbildung 32: Schematische Ansicht eines Fluidglaselements.....	69
Abbildung 33: Schematischer Horizontalschnitt Fluidglasfassade mit Leitungsführung.....	70
Abbildung 34: Schematischer Vertikalschnitt Fluidglasfassade mit Leitungsführung.....	71
Abbildung 35: Reflexion und Brechung an zwei Grenzflächen.....	73
Abbildung 36: Darstellung des Strahlungsdurchgangs für die zweite Zone und die ersten beiden Grenzflächen des Fluidaufbaus	76
Abbildung 37: Schematische Darstellung der Berechnung der Strahlungsabsorption im Fluidglasaufbau	84
Abbildung 38: Schematische Darstellung der Energiebilanzierung des Fluidglasaufbaus.....	85
Abbildung 39: Schematische Darstellung der Temperaturen im Fluidglasaufbau.....	85
Abbildung 40: Schematische Darstellung der thermischen Widerstände in den Zonen 1 bis 7 des Fluidglasaufbaus	86
Abbildung 41: Fluidglasprototyp an der NTB. Zweifachverglasung aus zweimal 8 mm SSG Planilux® und 2 mm SZR; links gefüllt mit destilliertem Wasser, rechts mit 1% vol. Farbstoff Basacid® Schwarz X40 liquid in destilliertem Wasser (Quelle: (Oppliger, 2009)).....	90
Abbildung 42: Messergebnisse für Strahlungstransmissionen der Messkampagne Basacid® Schwarz X40 bei senkrechter Einstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 300 nm bis 2500 nm und Ausgabewerte IGDB für Verglasungen ohne Fluidfüllung aus Optics (Quelle: Eigene Darstellung aus Messergebnissen NTB).....	91
Abbildung 43: Fluidglas-Prototyp mit Einfärbung Basacid® Schwarz X40 im Modellraumprüfstand des Lehrstuhls für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik der TUM	93
Abbildung 44: Transmission von leeren Küvetten der Firma Hellma aus verschiedenen Gläsern (Quelle: Hellma GmbH & Co. KG).....	94
Abbildung 45: Messergebnisse für Strahlungstransmissionen der Messkampagne Xfast® Schwarz 0050 bei senkrechter Einstrahlung im Wellenlängenbereich zwischen 300 nm bis 2500 nm (Quelle: Eigene Darstellung aus Messergebnissen NTB).....	95
Abbildung 46: Dreistufige Bildfolge des Entfärbungsprozess eines klaren Fluids mit Eisenoxidpigmenten durch Anlegen eines Permanentmagneten	97
Abbildung 47: Modellraumprüfstand an der TU München von außen (Foto: Heinrich Kleeberger)	98
Abbildung 48: Fluidglaselement im Bestandsfensterausschnitt des Modellraumprüfstands von außen betrachtet	99
Abbildung 49: Einbau Fluidglaselement in Fensteröffnung Modellraumprüfstand (links: Horizontalschnitt, rechts: Vertikalschnitt)	100
Abbildung 50: Schemazeichnungen Messaufbau Modellprüfraum (Quelle: Gstöhl, Daniel; NTB)	101
Abbildung 51: Leuchtenmatrix der künstlichen Sonne im Modellraumprüfstand (orange Schrift = Lampe an, graue Schrift = Lampe aus).....	102

Abbildung 52: Pyranometer vor dem Fluidglaselement. Messung der Einstrahlung auf die Fassade im Modellraumprüfstand (Foto: Heinrich Kleeberger)	103
Abbildung 53: Einstrahlung hinter der Fluidglasfassade in Fassadenmitte; zwei klare Flüssigkeiten; Pyranometermessung von 25.07.2011, 9:25 Uhr bis 26.07.2011, 14:35 Uhr.....	106
Abbildung 54: Messverlauf der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung und ohne Kühlung (Messung von 25.07.2011, 09:25 Uhr bis 26.07.2011, 14:35 Uhr)	107
Abbildung 55: Messverlauf der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung, mit Kühlung F2 (Messung von 08.06.2011, 11:20 Uhr bis 9.06.2011, 11:15 Uhr)	108
Abbildung 56: Messverlauf der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur mit Einfärbung F1 und Kühlung F2 (Messung von 03.08.2011, 14:45 Uhr bis 4.08.2011, 9:30 Uhr)	109
Abbildung 57: Fluidglas mit eingefärbtem inneren Fluidglaskreislauf (F2) im Modellraumprüfstand	111
Abbildung 58: Reinigungsvorgang von Ablagerungen am Düsenband im flüssigkeitsdurchströmten Scheibenzwischenraum (Fotos: Heinrich Kleeberger)	112
Abbildung 59: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade einer Einfachverglasung aus SSG PLANILUX® 8 mm bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell, Optics und Spektrometermessung NTB	117
Abbildung 60: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade einer Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell, Optics und Spektrometermessung NTB	117
Abbildung 61: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade einer Einfachverglasung aus einmal SSG DIAMANT® 6 mm bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics.....	118
Abbildung 62: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade einer Einfachverglasung aus einmal SSG PLANITHERM® ULTRA N auf DIAMANT® 6 mm Position 1 bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics	119
Abbildung 63: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade einer Einfachverglasung aus einmal SSG PLANITHERM® ULTRA N auf DIAMANT® 6 mm Position 2 bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics	119
Abbildung 64: Spektrale Transmissions- bzw. Reflexionsgrade für den Verglasungsaufbau LGGL (FGGF ohne Fluid) aus SSG DIAMANT® 6 mm ohne bzw. mit Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N auf Position 4 bzw. 7 bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics.....	121
Abbildung 65: Solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade der unbeschichteten Einfachverglasung SSG DIAMANT® 6 mm bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Window	122

Abbildung 66: Solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade der Einfachverglasung SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos.1) bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Window	123
Abbildung 67: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 der Fünfachverglasung LGGL (FGGF ohne Fluid) aus SSG DIAMANT® 6 mm ohne bzw. mit Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N auf Position 4 bzw. 7 bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Window	124
Abbildung 68: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade bei senkrechter Einstrahlung einer Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm mit klarem Wasser im 2 mm SZR; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Spektrometermessung NTB (Quelle: Eigene Darstellung z.T. mit Werten NTB)	125
Abbildung 69: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade bei senkrechter Einstrahlung der Verglasungsaufbauten LGGL und FGGF mit klarem Wasser in F1 und F2 im 2 mm SZR; Ausgabewerte Strahlungsmodell	128
Abbildung 70: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 der Verglasungsaufbauten LGGL und FGGF bei winkelabhängiger Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell	129
Abbildung 71: Verlauf der Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach EN 410 bei senkrechter Einstrahlung für den Aufbau FGGF mit Einfärbung im äußeren Fluid (Z3) mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen und klarem Wasser im inneren Fluid (Z9); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; Ausgabewerte Strahlungsmodell	130
Abbildung 72: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade; Aufbau FGGF mit Einfärbung im äußeren Fluid (Z3) mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen; klares Wasser im inneren Fluid (Z9); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell	131
Abbildung 73: Spektrale Absorptionsgrade; Aufbau FGGF mit Einfärbung im äußeren Fluid (Z3) mit 0% und 3% Xfast® Schwarz 0050; klares Wasser im inneren Fluid (Z9); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell	131
Abbildung 74: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 des Verglasungsaufbaus FGGF mit 3 Vol.-% Xfast® Schwarz 0050 in Z3 und klarem Wasser in Z9; Fluidschichten jeweils 2 mm stark; winkelabhängige Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell	132
Abbildung 75: Verlauf der Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach EN 410; Aufbau FGGF mit Einfärbung im inneren Fluid (Z9) mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen; klares Wasser im äußeren Fluid (Z3); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell	133
Abbildung 76: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade; Aufbau FGGF mit Einfärbung im inneren Fluid (Z9) mit 0% und 3% Xfast® Schwarz 0050; klares Wasser im äußeren Fluid (Z3); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell	133

Abbildung 77: Spektrale Absorptionsgrade; Aufbau FGGF mit Einfärbung im inneren Fluid (Z9) mit 0% und 3% Xfast® Schwarz 0050; klares Wasser im äußeren Fluid (Z3); Fluidschichten jeweils 2 mm stark; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell.....	134
Abbildung 78: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099; Verglasungsaufbaus FGGF mit 3 Vol.-% Xfast® Schwarz 0050 in F2; klares Wasser in F1; Fluidschichten jeweils 2 mm stark; winkelabhängige Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell.....	135
Abbildung 79: Visuelle Transmissionsgrade nach EN410; Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; senkrechte Einstrahlung; Ausgabe Strahlungsmodell	136
Abbildung 80: Solare Transmissionsgrade nach EN410; Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; senkrechte Einstrahlung; Ausgabe Strahlungsmodell	137
Abbildung 81: Solare Absorptionsgrade nach EN410; Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; senkrechte Einstrahlung; Ausgabe Strahlungsmodell	137
Abbildung 82: Schematische Darstellung des g-Wertes von Fluidgläsern	145
Abbildung 83: Fluidglasprototyp zur Hälfte mit klarem Wasser befüllt; Frontalaufnahme (Foto: Astrid Eckert).....	149
Abbildung 84: Fluidglasprototyp mit klarem Wasser befüllt; Frontalaufnahme (Foto: Astrid Eckert)	150
Abbildung 85: Fluidglasprototyp mit klarem Wasser befüllt; Schrägaufnahme (Foto: Astrid Eckert)	151
Abbildung 86: Fluidglasprototyp mit klarem Wasser befüllt; Schrägaufnahme (Foto: Astrid Eckert)	152
Abbildung 87: Fluidglasprototyp mit leicht eingefärbtem Wasser befüllt; Frontalaufnahme (Foto: Astrid Eckert).....	153
Abbildung 88: Fluidglasprototyp mit stark eingefärbtem Wasser befüllt; Frontalaufnahme (Foto: Astrid Eckert).....	154
Abbildung 89: Schematische Darstellung der optischen Bilanz der Solarkollektorfunktion von Fluidgläsern	155
Abbildung 90: Schematische Darstellung der Wärmeströme der Solarkollektorfunktion von Fluidgläsern	155
Abbildung 91: Schematische Darstellung des Wirkungsgrads von Fluidgläsern als Solarkollektor; Vergleich zu opaken Standard-Solarkollektoren in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung q_{sol} und der Temperaturdifferenz zwischen mittlerer Absorbtemperatur T_{abs} und Außenlufttemperatur T_{amb} (Vereinfachte Darstellung in Anlehnung an (Kaltschmitt, 2013, Abb. 4.11))	157

Abbildung 92: Schematische Darstellung der Wärmeströme zwischen den Zonen; 1m ² FGGF; F1 klar, F2 klar; Moskau, Nord; 14.02.2013, 19 Uhr; Heizen; Ergebnisse aus EES-Fluidglasmodellen	162
Abbildung 93: Schematische Darstellung der Wärmeströme zwischen den Zonen; 1m ² FGGF; F1 klar, F2 max. eingefärbt (3 Vol.-% Xfast); München, Süd; 12.02.2013, 13 Uhr; Heizen; Ergebnisse aus EES-Fluidglasmodellen	162
Abbildung 94: Schematische Darstellung der Wärmeströme zwischen den Zonen; 1m ² FGGF; F1 max. eingefärbt (3 Vol.-% Xfast), F2 klar; München, West; 09.07.2013, 17 Uhr; Kühlen; Ergebnisse aus EES-Fluidglasmodellen	163
Abbildung 95: Schematische Darstellung der Wärmeströme zwischen den Zonen; 1m ² FGGF; F1 max. eingefärbt (3 Vol.-% Xfast), F2 klar; Riad, West; 29.07.2013, 15 Uhr; Kühlen; Ergebnisse aus EES-Fluidglasmodellen	164
Abbildung 96: Entleerter Fluidglas Prototyp im Modellraumprüfstand der TUM (Foto: Heinrich Kleeberger).....	165
Abbildung 97: Foto oberer Anschluss Fluidglaskreislauf am Fluidglas Prototyp auf dem Solarprüfstand am CEA-Ines (Quelle: (Riche, Feichter & Gstoehl, 2015, S. 12)	167
Abbildung 98: Foto Fluidglaskreislauf und unterer Anschluss Fluidglaskreislauf am Fluidglas Prototyp auf dem Solarprüfstand am CEA-Ines (Quelle: (Riche, Feichter & Gstoehl, 2015, S. 14)	167
Abbildung 99: Detail Horizontalschnitt Fluidglaselement mit Rohrleitungen und Anschlüssen; Vorlauf (Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben NTB.).....	168
Abbildung 100: Druckverluste [mbar] im Fluidglassystem (Variante 1); Volumenstrom 1 l/min·m; Rohrleitungen 10 mm Innendurchmesser	174
Abbildung 101: Druckverluste [mbar] im Fluidglassystem; Volumenstrom 1 l/min·m; Verteilungen 36,8 mm, Anbindeleitungen 13,6 mm Innendurchmesser (Variante 2)	175
Abbildung 102: Verteilung der Druckverluste in der Fluidglasfassade (Variante 2) bei variierenden Volumenströmen	175
Abbildung 103: Druckverluste [mbar] für ein Fluidglaselement (1,05 m breit, 3,0 m hoch) in Abhängigkeit vom Volumenstrom (1 bis 20 l/min·m); inkl. Rohrleitungen (Variante 2)	176
Abbildung 104: Jährlicher, spezifischer Pumpenstrombedarf für die Fluidglasfassade in Abhängigkeit vom Volumenstrom (1 bis 20 l/min·m), bezogen auf 17,5 m ² Bürofläche (Variante 2)	176
Abbildung 105: Schematischer Aufbau der Simulation eines Einzelbüroraums mit Fluidglasfassade in SimulationX	178
Abbildung 106: Schematische Darstellung der Bilanzierung des Fluidglasraums in der thermischen Simulation	180
Abbildung 107: Vereinfachtes Flussdiagramm der Steuerungsstrategie Fluidglas	182
Abbildung 108: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [lx] auf Arbeitsebene bei globaler Einstrahlung (I) auf die Fassade unter bzw. über 150 W/m ² ; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung	184

Abbildung 109: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [lx] auf Arbeitsebene je Einfärbungsgrad des Fluid mit Xfast. Moskau, Nord-, Süd- und Westorientierung.....	184
Abbildung 110: Jahresverläufe der Außenluft- und der operativen Raumtemperaturen; 8760 Std.; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	186
Abbildung 111: Operative Raumtemperaturen in der Heizperiode; Nutzungszeit; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	187
Abbildung 112: Operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode; Nutzungszeit; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	187
Abbildung 113: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche in der Heiz- und Kühlperiode; Nutzungszeit; Moskau, Nord-, Süd- und Westorientierung.....	188
Abbildung 114: Heizwärmebedarf (links) und Kühlkältebedarf (rechts) für einen Einzelbüroraum (jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]); Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung	190
Abbildung 115: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (links: F1, rechts: F2 Einzelbüroraum; jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]); Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	190
Abbildung 116: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des äußeren Fluids (F1) in der Heiz- und Kühlperiode; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung	191
Abbildung 117: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des inneren Fluids (F2) in der Heiz- und Kühlperiode; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung	191
Abbildung 118: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [lx] auf Arbeitsebene bei globaler Einstrahlung (I) auf die Fassade unter bzw. über 150 W/m ² ; München; Nord-, Süd- und Westorientierung	193
Abbildung 119: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [lx] auf Arbeitsebene je Einfärbungsgrad des Fluid mit Xfast; München; Nord-, Süd- und Westorientierung	194
Abbildung 120: Jahresverläufe der Außenluft- und der operativen Raumtemperaturen; 8760 Std.; München; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	195
Abbildung 121: Operative Raumtemperaturen in der Heizperiode; Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	196
Abbildung 122: Operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode; Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	196
Abbildung 123: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche in der Heiz- und Kühlperiode; Nutzungszeit; München, Nord-, Süd- und Westorientierung	197
Abbildung 124: Heizwärmebedarf (links) und Kühlkältebedarf (rechts) für einen Einzelbüroraum (jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]); München; Nord-, Süd- und Westorientierung	198
Abbildung 125: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (links: F1, rechts: F2 Einzelbüroraum; jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]); München; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	199

Abbildung 126: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des äußeren Fluids (F1) in der Heiz- und Kühlperiode; München; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	199
Abbildung 127: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des inneren Fluids (F2) in der Heiz- und Kühlperiode; München; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	200
Abbildung 128: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [lx] auf Arbeitsebene bei globaler Einstrahlung (I) auf die Fassade unter bzw. über 150 W/m ² ; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	201
Abbildung 129: Häufigkeitsverteilung von Beleuchtungsstärken [lx] auf Arbeitsebene je Einfärbungsgrad des Fluid mit Xfast. Riad, Nord-, Süd- und Westorientierung.....	202
Abbildung 130: Jahresverläufe der Außenluft- und der operativen Raumtemperaturen; 8760 Std.; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	203
Abbildung 131: Operative Raumtemperaturen in der Heizperiode; Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	204
Abbildung 132: Operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	204
Abbildung 133: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche in der Heiz- und Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	205
Abbildung 134: Heizwärmebedarf (links) und Kühlkältebedarf (rechts) für einen Einzelbüroraum (jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]); Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	207
Abbildung 135: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (links: F1, rechts: F2 Einzelbüroraum; jeweils absolut [kWh/a] und spezifisch pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]); Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	207
Abbildung 136: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des äußeren Fluids (F1) in der Heiz- und Kühlperiode; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	208
Abbildung 137: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des inneren Fluids (F2) in der Heiz- und Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	208
Abbildung 138: Fluidglasprototypen mit eingefärbtem Fluid; Blick von innen nach außen; Nicosia, 4.07.2017; EU-Projekt „FLUIDGLASS“	259
Abbildung 139: Direkte, solare Transmissions- und Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099; Einfachverglasung SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos.2); winkelabhängige Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Window	273
Abbildung 140: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade; Verglasungsaufbau Prototyp im Modellraumprüfstand ohne Fluidfüllung („LGGL_Modellraumprüfstand“); senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell .	288
Abbildung 141: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade; Verglasungsaufbau Prototyp im Modellraumprüfstand mit klarem Fluid in F1 und F2 („FGGF_Modellraumprüfstand“); senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell.	289
Abbildung 142: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade; Verglasungsaufbau Prototyp im Modellraumprüfstand („FGGF_Modellraumprüfstand“) mit 1%	

Einfärbung Basacid® X40 in F1 und klarem Fluid in F2; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell.....	289
Abbildung 143: Validierung SimulationX-Fluidglasmodell; Vergleich simulierte zu gemessene Temperaturdifferenz zwischen Auslasstemperatur (T_{aus}) und Einlasstemperatur (T_{ein}) (Quelle: Shan Hua und Jochen Stopper aus Messergebnissen CEA-INES und Simulationsergebnissen SimulationX).....	303
Abbildung 144: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m^2 Nutzfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]; Einzelbüroraum; Moskau, Nordorientierung	305
Abbildung 145: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m^2 Nutzfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]; Einzelbüroraum; Moskau; Südorientierung.....	305
Abbildung 146: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m^2 Nutzfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]; Einzelbüroraum; Moskau; Westorientierung.....	305
Abbildung 147: Energiebedarf für künstliche Beleuchtung (links: absolut [kWh/a], rechts: spezifisch pro m^2 Nutzfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]); Nutzungszeit; Moskau, Nord-, Süd- und Westorientierung	306
Abbildung 148: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m^2 Fassadenfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]; Moskau; Nordorientierung	306
Abbildung 149: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m^2 Fassadenfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]; Moskau; Südorientierung	306
Abbildung 150: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m^2 Fassadenfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]; Moskau; Westorientierung.....	307
Abbildung 151: Operative Raumtemperaturen in der Heizperiode bei Vorlauftemperatur $F2 = 26^\circ\text{C}$; Nutzungszeit; Moskau; Nordorientierung	307
Abbildung 152: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche in der Heizperiode bei Vorlauftemperatur $F2 = 26^\circ\text{C}$; Moskau; Nordorientierung.....	307
Abbildung 153: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m^2 Nutzfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$] ; Vorlauftemperatur $F2 = 26^\circ\text{C}$ in der Heizperiode; Einzelbüroraum; Moskau; Nordorientierung.....	308
Abbildung 154: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des inneren Fluids (F2) in der Heizperiode bei Vorlauftemperatur $F2 = 26^\circ\text{C}$; Moskau; Nordorientierung	308
Abbildung 155: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m^2 Nutzfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]; Einzelbüroraum; München; Nordorientierung.....	310
Abbildung 156: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m^2 Nutzfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]; Einzelbüroraum; München; Südorientierung	310
Abbildung 157: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m^2 Nutzfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]; Einzelbüroraum; München, Westorientierung	310
Abbildung 158: Energiebedarf für künstliche Beleuchtung (links: absolut [kWh/a], rechts: spezifisch pro m^2 Nutzfläche [$\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}$]); Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung	311

Abbildung 159: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m ² Fassadenfläche [kWh/m ² a]; München; Nordorientierung.....	311
Abbildung 160: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m ² Fassadenfläche [kWh/m ² a]; München; Südorientierung.....	311
Abbildung 161: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m ² Fassadenfläche [kWh/m ² a]; München; Westorientierung.....	312
Abbildung 162: Operative Raumtemperaturen in der Heizperiode; Nutzungszeit; München; Südorientierung; Massenströme F1 und F2 1l/min·m.....	312
Abbildung 163: Operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode; Nutzungszeit; München; Südorientierung; Massenströme F1 und F2 1l/min·m.....	312
Abbildung 164: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des inneren Fluids (F2) in der Heizperiode; München; Südorientierung; Massenstrom F1 und F2 mit 1 l/min·m.....	313
Abbildung 165: Heizwärme- und Kühllältebedarf für einen Einzelbürraum pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]; München; Südorientierung; Massenstrom F1 und F2 1 l/min·m.....	313
Abbildung 166: Heizwärme- und Kühllältebedarf pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]; Einzelbürraum; Riad; Nordorientierung.....	315
Abbildung 167: Heizwärme- und Kühllältebedarf pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]; Einzelbürraum; Riad; Südorientierung.....	315
Abbildung 168: Heizwärme- und Kühllältebedarf pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]; Einzelbürraum; Riad; Westorientierung.....	315
Abbildung 169: Energiebedarf für künstliche Beleuchtung (links: absolut [kWh/a], rechts: spezifisch pro m ² Nutzfläche [kWh/m ² a]); Nutzungszeit; Riad, Nord-, Süd- und Westorientierung.....	316
Abbildung 170: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m ² Fassadenfläche [kWh/m ² a]; Riad; Nordorientierung.....	316
Abbildung 171: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m ² Fassadenfläche [kWh/m ² a]; Riad; Südorientierung.....	316
Abbildung 172: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m ² Fassadenfläche [kWh/m ² a]; Riad; Westorientierung.....	317
Abbildung 173: Operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad; F1 1 l/min·m, F2 3 l/min·m, T_F1_ein = 35°C; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	317
Abbildung 174: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung.....	318
Abbildung 175: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im inneren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung.....	319
Abbildung 176: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im inneren und äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung.....	319

Abbildung 177: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Vorlauftemperaturen im äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung	320
---	-----

Sofern nicht anders angegeben, handelt es sich bei allen Abbildungen um eigene Darstellungen und Berechnungen.

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der optischen Strahlung (Quelle: Eigene Darstellung nach DIN 5031-7)..	26
Tabelle 2: Gestaltungskriterien für Büroräume nach ISO 7730 Tabelle A.5 (DIN EN ISO 7730, S. 21).....	32
Tabelle 3: Kennwerte von aktuellen Wärmeschutzverglasungen (Stand der Technik)	47
Tabelle 4: Kennwerte adaptiver Verglasungen nach Hersteller- und Literaturangaben (Quellen: (Econtrol; Vetrotech Saint-Gobain International AG, 2015), (Haase, 2004) und (Hausladen et al., 2006, S. 127)).....	51
Tabelle 5: Kennwerte verschiedener Flüssigkeitskollektoren nach (Kaltschmitt, 2013, S. 201).	54
Tabelle 6: Typische Kennwerte von Wärmeübergabesystemen (Quelle: (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 176) und (Hegger, Hartwig & Keller, 2012, S. 100)).....	55
Tabelle 7: Typische Kennwerte von Kälteübergabesystemen (Quelle: (Hausladen & Tichelmann, 2009, S. 176) und (Hegger et al., 2012, S. 100)).....	55
Tabelle 8: Anforderungen an die Funktionszonen bei Fluidglasfassaden (fett gedruckte sind die jeweiligen Hauptanforderungen je Zone)	58
Tabelle 9: Aufbauvariationen von flüssigkeitsdurchströmten Verglasungen (Darstellung: grau = Glasscheibe, blau = Flüssigkeitsschicht, strichpunktierte Linie = thermische Trennung).....	65
Tabelle 10: Aufbau des untersuchten Fluidglases (von außen nach innen).....	66
Tabelle 11: Solare und visuelle Transmissionswerte nach EN 410 für die Messkampagne Basacid® Schwarz X40 (Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung aus Messergebnissen NTB)	94
Tabelle 12: Solare und visuelle Transmissionswerte nach EN 410 für die Messkampagne Xfast® Schwarz 0050 (Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung aus Messergebnissen NTB).....	95
Tabelle 13: Fluidglasaufbau des Prototyps im Modellraumprüfstand an der TUM.....	99
Tabelle 14: Senkrechte Einstrahlung auf die Fluidglasfassade (Messwerte Pyranometer in W/m^2 ; Messung vom 13.04.2011).....	104
Tabelle 15: Senkrechte Einstrahlung im Innenraum hinter der Fluidglasfassade, beide Kreisläufe mit klarem Wasser gefüllt (Messwerte Pyranometer in W/m^2 ; Messung vom 18.04.2011).....	104
Tabelle 16: Senkrechte Einstrahlung im Innenraum hinter der Fluidglasfassade, beide Kreisläufe mit klarem Wasser gefüllt (Messwerte Pyranometer in W/m^2 . Messung vom 17.11.2011).....	105
Tabelle 17: Vergleich Einstrahlung und solare Transmission durch das Fluidglas ohne Einfärbung	105
Tabelle 18: Messergebnisse der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung und ohne Kühlung (Messung von 25.07.2011, 09:25 Uhr bis 26.07.2011, 14:35 Uhr)	107
Tabelle 19: Messergebnisse im stationären Bereich der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung, mit Kühlung F2 (Messung von 08.06.2011, 11:20 Uhr bis 9.06.2011, 11:15 Uhr)	108

Tabelle 20: Messergebnisse im stationären Bereich der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur mit Einfärbung F1 und Kühlung F2 (Messung von 03.08.2011, 14:45 Uhr bis 4.08.2011, 9:30 Uhr).....	109
Tabelle 21: Fünfachverglasungsaufbau LGGL (FGGF ohne Fluid)	115
Tabelle 22: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 von unbeschichteten Gläsern als Einfach- und Zweifachverglasung aus SSG PLANILUX® 8 mm bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell, Optics und Messwerte NTB	118
Tabelle 23: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 von unbeschichteten Einfachverglasungen SSG SSG DIAMANT® 6 mm bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Optics	118
Tabelle 24: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 von beschichteter Einfachverglasung aus SSG DIAMANT® 6 mm mit Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N auf Position 1 bzw. 2 bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics	120
Tabelle 25: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade nach EN 410 für den Verglasungsaufbau LGGL (FGGF ohne Fluid) aus SSG DIAMANT® 6 mm ohne bzw. mit Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N auf Position 4 bzw. 7 bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Optics	120
Tabelle 26: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade und solare Absorptionsgrade nach EN 410 einer Zweifachverglasung aus SSG PLANILUX® 8 mm mit klarem Wasser im 2 mm SZR bei senkrechter Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Messwerte NTB	126
Tabelle 27: Fluidglasaufbau FGGF	127
Tabelle 28: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade und solare Absorptionsgrade nach EN 410 der Verglasungsaufbauten FGGF mit klarem Wasser bzw. LGGL; 2 mm SZR Zone 3 und 9; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell	128
Tabelle 29: Aufstellung der maximalen Transmissionsunterschiede bei klarem und maximal eingefärbtem Fluid mit Xfast® Schwarz 0050 bei variierenden Fluidschichtdicken; Ausgabewerte Strahlungsmodell für senkrechte Einstrahlung nach EN 410.....	138
Tabelle 30: U-Wert Berechnungen nach DIN 673 der Verglasungsaufbauten des Prototypen Modellraumprüfstand ohne Fluidfüllung	139
Tabelle 31: Im Energiebilanzmodell berechnete U-Wert für das Fluidglas FGGF_Modellraumprüfstand.....	140
Tabelle 32: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade und solare Absorptionsgrade nach EN 410 des Verglasungsaufbaus „FGGF_Modellraumprüfstand“ mit klaren Fluiden in F1 und F2 im 2 mm SZR bei senkrechter Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell.....	140
Tabelle 33: FGGF_Modellraumprüfstand ohne Einfärbung mit Kühlung des inneren Fluids (F2); Vergleich Messergebnisse mit Berechnungen	141

Tabelle 34: FGGF_Modellraumprüfstand ohne Einfärbung mit Kühlung des inneren Fluids (F2); Anpassung Absorption F1 und 20% Rückreflexion aus dem Innenraum; Vergleich Messergebnisse mit Berechnungen.....	141
Tabelle 35: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade und solare Absorptionsgrade nach EN 410 des Verglasungsaufbaus „FGGF_Modellraumprüfstand“ mit 1% Basacid X40 eingefärbtem Fluid in F1 und klarem Fluid in F2 im 2 mm SZR bei senkrechter Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell	142
Tabelle 36: FGGF_Modellraumprüfstand mit 1% Basacid X40 eingefärbtem Fluid in F1 und klarem Fluid in F2; Vergleich Messergebnisse mit Berechnungen.....	142
Tabelle 37: FGGF_Modellraumprüfstand mit 1% Basacid X40 eingefärbtem Fluid in F1 und klarem Fluid in F2. Modifikation Absorption F1, Rückreflexion 20% und Windgeschwindigkeit 1,3 m/s; Vergleich Messergebnisse mit Berechnungen.....	143
Tabelle 38: Fluidglasaufbau FGGF	145
Tabelle 39: Kennwerte von Fluidglas mit 5-fach Aufbau, Weißglas, 2 mm Fluidschichten und Einfärbung xfast® Schwarz 0050.....	146
Tabelle 40: Variationen von Schaltzuständen des Fluidglases als Solarkollektor.....	156
Tabelle 41: Heizleistung von Fluidglas.....	159
Tabelle 42: Kühlleistung von Fluidglas.....	159
Tabelle 43: Fließgeschwindigkeiten und Reynoldszahlen in Abhängigkeit der Volumenströme im Fluidglaselement; SZR 0,002 m, Breite 1,05 m	172
Tabelle 44: Rohrdurchmesser von Kunststoffrohren nach DIN 8062 bzw. Herstellerangaben	173
Tabelle 45: Fließgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Volumenströme und Leitungsquerschnitte in den Rohrleitungen (fett gedruckte Zahlen entsprechen zu hohen Fließgeschwindigkeiten).....	173
Tabelle 46: Häufigkeiten der Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene innerhalb der Nutzungszeit; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	183
Tabelle 47: Häufigkeiten der Einfärbungskonzentrationen innerhalb der Nutzungszeit; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung	185
Tabelle 48: Häufigkeiten der Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene innerhalb der Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung	193
Tabelle 49: Häufigkeiten der Einfärbungskonzentrationen innerhalb der Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung	194
Tabelle 50: Häufigkeiten der Beleuchtungsstärken auf der Arbeitsebene innerhalb der Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung.....	201
Tabelle 51: Häufigkeiten der Einfärbungskonzentrationen innerhalb der Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	202
Tabelle 52: Spektrale Strahlungsverteilung D_λ der Normlichtart D65 gewichtet mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ nach EN 410 Tabelle 1 und die spektrale Verteilung der Globalstrahlung S_λ gewichtet mit dem Wellenlängenintervalle $\Delta\lambda$ nach EN 410 Tabelle 2	260

Tabelle 53: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierenden Transmissionsgraden der Verglasung bei klarem Himmel. Vollverglasung mit gleichen Transmissionsgraden je Fassadenelement	261
Tabelle 54: Beleuchtungsstärkeverlauf bei klarem Himmel mit unterschiedlichen Transmissionsgraden der Fassadenelemente	261
Tabelle 55: Einzelbüroraum mit Vollverglasung bei klarem Himmel. Fassadenelemente in drei übereinander liegenden Zonen und vereinfachtem Lichtlenkschwert.....	261
Tabelle 56: Einzelbüroraum mit Vollverglasung bei klarem Himmel. Fassadenelemente in zwei übereinander liegenden Zonen und vereinfachtem Lichtlenkschwert.....	261
Tabelle 57: Gegenüberstellung unterschiedlicher Fassadenvarianten. Beleuchtungsstärkeverlauf in Raummitte je Meter Raumtiefe mit variierten Transmissionsgraden	261
Tabelle 58: Gemessene, spektrale Transmission $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm der Messreihe Basacid® Schwarz X40 von der NTB (Quelle: eigene Darstellung aus Werte der NTB)	263
Tabelle 59: Gemessene, spektrale Transmission $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm der Messreihe Xfast® Schwarz 0050 von der NTB (Quelle: eigene Darstellung aus Werten der NTB)	265
Tabelle 60. Messergebnisse der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung und ohne Kühlung (Messung von 25.07.2011 09:25 Uhr bis 26.07.2011 14:25 Uhr)	266
Tabelle 61: Messergebnisse der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung, mit Kühlung F2 (Messung von 08.06.2011 11:20 Uhr bis 9.06.2011 11:15 Uhr)	267
Tabelle 62: Messergebnisse der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur mit Einfärbung F1 und Kühlung F2 (Messung von 03.08.2011 14:45 Uhr bis 4.08.2011 9:30 Uhr)	267
Tabelle 63: In EES und Optics berechnete, spektrale Transmissionsgrade $T(\lambda)$ und Reflexionsgrade $R(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm für SSG PLANILUX® 8 mm als Einfachverglasung (L_Optics bzw. L_EES) und Zweifachverglasung mit einem SZR von 2mm (LIL_Optics bzw. LIL_EES).....	269
Tabelle 64: In EES und Optics berechnete, spektrale Transmissionsgrade $T(\lambda)$ und Reflexionsgrade $R(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm für SSG DIAMANT® 6 mm ohne Beschichtung (D_EES bzw. D_Optics) und mit Wärmeschutzbeschichtung PLANITHERM® ULTRA N auf Position 1 (DT1_EES bzw. DT1_Optics) und Position2 (DT2_EES bzw. DT2_Optics).....	271
Tabelle 65: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 der unbeschichteten Einfachverglasungen SSG DIAMANT® 6 mm bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Window	272
Tabelle 66: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 der beschichteten Einfachverglasung SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos.1) bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Window	273

Tabelle 67: Direkte, solare Transmissions- und Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 von beschichteten Einfachverglasungen SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos.2) bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Window ...	274
Tabelle 68: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 der Fünfachverglasung LGGL (FGGF ohne Fluid) aus SSG DIAMANT® 6 mm ohne bzw. mit Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N auf Position 4 bzw. 7 bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Window.....	275
Tabelle 69: Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach EN 410 bei senkrechter Einstrahlung für den Aufbau FGGF mit Einfärbung im äußeren Fluid (F1) mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen; Fluidschichten jeweils 2 mm dick.....	275
Tabelle 70: Spektrale Transmissionsgrade $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F1 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF	277
Tabelle 71: Spektrale Reflexionsgrade $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F1 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF	278
Tabelle 72: Spektrale Absorptionsgrade der äußeren Fluidschicht $Abs_{Z3}(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F1 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF	280
Tabelle 73: Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach EN 410 bei senkrechter Einstrahlung für den Aufbau FGGF mit Einfärbung im äußeren Fluid (F2) mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen; Fluidschichten jeweils 2 mm dick.....	280
Tabelle 74: Spektrale Transmissionsgrade $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F2 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF	282
Tabelle 75: Spektrale Reflexionsgrade $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F2 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF	284
Tabelle 76: Spektrale Absorptionsgrade der äußeren Fluidschicht $Abs_{Z3}(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F2 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF	285
Tabelle 77: Visuelle Transmissionsgrade bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F2; Ausgabe Strahlungsmodell	286
Tabelle 78: Solare Transmissionsgrade bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F2; Ausgabe Strahlungsmodell.....	286
Tabelle 79: Solare Absorptionsgrade von Fluid 1 (Z3) bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im	

äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F1; Ausgabe Strahlungsmodell.....	286
Tabelle 80: Visuelle Transmissionsgrade bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im inneren Fluid (F2) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F1; Ausgabe Strahlungsmodell	287
Tabelle 81: Solare Transmissionsgrade bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im inneren Fluid (F2) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F1; Ausgabe Strahlungsmodell	287
Tabelle 82: Solare Absorptionsgrade von Fluid 1 (Z3) bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im im inneren Fluid (F2) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F1; Ausgabe Strahlungsmodell.....	287
Tabelle 83: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade und solare Absorptionsgrade nach EN 410; Verglasungsaufbau Prototyp im Modellraumprüfstand ohne Fluidfüllung („LGGL_Modellraumprüfstand“); senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell.....	288
Tabelle 84: Wirkungsgrade der Solarkollektorfunktion Fluidglas Variante 1 (EN 673) mit F1 und F2 klar; $T_{Z9} = T_{Z11}$; $\eta_0 = 0,312$; äußere und innere Wärmeübergangskoeffizienten nach EN 673.....	290
Tabelle 85: Wirkungsgrade der Solarkollektorfunktion Fluidglas Variante 2 (EN 673) mit F1 max. eingefärbt (3% Xfast); F2 klar; $T_{Z9} = T_{Z11}$; $\eta_0 = 0,897$; äußere und innere Wärmeübergangskoeffizienten nach EN 673.....	290
Tabelle 86: Wirkungsgrade der Solarkollektorfunktion Fluidglas Variante 2 (1 m/s) mit F1 max. eingefärbt (3% Xfast); F2 klar; $T_{Z9} = T_{Z11}$; $\eta_0 = 0,897$; äußere und innere Wärmeübergangskoeffizienten berechnet; Windgeschwindigkeit außen 10 m/s.....	291
Tabelle 87: Wirkungsgrade der Solarkollektorfunktion Fluidglas Variante 2 (10m/s) mit F1 max. eingefärbt (3% Xfast); F2 klar; $T_{Z9} = T_{Z11}$; $\eta_0 = 0,897$; äußere und innere Wärmeübergangskoeffizienten berechnet; Windgeschwindigkeit außen 10 m/s.....	291
Tabelle 88: Wirkungsgrade der Solarkollektorfunktion Fluidglas Variante 3; F1 klar, F2 max. eingefärbt; $T_{Z9} = T_{Z11}$; $\eta_0 = 0,724$; äußere und innere Wärmeübergangskoeffizienten nach EN 673.....	292
Tabelle 89: Wärmeströme zwischen den Zonen für 1m ² FGGF; Moskau, München und Riad; Ergebnisse aus EES-Fluidglasmodell	292
Tabelle 90: Verlustbeiwerte der Fluidglassystemkomponenten.....	293
Tabelle 91: Fluidkennwerte für Berechnungen des Pumpenstrombedarfs (Quelle Wasser: (Idelchik, 1986, S. 9). Quelle Wasser/Propylenglycol: Berechnungen NTB)	294
Tabelle 92: Ergebnisse Druckverluste und Pumpenstrombedarf Fluidglas; Rohrleitungen Innendurchmesser 10 mm (Variante 1).....	295

Tabelle 93: Ergebnisse Druckverluste und Pumpenstrombedarf Fluidglas; Rohrleitungen Innendurchmesser 10 mm (gemäß Variante 1); Fluid aus 70% Wasser, 30% Propylenglycol	296
Tabelle 94: Ergebnisse Druckverluste und Pumpenstrombedarf; Rohrleitungen Innendurchmesser Verteilleitung 36,8 mm, Anbindeleitung 13,6 mm (Variante 2)	297
Tabelle 95: Vorlauftemperaturen je Standort in den thermischen Simulationen für das äußere Fluid (T_F1_in) und das innere Fluid (T_F2_in)	301
Tabelle 96: Thermischer Komfort in der Heizperiode; Nutzungszeit; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung	304
Tabelle 97: Thermischer Komfort in der Kühlperiode; Nutzungszeit; Moskau; Einzelbüro; Nord-, Süd- und Westorientierung	304
Tabelle 98: Thermischer Komfort in der Heizperiode; Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung	309
Tabelle 99: Thermischer Komfort in der Kühlperiode; Nutzungszeit; München; Einzelbüro; Nord-, Süd- und Westorientierung	309
Tabelle 100: Thermischer Komfort in der Heiz- und Kühlperiode; Nutzungszeit; München; Südorientierung; Massenströme F1 und F2 1l/min·m	313
Tabelle 101: Thermischer Komfort in der Heizperiode; Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	314
Tabelle 102: Thermischer Komfort in der Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad; Einzelbüro; Nord-, Süd- und Westorientierung	314
Tabelle 103: Thermischer Komfort in der Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad; F1 1 l/min·m, F2 3 l/min·m, T_F1_ein = 35°C; Einzelbüro; Nord-, Süd- und Westorientierung	317
Tabelle 104: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung	318
Tabelle 105: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im inneren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung	319
Tabelle 106: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im inneren und äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung	320
Tabelle 107: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Vorlauftemperaturen im äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung	320
Tabelle 108: Maximale Temperaturdifferenzen (ΔT_{F1} (aus - ein)) zwischen Ein- (T_F1_ein) und Auslasstemperatur (T_F1_aus) des äußeren Fluids (F1); Moskau, München und Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	321
Tabelle 109: Energiegewinne und Energiebedarf eines Einzelbüroriums mit Fluidglasfassade bezogen auf 17,5 m ² Nutzfläche bzw. 10,5 m ² Fluidglasfassade; Moskau, München und Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung	322

Sofern nicht anders angegeben, handelt es sich bei allen Tabellen um eigene Darstellungen und Berechnungen.

14 Abkürzungsverzeichnis

U _w -Wert	Wärmedurchgangskoeffizient in W/m ² K für das gesamte Fenster, d.h. U _g -Wert der Verglasung und U _f -Wert des Fensterrahmens
T _{vis}	Visuelle Transmission. Anteil der durchgelassenen Strahlung im visuellen Wellenlängenspektrum zw. 380 und 780 nm
T _{sol}	Solare Transmission. Anteil der durchgelassenen Strahlung im solaren Wellenlängenspektrum zw. 300 und 2500 nm
R _{vis}	Visuelle Reflexion. Anteil der reflektierten Strahlung im visuellen Wellenlängenspektrum zw. 380 und 780 nm
R _{sol}	Solare Reflexion. Anteil der reflektierten Strahlung im solaren Wellenlängenspektrum zw. 300 und 2500 nm
SZR	Scheibenzwischenraum. Zwischenraum zwischen zwei Glasscheiben mit Luft, Gas oder Fluid gefüllt.
IGDB	International Glazing Database des Lawrence Berkeley National Laboratory (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016a)
NTB	NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Schweiz
CEA-INES	CEA- INES Commissariat à l'énergie atomique, Institut National de l'Energie Solaire

Einfärbungen:

Basacid	Farbstoff Basacid® Schwarz X40 liquid von BASF SE (BASF Corporation, 2015a).
Xfast	Eisen-II-/Eisen-III-Oxid Pigmente Xfast® Schwarz 0050 von BASF SE (BASF Corporation, 2015b)

Verglasungsaufbauten:

Generell sind die Verglasungsaufbauten immer von außen nach innen angegeben.

Zusätze bei den Angaben zum Verglasungsaufbau weisen auf die Software mit der die Berechnungen durchgeführt bzw. auf die Institution an der die jeweiligen Messungen durchgeführt wurden hin:

_EES	Berechnungsergebnisse aus der Software EES
_Optics	Berechnungsergebnisse aus der Software Optics
_Window	Berechnungsergebnisse aus der Software Window
_NTB	Messergebnisse aus den Messungen an der NTB

Messkampagne Basacid® Schwarz X40:

L	Einfachverglasung aus SSG PLANILUX® 8 mm
---	--

LIL	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm Luft im SZR.
LwL	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm destilliertem Wasser im SZR.
LwL	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm destilliertem Wasser im SZR.
LwL_EES_NTB	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm destilliertem Wasser im SZR. Berechnung in EES aus den Transmissionsmessergebnissen an der NTB.
LwL_EES_Hale	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm destilliertem Wasser im SZR. Berechnung in EES mit den Literaturwerten spektrale Brechungsindizes $n(\lambda)$ und Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ von Wasser nach Hale et al.
Lb0.1%L	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm destilliertem Wasser mit 0,1% vol. Basacid® Schwarz X40 eingefärbt im SZR.
Lb1%L	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANILUX® 8 mm und 2 mm destilliertem Wasser mit 1% vol. Basacid® Schwarz X40 eingefärbt im SZR.

Messkampagne Xfast® Schwarz 0050:

KwK	Küvette gefüllt mit klarem, destilliertem Wasser, Schichtdicke 2 mm.
Kxf1%K	Küvette gefüllt mit 1% vol. Xfast eingefärbtem, destilliertem Wasser, Schichtdicke 2 mm.
Kxf2%K	Küvette gefüllt mit 2% vol. Xfast eingefärbtem, destilliertem Wasser, Schichtdicke 2 mm.
Kxf3%K	Küvette gefüllt mit 3% vol. Xfast eingefärbtem, destilliertem Wasser, Schichtdicke 2 mm.

Messkampagne und Validierung Modellraumprüfstand TUM:

TL2kLkTL5	Zweifachverglasung aus zweimal SSG PLANITHERM® ONE auf SSG PLANILUX® 6 mm (Pos. 2 und 5) und einmal SSG PLANILUX® 6 mm mit zweimal 16 mm Kryptonfüllung.
LITL4kLkTL7IL bzw. LGGL_Modellraumprüfstand	Fünffachverglasung aus zweimal SSG PLANITHERM® ONE auf SSG PLANILUX® 6 mm (Pos. 4 und 7) und dreimal SSG PLANILUX® 6 mm mit zweimal 16 mm Kryptonfüllung und zweimal 2 mm Luftfüllung.
LwTL4kLkTL7wL bzw. FGGF_Modellraumprüfstand	Fünffachverglasung aus zweimal SSG PLANITHERM® ONE auf SSG PLANILUX® 6 mm (Pos. 4 und 7) und dreimal SSG PLANILUX® 6 mm mit zweimal 16 mm Kryptonfüllung und zweimal 2 mm klarem Wasser gefüllt.
Lb1%TL4kLkTL7wL bzw. FGGF_Modellraumprüfstand mit Einfärbung	

Fünffachverglasung aus zweimal SSG PLANITHERM® ONE auf SSG PLANILUX® 6 mm (Pos. 4 und 7) und dreimal SSG PLANILUX® 6 mm mit zweimal 16 mm Kryptonfüllung. Äußerster 2mm SZR mit Wasser mit 1% vol. Basacid eingefärbt und innerster 2 mm SZR mit klarem Wasser gefüllt.

Validierung Strahlungsmodell:

$T(\lambda)_{\text{NTB}}$ Spektraler Transmissionsgrad gemessen an der NTB

$T(\lambda)_{\text{EES_kNTB}}$

Spektraler Transmissionsgrad im Strahlungsmodell berechnet mit aus den Transmissionsmessungen an der NTB ermittelten Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ und Literaturwerten für Brechungsindizes $n(\lambda)$ nach Hale et al.

$T(\lambda)_{\text{EES_kNTB}}$

Spektraler Reflexionsgrad nach außen im Strahlungsmodell berechnet mit aus den Transmissionsmessungen an der NTB ermittelten Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ und Literaturwerten für Brechungsindizes $n(\lambda)$ nach Hale et al.

$T(\lambda)_{\text{EES_kHale}}$

Spektraler Transmissionsgrad im Strahlungsmodell berechnet mit Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ und Brechungsindizes $n(\lambda)$ nach Hale et al.

$R(\lambda)_{\text{EES_kHale}}$

Spektraler Reflexionsgrad nach außen im Strahlungsmodell berechnet mit Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ und Brechungsindizes $n(\lambda)$ nach Hale et al.

$\text{Abs}(\lambda)_{\text{total_EES_kHale}}$

Spektraler, totaler Absorptionsgrad des Gesamtaufbaus im Strahlungsmodell berechnet mit Extinktionskoeffizienten $k(\lambda)$ und Brechungsindizes $n(\lambda)$ nach Hale et al.

Simulationen der Verglasungsaufbauten Fluidglas:

D Einfachverglasung aus SSG DIAMANT® 6 mm

DID Zweifachverglasung aus zweimal SSG DIAMANT® 6 mm und 2 mm Luft im SZR

DwD Zweifachverglasung aus zweimal SSG DIAMANT® 6 mm und 2 mm destilliertem Wasser im SZR

Dxf1%D Zweifachverglasung aus zweimal SSG DIAMANT® 6 mm und 2 mm destilliertem Wasser mit 1% vol. Xfast®Schwarz 0050 eingefärbt im SZR

Dxf2%D Zweifachverglasung aus zweimal SSG DIAMANT® 6 mm und 2 mm destilliertem Wasser mit 2% vol. Xfast®Schwarz 0050 eingefärbt im SZR

Dxf3%D Zweifachverglasung aus zweimal SSG DIAMANT® 6 mm und 2 mm destilliertem Wasser mit 3% vol. Xfast®Schwarz 0050 eingefärbt im SZR

DT1 Einfachverglasung aus PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6mm (Beschichtung auf Pos. 1)

DT2	Einfachverglasung aus PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6mm (Beschichtung auf Pos. 2)
DT2kDkDT5	Dreifachverglasung bestehend aus: PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6mm (Beschichtung auf Pos. 2), SZR 12 mm Krypton 100%, SSG DIAMANT® 6 mm, SZR 12 mm Krypton 100%, PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6mm (Beschichtung auf Pos. 5)
LGGL (wie FGGF, jedoch ohne Fluid)	Fünffachverglasung bestehend aus: SSG DIAMANT® 6 mm SZR 2mm mit Luft SSG PLANITHERM ULTRA N DIAMANT® (Pos. 4) 6 mm SZR 12 mm mit Krypton-Gasfüllung (100%) SSG DIAMANT® 6 mm SZR 12 mm mit Krypton-Gasfüllung (100%) SSG PLANITHERM ULTRA N DIAMANT® (Pos. 7) 6 mm SZR 2mm mit Luft SSG DIAMANT® 6 mm
FGGF	Fluidglasaufbau mit zwei Fluidschichten und zwei Gasschichten, bestehend aus: SSG DIAMANT® 6 mm, SZR 2 mm mit Fluid (reversibel einfärbbar), PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6mm (Beschichtung auf Pos. 4), SZR 12 mm Krypton 100%, SSG DIAMANT® 6 mm, SZR 12 mm Krypton 100%, PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6mm (Beschichtung auf Pos. 7), SZR 2 mm mit Fluid (reversibel einfärbbar), SSG DIAMANT® 6 mm
FGF	Fluidglasaufbau mit zwei Fluidschichten und einer Gasschicht, bestehend aus: SSG DIAMANT® 6 mm, SZR 2 mm mit Fluid (reversibel einfärbbar), PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6mm (Beschichtung auf Pos. 4), SZR 12 mm Krypton 100%, PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6mm (Beschichtung auf Pos. 5), SZR 2 mm mit Fluid (reversibel einfärbbar), SSG DIAMANT® 6 mm

Formelzeichen sind bei den jeweiligen Formeln erläutert.

15 Glossar

Allgemein

Beschichtungen	Auf Basisgläser aufgebrachte Beschichtungen. Die Beschichtungen können unterschiedlichste Funktionen erfüllen, z.B. zum Wärme- oder Sonnenschutz.
Ein- und Auslass	Mit „Einlass“ wird der Zulauf des Fluids in den flüssigkeitsführenden Scheibenzwischenraum des Fluidglases bezeichnet. Die „Einlasstemperatur“ ist die Eintrittstemperatur des Fluids in das Fluidglaselement. Die „Einlasstemperatur“ wird auch synonym als „Vorlauftemperatur“ bezeichnet. Analog dazu entspricht der „Auslass“ dem Austritt des Fluids aus dem flüssigkeitsführenden Scheibenzwischenraum des Fluidglases. Die „Auslasstemperatur“ ist dementsprechend die Austrittstemperatur des Fluids aus dem Fluidglaselement. Die „Auslasstemperatur“ wird auch synonym als „Rücklauftemperatur“ bezeichnet.
Energiebilanzmodell	In EES erstelltes Simulationsmodell zur Berechnung der Energiebilanz des Fluidglasaufbaus mit seiner Umgebung, d.h. mit dem Außen- bzw. dem Innenraum.
Enthalpie	(griechisch: Erwärmung) „Die Enthalpie ist eine Zustandsgröße, die den Energieinhalt eines Stoffstromes kennzeichnet und als Summe aus Innere Energie und dem Produkt aus Druck und Volumen definiert“ (Langeheinecke et al., 2008, S. 103). Im Fluidglasfall sollte das Fluid nur im flüssigen Zustand sein, d.h. ein Einphasengebiet.
Fluid	In den SZR der untersuchten flüssigkeitsdurchströmten Gläser eingeführte Flüssigkeit. Im Rahmen der Arbeit ist dies destilliertes Wasser mit oder ohne zusätzliche Einfärbung. Die Einfärbung erfolgt entweder mittels Farbstoffen oder Partikeln. Weitere voraussichtlich benötigte Additive, z.B. Frostschutzmittel oder Biozide, werden in der Arbeit nicht berücksichtigt, es sein denn, es wird explizit darauf hingewiesen.
Grenzfläche	Allgemeine Bezeichnung einer Fläche zwischen zwei unterschiedlichen Stoffschichten im Fluidglasaufbau. Beim Fluidglas sind dies immer Glasflächen, mit oder ohne Beschichtung, die entweder an Luft, Edelgas oder Fluid grenzen.
Low-E-Beschichtung	Low-Emissivity-Beschichtungen auf Gläsern zur Minimierung der Wärmeabstrahlung und zur Erhöhung der Reflexion von

	langwelliger Infrarotstrahlung. Zu diesem Zweck werden Gläser mit ca. 100 nm dünnen Edelmetall-Beschichtung versehen. Im Gegensatz zu unbeschichteten Gläsern mit einer Emissivität von ca. 84 % kann diese bei Low-E-Gläser auf bis zu 1% reduziert werden (Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH, 2006).
Scheibenzwischenraum	Zwischenraum zwischen zwei Glasscheiben innerhalb einer Mehrfachverglasung. Der Scheibenzwischenraum (SZR) ist bei Wärme- bzw. Sonnenschutzverglasungen mit Edelgas gefüllt. Beim Fluidglas sind zusätzlich Zwischenräume mit klarem oder eingefärbtem Wasser gefüllt.
Stoffschicht/Zone	Allgemeine Bezeichnung einer Schicht im Fluidglasaufbau. Die erste Stoffschicht ist immer die außen an das Fluidglaselement angrenzende Außenluft, die zweite Stoffschicht die äußerste Glasscheibe. Weitere Stoffschichten sind je nach Aufbau Fluide, Edelgase und Gläser. In der Modellierung werden Stoffschichten auch mit „Zonen“ bezeichnet.
Strahlungsmodell	In EES erstelltes Simulationsmodell zur Berechnung des Durchgangs der elektromagnetischen Strahlung - der Solarstrahlung - durch den Fluidglasaufbau.
Substrat	Monolithische Floatgläser als Basisgläser für aufzubringende Beschichtungen.
Weißglas	Extra klares, transparentes, monolithisches Floatglas mit sehr geringem Eisenoxidanteil, z.B. SSG DIAMANT®.
Verglasungen	
Einfachverglasung	Verglasung aus einer Glasscheibe
Zweifachverglasung	Verglasung aus zwei Glasscheiben mit einem Scheibenzwischenraum
Dreifachverglasung	Verglasung aus drei Glasscheiben mit zwei Scheibenzwischenräumen
Vierfachverglasung	Verglasung aus vier Glasscheiben mit drei Scheibenzwischenräumen
Fünffachverglasung	Verglasung aus fünf Glasscheiben mit vier Scheibenzwischenräumen
Produktbezeichnungen	
SSG	Saint-Gobain Glass. Im Rahmen der Arbeit werden exemplarisch Gläser von Saint-Gobain Glass verwendet und untersucht, da diese Gläser für Prototypen zur Verfügung

standen. Die Eigenschaften der untersuchten Gläser sind jedoch mit Gläsern anderer Hersteller vergleichbar.

SSG PLANILUX®

Klares, transparentes, monolithisches Floatglas von Saint-Gobain Glass. Es ist ein Alkali-Kalk-Hartglas. Es wird als Basisglas für die weitere Verarbeitung verwendet, z.B. für Low-E-Gläser (Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH, 2006). Die Fluidglas-Prototypen sind aus SSG PLANILUX®, wenn nicht anders angegeben.

SSG PLANICLEAR®

Seit September 2014 von Saint-Gobain Glass neu eingeführtes Basisglas als Ersatz für das SSG PLANILUX®. Aufgrund seines geringeren Eisengehalts hat es höhere Licht- und Energietransmissionswerte und geringere Energieabsorptionswerte als SSG PLANILUX®. (Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH, 2014b)

SSG DIAMANT®

Extra klares, transparentes, monolithisches Floatglas. Herstellungsverfahren gemäß SSG PLANILUX®, jedoch mit sehr geringem Eisenoxidanteil. Es hat noch höhere Licht- und Energietransmissionswerte und noch geringere Energieabsorptionswerte als SSG PLANICLEAR®. Es dient ebenfalls als Basisglas. (Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH, 2014a)

SSG PLANITHERM®

Produktpalette beschichteter Gläser - Low-E-Gläser - von Saint-Gobain Glass (Saint-Gobain Glass Deutschland GmbH) für Wärmeschutzverglasungen. Für die Fluidglas-Simulationen wird SSG DIAMANT® als Basisglas verwendet, wenn nicht anders angegeben.

16 Anhang

16.1 Foto Fluidglasprototyp



Abbildung 138: Fluidglasprototypen mit eingefärbtem Fluid; Blick von innen nach außen; Nicosia, 4.07.2017; EU-Projekt „FLUIDGLASS“

16.2 Spektrale Strahlungsverteilung im Strahlungsmodell

Aufstellung der gewählten Wellenlängenschritte für die Modellierung im Strahlungsmodell und deren Gewichtung gemäß EN 410 für die visuelle bzw. solare Transmission, Reflexion und Absorption. Die spektrale Strahlungsverteilung D_λ der Normlichtart D65 gewichtet mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ nach EN 410 Tabelle 1 und die spektrale Verteilung der Globalstrahlung S_λ gewichtet mit dem Wellenlängenintervalle $\Delta\lambda$ nach EN 410 Tabelle 2.

Wellenlänge [nm]	Gewichtung $S_{\Delta\lambda}$ [-]	Gewichtung $D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda * 10^2$ [-]	Wellenlänge [nm]	Gewichtung $S_{\Delta\lambda}$ [-]	Gewichtung $D_{\lambda} V(\lambda) \Delta\lambda * 10^2$ [-]
300	0,0005		660	0,0273	0,4612
305			670		0,2485
310			680	0,0246	0,1255
315			690		0,0536
320	0,0069		700	0,0237	0,0276
325			710		0,0146
330			720	0,022	0,0057
335			730		0,0035
340	0,0122		740	0,023	0,0021
345			750		0,0008
350			760	0,0199	0,0001
355			770		0,0000
360	0,0145		780	0,0211	0,0000
365			800	0,0330	
370	0,0177		850	0,0453	
375			900	0,0381	
380		0,0000	950	0,0220	
390		0,0005	1000	0,0329	
400	0,0235	0,0030	1050	0,0306	
410		0,0103	1100	0,0185	
420	0,0268	0,0352	1150	0,0136	
430		0,0948	1200	0,0210	
440	0,0294	0,2274	1250	0,0211	
450		0,4192	1300	0,0166	
460	0,0343	0,6663	1350	0,0042	
470		0,9850	1400	0,0010	
480	0,0339	1,5189	1450	0,0044	
490		2,1336	1500	0,0095	
500	0,0326	3,3491	1550	0,0123	
510		5,1393	1600	0,0110	
520	0,0316	7,0523	1650	0,0106	
530		8,7990	1700	0,0093	
540	0,0321	9,4427	1750	0,0068	
550		9,8077	1800	0,0024	
560	0,0312	9,4306	1850	0,0005	
570		8,6891	1900	0,0002	
580	0,0294	7,8994	1950	0,0012	
590		6,3306	2000	0,0030	
600	0,0289	5,3542	2050	0,0037	
610		4,2491	2100	0,0057	
620	0,0289	3,1502	2200	0,0066	
630		2,0812	2300	0,0060	
640	0,028	1,3810	2400	0,0041	
650		0,8070	2500	0,0006	

Tabelle 52: Spektrale Strahlungsverteilung D_{λ} der Normlichtart D65 gewichtet mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ nach EN 410 Tabelle 1 und die spektrale Verteilung der Globalstrahlung S_{λ} gewichtet mit dem Wellenlängenintervalle $\Delta\lambda$ nach EN 410 Tabelle 2

16.3 Simulationsergebnisse Systemkonzept Fluidglas

T_{vis} [%]	Beleuchtungsstärke [lx] je Raumtiefe [m]					
	0	1	2	3	4	5
70	39143	38542	36694	3840	2769	1335
54	30357	29910	28395	3007	2160	1043
47	26448	26040	24678	2567	1832	886
38	21407	21058	19921	2033	1440	699
16	8765	8487	8068	607	419	206
7	3785	3631	3451	197	128	62
5	2710	2595	2466	141	92	44
3	1634	1559	1480	85	55	27
1	558	523	494	28	18	9

Tabelle 53: Beleuchtungsstärkeverlauf bei variierenden Transmissionsgraden der Verglasung bei klarem Himmel. Vollverglasung mit gleichen Transmissionsgraden je Fassadenelement

T_{vis}	Beleuchtungsstärke [lx] je Raumtiefe [m]					
	0	1	2	3	4	5
2 x 5%, 1 x 70%	3565	4106	3849	1189	875	430
2 x 5%, 1 x 38%	3064	3253	3081	607	439	217
2 x 5%, 1 x 16%	2767	2729	2592	229	154	75

Tabelle 54: Beleuchtungsstärkeverlauf bei klarem Himmel mit unterschiedlichen Transmissionsgraden der Fassadenelemente

T_{vis}	Beleuchtungsstärke [lx] je Raumtiefe [m]					
	0	1	2	3	4	5
BR 0%, AB 5%, TL 70%	291	3087	1416	1065	699	355
BR 0%, AB 5%, TL 38%	184	2641	745	556	367	190
R 0%, AB 5%, TL 16%	104	2258	186	156	112	59

Tabelle 55: Einzelbüroraum mit Vollverglasung bei klarem Himmel. Fassadenelemente in drei übereinander liegenden Zonen und vereinfachtem Lichtlenkschwert

T_{vis}	Beleuchtungsstärke [lx] je Raumtiefe [m]					
	0	1	2	3	4	5
BR/AB 2 x 5%, 1 x 70%, TL 70%	3422	4429	2568	1768	1227	613
BR/AB 2 x 5%, 1 x 38%, TL 70%	3057	3801	1972	1348	930	468
BR/AB 2 x 5%, 1 x 16%, TL 70%	2819	3440	1667	1118	755	383

Tabelle 56: Einzelbüroraum mit Vollverglasung bei klarem Himmel. Fassadenelemente in zwei übereinander liegenden Zonen und vereinfachtem Lichtlenkschwert

T_{vis}	Beleuchtungsstärke [lx] je Raumtiefe [m]					
	0	1	2	3	4	5
Eine Funktionszone (T_{vis} 3 x 7%)	3785	3631	3451	197	128	62
Eine Funktionszone (T_{vis} 2 x 5%, 1 x 70%)	3565	4106	3849	1189	875	430
Drei Funktionszonen (T_{vis} BR 0%; AB 5%; TL 70%)	291	3087	1416	1065	699	355
Zwei Funktionszonen (T_{vis} BR/AB 2 x 5%, 1 x 70%; TL 70%)	3422	4429	2568	1768	1227	613

Tabelle 57: Gegenüberstellung unterschiedlicher Fassadenvarianten. Beleuchtungsstärkeverlauf in Raummitte je Meter Raumtiefe mit variierten Transmissionsgraden

16.4 Messergebnisse Spektrometermessungen

Messkampagne Basacid® Schwarz X40

Wellenlänge λ	Spektrale Transmission T(λ) im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm				
	L_NTB	LIL_NTB	LwL_NTB	Lb0,1%L_NTB	L1%L_NTB
[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
300	0	0	0	0	0
305	0	0	0	0	0
310	0,00019	0	0	0	0
315	0,00382	0	0	0	0
320	0,02369	0,000439	0,000478	0,00000001	0
325	0,08260	0,006179	0,00679023	0,00015655	0
330	0,19013	0,033633	0,037063	0,001393	0
335	0,33129	0,103829	0,11383222	0,00514116	0
340	0,47475	0,216500	0,23607	0,012831	0
345	0,59944	0,348357	0,37847958	0,02339146	0
350	0,69436	0,471380	0,51053	0,033161	0
355	0,76287	0,572051	0,61781978	0,0397359	0
360	0,80882	0,645240	0,69544	0,043619	0
365	0,83688	0,693356	0,74668259	0,0461994	0
370	0,84899	0,715390	0,76945	0,048409	0
375	0,84083	0,703473	0,75561966	0,04941581	0
380	0,83071	0,684580	0,73631	0,051035	0
390	0,86713	0,748490	0,80363	0,062875	0
400	0,88605	0,782100	0,83878	0,072339	0
410	0,88518	0,780280	0,83695	0,077189	0
420	0,88186	0,774080	0,82995	0,080537	0
430	0,88107	0,773490	0,82954	0,083854	0
440	0,87997	0,772770	0,82713	0,087299	0
450	0,88545	0,781050	0,83677	0,092656	0
460	0,89096	0,791960	0,84749	0,099724	0
470	0,89401	0,798620	0,85483	0,10724	0
480	0,89594	0,803240	0,85868	0,11273	0
490	0,89829	0,806430	0,8627	0,1141	0
500	0,90012	0,809540	0,86554	0,10854	0
510	0,90096	0,811790	0,86805	0,094878	0
520	0,90064	0,812610	0,86754	0,077271	0
530	0,89996	0,810590	0,86579	0,061507	0
540	0,89886	0,808830	0,86334	0,050186	0
550	0,89627	0,805150	0,85998	0,042213	0
560	0,89387	0,801030	0,85406	0,036836	0
570	0,89033	0,794940	0,84793	0,034946	0
580	0,88622	0,787940	0,8395	0,036856	0
590	0,88086	0,779100	0,83108	0,042714	0
600	0,87614	0,770580	0,8214	0,052049	0
610	0,87038	0,760770	0,8114	0,064314	0
620	0,86424	0,750880	0,79995	0,079263	0
630	0,85741	0,739560	0,78873	0,099067	0
640	0,85144	0,729520	0,77781	0,1308	0
650	0,84565	0,719170	0,76714	0,18697	0
660	0,83862	0,708980	0,75619	0,27531	0
670	0,83275	0,698550	0,74545	0,38606	0,000132
680	0,82605	0,687730	0,73418	0,49016	0,003616
690	0,81831	0,675230	0,72088	0,56494	0,029585

700	0,81057	0,663940	0,70869	0,60695	0,10828
710	0,80408	0,652240	0,69606	0,62517	0,21566
720	0,79619	0,640730	0,6834	0,62723	0,30152
730	0,78884	0,628470	0,6691	0,62216	0,35096
740	0,78071	0,617070	0,65612	0,6129	0,37481
750	0,77358	0,605130	0,64341	0,60366	0,38533
760	0,76577	0,594040	0,63119	0,59274	0,38785
770	0,75893	0,582500	0,61919	0,58257	0,38345
780	0,75017	0,571850	0,60832	0,57019	0,3742
800	0,73685	0,551800	0,58705	0,5486	0,35094
850	0,70947	0,510650	0,54152	0,50977	0,3327
900	0,69354	0,488390	0,51553	0,47812	0,30401
950	0,67657	0,467780	0,47157	0,44922	0,31585
1000	0,67045	0,457540	0,45131	0,43469	0,33469
1050	0,66596	0,454090	0,47028	0,4552	0,36916
1100	0,66689	0,454440	0,46811	0,45864	0,40332
1150	0,66927	0,457470	0,39792	0,39397	0,37905
1200	0,67426	0,464620	0,3826	0,37912	0,37905
1250	0,68241	0,475540	0,40623	0,40335	0,404405
1300	0,69367	0,490610	0,39815	0,39697	0,398025
1350	0,70747	0,512020	0,27989	0,28003	0,28098
1400	0,73087	0,536220	0,021566	0,022053	0,0216065
1450	0,73942	0,557310	0,002272	0,002114	0,002315
1500	0,75934	0,583390	0,008343	0,008647	0,0086175
1550	0,77079	0,604110	0,061857	0,05921	0,0605795
1600	0,78248	0,619310	0,14232	0,14066	0,141605
1650	0,78802	0,627820	0,19573	0,19335	0,194455
1700	0,78949	0,629710	0,20391	0,20312	0,204325
1750	0,78928	0,629200	0,14663	0,14549	0,14628
1800	0,78522	0,624540	0,10201	0,10247	0,10211
1850	0,78002	0,618480	0,060425	0,061066	0,061039
1900	0,77802	0,613770	0	0	0,00000001
1950	0,77891	0,613800	0	0	0,000097
2000	0,77757	0,611200	0	0,001388	0,000684
2050	0,7782	0,612080	0,000297	0,000299	0,000264
2100	0,77928	0,613190	0,00158	0,001669	0,0023125
2200	0,74597	0,560510	0,011064	0,010936	0,0113635
2300	0,75525	0,576860	0,003275	0,00406	0,0036175
2400	0,75575	0,576170	0	0,000159	0,000415
2500	0,72322	0,528730	0,000336	0	0

Tabelle 58: Gemessene, spektrale Transmission $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm der Messreihe Basacid® Schwarz X40 von der NTB (Quelle: eigene Darstellung aus Werte der NTB)¹⁵³

¹⁵³ Anmerkungen: Angaben in den Zeilen mit regulär gedruckten Wellenlängen entsprechen den Messergebnissen. Angaben mit fett gedruckten Wellenlängen sind kubische Interpolationen. Bei Eintrag „0“ wurden negative Messergebnisse auf null Transmission korrigiert.

Messergebnisse Messkampagne Xfast® Schwarz 0050

Wellenlänge λ	Spektrale Transmission T(λ) im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm			
	KwK_NTB	Kxf1%K_NTB	Kxf2%K_NTB	Kxf3%K_NTB
[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]
300	0,7878	0,3614	0,0967	0,0298
305	0,8255	0,3815	0,1045	0,0386
310	0,8501	0,3968	0,1108	0,0485
315	0,8664	0,4064	0,1145	0,0562
320	0,8759	0,4137	0,1166	0,0630
325	0,8846	0,4199	0,1201	0,0675
330	0,8855	0,4217	0,1194	0,0717
335	0,8910	0,4258	0,1209	0,0746
340	0,8981	0,4264	0,1218	0,0764
345	0,8955	0,4280	0,1210	0,0774
350	0,8988	0,4311	0,1244	0,0913
355	0,8992	0,4306	0,1238	0,0915
360	0,8996	0,4304	0,1232	0,0922
365	0,9010	0,4295	0,1224	0,0925
370	0,8994	0,4283	0,1214	0,0918
375	0,9006	0,4282	0,1205	0,0918
380	0,9002	0,4275	0,1201	0,0913
390	0,9022	0,4271	0,1183	0,0908
400	0,9029	0,4255	0,1170	0,0904
410	0,9027	0,4240	0,1157	0,0894
420	0,9037	0,4228	0,1143	0,0891
430	0,9028	0,4213	0,1129	0,0889
440	0,9032	0,4200	0,1120	0,0887
450	0,9025	0,4187	0,1109	0,0883
460	0,9035	0,4181	0,1101	0,0882
470	0,9041	0,4171	0,1095	0,0879
480	0,9041	0,4165	0,1087	0,0877
490	0,9041	0,4155	0,1080	0,0878
500	0,9055	0,4149	0,1073	0,0879
510	0,9052	0,4144	0,1070	0,0879
520	0,9054	0,4134	0,1066	0,0881
530	0,9057	0,4135	0,1065	0,0882
540	0,9057	0,4130	0,1063	0,0886
550	0,9056	0,4127	0,1062	0,0884
560	0,9060	0,4126	0,1061	0,0888
570	0,9071	0,4121	0,1061	0,0890
580	0,9057	0,4109	0,1061	0,0891
590	0,9062	0,4112	0,1065	0,0887
600	0,9067	0,4111	0,1068	0,0895
610	0,9064	0,4109	0,1065	0,0913
620	0,9066	0,4115	0,1075	0,0905
630	0,9063	0,4120	0,1088	0,0896
640	0,9069	0,4127	0,1096	0,0900
650	0,9071	0,4131	0,1102	0,0906
660	0,9070	0,4136	0,1107	0,0908
670	0,9075	0,4143	0,1118	0,0910
680	0,9069	0,4156	0,1136	0,0915
690	0,9077	0,4178	0,1157	0,0923
700	0,9072	0,4197	0,1184	0,0933
710	0,9068	0,4230	0,1216	0,0945
720	0,9064	0,4253	0,1249	0,0960
730	0,9054	0,4283	0,1284	0,0978
740	0,9043	0,4315	0,1323	0,0992

750	0,9039	0,4357	0,1369	0,1012
760	0,9061	0,4408	0,1413	0,1041
770	0,9052	0,4445	0,1459	0,1053
780	0,9068	0,4495	0,1503	0,1079
800	0,9161	0,5041	0,2204	0,1324
850	0,9171	0,5178	0,2386	0,1444
900	0,9153	0,5293	0,2544	0,1514
950	0,8743	0,5126	0,2519	0,1580
1000	0,8584	0,4954	0,2372	0,1562
1050	0,8949	0,5071	0,2357	0,1568
1100	0,8898	0,4999	0,2297	0,1546
1150	0,7672	0,4332	0,2023	0,1446
1200	0,7257	0,4107	0,1946	0,1381
1250	0,7478	0,4189	0,1965	0,1391
1300	0,7168	0,4014	0,1901	0,1377
1350	0,5129	0,2977	0,1510	0,1302
1400	0,0934	0,0955	0,0787	0,0992
1450	0,0510	0,0721	0,0684	0,0982
1500	0,0662	0,0830	0,0758	0,1032
1550	0,1457	0,1268	0,0980	0,1135
1600	0,2581	0,1881	0,1283	0,1267
1650	0,3256	0,2219	0,1430	0,1326
1700	0,3382	0,2292	0,1474	0,1330
1750	0,2675	0,1949	0,1339	0,1279
1800	0,2084	0,1644	0,1211	0,1256
1850	0,1601	0,1431	0,1134	0,1186
1900	0,0661	0,0934	0,0895	0,1134
1950	0,0666	0,0958	0,0913	0,1104
2000	0,0705	0,1096	0,1048	0,0963
2050	0,0709	0,1104	0,1053	0,0965
2100	0,0746	0,1120	0,1068	0,0952
2200	0,0865	0,1154	0,1066	0,0965
2300	0,0778	0,1185	0,1125	0,0860
2400	0,0691	0,1059	0,1009	0,0950
2500	0,0664	0,1002	0,0962	0,0936

Tabelle 59: Gemessene, spektrale Transmission $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm der Messreihe Xfast® Schwarz 0050 von der NTB (Quelle: eigene Darstellung aus Werten der NTB)¹⁵⁴

¹⁵⁴ Anmerkungen: Der Verlauf der Transmission in den fett geschriebenen Wellenlängenbereichen erscheint unrealistisch. Es ist davon auszugehen, dass die Transmission bei eingefärbtem Wasser geringer ist als mit klarem Wasser. Im Wellenlängenbereich zwischen ca. 1900 nm und 2500 nm gibt es keine Transmission durch Wasser, analog zu den Messungen mit Basacid® Schwarz X40.

16.5 Messergebnisse Modellraumprüfstand

Messung ohne Einfärbung, ohne Kühlung

Zeit [hh:mm]	Tsol [W/m ²]	F1_Vorlauf [°C]	F1_Rücklauf [°C]	F2_Vorlauf [°C]	F2_Rücklauf [°C]	Raum [°C]
9:25:00	159,47	23,93	21,65	23,97	23,38	23,85
10:25:00	157,79	28,20	30,63	24,77	25,00	24,34
11:25:00	158,44	31,02	33,31	25,64	25,90	24,59
12:25:00	157,93	32,50	34,72	26,34	26,63	24,78
13:25:00	156,38	33,28	35,49	26,85	27,16	24,92
14:25:00	157,33	33,73	35,99	27,24	27,57	25,05
15:25:00	159,73	34,14	36,41	27,54	27,88	25,18
16:25:00	156,09	34,36	36,53	27,72	28,08	25,28
17:25:00	157,43	34,38	36,62	27,87	28,23	25,37
18:25:00	160,75	34,49	36,73	28,02	28,38	25,46
19:25:00	163,41	34,66	36,97	28,14	28,50	25,55
20:25:00	158,27	34,60	36,78	28,18	28,55	25,62
21:25:00	157,42	34,60	36,79	28,21	28,58	25,69
22:25:00	162,14	34,60	36,86	28,24	28,63	25,76
23:25:00	162,18	34,67	36,95	28,27	28,66	25,83
0:25:00	158,27	34,68	36,89	28,31	28,69	25,89
1:25:00	156,52	34,62	36,81	28,32	28,71	25,95
2:25:00	159,41	34,63	36,89	28,34	28,74	26,01
3:25:00	158,89	34,66	36,87	28,36	28,77	26,07
4:25:00	157,36	34,69	36,92	28,38	28,79	26,13
5:25:00	152,30	34,60	36,73	28,38	28,78	26,17
6:25:00	154,72	34,53	36,74	28,36	28,78	26,22
7:25:00	153,50	34,51	36,68	28,30	28,74	26,27
8:25:00	153,04	34,53	36,66	28,33	28,76	26,31
9:25:00	159,57	34,66	36,89	28,40	28,83	26,38
10:25:00	158,89	34,83	37,04	28,49	28,92	26,44
11:25:00	155,92	34,84	36,97	28,55	28,97	26,48
12:25:00	156,58	34,86	37,03	28,60	29,03	26,53
13:25:00	155,02	34,91	37,08	28,66	29,08	26,57
14:10:00	155,38	34,94	37,08	28,71	29,13	26,61

Tabelle 60. Messergebnisse der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung und ohne Kühlung (Messung von 25.07.2011 09:25 Uhr bis 26.07.2011 14:25 Uhr)

Messung ohne Einfärbung, mit Kühlung F2

Zeit [hh:mm]	Tsol [W/m ²]	F1_Vorlauf [°C]	F1_Rücklauf [°C]	F2_Vorlauf [°C]	F2_Rücklauf [°C]	Raum [°C]
11:20:00	162,54	21,00	25,40	18,60	20,60	26,60
12:20:00	169,75	27,80	30,30	19,20	20,80	26,67
13:20:00	167,45	30,90	33,20	19,00	20,80	26,73
14:20:00	170,96	32,40	34,60	20,50	21,90	26,83
15:20:00	166,10	33,10	35,20	19,80	21,50	26,88
16:20:00	169,81	33,40	35,60	20,00	21,60	26,90
17:20:00	166,31	33,60	35,80	19,70	21,60	26,95

18:20:00	162,34	33,60	35,80	19,90	21,40	26,94
19:20:00	169,08	33,60	35,80	19,00	21,00	26,96
20:20:00	163,77	33,60	35,80	19,50	21,30	26,97
21:20:00	166,86	33,50	35,80	19,30	21,20	26,97
22:20:00	166,33	33,80	35,90	19,20	21,00	26,96
23:20:00	166,49	34,10	36,10	19,10	21,00	26,96
0:20:00	167,53	34,40	36,40	19,20	21,10	26,98
1:20:00	164,29	34,40	36,40	19,00	20,90	26,97
2:20:00	165,81	34,40	36,50	18,90	20,80	26,97
3:20:00	166,30	34,50	36,40	18,90	20,90	26,98
4:20:00	167,07	34,50	36,50	19,40	20,90	26,98
5:20:00	167,23	34,50	36,50	19,80	21,50	27,02
6:20:00	167,86	34,60	36,60	19,90	21,70	27,05
7:20:00	172,70	34,50	36,50	19,30	21,20	27,05
8:20:00	161,83	34,30	36,30	19,00	21,00	27,03
9:20:00	167,53	34,20	36,30	18,80	20,80	27,03
10:20:00	161,61	34,00	36,20	18,70	20,70	27,00
11:15:00	168,87	33,70	35,80	18,50	20,50	26,98

Tabelle 61: Messergebnisse der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur ohne Einfärbung, mit Kühlung F2 (Messung von 08.06.2011 11:20 Uhr bis 9.06.2011 11:15 Uhr)

Messung mit Einfärbung F1 und Kühlung F2

Zeit [hh:mm]	Tsol [W/m ²]	F1_Vorlauf [°C]	F1_Rücklauf [°C]	F2_Vorlauf [°C]	F2_Rücklauf [°C]	Raum [°C]
14:45:00	14,95	34,98	38,82	16,90	18,04	23,51
15:45:00	14,73	36,84	40,49	16,62	17,97	23,54
16:45:00	15,07	37,56	41,17	16,39	17,78	23,57
17:45:00	14,74	37,97	41,45	16,38	17,62	23,61
18:45:00	15,67	38,05	41,76	16,43	17,75	23,63
19:45:00	15,47	38,33	41,97	16,39	17,60	23,66
20:45:00	14,93	38,43	41,95	16,30	17,74	23,69
21:45:00	16,07	38,47	42,21	16,23	17,69	23,72
22:45:00	15,87	38,52	42,23	16,07	17,46	23,74
23:45:00	15,27	38,50	42,18	16,31	17,72	23,76
0:45:00	15,07	38,51	42,01	16,32	17,83	23,79
1:45:00	15,06	38,33	41,93	16,06	17,62	23,81
2:45:00	14,52	38,13	41,69	16,36	17,68	23,81
3:45:00	14,56	38,05	41,60	16,34	17,72	23,84
4:45:00	15,27	38,03	41,74	16,40	17,77	23,85
5:45:00	14,94	38,15	41,71	16,32	17,79	23,88
6:45:00	15,06	38,21	41,79	16,36	17,81	23,90
7:45:00	15,35	38,26	41,92	16,27	17,82	23,93
8:45:00	14,99	38,22	41,79	16,35	17,81	23,94
9:30:00	15,28	38,11	41,84	16,56	17,79	23,96

Tabelle 62: Messergebnisse der Fluidtemperaturen und der operativen Raumtemperatur mit Einfärbung F1 und Kühlung F2 (Messung von 03.08.2011 14:45 Uhr bis 4.08.2011 9:30 Uhr)

16.6 Validierung Strahlungsmodell

Validierung ohne Fluidfüllung mit senkrechter Einstrahlung

Einfachverglasung und Zweifachverglasung aus SSG PLANILUX® 8 mm:

Wellenlänge λ	Spektrale Transmission $T(\lambda)$ und Reflexion $R(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung							
	L_EES		L_Optics		LIL_EES		LIL_Optics	
	$T(\lambda)$	$R(\lambda)$	$T(\lambda)$	$R(\lambda)$	$T(\lambda)$	$R(\lambda)$	$T(\lambda)$	$R(\lambda)$
[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
300	0,000	0,046	0,000	0,046	0,000	0,046	0,000	0,046
305	0,000	0,049	0,000	0,049	0,000	0,049	0,000	0,049
310	0,000	0,046	0,000	0,046	0,000	0,046	0,000	0,046
315	0,006	0,048	0,006	0,048	0,000	0,048	0,000	0,048
320	0,027	0,047	0,027	0,047	0,001	0,047	0,001	0,047
325	0,071	0,046	0,071	0,046	0,005	0,046	0,005	0,046
330	0,167	0,046	0,167	0,046	0,028	0,047	0,028	0,047
335	0,298	0,049	0,298	0,049	0,089	0,053	0,089	0,053
340	0,437	0,060	0,437	0,060	0,192	0,072	0,192	0,072
345	0,559	0,059	0,559	0,059	0,314	0,078	0,314	0,078
350	0,664	0,068	0,664	0,068	0,443	0,098	0,443	0,098
355	0,739	0,073	0,739	0,073	0,549	0,113	0,549	0,113
360	0,787	0,079	0,787	0,079	0,623	0,128	0,623	0,128
365	0,817	0,079	0,817	0,079	0,672	0,132	0,672	0,132
370	0,835	0,084	0,835	0,084	0,702	0,143	0,702	0,143
375	0,827	0,079	0,827	0,079	0,688	0,133	0,688	0,133
380	0,818	0,079	0,818	0,079	0,673	0,132	0,673	0,132
390	0,852	0,079	0,852	0,079	0,731	0,137	0,731	0,137
400	0,876	0,082	0,876	0,082	0,773	0,145	0,773	0,145
410	0,875	0,082	0,875	0,082	0,771	0,145	0,771	0,145
420	0,871	0,082	0,871	0,082	0,764	0,145	0,764	0,145
430	0,874	0,082	0,874	0,082	0,769	0,145	0,769	0,145
440	0,874	0,081	0,874	0,081	0,769	0,143	0,769	0,143
450	0,876	0,082	0,876	0,082	0,773	0,145	0,773	0,145
460	0,878	0,081	0,878	0,081	0,776	0,144	0,776	0,144
470	0,886	0,082	0,886	0,082	0,790	0,147	0,790	0,147
480	0,896	0,083	0,896	0,083	0,808	0,150	0,808	0,150
490	0,891	0,081	0,891	0,081	0,799	0,146	0,799	0,146
500	0,888	0,082	0,888	0,082	0,794	0,147	0,794	0,147
510	0,890	0,082	0,890	0,082	0,797	0,148	0,797	0,147
520	0,888	0,081	0,888	0,081	0,794	0,145	0,794	0,145
530	0,892	0,081	0,892	0,081	0,801	0,146	0,801	0,146
540	0,895	0,081	0,895	0,081	0,806	0,146	0,806	0,146
550	0,893	0,081	0,893	0,081	0,803	0,146	0,803	0,146
560	0,888	0,080	0,888	0,080	0,794	0,143	0,794	0,144
570	0,888	0,080	0,888	0,080	0,794	0,143	0,794	0,144
580	0,883	0,080	0,883	0,080	0,785	0,143	0,785	0,143
590	0,877	0,079	0,877	0,079	0,774	0,140	0,774	0,140
600	0,874	0,078	0,874	0,078	0,769	0,138	0,769	0,138
610	0,869	0,077	0,869	0,077	0,759	0,136	0,760	0,136
620	0,862	0,076	0,862	0,076	0,747	0,133	0,747	0,133

630	0,857	0,077	0,857	0,077	0,739	0,134	0,739	0,134
640	0,853	0,076	0,853	0,076	0,732	0,132	0,732	0,132
650	0,845	0,076	0,845	0,076	0,718	0,131	0,718	0,131
660	0,841	0,076	0,841	0,076	0,711	0,130	0,711	0,130
670	0,837	0,075	0,837	0,075	0,705	0,128	0,705	0,128
680	0,829	0,074	0,829	0,074	0,691	0,125	0,691	0,125
690	0,819	0,072	0,819	0,072	0,674	0,121	0,674	0,121
700	0,814	0,073	0,814	0,073	0,666	0,122	0,666	0,122
710	0,807	0,073	0,807	0,073	0,655	0,121	0,655	0,121
720	0,800	0,072	0,800	0,072	0,643	0,118	0,643	0,118
730	0,795	0,072	0,795	0,072	0,636	0,118	0,635	0,118
740	0,788	0,070	0,788	0,070	0,624	0,114	0,624	0,114
750	0,783	0,072	0,783	0,072	0,616	0,116	0,616	0,116
760	0,774	0,071	0,774	0,071	0,602	0,114	0,602	0,114
770	0,769	0,069	0,769	0,069	0,594	0,110	0,594	0,110
780	0,762	0,070	0,762	0,070	0,584	0,111	0,584	0,111
800	0,748	0,066	0,748	0,066	0,562	0,103	0,562	0,103
850	0,723	0,063	0,723	0,063	0,525	0,096	0,525	0,096
900	0,711	0,067	0,711	0,067	0,508	0,101	0,508	0,101
950	0,690	0,064	0,690	0,064	0,478	0,095	0,478	0,095
1000	0,683	0,063	0,683	0,063	0,468	0,093	0,468	0,093
1050	0,680	0,062	0,680	0,062	0,464	0,091	0,464	0,091
1100	0,681	0,062	0,681	0,062	0,465	0,091	0,466	0,091
1150	0,681	0,063	0,681	0,063	0,466	0,092	0,466	0,092
1200	0,686	0,063	0,686	0,063	0,473	0,093	0,473	0,093
1250	0,697	0,063	0,697	0,063	0,488	0,094	0,488	0,094
1300	0,704	0,064	0,704	0,064	0,498	0,096	0,498	0,096
1350	0,720	0,065	0,720	0,065	0,521	0,099	0,521	0,099
1400	0,732	0,065	0,732	0,065	0,538	0,100	0,538	0,100
1450	0,750	0,066	0,750	0,066	0,565	0,103	0,565	0,103
1500	0,769	0,068	0,769	0,068	0,594	0,109	0,594	0,108
1550	0,780	0,068	0,780	0,068	0,611	0,109	0,611	0,110
1600	0,790	0,069	0,790	0,069	0,627	0,112	0,627	0,112
1650	0,795	0,068	0,795	0,068	0,635	0,111	0,635	0,111
1700	0,798	0,068	0,798	0,068	0,640	0,112	0,640	0,112
1750	0,795	0,068	0,795	0,068	0,635	0,111	0,635	0,111
1800	0,795	0,069	0,795	0,069	0,635	0,113	0,635	0,113
1850	0,792	0,066	0,792	0,066	0,630	0,108	0,630	0,108
1900	0,788	0,067	0,788	0,067	0,624	0,109	0,624	0,109
1950	0,782	0,066	0,782	0,066	0,614	0,107	0,614	0,107
2000	0,789	0,069	0,789	0,069	0,626	0,112	0,625	0,112
2050	0,786	0,066	0,786	0,066	0,621	0,107	0,621	0,107
2100	0,788	0,064	0,788	0,064	0,623	0,104	0,624	0,104
2200	0,759	0,068	0,759	0,068	0,579	0,107	0,579	0,107
2300	0,755	0,061	0,755	0,061	0,572	0,096	0,572	0,096
2400	0,751	0,057	0,751	0,057	0,566	0,089	0,566	0,089
2500	0,697	0,047	0,697	0,047	0,487	0,070	0,487	0,070

Tabelle 63: In EES und Optics berechnete, spektrale Transmissionsgrade T(λ) und Reflexionsgrade R(λ) im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm für SSG PLANILUX® 8 mm als Einfachverglasung (L_Optics bzw. L_EES) und Zweifachverglasung mit einem SZR von 2mm (LIL_Optics bzw. LIL_EES)

**Einfachverglasung SSG DIAMANT® 6 mm ohne Beschichtung bzw. mit Beschichtung
SSG PLANITHERM® ULTRA N:**

Wellenlänge λ	Spektrale Transmissionsgrade T(λ) und Reflexionsgrade R(λ) im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung											
	D_EES		D_Optics		DT1_EES		DT1_Optics		DT2_EES		DT2_Optics	
	T(λ)	R(λ)	T(λ)	R(λ)	T(λ)	R(λ)	T(λ)	R(λ)	T(λ)	R(λ)	T(λ)	R(λ)
[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
300	0,173	0,048	0,173	0,048	0,012	0,207	0,012	0,207	0,012	0,051	0,012	0,051
305	0,274	0,053	0,274	0,053	0,044	0,214	0,044	0,214	0,044	0,060	0,044	0,060
310	0,393	0,054	0,393	0,054	0,092	0,226	0,092	0,226	0,092	0,079	0,092	0,079
315	0,508	0,061	0,508	0,061	0,149	0,243	0,149	0,244	0,149	0,106	0,149	0,105
320	0,611	0,065	0,611	0,065	0,209	0,259	0,210	0,261	0,210	0,136	0,210	0,135
325	0,694	0,071	0,694	0,071	0,271	0,271	0,273	0,274	0,274	0,166	0,273	0,164
330	0,766	0,075	0,766	0,075	0,330	0,280	0,333	0,284	0,335	0,187	0,333	0,185
335	0,817	0,078	0,817	0,078	0,383	0,283	0,386	0,287	0,388	0,197	0,386	0,194
340	0,852	0,087	0,852	0,087	0,431	0,278	0,435	0,282	0,437	0,199	0,435	0,196
345	0,870	0,082	0,870	0,082	0,483	0,265	0,487	0,269	0,489	0,191	0,487	0,188
350	0,888	0,086	0,888	0,086	0,544	0,248	0,548	0,252	0,551	0,176	0,548	0,173
355	0,896	0,086	0,896	0,086	0,594	0,226	0,597	0,229	0,600	0,161	0,597	0,159
360	0,899	0,088	0,899	0,088	0,638	0,202	0,641	0,205	0,642	0,146	0,641	0,144
365	0,900	0,086	0,900	0,086	0,694	0,185	0,697	0,187	0,700	0,128	0,697	0,127
370	0,903	0,090	0,903	0,090	0,743	0,167	0,745	0,169	0,747	0,111	0,745	0,111
375	0,897	0,085	0,897	0,085	0,779	0,145	0,781	0,147	0,781	0,100	0,781	0,098
380	0,906	0,086	0,906	0,086	0,823	0,122	0,824	0,123	0,826	0,082	0,824	0,082
390	0,905	0,084	0,905	0,084	0,856	0,097	0,856	0,098	0,856	0,075	0,856	0,067
400	0,910	0,085	0,910	0,085	0,879	0,080	0,879	0,081	0,879	0,060	0,879	0,059
410	0,910	0,085	0,910	0,085	0,883	0,070	0,883	0,070	0,883	0,053	0,883	0,053
420	0,911	0,086	0,911	0,086	0,890	0,063	0,890	0,063	0,891	0,051	0,890	0,052
430	0,911	0,085	0,911	0,085	0,890	0,057	0,890	0,057	0,891	0,051	0,890	0,052
440	0,912	0,085	0,912	0,085	0,893	0,056	0,893	0,056	0,893	0,053	0,893	0,053
450	0,910	0,085	0,910	0,085	0,895	0,055	0,895	0,055	0,896	0,054	0,895	0,054
460	0,911	0,084	0,911	0,084	0,894	0,054	0,894	0,054	0,895	0,053	0,894	0,054
470	0,911	0,084	0,911	0,084	0,895	0,053	0,895	0,053	0,894	0,056	0,895	0,055
480	0,913	0,084	0,913	0,084	0,896	0,054	0,896	0,054	0,896	0,054	0,896	0,054
490	0,911	0,083	0,911	0,083	0,897	0,054	0,897	0,054	0,896	0,054	0,897	0,053
500	0,912	0,084	0,912	0,084	0,900	0,052	0,900	0,052	0,900	0,052	0,900	0,052
510	0,912	0,084	0,912	0,084	0,902	0,049	0,902	0,049	0,903	0,049	0,902	0,050
520	0,912	0,083	0,912	0,083	0,904	0,049	0,904	0,049	0,905	0,047	0,904	0,048
530	0,911	0,082	0,911	0,082	0,903	0,047	0,903	0,047	0,903	0,047	0,903	0,047
540	0,911	0,082	0,911	0,082	0,902	0,046	0,902	0,046	0,903	0,045	0,902	0,046
550	0,910	0,082	0,910	0,082	0,903	0,045	0,903	0,045	0,903	0,045	0,903	0,045
560	0,909	0,082	0,909	0,082	0,902	0,043	0,902	0,043	0,903	0,043	0,902	0,044
570	0,909	0,082	0,909	0,082	0,900	0,041	0,900	0,041	0,899	0,045	0,900	0,044
580	0,909	0,082	0,909	0,082	0,901	0,042	0,901	0,042	0,900	0,045	0,901	0,044
590	0,907	0,082	0,907	0,082	0,898	0,042	0,898	0,042	0,898	0,045	0,898	0,045
600	0,906	0,081	0,906	0,081	0,892	0,044	0,892	0,044	0,892	0,047	0,892	0,047
610	0,905	0,080	0,905	0,080	0,888	0,046	0,888	0,046	0,887	0,049	0,888	0,048
620	0,901	0,080	0,901	0,080	0,882	0,049	0,882	0,049	0,882	0,051	0,882	0,051
630	0,902	0,080	0,902	0,080	0,874	0,051	0,874	0,051	0,873	0,057	0,874	0,056
640	0,901	0,080	0,901	0,080	0,872	0,057	0,872	0,057	0,872	0,059	0,872	0,059
650	0,899	0,080	0,899	0,080	0,860	0,061	0,860	0,061	0,859	0,065	0,860	0,064
660	0,898	0,080	0,898	0,080	0,857	0,069	0,857	0,069	0,856	0,072	0,857	0,071

670	0,900	0,080	0,900	0,080	0,845	0,074	0,845	0,074	0,846	0,078	0,845	0,079
680	0,898	0,079	0,898	0,079	0,833	0,085	0,833	0,085	0,832	0,087	0,833	0,086
690	0,897	0,078	0,897	0,078	0,824	0,092	0,824	0,092	0,824	0,093	0,824	0,094
700	0,897	0,080	0,897	0,080	0,811	0,105	0,811	0,105	0,810	0,107	0,811	0,106
710	0,896	0,080	0,896	0,080	0,802	0,113	0,802	0,113	0,801	0,117	0,802	0,116
720	0,894	0,079	0,894	0,079	0,791	0,128	0,791	0,128	0,790	0,128	0,791	0,127
730	0,893	0,079	0,893	0,079	0,779	0,137	0,779	0,137	0,780	0,137	0,779	0,138
740	0,889	0,078	0,889	0,078	0,755	0,153	0,755	0,153	0,755	0,147	0,755	0,147
750	0,887	0,080	0,887	0,080	0,747	0,160	0,747	0,160	0,748	0,159	0,747	0,160
760	0,885	0,080	0,885	0,080	0,733	0,180	0,733	0,180	0,733	0,173	0,733	0,173
770	0,882	0,077	0,882	0,077	0,717	0,189	0,717	0,189	0,717	0,186	0,717	0,186
780	0,878	0,079	0,878	0,079	0,695	0,185	0,695	0,184	0,694	0,196	0,695	0,196
800	0,888	0,077	0,888	0,077	0,680	0,212	0,679	0,211	0,678	0,224	0,679	0,225
850	0,880	0,075	0,880	0,075	0,630	0,279	0,630	0,279	0,630	0,283	0,630	0,283
900	0,871	0,079	0,871	0,079	0,577	0,348	0,576	0,347	0,575	0,356	0,576	0,356
950	0,867	0,076	0,867	0,076	0,542	0,404	0,542	0,404	0,542	0,406	0,542	0,407
1000	0,866	0,076	0,866	0,076	0,476	0,459	0,476	0,459	0,476	0,458	0,476	0,458
1050	0,866	0,075	0,866	0,075	0,416	0,503	0,417	0,503	0,418	0,499	0,417	0,498
1100	0,867	0,076	0,867	0,076	0,368	0,544	0,370	0,545	0,372	0,535	0,370	0,534
1150	0,867	0,076	0,867	0,076	0,328	0,577	0,330	0,578	0,332	0,566	0,330	0,565
1200	0,868	0,076	0,868	0,076	0,291	0,609	0,294	0,610	0,297	0,596	0,294	0,595
1250	0,868	0,075	0,868	0,075	0,264	0,635	0,266	0,636	0,268	0,624	0,266	0,623
1300	0,874	0,076	0,874	0,076	0,239	0,660	0,240	0,660	0,241	0,656	0,240	0,656
1350	0,878	0,077	0,878	0,077	0,210	0,677	0,213	0,678	0,216	0,664	0,213	0,663
1400	0,879	0,076	0,879	0,076	0,189	0,695	0,192	0,696	0,195	0,680	0,192	0,679
1450	0,886	0,076	0,886	0,076	0,173	0,710	0,175	0,711	0,177	0,702	0,175	0,701
1500	0,888	0,076	0,888	0,076	0,159	0,724	0,162	0,725	0,165	0,708	0,162	0,707
1550	0,890	0,076	0,890	0,076	0,149	0,736	0,151	0,737	0,153	0,725	0,151	0,724
1600	0,894	0,077	0,894	0,077	0,134	0,746	0,136	0,747	0,138	0,737	0,136	0,736
1650	0,893	0,075	0,893	0,075	0,123	0,755	0,126	0,756	0,129	0,740	0,126	0,739
1700	0,892	0,075	0,892	0,075	0,116	0,762	0,120	0,764	0,124	0,745	0,120	0,744
1750	0,890	0,075	0,890	0,075	0,101	0,771	0,106	0,773	0,111	0,743	0,106	0,741
1800	0,888	0,076	0,888	0,076	0,095	0,776	0,100	0,778	0,104	0,752	0,100	0,750
1850	0,884	0,073	0,884	0,073	0,087	0,783	0,092	0,785	0,097	0,754	0,092	0,752
1900	0,884	0,074	0,884	0,074	0,077	0,789	0,082	0,791	0,086	0,761	0,082	0,759
1950	0,879	0,073	0,879	0,073	0,071	0,790	0,076	0,793	0,080	0,758	0,076	0,756
2000	0,878	0,076	0,878	0,076	0,068	0,794	0,075	0,798	0,081	0,748	0,075	0,746
2050	0,877	0,073	0,877	0,073	0,063	0,799	0,071	0,803	0,077	0,747	0,071	0,744
2100	0,877	0,070	0,877	0,070	0,059	0,806	0,065	0,809	0,070	0,761	0,065	0,759
2200	0,848	0,074	0,848	0,074	0,047	0,806	0,057	0,813	0,063	0,712	0,057	0,709
2300	0,841	0,067	0,841	0,067	0,032	0,815	0,039	0,821	0,042	0,706	0,039	0,703
2400	0,833	0,063	0,833	0,063	0,031	0,826	0,038	0,832	0,042	0,731	0,038	0,728
2500	0,790	0,053	0,790	0,053	0,039	0,796	0,050	0,806	0,054	0,641	0,050	0,637

Tabelle 64: In EES und Optics berechnete, spektrale Transmissionsgrade $T(\lambda)$ und Reflexionsgrade $R(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 nm und 2500 nm für SSG DIAMANT® 6 mm ohne Beschichtung (D_EES bzw. D_Optics) und mit Wärmeschutzbeschichtung PLANITHERM® ULTRA N auf Position 1 (DT1_EES bzw. DT1_Optics) und Position2 (DT2_EES bzw. DT2_Optics)

Validierung ohne Fluidfüllung mit winkelabhängiger Einstrahlung

SSG DIAMANT® 6 mm:

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90° ¹⁵⁵
EES										
Tsol (EES)	0,888	0,887	0,886	0,883	0,874	0,852	0,797	0,672	0,413	0,004
Rsol (EES)	0,079	0,079	0,079	0,081	0,089	0,110	0,163	0,286	0,545	0,983
Abs_total (EES)	0,033	0,033	0,034	0,035	0,036	0,038	0,040	0,041	0,042	0,012
Window										
Tsol (Window)	0,889	0,888	0,887	0,885	0,877	0,858	0,810	0,693	0,431	0,000
Rsol (Window)	0,079	0,079	0,079	0,081	0,087	0,105	0,151	0,267	0,529	1,000
Abs_total	0,032	0,033	0,033	0,034	0,036	0,037	0,039	0,040	0,040	0,000
Abweichung EES – Window										
Tsol	-0,1%	-0,1%	-0,1%	-0,2%	-0,3%	-0,6%	-1,3%	-2,1%	-1,8%	
Rsol	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,2%	0,5%	1,2%	1,9%	1,6%	
Abs_total	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	0,1%	0,1%	0,2%	

Tabelle 65: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 der unbeschichteten Einfachverglasungen SSG DIAMANT® 6 mm bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Window

SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos.1):

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
EES										
Tsol (EES)	0,618	0,617	0,617	0,614	0,609	0,597	0,568	0,501	0,349	0,001
Rsol (EES)	0,289	0,289	0,289	0,290	0,293	0,303	0,329	0,394	0,546	0,983
Abs_total (EES)	0,093	0,093	0,094	0,096	0,097	0,100	0,102	0,105	0,105	0,015
Window										
Tsol (Window)	0,622	0,621	0,621	0,618	0,613	0,601	0,573	0,506	0,353	0,001
Rsol (Window)	0,294	0,294	0,294	0,295	0,298	0,308	0,334	0,398	0,550	0,983

¹⁵⁵ Im Strahlungsmodell kann nur bis zu einem Winkel von 89,8° gerechnet werden. Die Angaben 90° für das Strahlungsmodell entsprechen hier und in den folgenden Betrachtungen den Berechnungen für 89,8°. Die Abweichungen werden nicht in die Betrachtung mit einbezogen.

Abs_total	0,084	0,084	0,085	0,086	0,088	0,090	0,093	0,096	0,097	0,015
Abweichung EES – Window										
Tsol	-0,1%	-0,6%	0,2%	0,9%	1,6%	2,5%	4,4%	7,5%	9,4%	
Rsol	-0,1%	0,5%	0,7%	0,5%	0,0%	-0,3%	-0,3%	-0,8%	-3,7%	
Abs_total	0,1%	-0,1%	-0,9%	-1,5%	-1,7%	-2,2%	-4,1%	-6,8%	-5,7%	

Tabelle 66: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 der beschichteten Einfachverglasung SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos.1) bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Window

SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos.2):

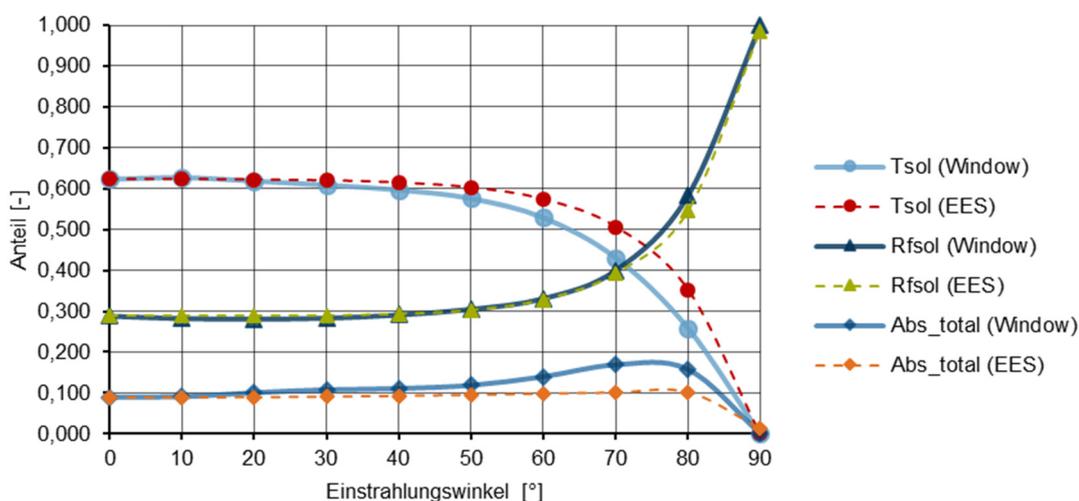


Abbildung 139: Direkte, solare Transmissions- und Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099; Einfachverglasung SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos.2); winkelabhängige Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell mit Window

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
EES										
Tsol (EES)	0,619	0,619	0,618	0,616	0,610	0,598	0,569	0,501	0,347	0,001
Rsol (EES)	0,279	0,278	0,279	0,279	0,283	0,293	0,319	0,385	0,541	0,984
Abs_total (EES)	0,102	0,102	0,103	0,104	0,106	0,108	0,111	0,113	0,111	0,014
Window										
Tsol (Window)	0,623	0,623	0,622	0,620	0,614	0,602	0,574	0,506	0,352	0,001
Rsol (Window)	0,288	0,288	0,288	0,289	0,292	0,302	0,328	0,392	0,546	0,984
Abs_total (Window)	0,088	0,089	0,090	0,091	0,093	0,095	0,098	0,101	0,102	0,014
Abweichung EES – Window										

Tsol	0,0%	-0,4%	0,3%	1,1%	1,7%	2,6%	4,5%	7,5%	9,3%	0,1%
Rsol	0,0%	0,6%	0,7%	0,6%	0,1%	-0,3%	-0,3%	-0,8%	-3,7%	-1,5%
Abs_total	-0,2%	-0,2%	-1,1%	-1,7%	-1,8%	-2,4%	-4,2%	-6,8%	-5,6%	1,3%

Tabelle 67: Direkte, solare Transmissions- und Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 von beschichteten Einfachverglasungen SSG PLANITHERM® ULTRA N DIAMANT® 6 mm (Pos.2) bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Window

Fünffachverglasung LGGL (FGGF ohne Fluid):

	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
EES										
Tsol (EES)	0,373	0,372	0,370	0,365	0,351	0,320	0,259	0,163	0,055	0,000
Rsol (EES)	0,396	0,396	0,396	0,397	0,406	0,431	0,489	0,591	0,737	0,984
Abs_total (EES)	0,230	0,231	0,233	0,237	0,242	0,248	0,251	0,245	0,207	0,015
Abs_Z2 (EES)	0,052	0,052	0,053	0,055	0,057	0,059	0,062	0,064	0,062	0,013
Abs_Z4 (EES)	0,103	0,103	0,104	0,105	0,107	0,109	0,111	0,110	0,094	0,002
Abs_Z6 (EES)	0,021	0,021	0,022	0,022	0,023	0,024	0,024	0,023	0,018	0,000
Abs_Z8 (EES)	0,046	0,046	0,046	0,047	0,048	0,048	0,046	0,041	0,029	0,000
Abs_Z10 (EES)	0,008	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009	0,008	0,007	0,004	0,000
Window										
Tsol (Window)	0,373	0,376	0,365	0,351	0,334	0,299	0,228	0,122	0,031	0,000
Rsol (Window)	0,406	0,399	0,394	0,395	0,405	0,427	0,470	0,557	0,721	1,000
Abs_total (Window)	0,221	0,225	0,240	0,254	0,262	0,275	0,302	0,320	0,248	0,000
Abs_Z2 (Window)	0,048	0,049	0,049	0,051	0,053	0,056	0,059	0,061	0,061	0,000
Abs_Z4 (Window)	0,096	0,098	0,108	0,115	0,119	0,126	0,147	0,170	0,136	0,000
Abs_Z6 (Window)	0,022	0,022	0,022	0,023	0,023	0,024	0,023	0,020	0,014	0,000
Abs_Z8 (Window)	0,046	0,047	0,052	0,056	0,058	0,060	0,066	0,064	0,035	0,000
Abs_Z10 (Window)	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,007	0,005	0,002	0,000
Abweichung EES – Window										
Tsol	0,0%	0,4%	-0,5%	-1,4%	-1,7%	-2,1%	-3,1%	-4,1%	-2,4%	0,0%
Rsol	1,0%	0,3%	-0,2%	-0,2%	-0,1%	-0,4%	-1,9%	-3,4%	-1,6%	1,6%
Abs_total	-0,9%	-0,6%	0,7%	1,7%	2,0%	2,7%	5,1%	7,5%	4,1%	-1,5%

Abs_Z2	-0,4%	-0,3%	-0,4%	-0,4%	-0,4%	-0,3%	-0,3%	-0,3%	-0,1%	-1,3%
Abs_Z4	-0,7%	-0,5%	0,4%	1,0%	1,2%	1,7%	3,6%	6,0%	4,2%	-0,2%
Abs_Z6	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	-0,1%	-0,3%	-0,4%	0,0%
Abs_Z8	0,0%	0,1%	0,6%	0,9%	1,0%	1,2%	2,0%	2,3%	0,6%	0,0%
Abs_Z10	0,1%	0,1%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,1%	-0,2%	-0,2%	0,0%

Tabelle 68: Direkte, solare Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach ISO 15099 der Fünffachverglasung LGGL (FGGF ohne Fluid) aus SSG DIAMANT® 6 mm ohne bzw. mit Wärmeschutzbeschichtung SSG PLANITHERM® ULTRA N auf Position 4 bzw. 7 bei winkelabhängiger Einstrahlung; Vergleich EES-Strahlungsmodell und Window

Modellerweiterung eingefärbte Fluidfüllung

Fluidglas (FGGF) mit Einfärbung Xfast® Schwarz 0050 im äußeren Fluid (F1); Fluidschichtdicke 2 mm; Ergebnisse Strahlungsmodell für senkrechte Einstrahlung:

Vol. %-Anteil Xfast® Schwarz 0050 – F1		0%	0,5%	1%	1,5%	2%	2,5%	3%
	Tvis	0,698	0,512	0,317	0,154	0,082	0,065	0,068
	Rvis	0,172	0,114	0,073	0,053	0,049	0,048	0,048
	Tsol	0,447	0,331	0,212	0,113	0,065	0,051	0,049
	Rsol	0,223	0,148	0,095	0,065	0,055	0,052	0,051
	Abs total	0,331	0,522	0,693	0,822	0,880	0,897	0,900
	Abs_Z2	0,037	0,034	0,032	0,031	0,031	0,030	0,030
	Abs_Z3	0,137	0,370	0,581	0,745	0,820	0,844	0,848
	Abs_Z4	0,082	0,062	0,041	0,024	0,015	0,012	0,011
	Abs_Z6	0,018	0,014	0,010	0,006	0,004	0,003	0,003
	Abs_Z8	0,042	0,032	0,021	0,012	0,007	0,006	0,005
	Abs_Z9	0,005	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001
	Abs_Z10	0,009	0,007	0,005	0,003	0,002	0,001	0,001

Tabelle 69: Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach EN 410 bei senkrechter Einstrahlung für den Aufbau FGGF mit Einfärbung im äußeren Fluid (F1) mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen; Fluidschichten jeweils 2 mm dick

Wellenlänge λ	Spektrale Transmissionsgrade $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F1 (SZR 2 mm).						
	$T(\lambda)_{xf0\%}$	$T(\lambda)_{xf0,5\%}$	$T(\lambda)_{xf1\%}$	$T(\lambda)_{xf1,5\%}$	$T(\lambda)_{xf2\%}$	$T(\lambda)_{xf2,5\%}$	$T(\lambda)_{xf3\%}$
[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
300	9,60E-07	6,88E-07	4,40E-07	2,35E-07	1,18E-07	6,37E-08	3,63E-08
305	5,34E-05	3,85E-05	2,47E-05	1,32E-05	6,75E-06	3,92E-06	2,50E-06
310	6,95E-04	5,05E-04	3,24E-04	1,72E-04	9,02E-05	5,63E-05	3,96E-05
315	4,03E-03	2,94E-03	1,89E-03	9,97E-04	5,31E-04	3,48E-04	2,60E-04
320	1,44E-02	1,06E-02	6,78E-03	3,54E-03	1,91E-03	1,30E-03	1,03E-03
325	3,62E-02	2,66E-02	1,71E-02	9,04E-03	4,91E-03	3,39E-03	2,76E-03
330	7,35E-02	5,43E-02	3,48E-02	1,82E-02	9,87E-03	7,01E-03	5,92E-03
335	1,20E-01	8,88E-02	5,70E-02	2,98E-02	1,62E-02	1,17E-02	9,99E-03
340	1,74E-01	1,28E-01	8,18E-02	4,29E-02	2,34E-02	1,69E-02	1,47E-02
345	2,25E-01	1,67E-01	1,07E-01	5,55E-02	3,01E-02	2,20E-02	1,93E-02
350	2,98E-01	2,21E-01	1,42E-01	7,38E-02	4,09E-02	3,14E-02	3,00E-02
355	3,54E-01	2,63E-01	1,68E-01	8,69E-02	4,83E-02	3,74E-02	3,57E-02
360	4,02E-01	2,99E-01	1,92E-01	9,86E-02	5,48E-02	4,23E-02	4,09E-02
365	4,65E-01	3,45E-01	2,21E-01	1,14E-01	6,30E-02	4,88E-02	4,74E-02
370	5,29E-01	3,93E-01	2,50E-01	1,28E-01	7,05E-02	5,49E-02	5,35E-02
375	5,55E-01	4,12E-01	2,62E-01	1,35E-01	7,36E-02	5,75E-02	5,61E-02
380	6,23E-01	4,62E-01	2,95E-01	1,50E-01	8,21E-02	6,43E-02	6,27E-02
390	6,56E-01	4,88E-01	3,09E-01	1,57E-01	8,55E-02	6,65E-02	6,56E-02
400	6,92E-01	5,13E-01	3,23E-01	1,64E-01	8,90E-02	6,97E-02	6,88E-02

410	6,91E-01	5,12E-01	3,23E-01	1,63E-01	8,86E-02	6,89E-02	6,81E-02
420	7,02E-01	5,20E-01	3,26E-01	1,64E-01	8,79E-02	6,92E-02	6,89E-02
430	6,99E-01	5,17E-01	3,25E-01	1,61E-01	8,66E-02	6,82E-02	6,85E-02
440	7,06E-01	5,22E-01	3,26E-01	1,61E-01	8,66E-02	6,85E-02	6,90E-02
450	7,04E-01	5,20E-01	3,26E-01	1,61E-01	8,61E-02	6,77E-02	6,86E-02
460	7,04E-01	5,20E-01	3,24E-01	1,60E-01	8,53E-02	6,74E-02	6,84E-02
470	7,05E-01	5,20E-01	3,23E-01	1,58E-01	8,47E-02	6,70E-02	6,83E-02
480	7,11E-01	5,24E-01	3,26E-01	1,60E-01	8,52E-02	6,73E-02	6,87E-02
490	7,07E-01	5,21E-01	3,23E-01	1,58E-01	8,40E-02	6,67E-02	6,83E-02
500	7,14E-01	5,25E-01	3,26E-01	1,58E-01	8,37E-02	6,67E-02	6,90E-02
510	7,15E-01	5,26E-01	3,26E-01	1,58E-01	8,40E-02	6,70E-02	6,91E-02
520	7,16E-01	5,26E-01	3,26E-01	1,58E-01	8,40E-02	6,70E-02	6,93E-02
530	7,10E-01	5,22E-01	3,23E-01	1,56E-01	8,28E-02	6,62E-02	6,89E-02
540	7,08E-01	5,20E-01	3,22E-01	1,56E-01	8,27E-02	6,64E-02	6,90E-02
550	7,06E-01	5,18E-01	3,20E-01	1,55E-01	8,27E-02	6,61E-02	6,86E-02
560	7,01E-01	5,16E-01	3,18E-01	1,54E-01	8,16E-02	6,55E-02	6,85E-02
570	6,97E-01	5,12E-01	3,15E-01	1,53E-01	8,10E-02	6,50E-02	6,82E-02
580	6,99E-01	5,13E-01	3,16E-01	1,53E-01	8,14E-02	6,55E-02	6,85E-02
590	6,90E-01	5,06E-01	3,12E-01	1,52E-01	8,09E-02	6,45E-02	6,72E-02
600	6,80E-01	4,97E-01	3,07E-01	1,50E-01	8,02E-02	6,42E-02	6,69E-02
610	6,72E-01	4,92E-01	3,03E-01	1,47E-01	7,88E-02	6,38E-02	6,74E-02
620	6,57E-01	4,80E-01	2,97E-01	1,45E-01	7,74E-02	6,25E-02	6,52E-02
630	6,49E-01	4,74E-01	2,95E-01	1,45E-01	7,79E-02	6,21E-02	6,40E-02
640	6,48E-01	4,73E-01	2,94E-01	1,45E-01	7,82E-02	6,25E-02	6,40E-02
650	6,29E-01	4,60E-01	2,86E-01	1,41E-01	7,57E-02	6,07E-02	6,25E-02
660	6,27E-01	4,58E-01	2,85E-01	1,41E-01	7,62E-02	6,09E-02	6,25E-02
670	6,18E-01	4,51E-01	2,81E-01	1,40E-01	7,57E-02	6,05E-02	6,16E-02
680	6,01E-01	4,39E-01	2,74E-01	1,37E-01	7,52E-02	5,98E-02	6,03E-02
690	5,90E-01	4,31E-01	2,70E-01	1,37E-01	7,51E-02	5,95E-02	5,96E-02
700	5,80E-01	4,23E-01	2,67E-01	1,36E-01	7,52E-02	5,95E-02	5,92E-02
710	5,69E-01	4,16E-01	2,64E-01	1,36E-01	7,59E-02	5,99E-02	5,88E-02
720	5,55E-01	4,07E-01	2,59E-01	1,35E-01	7,57E-02	5,97E-02	5,83E-02
730	5,40E-01	3,97E-01	2,54E-01	1,34E-01	7,60E-02	5,97E-02	5,79E-02
740	5,06E-01	3,72E-01	2,40E-01	1,28E-01	7,34E-02	5,75E-02	5,51E-02
750	4,96E-01	3,66E-01	2,38E-01	1,29E-01	7,49E-02	5,82E-02	5,51E-02
760	4,82E-01	3,57E-01	2,33E-01	1,28E-01	7,48E-02	5,83E-02	5,49E-02
770	4,60E-01	3,41E-01	2,24E-01	1,24E-01	7,33E-02	5,70E-02	5,30E-02
780	4,28E-01	3,19E-01	2,11E-01	1,18E-01	7,01E-02	5,45E-02	5,05E-02
800	4,33E-01	3,30E-01	2,36E-01	1,55E-01	1,03E-01	7,68E-02	6,19E-02
850	3,80E-01	2,92E-01	2,12E-01	1,43E-01	9,75E-02	7,34E-02	5,90E-02
900	3,28E-01	2,54E-01	1,88E-01	1,30E-01	8,97E-02	6,74E-02	5,34E-02
950	2,64E-01	2,05E-01	1,53E-01	1,06E-01	7,49E-02	5,77E-02	4,71E-02
1000	2,20E-01	1,70E-01	1,25E-01	8,56E-02	5,98E-02	4,68E-02	3,94E-02
1050	1,84E-01	1,41E-01	1,03E-01	6,90E-02	4,75E-02	3,71E-02	3,15E-02
1100	1,46E-01	1,12E-01	8,11E-02	5,40E-02	3,70E-02	2,90E-02	2,49E-02
1150	1,10E-01	8,49E-02	6,17E-02	4,12E-02	2,86E-02	2,31E-02	2,05E-02
1200	8,25E-02	6,35E-02	4,62E-02	3,12E-02	2,18E-02	1,75E-02	1,54E-02
1250	1,17E-02	9,00E-03	6,54E-03	4,39E-03	3,06E-03	2,45E-03	2,17E-03
1300	2,42E-03	1,85E-03	1,36E-03	9,22E-04	6,39E-04	5,16E-04	4,66E-04
1350	7,72E-04	6,06E-04	4,50E-04	3,10E-04	2,30E-04	2,02E-04	1,97E-04
1400	4,71E-04	4,88E-04	4,80E-04	4,31E-04	3,94E-04	4,23E-04	5,00E-04
1450	5,57E-04	6,98E-04	7,88E-04	7,75E-04	7,48E-04	8,60E-04	1,08E-03
1500	1,01E-03	1,17E-03	1,25E-03	1,19E-03	1,15E-03	1,27E-03	1,57E-03
1550	1,94E-03	1,84E-03	1,67E-03	1,45E-03	1,29E-03	1,33E-03	1,51E-03
1600	2,94E-03	2,55E-03	2,13E-03	1,73E-03	1,46E-03	1,39E-03	1,44E-03
1650	3,13E-03	2,62E-03	2,13E-03	1,67E-03	1,37E-03	1,27E-03	1,27E-03
1700	2,64E-03	2,20E-03	1,78E-03	1,40E-03	1,14E-03	1,05E-03	1,03E-03
1750	1,60E-03	1,38E-03	1,16E-03	9,49E-04	7,99E-04	7,54E-04	7,65E-04
1800	1,02E-03	9,13E-04	8,05E-04	6,72E-04	5,92E-04	5,84E-04	6,16E-04

1850	2,91E-08	2,95E-08	2,72E-08	2,31E-08	1,99E-08	2,01E-08	2,24E-08
1900	5,97E-12	4,12E-12	3,25E-12	3,08E-12	3,25E-12	3,29E-12	3,25E-12
1950	3,34E-14	1,03E-13	2,22E-13	2,56E-13	2,22E-13	2,11E-13	2,22E-13
2000	1,42E-14	5,66E-14	1,43E-13	1,71E-13	1,43E-13	1,35E-13	1,43E-13
2050	6,62E-13	8,05E-13	9,22E-13	9,45E-13	9,22E-13	9,10E-13	9,22E-13
2100	3,79E-10	4,99E-10	6,11E-10	6,57E-10	6,11E-10	5,17E-10	4,09E-10
2200	9,26E-06	1,11E-05	1,23E-05	1,22E-05	1,14E-05	1,08E-05	1,03E-05
2300	2,52E-07	3,24E-07	3,86E-07	3,94E-07	3,65E-07	3,24E-07	2,80E-07
2400	5,60E-12	9,06E-12	1,24E-11	1,32E-11	1,24E-11	1,23E-11	1,24E-11
2500	4,93E-17	6,72E-16	3,71E-15	5,55E-15	3,71E-15	3,36E-15	3,71E-15

Tabelle 70: Spektrale Transmissionsgrade T(λ) im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F1 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF

Wellenlänge λ	Spektrale Reflexionsgrade R(λ) im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F1 (SZR 2 mm)..						
	R(λ)_xf0%	R(λ)_xf0,5%	R(λ)_xf1%	R(λ)_xf1,5%	R(λ)_xf2%	R(λ)_xf2,5%	R(λ)_xf3%
[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
300	4,69E-02	4,68E-02	4,67E-02	4,67E-02	4,67E-02	4,67E-02	4,67E-02
305	5,03E-02	4,98E-02	4,96E-02	4,95E-02	4,94E-02	4,94E-02	4,94E-02
310	5,04E-02	4,88E-02	4,77E-02	4,71E-02	4,70E-02	4,70E-02	4,69E-02
315	6,02E-02	5,49E-02	5,14E-02	4,96E-02	4,91E-02	4,90E-02	4,90E-02
320	7,59E-02	6,32E-02	5,43E-02	4,98E-02	4,86E-02	4,83E-02	4,82E-02
325	1,04E-01	7,87E-02	6,13E-02	5,24E-02	5,00E-02	4,95E-02	4,93E-02
330	1,39E-01	9,78E-02	6,89E-02	5,41E-02	5,03E-02	4,94E-02	4,92E-02
335	1,71E-01	1,16E-01	7,63E-02	5,60E-02	5,06E-02	4,95E-02	4,92E-02
340	2,06E-01	1,36E-01	8,72E-02	6,24E-02	5,58E-02	5,44E-02	5,41E-02
345	2,15E-01	1,40E-01	8,64E-02	5,87E-02	5,15E-02	5,01E-02	4,98E-02
350	2,32E-01	1,51E-01	9,22E-02	6,17E-02	5,39E-02	5,25E-02	5,23E-02
355	2,35E-01	1,52E-01	9,21E-02	6,12E-02	5,35E-02	5,21E-02	5,19E-02
360	2,34E-01	1,53E-01	9,31E-02	6,24E-02	5,47E-02	5,33E-02	5,32E-02
365	2,31E-01	1,50E-01	9,10E-02	6,08E-02	5,32E-02	5,19E-02	5,18E-02
370	2,36E-01	1,54E-01	9,37E-02	6,33E-02	5,57E-02	5,44E-02	5,43E-02
375	2,17E-01	1,42E-01	8,69E-02	5,93E-02	5,24E-02	5,12E-02	5,11E-02
380	2,14E-01	1,41E-01	8,68E-02	5,93E-02	5,25E-02	5,14E-02	5,13E-02
390	2,02E-01	1,34E-01	8,26E-02	5,72E-02	5,09E-02	4,99E-02	4,99E-02
400	1,96E-01	1,30E-01	8,12E-02	5,72E-02	5,14E-02	5,04E-02	5,04E-02
410	1,88E-01	1,25E-01	7,94E-02	5,66E-02	5,12E-02	5,03E-02	5,03E-02
420	1,88E-01	1,26E-01	7,96E-02	5,71E-02	5,17E-02	5,09E-02	5,08E-02
430	1,83E-01	1,22E-01	7,80E-02	5,60E-02	5,09E-02	5,01E-02	5,01E-02
440	1,85E-01	1,23E-01	7,80E-02	5,60E-02	5,09E-02	5,01E-02	5,02E-02
450	1,85E-01	1,23E-01	7,82E-02	5,61E-02	5,11E-02	5,03E-02	5,03E-02
460	1,82E-01	1,21E-01	7,66E-02	5,51E-02	5,01E-02	4,94E-02	4,94E-02
470	1,83E-01	1,21E-01	7,65E-02	5,50E-02	5,02E-02	4,94E-02	4,95E-02
480	1,84E-01	1,22E-01	7,68E-02	5,51E-02	5,02E-02	4,94E-02	4,95E-02
490	1,80E-01	1,20E-01	7,53E-02	5,42E-02	4,95E-02	4,88E-02	4,88E-02
500	1,82E-01	1,21E-01	7,63E-02	5,48E-02	5,01E-02	4,94E-02	4,95E-02
510	1,80E-01	1,20E-01	7,59E-02	5,47E-02	5,01E-02	4,94E-02	4,95E-02
520	1,78E-01	1,18E-01	7,46E-02	5,40E-02	4,94E-02	4,88E-02	4,88E-02
530	1,74E-01	1,16E-01	7,34E-02	5,33E-02	4,88E-02	4,82E-02	4,83E-02
540	1,73E-01	1,15E-01	7,33E-02	5,33E-02	4,89E-02	4,83E-02	4,83E-02
550	1,71E-01	1,14E-01	7,28E-02	5,32E-02	4,88E-02	4,82E-02	4,83E-02
560	1,69E-01	1,13E-01	7,24E-02	5,31E-02	4,88E-02	4,82E-02	4,83E-02
570	1,68E-01	1,12E-01	7,19E-02	5,29E-02	4,88E-02	4,82E-02	4,83E-02
580	1,68E-01	1,13E-01	7,21E-02	5,30E-02	4,88E-02	4,82E-02	4,83E-02
590	1,68E-01	1,12E-01	7,20E-02	5,31E-02	4,89E-02	4,83E-02	4,84E-02
600	1,66E-01	1,10E-01	7,09E-02	5,24E-02	4,83E-02	4,77E-02	4,78E-02
610	1,64E-01	1,09E-01	7,02E-02	5,18E-02	4,77E-02	4,72E-02	4,73E-02
620	1,64E-01	1,09E-01	7,04E-02	5,20E-02	4,79E-02	4,73E-02	4,74E-02

630	1,66E-01	1,10E-01	7,10E-02	5,22E-02	4,80E-02	4,74E-02	4,74E-02
640	1,69E-01	1,12E-01	7,17E-02	5,24E-02	4,81E-02	4,74E-02	4,75E-02
650	1,71E-01	1,13E-01	7,22E-02	5,27E-02	4,83E-02	4,76E-02	4,77E-02
660	1,77E-01	1,16E-01	7,36E-02	5,31E-02	4,84E-02	4,77E-02	4,77E-02
670	1,82E-01	1,19E-01	7,44E-02	5,33E-02	4,83E-02	4,76E-02	4,76E-02
680	1,86E-01	1,21E-01	7,51E-02	5,31E-02	4,80E-02	4,72E-02	4,72E-02
690	1,90E-01	1,23E-01	7,58E-02	5,31E-02	4,76E-02	4,67E-02	4,67E-02
700	2,04E-01	1,31E-01	7,99E-02	5,52E-02	4,91E-02	4,81E-02	4,81E-02
710	2,11E-01	1,35E-01	8,22E-02	5,61E-02	4,96E-02	4,84E-02	4,84E-02
720	2,20E-01	1,40E-01	8,42E-02	5,63E-02	4,92E-02	4,80E-02	4,79E-02
730	2,28E-01	1,45E-01	8,67E-02	5,74E-02	4,97E-02	4,83E-02	4,82E-02
740	2,31E-01	1,46E-01	8,75E-02	5,76E-02	4,95E-02	4,80E-02	4,78E-02
750	2,43E-01	1,54E-01	9,23E-02	6,05E-02	5,16E-02	4,98E-02	4,95E-02
760	2,56E-01	1,62E-01	9,62E-02	6,19E-02	5,21E-02	5,01E-02	4,98E-02
770	2,58E-01	1,63E-01	9,62E-02	6,09E-02	5,06E-02	4,85E-02	4,80E-02
780	2,58E-01	1,64E-01	9,83E-02	6,30E-02	5,25E-02	5,03E-02	4,98E-02
800	2,90E-01	1,88E-01	1,19E-01	7,66E-02	5,89E-02	5,27E-02	5,00E-02
850	3,36E-01	2,17E-01	1,36E-01	8,60E-02	6,36E-02	5,51E-02	5,12E-02
900	3,97E-01	2,58E-01	1,63E-01	1,03E-01	7,38E-02	6,22E-02	5,66E-02
950	3,90E-01	2,56E-01	1,63E-01	1,02E-01	7,36E-02	6,21E-02	5,65E-02
1000	4,22E-01	2,73E-01	1,70E-01	1,04E-01	7,38E-02	6,27E-02	5,77E-02
1050	4,49E-01	2,86E-01	1,73E-01	1,03E-01	7,22E-02	6,15E-02	5,68E-02
1100	4,46E-01	2,83E-01	1,70E-01	1,01E-01	7,16E-02	6,15E-02	5,72E-02
1150	4,17E-01	2,67E-01	1,63E-01	9,81E-02	7,09E-02	6,20E-02	5,85E-02
1200	3,86E-01	2,48E-01	1,54E-01	9,50E-02	6,96E-02	6,11E-02	5,75E-02
1250	1,04E-01	7,97E-02	6,33E-02	5,32E-02	4,89E-02	4,74E-02	4,69E-02
1300	5,98E-02	5,38E-02	4,98E-02	4,74E-02	4,62E-02	4,59E-02	4,58E-02
1350	5,13E-02	4,92E-02	4,77E-02	4,67E-02	4,63E-02	4,62E-02	4,62E-02
1400	4,90E-02	4,93E-02	4,92E-02	4,84E-02	4,78E-02	4,82E-02	4,95E-02
1450	5,03E-02	5,34E-02	5,58E-02	5,54E-02	5,47E-02	5,79E-02	6,54E-02
1500	5,57E-02	5,96E-02	6,18E-02	6,02E-02	5,92E-02	6,24E-02	7,14E-02
1550	6,87E-02	6,65E-02	6,26E-02	5,81E-02	5,54E-02	5,61E-02	5,92E-02
1600	8,78E-02	7,73E-02	6,75E-02	6,00E-02	5,57E-02	5,47E-02	5,54E-02
1650	9,55E-02	8,01E-02	6,79E-02	5,87E-02	5,39E-02	5,25E-02	5,26E-02
1700	9,10E-02	7,68E-02	6,55E-02	5,74E-02	5,29E-02	5,14E-02	5,13E-02
1750	7,92E-02	7,03E-02	6,27E-02	5,66E-02	5,30E-02	5,21E-02	5,23E-02
1800	6,98E-02	6,48E-02	6,04E-02	5,57E-02	5,33E-02	5,31E-02	5,40E-02
1850	4,32E-02						
1900	4,41E-02						
1950	4,36E-02						
2000	4,58E-02						
2050	4,39E-02						
2100	4,18E-02						
2200	4,69E-02	4,72E-02	4,74E-02	4,74E-02	4,72E-02	4,71E-02	4,70E-02
2300	4,18E-02	4,18E-02	4,19E-02	4,19E-02	4,19E-02	4,18E-02	4,18E-02
2400	3,97E-02						
2500	3,43E-02						

Tabelle 71: Spektrale Reflexionsgrade $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F1 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF

Wellenlänge λ	Spektrale Absorptionsgrade der äußeren Fluidschicht Abs_Z3(λ) im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F1 (SZR 2 mm).						
	Abs_Z3(λ)_xf0%	Abs_Z3(λ)_xf0,5%	Abs_Z3(λ)_xf1%	Abs_Z3(λ)_xf1,5%	Abs_Z3(λ)_xf2%	Abs_Z3(λ)_xf2,5%	Abs_Z3(λ)_xf3%
[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
300	2,44E-04	5,16E-02	9,82E-02	1,37E-01	1,59E-01	7,73E-01	1,74E-01
305	3,53E-04	8,07E-02	1,55E-01	2,17E-01	2,51E-01	6,64E-01	2,73E-01
310	4,65E-04	1,14E-01	2,21E-01	3,10E-01	3,58E-01	5,43E-01	3,87E-01

315	5,58E-04	1,47E-01	2,86E-01	4,03E-01	4,62E-01	4,21E-01	4,97E-01
320	6,27E-04	1,78E-01	3,47E-01	4,88E-01	5,58E-01	3,15E-01	5,95E-01
325	6,69E-04	2,06E-01	4,00E-01	5,57E-01	6,34E-01	2,28E-01	6,74E-01
330	6,85E-04	2,30E-01	4,47E-01	6,21E-01	7,03E-01	1,54E-01	7,42E-01
335	6,70E-04	2,48E-01	4,81E-01	6,65E-01	7,52E-01	1,01E-01	7,90E-01
340	6,37E-04	2,67E-01	5,11E-01	7,00E-01	7,88E-01	5,87E-02	8,26E-01
345	5,79E-04	2,68E-01	5,18E-01	7,15E-01	8,05E-01	4,63E-02	8,41E-01
350	5,28E-04	2,74E-01	5,30E-01	7,31E-01	8,20E-01	2,49E-02	8,49E-01
355	4,70E-04	2,76E-01	5,36E-01	7,39E-01	8,28E-01	1,73E-02	8,56E-01
360	4,13E-04	2,76E-01	5,36E-01	7,41E-01	8,30E-01	1,25E-02	8,58E-01
365	3,61E-04	2,77E-01	5,37E-01	7,41E-01	8,31E-01	1,35E-02	8,58E-01
370	3,15E-04	2,76E-01	5,42E-01	7,46E-01	8,37E-01	6,73E-03	8,62E-01
375	2,63E-04	2,72E-01	5,35E-01	7,38E-01	8,29E-01	1,73E-02	8,54E-01
380	2,27E-04	2,75E-01	5,38E-01	7,46E-01	8,37E-01	7,70E-03	8,63E-01
390	1,68E-04	2,71E-01	5,37E-01	7,45E-01	8,36E-01	1,06E-02	8,61E-01
400	1,30E-04	2,72E-01	5,40E-01	7,49E-01	8,41E-01	4,81E-03	8,65E-01
410	1,03E-04	2,72E-01	5,38E-01	7,49E-01	8,41E-01	4,82E-03	8,65E-01
420	8,96E-05	2,72E-01	5,41E-01	7,51E-01	8,44E-01	2,88E-03	8,67E-01
430	7,94E-05	2,72E-01	5,40E-01	7,53E-01	8,45E-01	3,85E-03	8,66E-01
440	7,09E-05	2,73E-01	5,43E-01	7,55E-01	8,47E-01	2,88E-03	8,68E-01
450	6,25E-05	2,73E-01	5,42E-01	7,54E-01	8,45E-01	4,81E-03	8,66E-01
460	5,75E-05	2,73E-01	5,44E-01	7,55E-01	8,47E-01	4,81E-03	8,67E-01
470	5,48E-05	2,75E-01	5,47E-01	7,58E-01	8,48E-01	4,82E-03	8,67E-01
480	5,41E-05	2,76E-01	5,48E-01	7,60E-01	8,50E-01	2,88E-03	8,69E-01
490	5,41E-05	2,76E-01	5,48E-01	7,58E-01	8,48E-01	5,77E-03	8,67E-01
500	5,51E-05	2,76E-01	5,49E-01	7,62E-01	8,51E-01	3,85E-03	8,68E-01
510	5,88E-05	2,76E-01	5,48E-01	7,61E-01	8,50E-01	3,85E-03	8,68E-01
520	6,49E-05	2,77E-01	5,49E-01	7,61E-01	8,50E-01	4,82E-03	8,67E-01
530	7,37E-05	2,75E-01	5,47E-01	7,60E-01	8,49E-01	6,74E-03	8,66E-01
540	8,48E-05	2,75E-01	5,47E-01	7,60E-01	8,49E-01	6,74E-03	8,65E-01
550	9,70E-05	2,76E-01	5,48E-01	7,59E-01	8,48E-01	7,70E-03	8,64E-01
560	1,05E-04	2,74E-01	5,46E-01	7,58E-01	8,47E-01	8,67E-03	8,63E-01
570	1,37E-04	2,75E-01	5,48E-01	7,58E-01	8,47E-01	8,67E-03	8,63E-01
580	2,17E-04	2,76E-01	5,48E-01	7,58E-01	8,47E-01	8,67E-03	8,63E-01
590	3,44E-04	2,76E-01	5,46E-01	7,56E-01	8,44E-01	1,06E-02	8,61E-01
600	4,90E-04	2,77E-01	5,46E-01	7,55E-01	8,43E-01	1,25E-02	8,59E-01
610	5,51E-04	2,75E-01	5,45E-01	7,54E-01	8,42E-01	1,44E-02	8,56E-01
620	5,84E-04	2,75E-01	5,43E-01	7,50E-01	8,38E-01	1,83E-02	8,53E-01
630	6,15E-04	2,77E-01	5,42E-01	7,49E-01	8,37E-01	1,74E-02	8,55E-01
640	6,49E-04	2,77E-01	5,42E-01	7,48E-01	8,36E-01	1,83E-02	8,54E-01
650	6,80E-04	2,76E-01	5,41E-01	7,47E-01	8,35E-01	2,02E-02	8,52E-01
660	7,48E-04	2,78E-01	5,42E-01	7,47E-01	8,34E-01	2,12E-02	8,52E-01
670	8,43E-04	2,80E-01	5,44E-01	7,48E-01	8,35E-01	1,93E-02	8,54E-01
680	9,74E-04	2,81E-01	5,43E-01	7,45E-01	8,31E-01	2,22E-02	8,52E-01
690	1,14E-03	2,81E-01	5,42E-01	7,42E-01	8,29E-01	2,41E-02	8,50E-01
700	1,33E-03	2,84E-01	5,44E-01	7,42E-01	8,29E-01	2,22E-02	8,51E-01
710	2,07E-03	2,84E-01	5,42E-01	7,39E-01	8,26E-01	2,32E-02	8,50E-01
720	3,06E-03	2,85E-01	5,41E-01	7,36E-01	8,23E-01	2,61E-02	8,48E-01
730	4,09E-03	2,85E-01	5,39E-01	7,33E-01	8,20E-01	2,70E-02	8,46E-01
740	5,03E-03	2,85E-01	5,35E-01	7,26E-01	8,13E-01	3,19E-02	8,41E-01
750	5,97E-03	2,85E-01	5,33E-01	7,22E-01	8,09E-01	3,19E-02	8,40E-01
760	6,11E-03	2,85E-01	5,32E-01	7,19E-01	8,06E-01	3,39E-02	8,37E-01
770	5,77E-03	2,84E-01	5,27E-01	7,13E-01	8,00E-01	3,97E-02	8,33E-01
780	5,31E-03	2,79E-01	5,21E-01	7,06E-01	7,94E-01	4,16E-02	8,28E-01
800	4,70E-03	2,68E-01	4,83E-01	6,51E-01	7,49E-01	3,41E-02	8,21E-01
850	1,08E-02	2,74E-01	4,83E-01	6,44E-01	7,39E-01	4,40E-02	8,13E-01
900	1,77E-02	2,81E-01	4,86E-01	6,42E-01	7,35E-01	4,91E-02	8,11E-01
950	9,91E-02	3,37E-01	5,24E-01	6,64E-01	7,47E-01	5,61E-02	8,10E-01
1000	9,57E-02	3,46E-01	5,37E-01	6,80E-01	7,59E-01	5,72E-02	8,14E-01

1050	8,32E-02	3,46E-01	5,47E-01	6,93E-01	7,70E-01	5,81E-02	8,20E-01
1100	1,23E-01	3,79E-01	5,73E-01	7,11E-01	7,83E-01	5,60E-02	8,28E-01
1150	1,89E-01	4,21E-01	5,99E-01	7,26E-01	7,91E-01	5,61E-02	8,27E-01
1200	2,59E-01	4,70E-01	6,29E-01	7,42E-01	8,01E-01	5,51E-02	8,36E-01
1250	7,31E-01	7,81E-01	8,21E-01	8,51E-01	8,68E-01	5,52E-02	8,78E-01
1300	8,43E-01	8,61E-01	8,75E-01	8,86E-01	8,93E-01	4,83E-02	8,97E-01
1350	8,75E-01	8,84E-01	8,92E-01	8,98E-01	9,01E-01	4,34E-02	9,03E-01
1400	8,83E-01	8,82E-01	8,82E-01	8,86E-01	8,88E-01	4,36E-02	8,81E-01
1450	8,86E-01	8,76E-01	8,70E-01	8,71E-01	8,73E-01	3,72E-02	8,46E-01
1500	8,72E-01	8,62E-01	8,57E-01	8,61E-01	8,63E-01	3,55E-02	8,35E-01
1550	8,46E-01	8,51E-01	8,60E-01	8,70E-01	8,77E-01	3,32E-02	8,68E-01
1600	8,17E-01	8,36E-01	8,56E-01	8,72E-01	8,83E-01	2,83E-02	8,84E-01
1650	7,99E-01	8,27E-01	8,51E-01	8,71E-01	8,83E-01	3,12E-02	8,86E-01
1700	8,07E-01	8,33E-01	8,55E-01	8,74E-01	8,85E-01	3,21E-02	8,90E-01
1750	8,24E-01	8,42E-01	8,58E-01	8,72E-01	8,82E-01	3,41E-02	8,84E-01
1800	8,44E-01	8,54E-01	8,64E-01	8,76E-01	8,82E-01	3,51E-02	8,80E-01
1850	9,15E-01	9,15E-01	9,15E-01	9,15E-01	9,15E-01	4,15E-02	9,15E-01
1900	9,16E-01	9,16E-01	9,16E-01	9,16E-01	9,16E-01	4,05E-02	9,16E-01
1950	9,10E-01	9,10E-01	9,10E-01	9,10E-01	9,10E-01	4,66E-02	9,10E-01
2000	9,10E-01	9,10E-01	9,10E-01	9,10E-01	9,10E-01	4,44E-02	9,10E-01
2050	9,08E-01	9,08E-01	9,08E-01	9,08E-01	9,08E-01	4,84E-02	9,08E-01
2100	9,07E-01	9,07E-01	9,07E-01	9,07E-01	9,07E-01	5,13E-02	9,07E-01
2200	8,67E-01	8,64E-01	8,62E-01	8,63E-01	8,64E-01	7,56E-02	8,65E-01
2300	8,66E-01	8,65E-01	8,64E-01	8,64E-01	8,65E-01	8,94E-02	8,66E-01
2400	8,59E-01	8,59E-01	8,59E-01	8,59E-01	8,59E-01	1,01E-01	8,59E-01
2500	8,12E-01	8,12E-01	8,12E-01	8,12E-01	8,12E-01	1,53E-01	8,12E-01

Tabelle 72: Spektrale Absorptionsgrade der äußeren Fluidschicht Abs_Z3(λ) im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F1 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF

Fluidglas (FGGF) mit Einfärbung Xfast® Schwarz 0050 im inneren Fluid (F2); Fluidschichtdicke 2 mm; Ergebnisse Strahlungsmodell für senkrechte Einstrahlung:

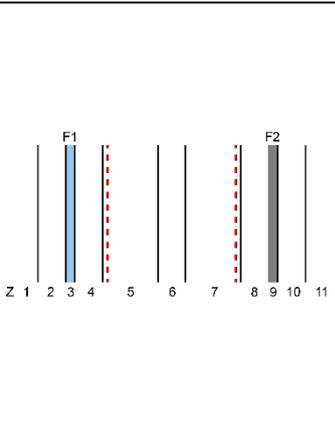
Vol. %-Anteil Xfast® Schwarz 0050 – F2	0%	0,5%	1%	1,5%	2%	2,5%	3%	
	Tvis	0,698	0,512	0,317	0,154	0,082	0,065	0,068
	Rvis	0,172	0,160	0,152	0,148	0,147	0,147	0,147
	Tsol	0,447	0,331	0,212	0,113	0,065	0,051	0,049
	Rsol	0,223	0,216	0,212	0,210	0,209	0,209	0,209
	Abs_total	0,331	0,453	0,576	0,678	0,726	0,740	0,742
	Abs_Z2	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037
	Abs_Z3	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137	0,137
	Abs_Z4	0,082	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081	0,081
	Abs_Z6	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
	Abs_Z8	0,042	0,042	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041
	Abs_Z9	0,005	0,131	0,257	0,361	0,411	0,425	0,428
	Abs_Z10	0,009	0,007	0,005	0,003	0,002	0,001	0,001

Tabelle 73: Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade nach EN 410 bei senkrechter Einstrahlung für den Aufbau FGGF mit Einfärbung im äußeren Fluid (F2) mit Xfast® Schwarz 0050 in unterschiedlichen Einfärbungsstufen; Fluidschichten jeweils 2 mm dick

Wellenlänge λ	Spektrale Transmissionsgrade $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F2 (SZR 2 mm).						
	$T(\lambda)_{xf0\%}$	$T(\lambda)_{xf0,5\%}$	$T(\lambda)_{xf1\%}$	$T(\lambda)_{xf1,5\%}$	$T(\lambda)_{xf2\%}$	$T(\lambda)_{xf2,5\%}$	$T(\lambda)_{xf3\%}$
[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
300	9,60E-07	6,88E-07	4,40E-07	2,35E-07	1,18E-07	6,37E-08	3,63E-08
305	5,34E-05	3,85E-05	2,47E-05	1,32E-05	6,75E-06	3,92E-06	2,49E-06
310	6,95E-04	5,05E-04	3,24E-04	1,72E-04	9,02E-05	5,63E-05	3,94E-05
315	4,03E-03	2,94E-03	1,89E-03	9,97E-04	5,31E-04	3,48E-04	2,61E-04
320	1,44E-02	1,06E-02	6,78E-03	3,54E-03	1,91E-03	1,30E-03	1,02E-03
325	3,62E-02	2,66E-02	1,71E-02	9,04E-03	4,91E-03	3,39E-03	2,75E-03
330	7,35E-02	5,43E-02	3,48E-02	1,82E-02	9,87E-03	7,01E-03	5,93E-03
335	1,20E-01	8,88E-02	5,70E-02	2,98E-02	1,62E-02	1,17E-02	9,95E-03
340	1,74E-01	1,28E-01	8,18E-02	4,29E-02	2,34E-02	1,69E-02	1,47E-02
345	2,25E-01	1,67E-01	1,07E-01	5,55E-02	3,01E-02	2,20E-02	1,93E-02
350	2,98E-01	2,21E-01	1,42E-01	7,38E-02	4,09E-02	3,14E-02	3,01E-02
355	3,54E-01	2,63E-01	1,68E-01	8,69E-02	4,83E-02	3,74E-02	3,56E-02
360	4,02E-01	2,99E-01	1,92E-01	9,86E-02	5,48E-02	4,23E-02	4,09E-02
365	4,65E-01	3,45E-01	2,21E-01	1,14E-01	6,30E-02	4,88E-02	4,75E-02
370	5,29E-01	3,93E-01	2,50E-01	1,28E-01	7,05E-02	5,49E-02	5,34E-02
375	5,55E-01	4,12E-01	2,62E-01	1,35E-01	7,36E-02	5,75E-02	5,59E-02
380	6,23E-01	4,62E-01	2,95E-01	1,50E-01	8,21E-02	6,43E-02	6,26E-02
390	6,56E-01	4,88E-01	3,09E-01	1,57E-01	8,55E-02	6,65E-02	6,56E-02
400	6,92E-01	5,13E-01	3,23E-01	1,64E-01	8,90E-02	6,97E-02	6,88E-02
410	6,91E-01	5,12E-01	3,23E-01	1,63E-01	8,86E-02	6,89E-02	6,81E-02
420	7,02E-01	5,20E-01	3,26E-01	1,64E-01	8,79E-02	6,92E-02	6,88E-02
430	6,99E-01	5,17E-01	3,25E-01	1,61E-01	8,66E-02	6,82E-02	6,86E-02
440	7,06E-01	5,22E-01	3,26E-01	1,61E-01	8,66E-02	6,85E-02	6,89E-02
450	7,04E-01	5,20E-01	3,26E-01	1,61E-01	8,61E-02	6,77E-02	6,84E-02
460	7,04E-01	5,20E-01	3,24E-01	1,60E-01	8,53E-02	6,74E-02	6,82E-02
470	7,05E-01	5,20E-01	3,23E-01	1,58E-01	8,47E-02	6,70E-02	6,84E-02
480	7,11E-01	5,24E-01	3,26E-01	1,60E-01	8,52E-02	6,73E-02	6,87E-02
490	7,07E-01	5,21E-01	3,23E-01	1,58E-01	8,40E-02	6,67E-02	6,84E-02
500	7,14E-01	5,25E-01	3,26E-01	1,58E-01	8,37E-02	6,67E-02	6,88E-02
510	7,15E-01	5,26E-01	3,26E-01	1,58E-01	8,40E-02	6,70E-02	6,90E-02
520	7,16E-01	5,26E-01	3,26E-01	1,58E-01	8,40E-02	6,70E-02	6,93E-02
530	7,10E-01	5,22E-01	3,23E-01	1,56E-01	8,28E-02	6,62E-02	6,88E-02
540	7,08E-01	5,20E-01	3,22E-01	1,56E-01	8,27E-02	6,64E-02	6,90E-02
550	7,06E-01	5,18E-01	3,20E-01	1,55E-01	8,27E-02	6,61E-02	6,86E-02
560	7,01E-01	5,16E-01	3,18E-01	1,54E-01	8,16E-02	6,55E-02	6,85E-02
570	6,97E-01	5,12E-01	3,15E-01	1,53E-01	8,10E-02	6,50E-02	6,82E-02
580	6,99E-01	5,13E-01	3,16E-01	1,53E-01	8,14E-02	6,55E-02	6,84E-02
590	6,90E-01	5,06E-01	3,12E-01	1,52E-01	8,09E-02	6,45E-02	6,73E-02
600	6,80E-01	4,97E-01	3,07E-01	1,50E-01	8,02E-02	6,42E-02	6,70E-02
610	6,72E-01	4,92E-01	3,03E-01	1,47E-01	7,88E-02	6,38E-02	6,74E-02
620	6,57E-01	4,80E-01	2,97E-01	1,45E-01	7,74E-02	6,25E-02	6,53E-02
630	6,49E-01	4,74E-01	2,95E-01	1,45E-01	7,79E-02	6,21E-02	6,38E-02
640	6,48E-01	4,73E-01	2,94E-01	1,45E-01	7,82E-02	6,25E-02	6,40E-02
650	6,29E-01	4,60E-01	2,86E-01	1,41E-01	7,57E-02	6,07E-02	6,24E-02
660	6,27E-01	4,58E-01	2,85E-01	1,41E-01	7,62E-02	6,09E-02	6,25E-02
670	6,18E-01	4,51E-01	2,81E-01	1,40E-01	7,57E-02	6,05E-02	6,16E-02
680	6,01E-01	4,39E-01	2,74E-01	1,37E-01	7,52E-02	5,98E-02	6,02E-02
690	5,90E-01	4,31E-01	2,70E-01	1,37E-01	7,51E-02	5,95E-02	5,95E-02
700	5,80E-01	4,23E-01	2,67E-01	1,36E-01	7,52E-02	5,95E-02	5,93E-02
710	5,69E-01	4,16E-01	2,64E-01	1,36E-01	7,59E-02	5,99E-02	5,88E-02
720	5,55E-01	4,07E-01	2,59E-01	1,35E-01	7,57E-02	5,97E-02	5,82E-02
730	5,40E-01	3,97E-01	2,54E-01	1,34E-01	7,60E-02	5,97E-02	5,79E-02
740	5,06E-01	3,72E-01	2,40E-01	1,28E-01	7,34E-02	5,75E-02	5,50E-02
750	4,96E-01	3,66E-01	2,38E-01	1,29E-01	7,49E-02	5,82E-02	5,50E-02
760	4,82E-01	3,57E-01	2,33E-01	1,28E-01	7,48E-02	5,83E-02	5,50E-02

770	4,60E-01	3,41E-01	2,24E-01	1,24E-01	7,33E-02	5,70E-02	5,30E-02
780	4,28E-01	3,19E-01	2,11E-01	1,18E-01	7,01E-02	5,45E-02	5,04E-02
800	4,33E-01	3,30E-01	2,36E-01	1,55E-01	1,03E-01	7,68E-02	6,20E-02
850	3,80E-01	2,92E-01	2,12E-01	1,43E-01	9,75E-02	7,34E-02	5,90E-02
900	3,28E-01	2,54E-01	1,88E-01	1,30E-01	8,97E-02	6,74E-02	5,33E-02
950	2,64E-01	2,05E-01	1,53E-01	1,06E-01	7,49E-02	5,77E-02	4,71E-02
1000	2,20E-01	1,70E-01	1,25E-01	8,56E-02	5,98E-02	4,68E-02	3,93E-02
1050	1,84E-01	1,41E-01	1,03E-01	6,90E-02	4,75E-02	3,71E-02	3,15E-02
1100	1,46E-01	1,12E-01	8,11E-02	5,40E-02	3,70E-02	2,90E-02	2,49E-02
1150	1,10E-01	8,49E-02	6,17E-02	4,12E-02	2,86E-02	2,31E-02	2,05E-02
1200	8,25E-02	6,35E-02	4,62E-02	3,12E-02	2,18E-02	1,75E-02	1,54E-02
1250	1,17E-02	9,00E-03	6,54E-03	4,39E-03	3,06E-03	2,45E-03	2,17E-03
1300	2,42E-03	1,85E-03	1,36E-03	9,22E-04	6,39E-04	5,16E-04	4,69E-04
1350	7,72E-04	6,06E-04	4,50E-04	3,10E-04	2,30E-04	2,02E-04	1,98E-04
1400	4,71E-04	4,88E-04	4,80E-04	4,31E-04	3,94E-04	4,23E-04	4,97E-04
1450	5,57E-04	6,98E-04	7,88E-04	7,75E-04	7,48E-04	8,60E-04	1,08E-03
1500	1,01E-03	1,17E-03	1,25E-03	1,19E-03	1,15E-03	1,27E-03	1,57E-03
1550	1,94E-03	1,84E-03	1,67E-03	1,45E-03	1,29E-03	1,33E-03	1,49E-03
1600	2,94E-03	2,55E-03	2,13E-03	1,73E-03	1,46E-03	1,39E-03	1,44E-03
1650	3,13E-03	2,62E-03	2,13E-03	1,67E-03	1,37E-03	1,27E-03	1,27E-03
1700	2,64E-03	2,20E-03	1,78E-03	1,40E-03	1,14E-03	1,05E-03	1,03E-03
1750	1,60E-03	1,38E-03	1,16E-03	9,49E-04	7,99E-04	7,54E-04	7,65E-04
1800	1,02E-03	9,13E-04	8,05E-04	6,72E-04	5,92E-04	5,84E-04	6,18E-04
1850	2,91E-08	2,95E-08	2,72E-08	2,31E-08	1,99E-08	2,01E-08	2,25E-08
1900	5,97E-12	4,12E-12	3,25E-12	3,08E-12	3,25E-12	3,29E-12	3,25E-12
1950	3,34E-14	1,03E-13	2,22E-13	2,56E-13	2,22E-13	2,11E-13	2,22E-13
2000	1,42E-14	5,66E-14	1,43E-13	1,71E-13	1,43E-13	1,35E-13	1,43E-13
2050	6,62E-13	8,05E-13	9,22E-13	9,45E-13	9,22E-13	9,10E-13	9,22E-13
2100	3,79E-10	4,99E-10	6,11E-10	6,57E-10	6,11E-10	5,17E-10	4,07E-10
2200	9,26E-06	1,11E-05	1,23E-05	1,22E-05	1,14E-05	1,08E-05	1,03E-05
2300	2,52E-07	3,24E-07	3,86E-07	3,94E-07	3,65E-07	3,24E-07	2,78E-07
2400	5,60E-12	9,06E-12	1,24E-11	1,32E-11	1,24E-11	1,23E-11	1,24E-11
2500	4,93E-17	6,72E-16	3,71E-15	5,55E-15	3,71E-15	3,36E-15	3,71E-15

Tabelle 74: Spektrale Transmissionsgrade $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F2 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF

Wellenlänge λ	Spektrale Reflexionsgrade $R(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F2 (SZR 2 mm)..						
	$R(\lambda)_{xf0\%}$	$R(\lambda)_{xf0,5\%}$	$R(\lambda)_{xf1\%}$	$R(\lambda)_{xf1,5\%}$	$R(\lambda)_{xf2\%}$	$R(\lambda)_{xf2,5\%}$	$R(\lambda)_{xf3\%}$
[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
300	4,69E-02	4,69E-02	4,69E-02	4,69E-02	4,69E-02	4,69E-02	4,69E-02
305	5,03E-02	5,03E-02	5,03E-02	5,03E-02	5,03E-02	5,03E-02	5,03E-02
310	5,04E-02	5,04E-02	5,04E-02	5,04E-02	5,04E-02	5,04E-02	5,04E-02
315	6,02E-02	6,02E-02	6,02E-02	6,02E-02	6,02E-02	6,02E-02	6,02E-02
320	7,59E-02	7,59E-02	7,59E-02	7,59E-02	7,59E-02	7,59E-02	7,59E-02
325	1,04E-01	1,04E-01	1,04E-01	1,04E-01	1,04E-01	1,04E-01	1,04E-01
330	1,39E-01	1,38E-01	1,38E-01	1,38E-01	1,38E-01	1,38E-01	1,38E-01
335	1,71E-01	1,71E-01	1,71E-01	1,70E-01	1,70E-01	1,70E-01	1,70E-01
340	2,06E-01	2,05E-01	2,05E-01	2,05E-01	2,04E-01	2,04E-01	2,04E-01
345	2,15E-01	2,13E-01	2,13E-01	2,12E-01	2,12E-01	2,12E-01	2,12E-01
350	2,32E-01	2,30E-01	2,29E-01	2,28E-01	2,28E-01	2,27E-01	2,27E-01
355	2,35E-01	2,32E-01	2,30E-01	2,28E-01	2,28E-01	2,28E-01	2,28E-01
360	2,34E-01	2,30E-01	2,27E-01	2,25E-01	2,25E-01	2,25E-01	2,25E-01
365	2,31E-01	2,25E-01	2,22E-01	2,20E-01	2,19E-01	2,19E-01	2,19E-01
370	2,36E-01	2,28E-01	2,23E-01	2,20E-01	2,20E-01	2,20E-01	2,20E-01
375	2,17E-01	2,09E-01	2,04E-01	2,01E-01	2,00E-01	2,00E-01	2,00E-01

1700	9,10E-02						
1750	7,92E-02						
1800	6,98E-02						
1850	4,32E-02						
1900	4,41E-02						
1950	4,36E-02						
2000	4,58E-02						
2050	4,39E-02						
2100	4,18E-02						
2200	4,69E-02						
2300	4,18E-02						
2400	3,97E-02						
2500	3,43E-02						

Tabelle 75: Spektrale Reflexionsgrade $T(\lambda)$ im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F2 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF

Wellenlänge λ	Spektrale Absorptionsgrade der äußeren Fluidschicht Abs_Z9(λ) im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F2 (SZR 2 mm).						
	Abs_Z9(λ)_xf0%	Abs_Z9(λ)_xf0,5%	Abs_Z9(λ)_xf1%	Abs_Z9(λ)_xf1,5%	Abs_Z9(λ)_xf2%	Abs_Z9(λ)_xf2,5%	Abs_Z9(λ)_xf3%
[nm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
300	7,18E-09	1,52E-06	2,89E-06	4,03E-06	4,67E-06	4,97E-06	4,85E-06
305	7,18E-09	5,25E-05	1,01E-04	1,41E-04	1,63E-04	4,97E-06	1,72E-04
310	7,18E-09	4,68E-04	9,10E-04	1,28E-03	1,48E-03	4,97E-06	1,56E-03
315	7,18E-09	2,08E-03	4,07E-03	5,75E-03	6,62E-03	4,97E-06	7,01E-03
320	7,18E-09	6,08E-03	1,20E-02	1,70E-02	1,96E-02	4,97E-06	2,07E-02
325	7,18E-09	1,35E-02	2,67E-02	3,77E-02	4,33E-02	4,97E-06	4,59E-02
330	7,18E-09	2,46E-02	4,90E-02	6,96E-02	7,97E-02	4,97E-06	8,42E-02
335	7,18E-09	3,74E-02	7,48E-02	1,06E-01	1,22E-01	4,97E-06	1,29E-01
340	7,18E-09	5,29E-02	1,05E-01	1,47E-01	1,69E-01	4,97E-06	1,78E-01
345	7,18E-09	6,57E-02	1,31E-01	1,87E-01	2,15E-01	4,97E-06	2,26E-01
350	7,18E-09	8,46E-02	1,70E-01	2,42E-01	2,77E-01	4,97E-06	2,88E-01
355	7,18E-09	9,97E-02	2,01E-01	2,86E-01	3,26E-01	4,97E-06	3,39E-01
360	7,18E-09	1,13E-01	2,27E-01	3,24E-01	3,69E-01	4,97E-06	3,84E-01
365	7,18E-09	1,31E-01	2,63E-01	3,75E-01	4,28E-01	4,97E-06	4,44E-01
370	7,18E-09	1,47E-01	2,99E-01	4,25E-01	4,84E-01	4,97E-06	5,02E-01
375	7,18E-09	1,56E-01	3,17E-01	4,50E-01	5,14E-01	4,97E-06	5,32E-01
380	7,18E-09	1,74E-01	3,51E-01	5,02E-01	5,71E-01	4,97E-06	5,92E-01
390	7,18E-09	1,83E-01	3,73E-01	5,31E-01	6,05E-01	4,97E-06	6,26E-01
400	7,18E-09	1,93E-01	3,93E-01	5,59E-01	6,35E-01	4,97E-06	6,56E-01
410	7,18E-09	1,94E-01	3,93E-01	5,60E-01	6,36E-01	4,97E-06	6,57E-01
420	7,18E-09	1,97E-01	4,01E-01	5,69E-01	6,47E-01	4,97E-06	6,67E-01
430	7,18E-09	1,96E-01	3,99E-01	5,69E-01	6,45E-01	4,97E-06	6,64E-01
440	7,18E-09	1,98E-01	4,05E-01	5,75E-01	6,51E-01	4,97E-06	6,70E-01
450	7,18E-09	1,98E-01	4,05E-01	5,75E-01	6,52E-01	4,97E-06	6,70E-01
460	7,18E-09	1,99E-01	4,06E-01	5,76E-01	6,52E-01	4,97E-06	6,70E-01
470	7,18E-09	2,00E-01	4,08E-01	5,79E-01	6,54E-01	4,97E-06	6,71E-01
480	7,18E-09	2,02E-01	4,11E-01	5,82E-01	6,58E-01	4,97E-06	6,76E-01
490	7,18E-09	2,02E-01	4,11E-01	5,82E-01	6,57E-01	4,97E-06	6,74E-01
500	7,18E-09	2,03E-01	4,14E-01	5,88E-01	6,63E-01	4,97E-06	6,79E-01
510	7,18E-09	2,04E-01	4,15E-01	5,89E-01	6,64E-01	4,97E-06	6,80E-01
520	7,18E-09	2,05E-01	4,17E-01	5,90E-01	6,66E-01	4,97E-06	6,82E-01
530	7,18E-09	2,03E-01	4,14E-01	5,87E-01	6,62E-01	4,97E-06	6,77E-01
540	7,18E-09	2,03E-01	4,12E-01	5,85E-01	6,60E-01	4,97E-06	6,74E-01
550	7,18E-09	2,04E-01	4,13E-01	5,84E-01	6,59E-01	4,97E-06	6,74E-01
560	7,18E-09	2,01E-01	4,11E-01	5,81E-01	6,55E-01	4,97E-06	6,69E-01
570	7,18E-09	2,01E-01	4,10E-01	5,78E-01	6,52E-01	4,97E-06	6,66E-01

580	7,18E-09	2,02E-01	4,11E-01	5,80E-01	6,53E-01	4,97E-06	6,67E-01
590	7,18E-09	2,01E-01	4,06E-01	5,73E-01	6,46E-01	4,97E-06	6,61E-01
600	7,18E-09	1,99E-01	4,02E-01	5,65E-01	6,37E-01	4,97E-06	6,51E-01
610	7,18E-09	1,96E-01	3,97E-01	5,60E-01	6,31E-01	4,97E-06	6,43E-01
620	7,18E-09	1,93E-01	3,90E-01	5,49E-01	6,19E-01	4,97E-06	6,32E-01
630	7,18E-09	1,91E-01	3,83E-01	5,41E-01	6,10E-01	4,97E-06	6,24E-01
640	7,18E-09	1,91E-01	3,83E-01	5,39E-01	6,08E-01	4,97E-06	6,23E-01
650	7,18E-09	1,85E-01	3,72E-01	5,25E-01	5,92E-01	4,97E-06	6,06E-01
660	7,18E-09	1,86E-01	3,71E-01	5,23E-01	5,90E-01	4,97E-06	6,05E-01
670	7,18E-09	1,83E-01	3,65E-01	5,13E-01	5,79E-01	4,97E-06	5,94E-01
680	7,18E-09	1,78E-01	3,55E-01	4,99E-01	5,64E-01	4,97E-06	5,80E-01
690	7,18E-09	1,75E-01	3,47E-01	4,88E-01	5,52E-01	4,97E-06	5,69E-01
700	7,18E-09	1,72E-01	3,40E-01	4,77E-01	5,41E-01	4,97E-06	5,57E-01
710	7,18E-09	1,68E-01	3,32E-01	4,66E-01	5,29E-01	4,97E-06	5,47E-01
720	7,18E-09	1,64E-01	3,23E-01	4,54E-01	5,16E-01	4,97E-06	5,34E-01
730	7,18E-09	1,59E-01	3,13E-01	4,40E-01	5,01E-01	4,97E-06	5,20E-01
740	7,18E-09	1,50E-01	2,93E-01	4,12E-01	4,69E-01	4,97E-06	4,89E-01
750	7,18E-09	1,46E-01	2,85E-01	4,01E-01	4,58E-01	4,97E-06	4,79E-01
760	7,18E-09	1,41E-01	2,75E-01	3,87E-01	4,43E-01	4,97E-06	4,65E-01
770	7,18E-09	1,34E-01	2,61E-01	3,68E-01	4,22E-01	4,97E-06	4,44E-01
780	7,18E-09	1,24E-01	2,42E-01	3,42E-01	3,93E-01	4,97E-06	4,14E-01
800	7,18E-09	1,15E-01	2,16E-01	3,03E-01	3,58E-01	4,97E-06	4,02E-01
850	7,18E-09	1,01E-01	1,87E-01	2,62E-01	3,10E-01	4,97E-06	3,52E-01
900	7,18E-09	8,70E-02	1,59E-01	2,22E-01	2,65E-01	4,97E-06	3,04E-01
950	7,18E-09	8,87E-02	1,46E-01	1,97E-01	2,31E-01	4,97E-06	2,61E-01
1000	7,18E-09	7,38E-02	1,23E-01	1,66E-01	1,94E-01	4,97E-06	2,16E-01
1050	7,18E-09	6,02E-02	1,02E-01	1,39E-01	1,62E-01	4,97E-06	1,80E-01
1100	7,18E-09	5,36E-02	8,73E-02	1,17E-01	1,35E-01	4,97E-06	1,48E-01
1150	7,18E-09	4,77E-02	7,30E-02	9,51E-02	1,09E-01	4,97E-06	1,17E-01
1200	7,18E-09	4,26E-02	6,12E-02	7,74E-02	8,75E-02	4,97E-06	9,43E-02
1250	7,18E-09	2,91E-02	3,17E-02	3,40E-02	3,54E-02	4,97E-06	3,60E-02
1300	7,18E-09	1,45E-02	1,50E-02	1,55E-02	1,58E-02	4,97E-06	1,57E-02
1350	7,18E-09	7,88E-03	8,05E-03	8,20E-03	8,28E-03	4,97E-06	8,15E-03
1400	7,18E-09	5,64E-03	5,65E-03	5,70E-03	5,74E-03	4,97E-06	5,51E-03
1450	7,18E-09	5,57E-03	5,47E-03	5,49E-03	5,51E-03	4,97E-06	5,07E-03
1500	7,18E-09	6,81E-03	6,72E-03	6,79E-03	6,83E-03	4,97E-06	6,30E-03
1550	7,18E-09	8,69E-03	8,87E-03	9,11E-03	9,27E-03	4,97E-06	8,93E-03
1600	7,18E-09	9,48E-03	9,91E-03	1,03E-02	1,06E-02	4,97E-06	1,05E-02
1650	7,18E-09	9,01E-03	9,52E-03	1,00E-02	1,03E-02	4,97E-06	1,03E-02
1700	7,18E-09	8,09E-03	8,53E-03	8,92E-03	9,19E-03	4,97E-06	9,21E-03
1750	7,18E-09	5,82E-03	6,04E-03	6,27E-03	6,42E-03	4,97E-06	6,38E-03
1800	7,18E-09	4,57E-03	4,68E-03	4,82E-03	4,91E-03	4,97E-06	4,82E-03
1850	7,18E-09	2,71E-05	2,71E-05	2,71E-05	2,71E-05	4,97E-06	2,55E-05
1900	7,18E-09	3,53E-07	3,53E-07	3,53E-07	3,53E-07	4,97E-06	3,20E-07
1950	7,18E-09	2,44E-08	2,43E-08	2,43E-08	2,43E-08	4,97E-06	2,16E-08
2000	7,18E-09	1,57E-08	1,57E-08	1,57E-08	1,57E-08	4,97E-06	1,39E-08
2050	7,18E-09	1,01E-07	1,01E-07	1,01E-07	1,01E-07	4,97E-06	9,11E-08
2100	7,18E-09	2,25E-06	2,25E-06	2,25E-06	2,25E-06	4,97E-06	2,08E-06
2200	7,18E-09	2,74E-04	2,73E-04	2,73E-04	2,74E-04	4,97E-06	2,67E-04
2300	7,18E-09	3,15E-05	3,14E-05	3,14E-05	3,14E-05	4,97E-06	3,01E-05
2400	7,18E-09	1,45E-07	1,45E-07	1,45E-07	1,45E-07	4,97E-06	1,32E-07
2500	7,18E-09	4,80E-10	4,80E-10	4,80E-10	4,80E-10	4,97E-06	4,11E-10

Tabelle 76: Spektrale Absorptionsgrade der äußeren Fluidschicht Abs_Z3(λ) im Wellenlängenbereich von 300 bis 2500 nm bei senkrechter Einstrahlung mit unterschiedlichen Farbkonzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in F2 (SZR 2 mm); Aufbau FGGF

**Fluidglas (FGGF) mit variablen Einfärbungskonzentrationsstufen von 0 bis 3 vol.-%
Xfast® Schwarz 0050 und variablen Fluidschichtstärken (F1 und F2) von 1 bis 6 mm;
Ergebnisse Strahlungsmodell für senkrechte Einstrahlung**

Einfärbung äußeres Fluid (F1):

Visuelle Transmissionsgrade Tvis bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF.								
		Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1). Inneres Fluid (F2) klares Wasser [Vol.-%]						
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Dicke SZR F1 und F2 [mm]	1	0,6976	0,5976	0,4696	0,3269	0,2383	0,2132	0,2174
	2	0,6975	0,5121	0,3166	0,1538	0,0818	0,0655	0,0681
	4	0,6973	0,3763	0,1443	0,0341	0,0097	0,0062	0,0067
	6	0,6970	0,2767	0,0658	0,0076	0,0011	0,0006	0,0007

Tabelle 77: Visuelle Transmissionsgrade bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F2; Ausgabe Strahlungsmodell

Solare Transmissionsgrade Tsol bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF.								
		Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1). Inneres Fluid (F2) klares Wasser [Vol.-%]						
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Dicke SZR F1 und F2 [mm]	1	0,4508	0,3880	0,3107	0,2254	0,1699	0,1507	0,1484
	2	0,4465	0,3308	0,2125	0,1128	0,0649	0,0509	0,0489
	4	0,4408	0,2422	0,1005	0,0293	0,0103	0,0063	0,0055
	6	0,4362	0,1779	0,0479	0,0080	0,0018	0,0008	0,0007

Tabelle 78: Solare Transmissionsgrade bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F2; Ausgabe Strahlungsmodell

Solare Absorptionsgrade in Fluid 1 (Abs Z3) bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF.								
		Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1). Inneres Fluid (F2) klares Wasser [Vol.-%]						
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Dicke SZR F1 und F2 [mm]	1	0,1081	0,2396	0,3886	0,5417	0,6384	0,6738	0,6814
	2	0,1371	0,3696	0,5813	0,7445	0,8204	0,8436	0,8485
	4	0,1625	0,5410	0,7718	0,8784	0,9069	0,9134	0,9148
	6	0,1779	0,6527	0,8528	0,9108	0,9202	0,9218	0,9222

Tabelle 79: Solare Absorptionsgrade von Fluid 1 (Z3) bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im äußeren Fluid (F1) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F1; Ausgabe Strahlungsmodell

Einfärbung inneres Fluid (F2):

Visuelle Transmissionsgrade Tvis bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF.								
		Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im inneren Fluid (F2). Äußeres Fluid (F1) klares Wasser [Vol.-%]						
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Dicke SZR F1 und F2 [mm]	1	0,698	0,6976	0,5976	0,4696	0,3269	0,2383	0,2132
	2	0,698	0,6975	0,5121	0,3166	0,1538	0,0818	0,0655
	4	0,697	0,6973	0,3763	0,1442	0,0341	0,0097	0,0062
	6	0,697	0,6970	0,2767	0,0658	0,0076	0,0011	0,0006

Tabelle 80: Visuelle Transmissionsgrade bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im inneren Fluid (F2) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F1; Ausgabe Strahlungsmodell

Solare Transmissionsgrade Tsol bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF.								
		Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im inneren Fluid (F2). Äußeres Fluid (F1) klares Wasser [Vol.-%]						
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Dicke SZR F1 und F2 [mm]	1	0,4508	0,3880	0,3107	0,2254	0,1699	0,1507	0,1483
	2	0,4465	0,3308	0,2125	0,1128	0,0649	0,0509	0,0488
	4	0,4408	0,2422	0,1005	0,0293	0,0103	0,0063	0,0055
	6	0,4362	0,1779	0,0479	0,0080	0,0018	0,0008	0,0006

Tabelle 81: Solare Transmissionsgrade bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im inneren Fluid (F2) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F1; Ausgabe Strahlungsmodell

Solare Absorptionsgrade in Fluid 1 (Abs_Z3) bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF.								
		Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im inneren Fluid (F2). Äußeres Fluid (F1) klares Wasser [Vol.-%]						
		0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Dicke SZR F1 und F2 [mm]	1	0,0037	0,0723	0,1559	0,2467	0,3052	0,3254	0,3280
	2	0,0047	0,1306	0,2569	0,3614	0,4110	0,4255	0,4277
	4	0,0063	0,2209	0,3697	0,4432	0,4628	0,4669	0,4678
	6	0,0080	0,2857	0,4209	0,4618	0,4682	0,4692	0,4694

Tabelle 82: Solare Absorptionsgrade von Fluid 1 (Z3) bei senkrechter Einstrahlung nach EN410 für den Aufbau FGGF mit unterschiedlichen Konzentrationen Xfast® Schwarz 0050 in Wasser im inneren Fluid (F2) und unterschiedlichen Scheibenzwischenräumen; SZR F1 und F2 analog variiert; klares Wasser in F1; Ausgabe Strahlungsmodell

16.7 Validierung Energiebilanzmodell

Prototyp Modellraumprüfstand

Validierung ohne Fluidfüllung

Verglasungsaufbau „LGGL_Modellraumprüfstand“ (ohne Fluid)		
	Tvis	0,473
	Rvis	0,353
	Tsol	0,233
	Rsol	0,356
	Abs_total	0,411
	Abs_Z2	0,142
	Abs_Z4	0,165
	Abs_Z6	0,046
	Abs_Z8	0,044
	Abs_Z10	0,014

Tabelle 83: Visuelle und solare Transmissions- und Reflexionsgrade und solare Absorptionsgrade nach EN 410; Verglasungsaufbau Prototyp im Modellraumprüfstand ohne Fluidfüllung („LGGL_Modellraumprüfstand“); senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

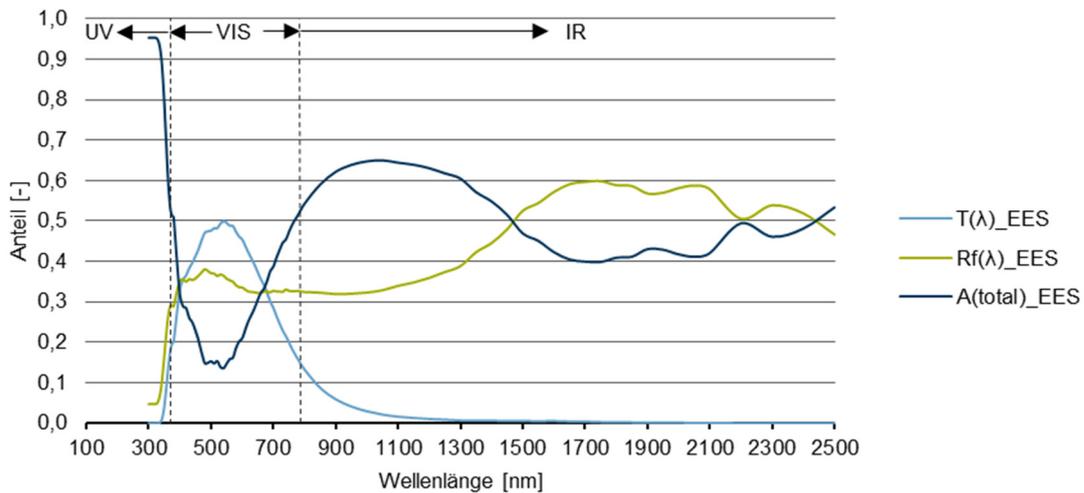


Abbildung 140: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade; Verglasungsaufbau Prototyp im Modellraumprüfstand ohne Fluidfüllung („LGGL_Modellraumprüfstand“); senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Validierung mit klarem Fluid

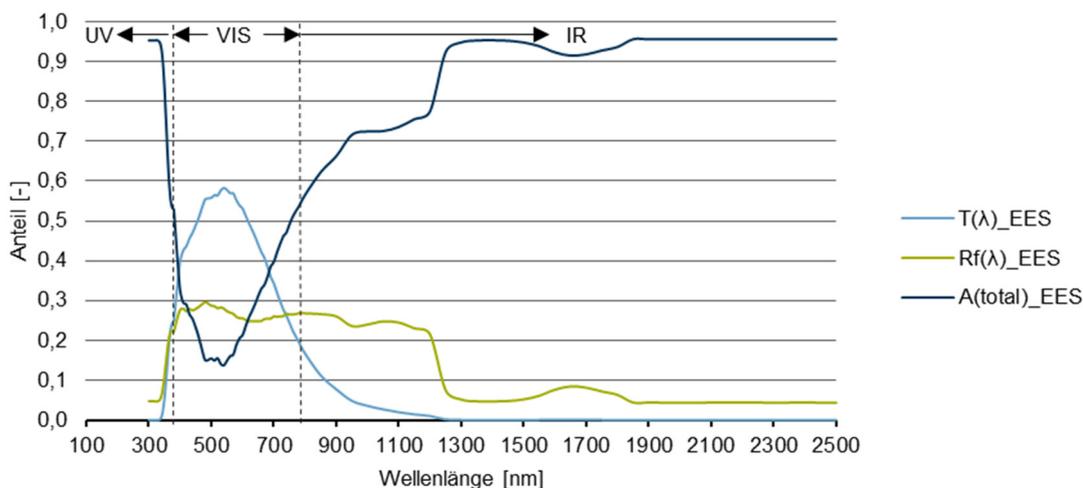


Abbildung 141: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade; Verglasungsaufbau Prototyp im Modellraumprüfstand mit klarem Fluid in F1 und F2 („FGGF_Modellraumprüfstand“); senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

Validierung mit eingefärbtem Fluid

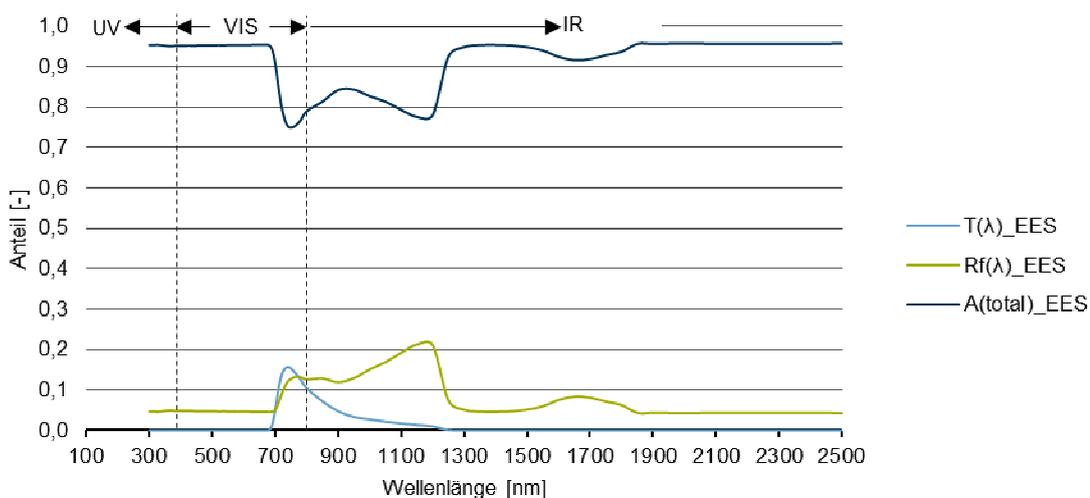


Abbildung 142: Spektrale Transmissions-, Reflexions- und Absorptionsgrade; Verglasungsaufbau Prototyp im Modellraumprüfstand („FGGF_Modellraumprüfstand“) mit 1% Einfärbung Basacid® X40 in F1 und klarem Fluid in F2; senkrechte Einstrahlung; Ausgabewerte Strahlungsmodell

16.8 Kenndaten Fluidglasaufbauten aus EES

Fluidglas als thermischer Solarkollektor

Variante 1 (EN 673): F1 und F2 klar, $T_{Z9} = T_{Z11}$; $\eta_0 = 0,312$					
$\Delta T (T_{Z3} - T_{Amb}), [K]$	0	10	20	30	40
$\Delta T/q_{sol}, [-]$	0	0,0125	0,025	0,0375	0,05
$\eta, [-]$	0,33	0,05	-0,24	-	-
$\dot{q}_{F1}, [W/m^2]$	211,30	-19,70	-251,70	-	-
$\dot{q}_{F2}, [W/m^2]$	52,24	56,15	60,56	-	-
$\dot{q}_{vZ3nZ1}, [W/m^2]$	0,50	227,40	455,20	-	-
$\dot{q}_{vZ11nZ9}, [W/m^2]$	0,03	-0,19	0,03	-	-
$T_{Z3_fluid_ein}, [^{\circ}C]$	23,50	34,87	46,85	-	-
$T_{Z3}, [^{\circ}C]$	25,02	35,01	45,04	-	-
$T_{Z3_fluid_aus}, [^{\circ}C]$	26,54	35,15	43,22	-	-
$T_{Z9_fluid_ein}, [^{\circ}C]$	24,12	24,12	24,06	-	-
$T_{Z9}, [^{\circ}C]$	24,50	24,52	24,50	-	-
$T_{Z9_fluid_aus}, [^{\circ}C]$	24,87	24,93	24,93	-	-

Tabelle 84: Wirkungsgrade der Solarkollektorfunktion Fluidglas Variante 1 (EN 673) mit F1 und F2 klar; $T_{Z9} = T_{Z11}$; $\eta_0 = 0,312$; äußere und innere Wärmeübergangskoeffizienten nach EN 673

Variante 2 (EN 673): F1 max. eingefärbt, F2 klar, $T_{Z9} = T_{Z11}$; $\eta_0 = 0,897$					
$\Delta T (T_{Z3} - T_{Amb}), [K]$	0	10	20	30	40
$\Delta T/q_{sol}, [-]$	0	0,0125	0,025	0,0375	0,05
$\eta, [-]$	0,88	0,61	0,33	0,05	-0,24
$\dot{q}_{F1}, [W/m^2]$	700,70	480,80	249,60	18,12	-213,30
$\dot{q}_{F2}, [W/m^2]$	7,20	11,14	15,31	19,53	23,79
$\dot{q}_{vZ3nZ1}, [W/m^2]$	11,29	227,20	454,30	681,50	908,70
$\dot{q}_{vZ11nZ9}, [W/m^2]$	-0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01
$T_{Z3_fluid_ein}, [^{\circ}C]$	20,45	31,54	43,20	54,87	66,53
$T_{Z3}, [^{\circ}C]$	25,50	35,00	45,00	55,00	65,00
$T_{Z3_fluid_aus}, [^{\circ}C]$	30,54	38,47	46,80	55,13	63,46
$T_{Z9_fluid_ein}, [^{\circ}C]$	24,45	24,42	24,39	24,36	24,33
$T_{Z9}, [^{\circ}C]$	24,50	24,50	24,50	24,50	24,50
$T_{Z9_fluid_aus}, [^{\circ}C]$	24,55	24,58	24,61	24,64	24,67

Tabelle 85: Wirkungsgrade der Solarkollektorfunktion Fluidglas Variante 2 (EN 673) mit F1 max. eingefärbt (3% Xfast); F2 klar; $T_{Z9} = T_{Z11}$; $\eta_0 = 0,897$; äußere und innere Wärmeübergangskoeffizienten nach EN 673

Variante 2 (1 m/s): F1 max. eingefärbt, F2 klar, T_Z9 = T_Z11; $\eta_0 = 0,897$						
$\Delta T (T_{Z3} - T_{Amb}), [K]$	0	10	20	30	40	50
$\Delta T/q_{sol}, [-]$	0	0,0125	0,025	0,0375	0,05	0,0625
$\eta, [-]$	0,90	0,73	0,56	0,38	0,21	0,02
$\dot{q}_{F1}, [W/m^2]$	711,20	570,03	428,85	287,68	146,50	-9,62
$\dot{q}_{F2}, [W/m^2]$	7,00	11,20	15,40	19,59	23,79	28,10
$\dot{q}_{vZ3nZ1}, [W/m^2]$	-0,01	137,22	274,45	411,67	548,90	700,70
$\dot{q}_{vZ11nZ9}, [W/m^2]$	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01
T_Z3_fluid_ein, [°C]	19,87	30,89	41,91	52,93	63,95	75,07
T_Z3, [°C]	25,00	35,00	45,00	55,00	65,00	75,00
T_Z3_fluid_aus, [°C]	30,13	39,11	48,10	57,08	66,06	74,93
T_Z9_fluid_ein, [°C]	24,45	24,42	24,39	24,36	24,33	24,30
T_Z9, [°C]	24,50	24,50	24,50	24,50	24,50	24,50
T_Z9_fluid_aus, [°C]	24,55	24,58	24,61	24,64	24,67	24,70

Tabelle 86: Wirkungsgrade der Solarkollektorfunktion Fluidglas Variante 2 (1 m/s) mit F1 max. eingefärbt (3% Xfast); F2 klar; T_Z9 = T_Z11; $\eta_0 = 0,897$; äußere und innere Wärmeübergangskoeffizienten berechnet; Windgeschwindigkeit außen 10 m/s

Variante 2 (10 m/s): F1 max. eingefärbt, F2 klar, T_Z9 = T_Z11; $\eta_0 = 0,897$					
$\Delta T (T_{Z3} - T_{Amb}), [K]$	0	10	20	30	40
$\Delta T/q_{sol}, [-]$	0	0,0125	0,025	0,0375	0,05
$\eta, [-]$	0,90	0,40	-0,10		
$\dot{q}_{F1}, [W/m^2]$	712,20	309,63	-92,94		
$\dot{q}_{F2}, [W/m^2]$	7,00	11,16	15,31		
$\dot{q}_{vZ3nZ1}, [W/m^2]$	-0,01	398,39	796,80		
$\dot{q}_{vZ11nZ9}, [W/m^2]$	0,00	0,00	0,00		
T_Z3_fluid_ein, [°C]	19,87	32,77	45,67		
T_Z3, [°C]	25,00	35,00	45,00		
T_Z3_fluid_aus, [°C]	30,13	37,23	44,33		
T_Z9_fluid_ein, [°C]	24,45	24,42	24,39		
T_Z9, [°C]	24,50	24,50	24,50		
T_Z9_fluid_aus, [°C]	24,55	24,58	24,61		

Tabelle 87: Wirkungsgrade der Solarkollektorfunktion Fluidglas Variante 2 (10m/s) mit F1 max. eingefärbt (3% Xfast); F2 klar; T_Z9 = T_Z11; $\eta_0 = 0,897$; äußere und innere Wärmeübergangskoeffizienten berechnet; Windgeschwindigkeit außen 10 m/s

Variante 3 (EN 673): F1 klar, F2 max. eingefärbt, T_Z9 = T_Z11; $\eta_0 = 0,724$					
$\Delta T (T_{Z3} - T_{Amb}), [K]$	0	10	20	30	40
$\Delta T/q_{sol}, [-]$	0	0,0125	0,025	0,0375	0,05
$\eta, [-]$	0,74	0,46	0,18	-0,11	
$\dot{q}_{F1}, [W/m^2]$	211,00	-20,39	-251,60	-483,10	
$\dot{q}_{F2}, [W/m^2]$	383,40	387,50	391,70	396,00	
$\dot{q}_{vZ3nZ1}, [W/m^2]$	-0,01	227,30	454,30	681,60	
$\dot{q}_{vZ11nZ9}, [W/m^2]$	-0,01	-0,03	-0,01	0,06	
T_Z3_fluid_ein, [°C]	23,48	35,15	46,81	58,48	
T_Z3, [°C]	25,00	35,00	45,00	55,00	
T_Z3_fluid_aus, [°C]	26,52	34,86	43,19	51,52	
T_Z9_fluid_ein, [°C]	21,74	21,71	21,68	21,64	
T_Z9, [°C]	24,50	24,50	27,32	24,49	
T_Z9_fluid_aus, [°C]	27,26	27,29	24,50	27,34	

Tabelle 88: Wirkungsgrade der Solarkollektorfunktion Fluidglas Variante 3; F1 klar, F2 max. eingefärbt; T_Z9 = T_Z11; $\eta_0 = 0,724$; äußere und innere Wärmeübergangskoeffizienten nach EN 673

Standort/Orientierung			Moskau, Nord	München, Süd	München, West	Riad, West
Datum/Uhrzeit		[TT.MM.JJ HH:MM]	14.2.13 19:00	12.2.13 13:00	9.7.14 17:00	29.7.13 15:00
Modus			Heizen	Heizen	Kühlen	Kühlen
Solare Einstrahlung	qsol	[W/m ²]	0,0	309,0	853,0	620,0
	qa_Z234	[W/m ²]	0,0	78,8	766,8	557,4
	qa_Z6	[W/m ²]	0,0	5,6	2,6	1,9
	qa_Z8910	[W/m ²]	0,0	145,2	6,0	4,3
Temperaturen	TZ1	[°C]	-23,0	0,0	32,0	46,5
	TZ11	[°C]	22,0	22,0	24,5	24,5
Fluide	TF1_ein	[°C]	0,0	0,0	20,0	40,0
	TF1_aus	[°C]	0,0	0,0	32,6	48,5
	mF1	[l/min·m]	0,0	0,0	1,0	1,0
	TF2_ein	[°C]	35,0	35,0	18,0	18,0
	TF2_aus	[°C]	33,0	35,3	18,8	18,9
	mF2	[l/min·m]	1,0	1,0	1,0	1,0
Wärmeströme	qF1	[W/m ²]	0,0	0,0	876,7	590,4
	qF2	[W/m ²]	-137,4	22,4	56,3	64,3
	qvZ1nZ3	[W/m ²]	-37,9	-96,6	112,4	46,4
	qvZ3nZ6	[W/m ²]	-37,9	-17,8	2,5	13,4
	qvZ6nZ9	[W/m ²]	-37,9	-12,3	5,1	15,2
	qvZ9nZ11	[W/m ²]	99,6	110,6	-45,2	-44,7
Heiz-/Kühlleistung F2	Z6 ↔ Z9	[%]	27,6%	10,0%	10,1%	25,4%
	Z9 ↔ Z11	[%]	72,4%	90,0%	89,9%	74,6%

Tabelle 89: Wärmeströme zwischen den Zonen für 1m² FGFG; Moskau, München und Riad; Ergebnisse aus EES-Fluidglasmodell

16.9 Pumpenstrombedarf

Verlustbeiwerte

	$d_{i,1}$	$d_{i,2}$	h	$h/d_{i,1}$	A_g/A_0	Q_g/Q_0	ζ_1	ζ_2
	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Einlauf (Idelchik, 1986, S. 532)								
	10,0		2	0,20			0,76	
	13,6		2	0,15			0,98	
Auslauf (Idelchik, 1986, S. 128)								
	10,0		2	0,20			0,17	
	13,6		2	0,15			0,25	
Abzweige (Stromtrennung) (Idelchik, 1986, S. 364)								
Abzweig 1	10,0	10,0			1,0	0,17	1,00	0,64
Abzweig 2	10,0	10,0			1,0	0,20	1,00	0,64
Abzweig 3	10,0	10,0			1,0	0,25	1,13	0,60
Abzweig 4	10,0	10,0			1,0	0,33	1,13	0,60
Abzweig 5	10,0	10,0			1,0	0,50	1,40	0,55
Abzweig 1	36,8	13,6			0,37	0,17	1,54	0,64
Abzweig 2	36,8	13,6			0,37	0,20	1,54	0,64
Abzweig 3	36,8	13,6			0,37	0,25	1,90	0,60
Abzweig 4	36,8	13,6			0,37	0,33	1,90	0,60
Abzweig 5	36,8	13,6			0,37	0,50	2,73	0,55
Abzweige (Stromvereinigung) (Idelchik, 1986, S. 353)								
Abzweig 1	10,0	10,0			1,0	0,50	0,50	0,75
Abzweig 2	10,0	10,0			1,0	0,33	-0,24	0,60
Abzweig 3	10,0	10,0			1,0	0,25	-0,24	0,60
Abzweig 4	10,0	10,0			1,0	0,20	-0,40	0,64
Abzweig 5	10,0	10,0			1,0	0,17	-0,40	0,64
Abzweig 1	36,8	13,6			0,37	1,00	12,20	1,00
Abzweig 2	36,8	13,6			0,37	0,50	2,24	0,75
Abzweig 3	36,8	13,6			0,37	0,33	0,59	0,60
Abzweig 4	36,8	13,6			0,37	0,25	0,59	0,60
Abzweig 5	36,8	13,6			0,37	0,20	-0,01	0,64
Querschnittsverengungen (Hakenesch, S. 34)								
							$\zeta = 1,5 \cdot \left(\frac{1 - \alpha_K}{\alpha_K} \right)$	
Querschnittserweiterungen (nach Borda-Carnotschem Stoßverlust)								
							$\zeta = \left(\frac{A_1}{A_2} - 1 \right)^2$	

Tabelle 90: Verlustbeiwerte der Fluidglassystemkomponenten

mit

$$\alpha_K \quad \text{Kontraktionszahl } \alpha_K \approx 0,614 + 0,133 \cdot \frac{A_2}{A_1} - 0,261 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 + 0,511 \cdot \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^3$$

 A_1 Durchströmte Rohrfläche Ausgangsquerschnitt

 A_2 Durchströmte Rohrfläche weiterführender Querschnitt

Fluidkennwerte

Wasser										
Temperatur	[°C]	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Druck p	[MPa]	9,81E-02								
Dichte ρ	[kg/m ³]	1,00E+03	1,00E+03	9,98E+02	9,96E+02	9,92E+02	9,88E+02	9,83E+02	9,78E+02	9,72E+02
Dynamische Viskosität η	[Pa·s]	1,79E-03	1,30E-03	1,01E-03	8,02E-04	6,54E-04	5,49E-04	4,70E-04	4,06E-04	3,55E-04
Kinematische Viskosität ν	[m ² /s]	1,79E-06	1,30E-06	1,01E-06	8,05E-07	6,59E-07	5,56E-07	4,78E-07	4,15E-07	3,65E-07
70% Wasser, 30% Propylenglycol										
Druck p	[MPa]	9,81E-02								
Dichte ρ	[kg/m ³]	1,03E+03	1,03E+03	1,02E+03	1,02E+03	1,01E+03	1,01E+03	1,00E+03	9,94E+02	9,86E+02
Dynamische Viskosität η	[Pa·s]	7,20E-03	4,50E-03	2,90E-03	2,10E-03	1,60E-03	1,20E-03	1,00E-03	3,60E-03	1,55E-02
Kinematische Viskosität ν	[m ² /s]	6,98E-06	4,38E-06	2,83E-06	2,06E-06	1,58E-06	1,19E-06	9,99E-07	3,62E-06	1,57E-05

**Tabelle 91: Fluidkennwerte für Berechnungen des Pumpenstrombedarfs (Quelle Wasser: (Idelchik, 1986, S. 9).
Quelle Wasser/Propylenglycol: Berechnungen NTB)**

Ergebnisse Pumpenstrombedarf¹⁵⁶

Volumenstrom [l/min·m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Druckverlust [mbar]										
Vorlauf:										
Verteilleitungen	0,40	1,51	3,15	5,15	7,62	10,44	13,63	17,20	21,14	25,39
Abzweige	0,43	1,73	3,89	6,92	10,81	15,57	21,19	27,68	35,04	43,25
Anbindeleitungen	0,03	0,06	0,09	0,11	0,21	0,30	0,40	0,53	0,70	0,84
Fluidglaselement:										
Einläufe	0,03	0,13	0,28	0,50	0,78	1,13	1,53	2,00	2,54	3,13
Düsenbänder (2 Stk.)	0,16	0,34	0,55	0,79	1,06	1,36	1,68	2,04	2,41	2,82
Fluidglas (freier Querschnitt)	0,60	1,21	1,81	2,42	3,02	3,62	4,23	4,83	5,43	6,04
Ausläufe	0,01	0,03	0,06	0,11	0,18	0,25	0,34	0,45	0,57	0,70
Rücklauf:										
Anbindeleitungen	0,03	0,06	0,09	0,11	0,21	0,30	0,40	0,53	0,70	0,84
Abzweige	0,12	0,46	1,04	1,85	2,90	4,17	5,68	7,41	9,38	11,58
Verteilleitungen	0,40	1,51	3,15	5,15	7,62	10,44	13,63	17,20	21,14	25,39
Gesamtsumme Druckverlust:										
Fluidglaselement	2,2	7,0	14,1	23,1	34,4	47,6	62,7	79,9	99,0	120,0
Fluidfassade	6,6	21,1	42,3	69,4	103,2	142,7	188,2	239,6	297,1	360,0
Strombedarf:										
Fluidfassade [kWh/a]	0,13	0,80	2,41	5,26	9,78	16,23	24,97	36,34	50,70	68,25
Bürofläche [kWh/m²a]	0,01	0,05	0,14	0,30	0,56	0,93	1,43	2,08	2,90	3,90

Tabelle 92: Ergebnisse Druckverluste und Pumpenstrombedarf Fluidglas; Rohrleitungen Innendurchmesser 10 mm (Variante 1)

¹⁵⁶ Für Tabelle 92 bis Tabelle 94 gilt: Ein Fluidglaselement hat die Abmessungen (Breite x Höhe) 1,15 m x 3,0 m. Eine Fluidglasfassade besteht aus 3 Fluidglaselementen und hat die Abmessung (Breite x Höhe) 3,5 m x 3,0 m. Bürofläche: 17,5 m². Gesamtwirkungsgrad der Pumpe: 30%. Betriebsstunden Pumpe: 3250 h/a.

Volumenstrom [l/min·m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Druckverlust [mbar]										
Vorlauf:										
Verteilleitungen	0,002	0,003	0,006	0,010	0,014	0,021	0,028	0,036	0,044	0,053
Abzweige	0,023	0,093	0,209	0,371	0,580	0,836	1,137	1,486	1,880	2,321
Anbindeleitungen	0,008	0,017	0,025	0,033	0,042	0,064	0,087	0,113	0,143	0,177
Fluidglaselement:										
Einläufe	0,009	0,037	0,082	0,146	0,229	0,329	0,448	0,586	0,741	0,915
Düsenbänder (2 Stk.)	0,157	0,342	0,554	0,795	1,063	1,359	1,683	2,035	2,415	2,822
Fluidglas (freier Querschnitt)	0,604	1,208	1,811	2,415	3,019	3,623	4,227	4,830	5,434	6,038
Ausläufe	0,002	0,008	0,018	0,033	0,051	0,074	0,100	0,131	0,166	0,205
Rücklauf:										
Anbindeleitungen	0,008	0,017	0,025	0,033	0,042	0,064	0,087	0,113	0,143	0,177
Abzweige	0,001	0,003	0,006	0,011	0,016	0,024	0,032	0,042	0,053	0,066
Verteilleitungen	0,002	0,003	0,006	0,010	0,014	0,021	0,028	0,036	0,044	0,053
Gesamtsumme Druckverlust:										
Fluidglaselement	0,82	1,73	2,74	3,86	5,07	6,41	7,86	9,41	11,07	12,83
Fluidfassade	2,45	5,19	8,23	11,57	15,21	19,24	23,57	28,23	33,20	38,49
Strombedarf:										
Fluidfassade [kWh/a]	0,05	0,20	0,47	0,62	0,78	0,94	1,09	1,25	1,40	1,56
Bürofläche [kWh/m²a]	0,003	0,01	0,03	0,05	0,08	0,13	0,18	0,24	0,32	0,42

Tabelle 93: Ergebnisse Druckverluste und Pumpenstrombedarf Fluidglas; Rohrleitungen Innendurchmesser 10 mm (gemäß Variante 1); Fluid aus 70% Wasser, 30% Propylenglycol

Volumenstrom [l/min·m]	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Druckverlust [mbar]										
Vorlauf:										
Verteilleitungen	0,063	0,073	0,084	0,095	0,107	0,120	0,133	0,147	0,162	0,176
Abzweige	2,809	3,342	3,923	4,549	5,223	5,942	6,708	7,520	8,379	9,285
Anbindeleitungen	0,214	0,270	0,309	0,350	0,393	0,439	0,486	0,536	0,587	0,641
Fluidglaselement:										
Einläufe	1,107	1,318	1,547	1,794	2,059	2,343	2,645	2,965	3,304	3,661
Düsenbänder (2 Stk.)	3,258	3,721	4,212	4,731	5,278	5,852	6,454	7,085	7,743	8,429
Fluidglas (freier Querschnitt)	6,642	7,246	7,849	8,453	9,057	9,661	10,26	10,87	11,47	12,08
Ausläufe	0,248	0,295	0,346	0,401	0,461	0,524	0,592	0,663	0,739	0,819
Rücklauf:										
Anbindeleitungen	0,214	0,270	0,309	0,350	0,393	0,439	0,486	0,536	0,587	0,641
Abzweige	0,080	0,095	0,111	0,129	0,148	0,169	0,191	0,214	0,238	0,264
Verteilleitungen	0,063	0,073	0,084	0,095	0,107	0,120	0,133	0,147	0,162	0,176
Gesamtsumme Druckverlust:										
Fluidglaselement	14,70	16,70	18,77	20,95	23,23	25,61	28,09	30,68	33,37	36,17
Fluidfassade	44,09	50,11	56,32	62,84	69,68	76,83	84,28	92,04	100,1	108,5
Strombedarf:										
Fluidfassade [kWh/a]	1,72	1,87	2,03	2,18	2,34	2,50	2,65	2,81	2,96	3,12
Bürofläche [kWh/m²a]	0,53	0,65	0,79	0,95	1,13	1,33	1,55	1,79	2,06	2,35

Tabelle 94: Ergebnisse Druckverluste und Pumpenstrombedarf; Rohrleitungen Innendurchmesser Verteilleitung 36,8 mm, Anbindeleitung 13,6 mm (Variante 2)

16.10 Gebäudetechnikkonzepte

Gebäudetechnikkonzepte in Anlehnung an (Hausladen et al., 2012, 56-57, 72-73, 120-121)

Moskau und München:

Durchschnittliche, jährliche Erdreichtemperatur in 10-12 Meter in Moskau ca. 6°C, in München ca. 9°C

Heizkonzept:

Benötigte Vorlauftemperatur Fluidglas ca. 26°C bis max. 35°C

Potentielle Gebäudetechniken:

- Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden
- Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit Grundwasser
- solarthermische Gewinne aus Fluidglasfassade

Kühlkonzept:

Benötigte Vorlauftemperatur Fluidglas minimal 18°C

Potentielle Gebäudetechniken:

- Grundwasser- oder Erdsondenkühlung
- Sole-Wasser- oder Wasser-Wasser-Umkehrwärmepumpe
- Kühlturm
- ev. Rückkühlung über Fluidglasfassade

Lüftung:

- Mechanische Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung
- erhöhte Nachtlüftung

Riad:

Durchschnittliche, jährliche Erdreichtemperatur in 10-12 Meter ca. 27°C

Heizkonzept:

Sehr geringer Heizwärmebedarf, nur im Januar bei Nord- und Westorientierung. Benötigte Vorlauftemperatur Fluidglas ca. 26°C bis max. 35°C

Potentielle Gebäudetechniken:

- voraussichtlich sind die thermischen Gewinne aus der Fluidglasfassade (Süden) ausreichend. Dies ist im Rahmen weiterer Untersuchungen zu überprüfen.
- solarthermische Kollektoren

Kühlkonzept:

Benötigte Vorlauftemperatur Fluidglas minimal 18°C

Potentielle Gebäudetechniken:

- Kühlturm (adiabate Kühlung in der Nacht)
- ev. Rückkühlung über Fluidglasfassade (in der Nacht)

Lüftung:

- Mechanische Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung
- erhöhte Nachtlüftung

16.11 Randbedingungen Simulationen

Alle thermischen Simulationen und Tageslichtsimulationen wurden für einen Einzelbüroraum durchgeführt.

Abmessungen

Einzelbüroraum in Anlehnung an VDI 6020 Blatt 1 Anhang A. (VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, 2001):

- Raumbreite: 3,50 m
- Raumtiefe: 5,00 m
- Raumhöhe: 3,00m
- Grundfläche: 17,50 m²
- Volumen: 52,50 m³
- Fassadenfläche 10,5 m²
- Fensterfläche 10,2 m²
- Fensterflächenanteil ca. 97%
- Raumtyp M „mittel“ gemäß VDI 2078 Anhang C1 (VDI-Fachbereich Technische Gebäudeausrüstung, 2015)

Oberflächen im Innenraum

Die Reflexionsgrade der Innenoberflächen in Anlehnung an die Empfehlungen der (DIN EN 12464-1, S. 9) und nach (Bartenbach, 2009, S. 196–206):

- Decke: 0,85
- Wände: 0,6
- Boden: 0,4
- Schreibtisch: 0,3

Nutzungszeiten

Randbedingungen in Anlehnung an DIN V 18599 – 10 Nr.1 „Einzelbüro“:

- Kalenderjahr 2013, Deutschland
- Nutzungsstunden: 2379 Stunden
- Tägliche Nutzungszeit: 7:00 – 17:00 Uhr
- Jährliche Nutzungszeit: 250 Tage pro Jahr

Interne Lasten innerhalb der Nutzungszeit

- 1 Person = 70 W (4 W/m²)
- 1 Computer = 140 W (8 W/m²)
- Beleuchtung = 10 W/m² innerhalb der Nutzungszeit, wenn die Beleuchtungsstärke durch Tageslicht im Bereich der Sehaufgabe < 300 lx beträgt.

Raumkonditionierung

Heizung:

- angeschaltet ab operative Temperatur $\leq 21,5^{\circ}\text{C}$.
- ausgeschaltet ab operative Temperatur $\geq 22,5^{\circ}\text{C}$.

Heizperiode bei Außentemperatur $\leq 12^{\circ}\text{C}$ (gleitendes 24 Stundenmittel).

Kühlung:

- angeschaltet ab operative Temperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$.
- ausgeschaltet ab operative Temperatur $\leq 24^{\circ}\text{C}$.

Raum-Soll-Temperatur außerhalb der Nutzungszeit mind. 16°C . Beginn der Raumkonditionierung 2 Stunden vor Nutzungsbeginn.

Thermischer Komfort

Komfortanforderungen operative Raumtemperatur innerhalb der Nutzungszeit nach EN ISO 7730 Tab A.5 bzw. nach EN 15251 Tab. A3:

Heizperiode:

- Ziel-Wert nach Kategorie A: $21,0^{\circ}\text{C} - 23,0^{\circ}\text{C}$
- Mindestanforderungen nach Kategorie C: $19,0^{\circ}\text{C} - 25,0^{\circ}\text{C}$
- zulässige Überschreitungzeit: 3% der Nutzungszeit für Kat. I und 5% für Kat. II und III. nach DGNB
- Bekleidungsfaktor: 1,0 clo

Kühlperiode

- Ziel-Wert nach Kategorie A: $23,5^{\circ}\text{C} - 25,5^{\circ}\text{C}$
- Mindestanforderungen nach Kategorie C: $22,0^{\circ}\text{C} - 27,0^{\circ}\text{C}$
- zulässige Überschreitungzeit: 3% der Nutzungszeit für Kat. I und 5% für Kat. II und III. nach DGNB
- Bekleidungsfaktor: 0,5 clo

Visueller Komfort

Obergrenze Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene: 4000 Lux

Untergrenze Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsebene: 300 Lux

Bei Beleuchtungsstärken < 300 Lux wird die künstliche Beleuchtung mit 10 W/m^2 eingeschaltet.

Lüftungsstrategie

Luftwechselrate:

- außerhalb der Nutzungszeiten $0,5 \text{ h}^{-1}$
- innerhalb der Nutzungszeiten $1,5 \text{ h}^{-1}$
- Nachtlüftung im Kühlfall 5 h^{-1} , wenn $T_{\text{Raum}} \geq 23,5^{\circ}\text{C}$

Wärmerückgewinnung (WRG):

Heizperiode:

- $T_{\text{amb}} < T_{\text{Raum}} = 80\% \text{ WRG}$

- $T_{\text{amb}} > T_{\text{Raum}} = 0\% \text{ WRG}$

Kühlperiode:

- $T_{\text{amb}} > T_{\text{Raum}} = 80\% \text{ WRG}$

außerhalb der Nutzungszeit:

- $T_{\text{amb}} < T_{\text{Raum}} = 0\% \text{ WRG}$

innerhalb der Nutzungszeit:

- $T_{\text{Raum}} - 4 \text{ K} \geq T_{\text{amb}} \leq T_{\text{Raum}} = 0\% \text{ WRG}$
- $T_{\text{amb}} \leq T_{\text{Raum}} - 4 \text{ K} = \text{Anteil WRG geregelt auf } T_{\text{Zuluft}} = T_{\text{Raum}} - 4 \text{ K}$

Vorlauftemperaturen Fluide

Standort	Kühlfall		Heizfall	
	T_{F1_in} [°C]	T_{F2_in} [°C]	T_{F1_in} [°C]	T_{F2_in} [°C]
Moskau	20	18	15	35/26
München	20	18	15	35
Riad	30/35/40	18	15	35-

Tabelle 95: Vorlauftemperaturen je Standort in den thermischen Simulationen für das äußere Fluid (T_{F1_in}) und das innere Fluid (T_{F2_in})

Der Massenstrom des äußeren Flüssigkeitskreislaufs ist ausgeschaltet, wenn die Umgebungstemperatur unter der Vorlauftemperatur liegt.

Weitere Annahmen

Alle Innenbauteile sind ohne Temperaturunterschiede zum simulierten Büroraum berechnet (adiabat).

Einflüsse durch die Umgebung, z.B. gegenüberliegender Gebäude oder Boden, sind nicht berücksichtigt, d.h. 100% Strahlungsaustausch mit dem Himmel. Es wird von einem Büroraum in einem freistehenden Hochhaus in den oberen Etagen ausgegangen.

Die Windgeschwindigkeiten sind den Wetterdaten entnommen, d.h. ein Anstieg der Windgeschwindigkeiten mit zunehmender Gebäudehöhe ist nicht berücksichtigt.

Verschattungen durch Umgebung und Fensterleibungen sind nicht berücksichtigt.

Das Wellenlängenspektrum und dessen Gewichtung für die kurzweilige Strahlung erfolgt nach DIN EN 410.

Wetterdaten

Es wird an allen drei Standorten der Wetterdatensatz für das Jahr 2013 aus Meteororm (*Meteororm*) verwendet. Für den Standort Moskau wird Moskau City, für München wird München Airport und für Raid wird Solar City in Meteororm gewählt.

Resultierender Einstrahlungswinkel

Der resultierende Einstrahlungswinkel der Direktstrahlung auf die Fassade wird in der Gebäudesimulation nach (Duffie & Beckman, 2013, S. 10–14) wie folgt berechnet:

$$\begin{aligned}
 \cos\varphi &= \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot \cos\beta \\
 &\quad - \sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \\
 &\quad + \cos\delta \cdot \cos\phi \cdot \cos\beta \cdot \cos\omega \\
 &\quad + \cos\delta \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot \cos\omega \\
 &\quad + \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot \sin\omega
 \end{aligned} \tag{55}$$

mit

- φ Resultierender Einstrahlungswinkel auf die Fassade
- δ Solarer Deklinationswinkel, $-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ$ (nördlich positiv),

$$\delta = \frac{23,45 \cdot \pi}{180} \cdot \sin \left[(280,1 + 0,9863 \cdot day) \frac{\pi}{180} \right]$$
- ϕ Winkel der geographischen Breite (Latitude), nördlich oder südliche Lage vom Äquator -
 $90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ (nördlich positiv)
- β Neigungswinkel der Fassade zur Horizontalen, 90° entspricht vertikaler Fassade.
- γ Azimuthwinkel der Fassade, $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$, 0° = Süden, westlich positiv.
- ω Stundewinkel, Winkelabweichung nach Westen oder Osten abweichend vom lokalen Meridian, 15° pro Stunde, (östlich negativ), $\omega(t_{sol}) = 15 \cdot (t_{sol} - 12) \cdot \frac{\pi}{180}$

Die Diffusstrahlung wird vereinfacht mit einem Einstrahlungswinkel von 60° angenommen (Duffie & Beckman, 2013, S. 212).

Berechnung der Himmelstemperatur

Die Himmelstemperatur T_{sky} kann mittels der Umgebungstemperatur T_{amb} , Himmelsbedeckung b_h und der Emissivität ε_{sky} des Himmels berechnet werden (Berdahl & Martin, 1984):

$$T_{sky} = T_{amb} (\varepsilon_{sky} + (1 - \varepsilon_{sky}) \cdot b_h)^{\frac{1}{4}} \tag{56}$$

Berechnung der Himmelsbedeckung b_h nach (Kasten & Czeplak, 1980):

$$b_h = \begin{cases} \left(1,4286 \cdot \frac{I_{beam,hor}}{I_{global,hor}} - 0,3 \right)^{\frac{1}{2}} & \text{if } I_{beam,hor} > 0 \\ 0 & \text{if } I_{beam,hor} = 0 \end{cases} \tag{57}$$

Berechnung der Emissivität des klaren Himmels nach (Duffie & Beckman, 2013):

$$\varepsilon_{sky} = 0,711 + 0,0056 \cdot \vartheta_{dew} + 0,000073 \cdot \vartheta_{dew}^2 + 0,013 \cdot \cos \left(15 \frac{\pi t[h]}{180} \right) \tag{58}$$

mit

- ϑ_{dew} Taupunkttemperatur, [$^\circ\text{C}$]

16.12 Validierung SimulationX-Fluidglasmodell

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „FLUIDGLASS“ wurden am CEA-INES Messungen im Solarprüfstand mit Fluidglaselementen durchgeführt (Baumgärtner et al., 2017, S. 213–214). Der gemessene Fluidglasaufbau bestand aus drei 6 mm starken, unbeschichteten Floatgläsern (Saint-Gobain Extra Clear®), zwei 12 mm starken Scheibenzwischenräumen mit Argonfüllung und einer 2 mm starken Fluidschicht. Der Prototyp wurde sowohl mit der Fluidschicht „außen“, d.h. zur künstlichen Sonne orientiert (Bezeichnung: FGG), als auch mit der Fluidschicht nach „innen“ (Bezeichnung: GGF) getestet. Die Einstrahlung war senkrecht auf das Fluidglaselement.

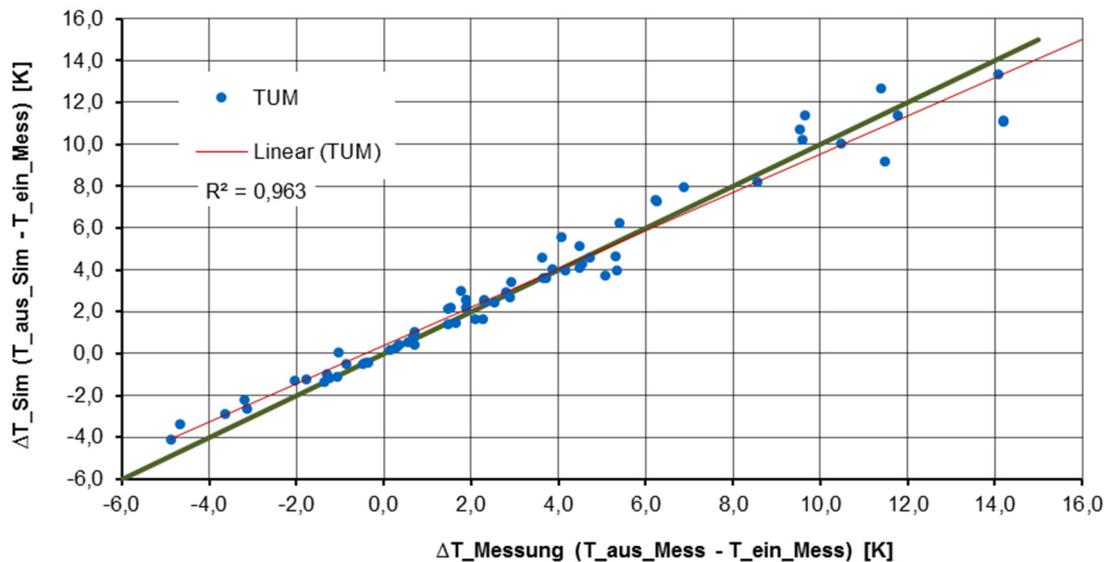


Abbildung 143: Validierung SimulationX-Fluidglasmodell; Vergleich simulierte zu gemessene Temperaturdifferenz zwischen Auslasstemperatur (T_{aus}) und Einlasstemperatur (T_{ein}) (Quelle: Shan Hua und Jochen Stopper aus Messergebnissen CEA-INES und Simulationsergebnissen SimulationX)

Der Vergleich der simulierten Rücklaufstemperatur (TUM) mit der gemessenen Rücklaufstemperatur zeigt eine gute Übereinstimmung, wie in Abbildung 143 zu sehen ist. Auf der X-Achse ist die Temperaturdifferenz der gemessenen Auslasstemperatur ($T_{\text{aus_Mess}}$) abzüglich der gemessenen Einlasstemperatur ($T_{\text{ein_Mess}}$) aufgetragen, auf der Y-Achse die Temperaturdifferenz der simulierten Auslasstemperatur ($T_{\text{aus_Sim}}$) abzüglich der gemessenen Einlasstemperatur ($T_{\text{ein_Mess}}$). Die gemessenen Einlasstemperaturen wurden als Eingangsparameter für die Simulation verwendet. Darüber hinaus wurden die gemessenen Umgebungstemperaturen, die Einstrahlung, die Einfärbungskonzentration, der Massenstrom und die Windgeschwindigkeiten als Eingabeparameter verwendet. Bei hohen Temperaturdifferenzen zwischen Aus- und Einlasstemperatur sind die größten Abweichungen zu beobachten. Bei der maximal gemessenen Temperaturdifferenz von $14,20^\circ\text{C}$ liegt die simulierte Temperaturdifferenz lediglich bei $11,06^\circ\text{C}$. Die Abweichung von $-3,14\text{ K}$ stellt die größte Abweichung der Validierung dar. Die mittlere Abweichung liegt bei $0,12\text{ K}$.

16.13 Ergebnisse Simulationen

16.13.1 Moskau

Massenströme Fluid 1 (außen) 1 l/min·m, Fluid 2 (innen) 3 l/min·m

Thermischer Komfort

Komfortkategorie	Temperaturbereich	Nord	Süd	West
< C	(op. T: < 19,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
C (< B)	(op. T: 19,0°C - 20,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
B (< A)	(op. T: 20,0°C - 21,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
A	(op. T: 21,0°C - 23,0°C)	89,8%	85,5%	83,9%
B (> A)	(op. T: 23,0°C - 24,0°C)	9,9%	13,8%	15,3%
C (> B)	(op. T: 24,0°C - 25,0°C)	0,3%	0,7%	0,7%
> C	(op. T > 25,0°C)	0,0%	0,0%	0,1%

Tabelle 96: Thermischer Komfort in der Heizperiode; Nutzungszeit; Moskau; Nord-, Süd- und Westorientierung

Komfortkategorie	Temperaturbereich	Nord	Süd	West
< C	(op. T: < 22,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
C (< B)	(op. T: 22,0°C - 23,0°C)	2,3%	1,6%	1,0%
B (< A)	(op. T: 23,0°C - 23,5°C)	5,1%	3,1%	3,0%
A	(op. T: 23,5°C - 25,5°C)	92,3%	95,3%	95,7%
B (> A)	(op. T: 25,5°C - 26,0°C)	0,3%	0,0%	0,3%
C (> B)	(op. T: 26,0°C - 27,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
> C	(op. T > 27,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%

Tabelle 97: Thermischer Komfort in der Kühlperiode; Nutzungszeit; Moskau; Einzelbüro; Nord-, Süd- und Westorientierung

Energiebedarfe

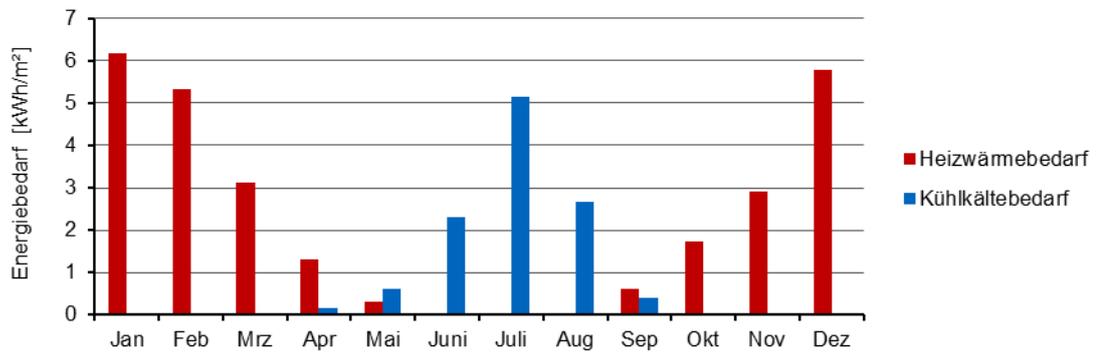


Abbildung 144: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]; Einzelbüroraum; Moskau, Nordorientierung¹⁵⁷

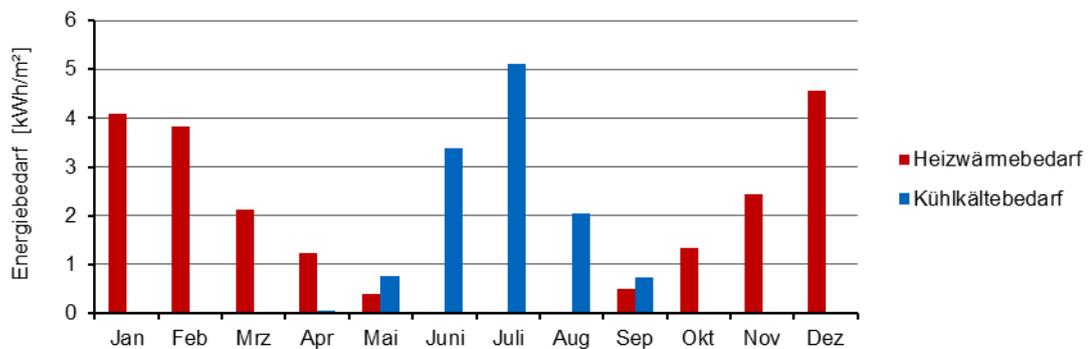


Abbildung 145: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]; Einzelbüroraum; Moskau; Südorientierung

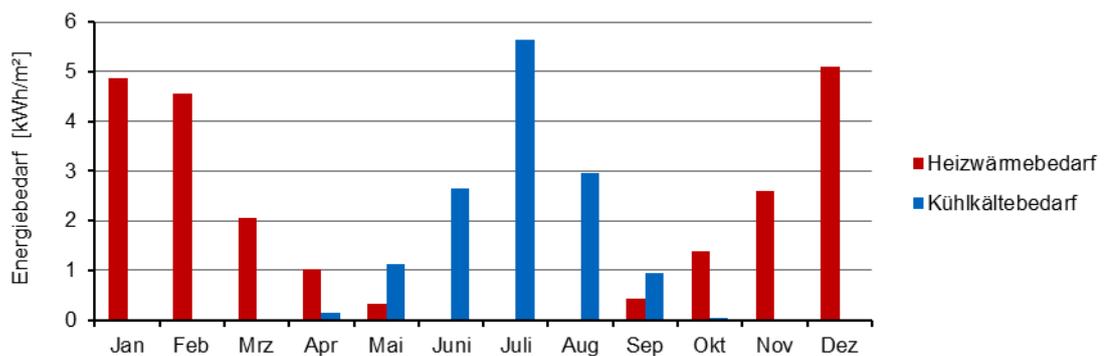


Abbildung 146: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]; Einzelbüroraum; Moskau; Westorientierung

¹⁵⁷ Wenn nicht anders angegeben ist die Vorlauftemperatur im Heizfall 35°C und im Kühlfall 18°C.



Abbildung 147: Energiebedarf für künstliche Beleuchtung (links: absolut [kWh/a], rechts: spezifisch pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]); Nutzungszeit; Moskau, Nord-, Süd- und Westorientierung

Energiegewinne

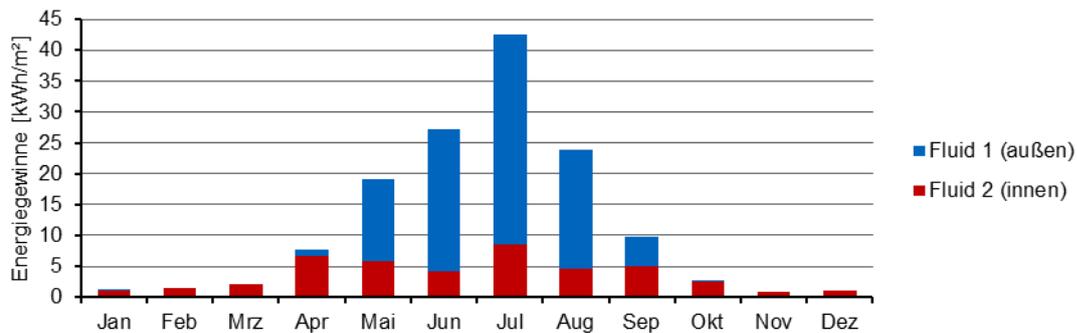


Abbildung 148: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m² Fassadenfläche [kWh/m²a]; Moskau; Nordorientierung

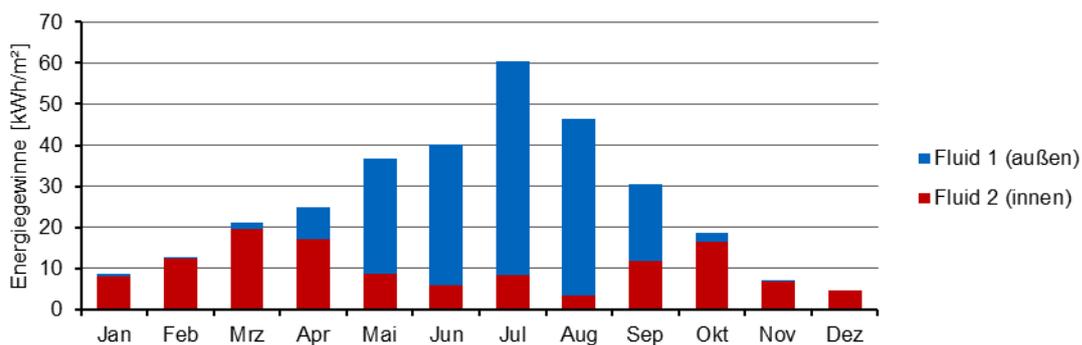


Abbildung 149: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m² Fassadenfläche [kWh/m²a]; Moskau; Südorientierung

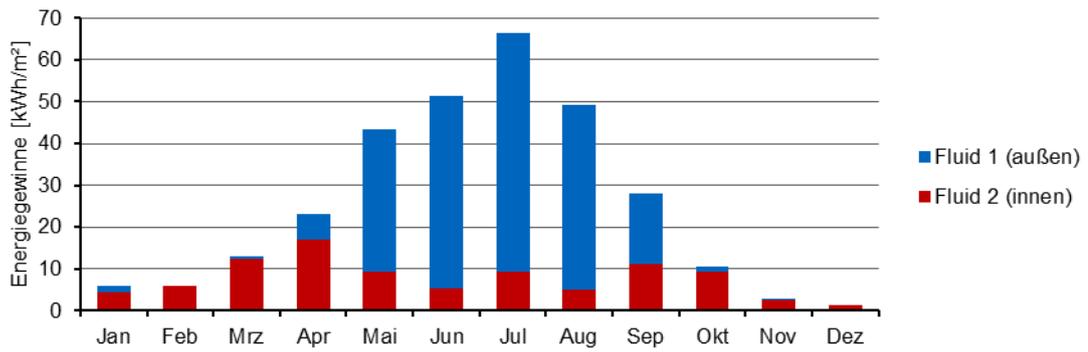


Abbildung 150: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m² Fassadenfläche [kWh/m²a]; Moskau; Westorientierung

Exkurs Vorlauftemperatur F2 = 26°C in der Heizperiode

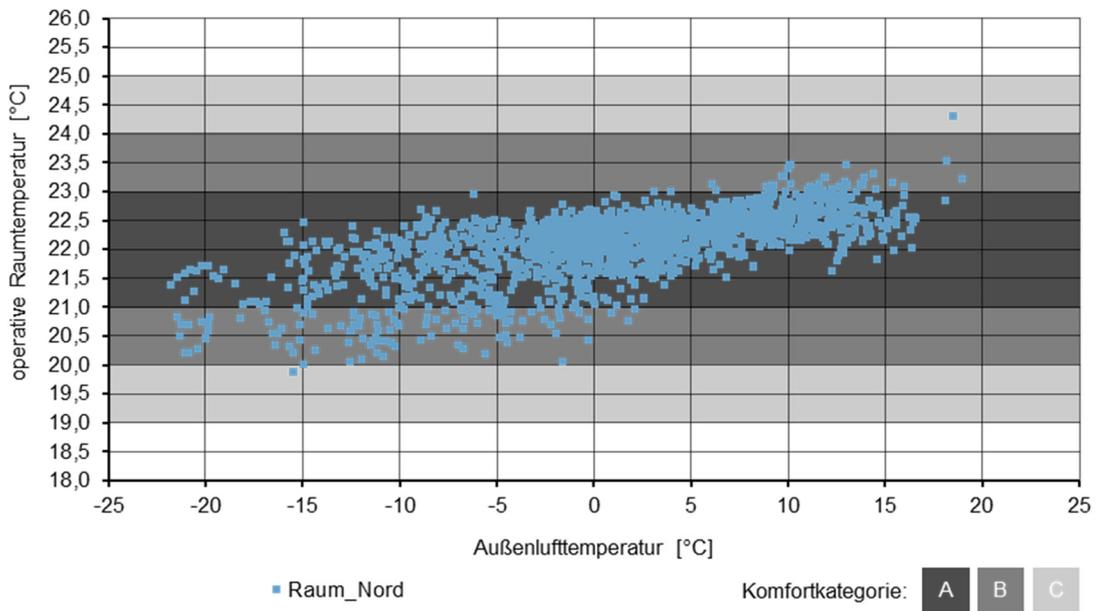


Abbildung 151: Operative Raumtemperaturen in der Heizperiode bei Vorlauftemperatur F2 = 26°C; Nutzungszeit; Moskau; Nordorientierung

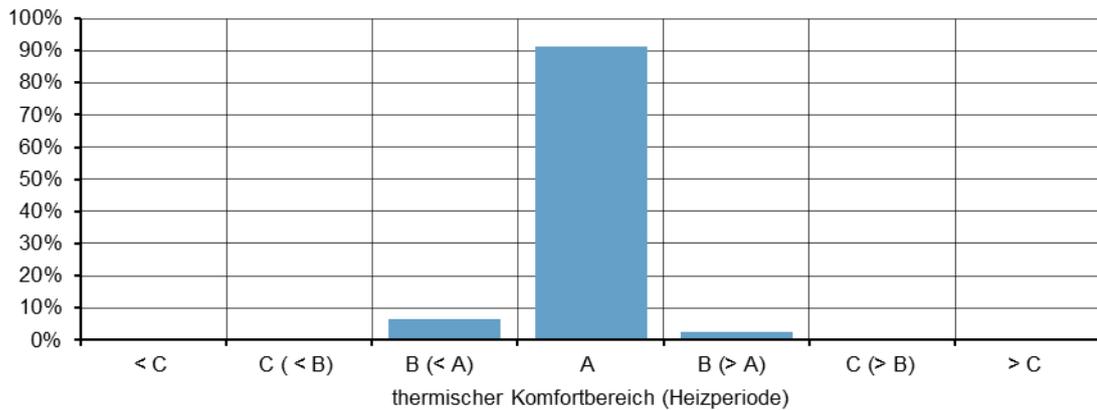


Abbildung 152: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche in der Heizperiode bei Vorlauftemperatur F2 = 26°C; Moskau; Nordorientierung

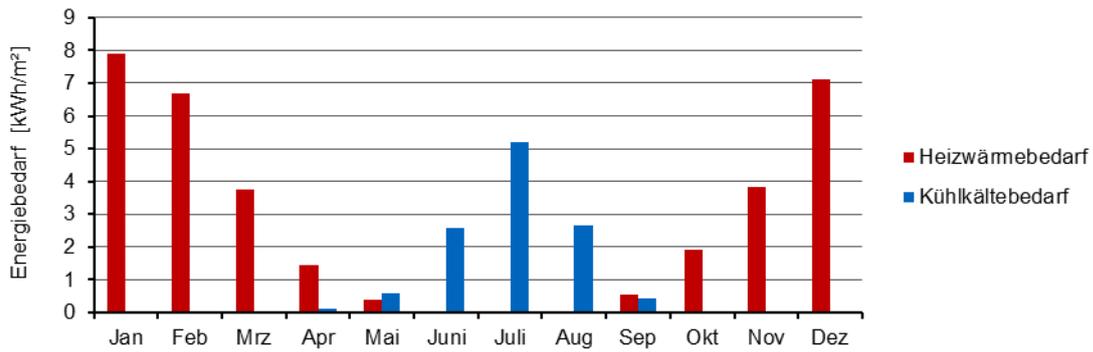


Abbildung 153: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m² Nutzfläche [kWh/m²a] ; Vorlauftemperatur F2 = 26°C in der Heizperiode; Einzelbüroraum; Moskau; Nordorientierung

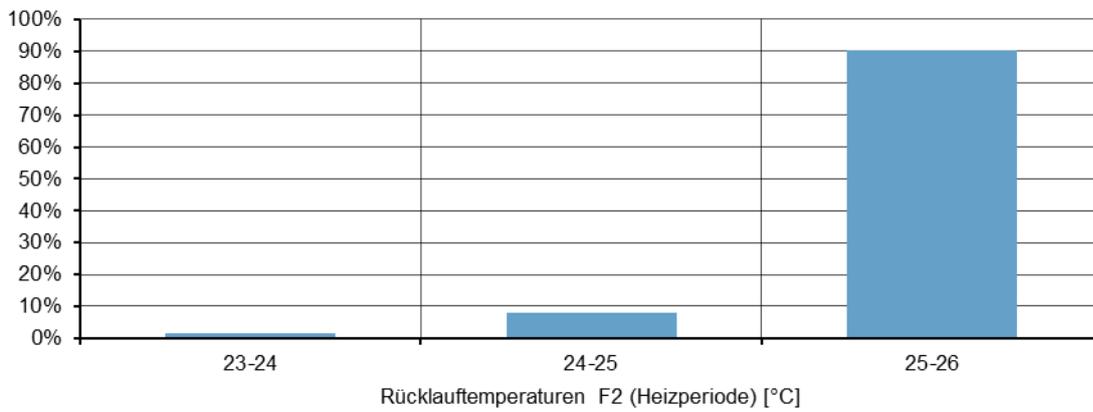


Abbildung 154: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des inneren Fluids (F2) in der Heizperiode bei Vorlauftemperatur F2 = 26°C; Moskau; Nordorientierung

16.13.2 München

Massenströme Fluid 1 (außen) 1 l/min·m, Fluid 2 (innen) 3 l/min·m

Thermischer Komfort

Komfortkategorie	Temperaturbereich	Nord	Süd	West
< C	(op. T: < 19,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
C (< B)	(op. T: 19,0°C - 20,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
B (< A)	(op. T: 20,0°C - 21,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
A	(op. T: 21,0°C - 23,0°C)	92,7%	80,9%	82,5%
B (> A)	(op. T: 23,0°C - 24,0°C)	7,1%	18,4%	16,1%
C (> B)	(op. T: 24,0°C - 25,0°C)	0,2%	0,7%	1,4%
> C	(op. T > 25,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%

Tabelle 98: Thermischer Komfort in der Heizperiode; Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

Komfortkategorie	Temperaturbereich	Nord	Süd	West
< C	(op. T: < 22,0°C)	0,2%	0,0%	0,0%
C (< B)	(op. T: 22,0°C - 23,0°C)	3,4%	1,5%	1,7%
B (< A)	(op. T: 23,0°C - 23,5°C)	5,8%	3,6%	3,3%
A	(op. T: 23,5°C - 25,5°C)	90,4%	94,2%	94,9%
B (> A)	(op. T: 25,5°C - 26,0°C)	0,2%	0,7%	0,1%
C (> B)	(op. T: 26,0°C - 27,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
> C	(op. T > 27,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%

Tabelle 99: Thermischer Komfort in der Kühlperiode; Nutzungszeit; München; Einzelbüro; Nord-, Süd- und Westorientierung

Energiebedarfe

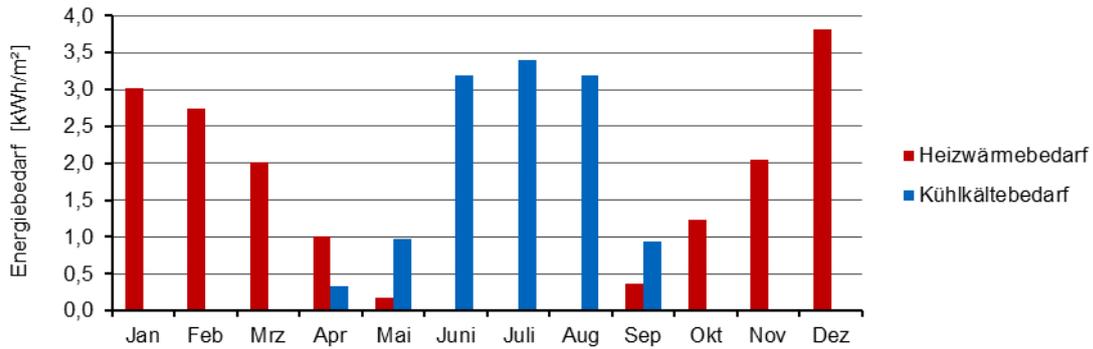


Abbildung 155: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]; Einzelbüroraum; München; Nordorientierung

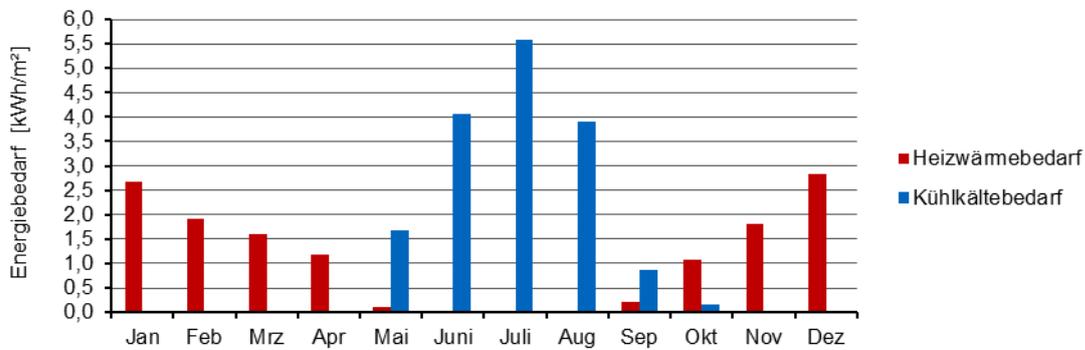


Abbildung 156: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]; Einzelbüroraum; München; Südorientierung

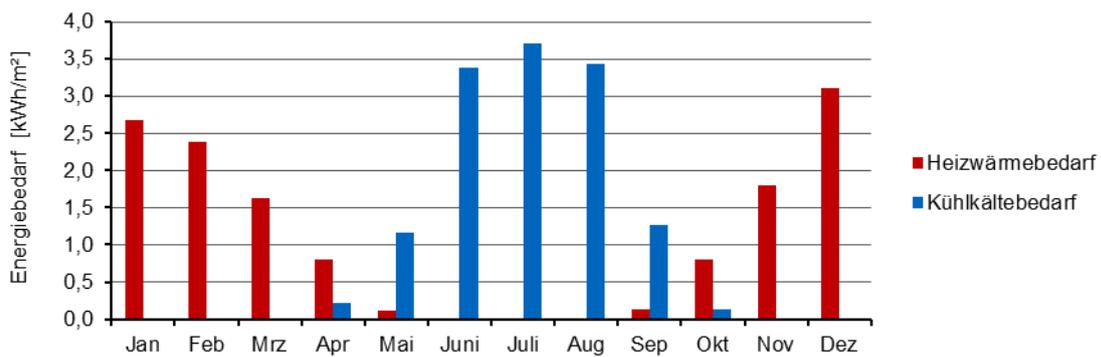


Abbildung 157: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]; Einzelbüroraum; München; Westorientierung



Abbildung 158: Energiebedarf für künstliche Beleuchtung (links: absolut [kWh/a], rechts: spezifisch pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]); Nutzungszeit; München; Nord-, Süd- und Westorientierung

Energiegewinne

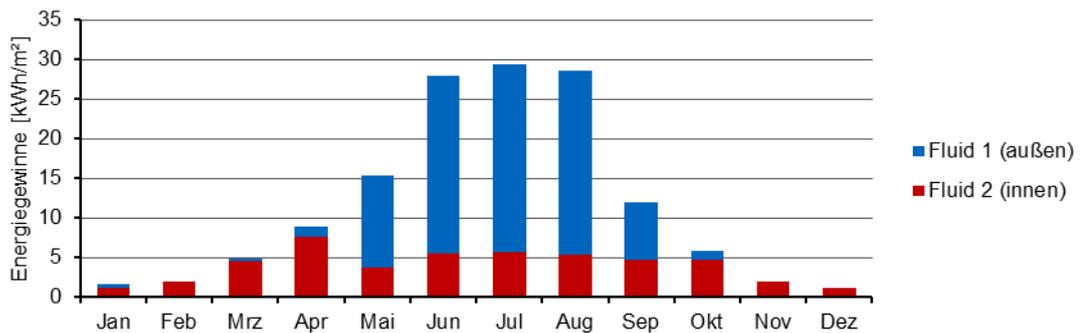


Abbildung 159: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m² Fassadenfläche [kWh/m²a]; München; Nordorientierung

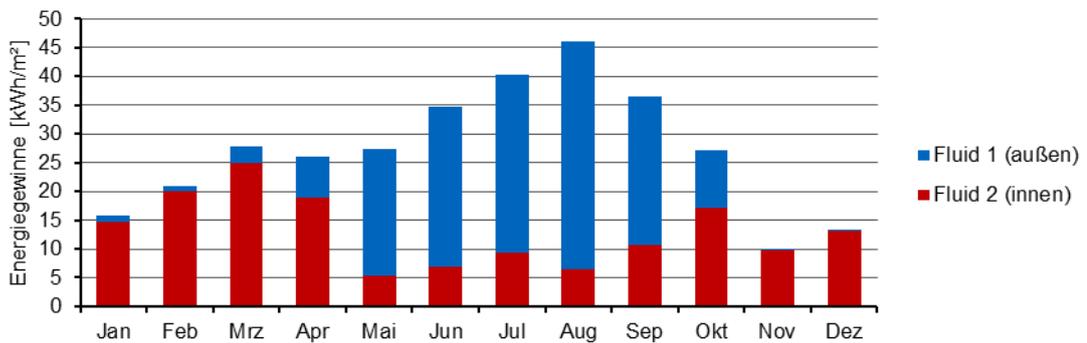


Abbildung 160: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m² Fassadenfläche [kWh/m²a]; München; Südorientierung

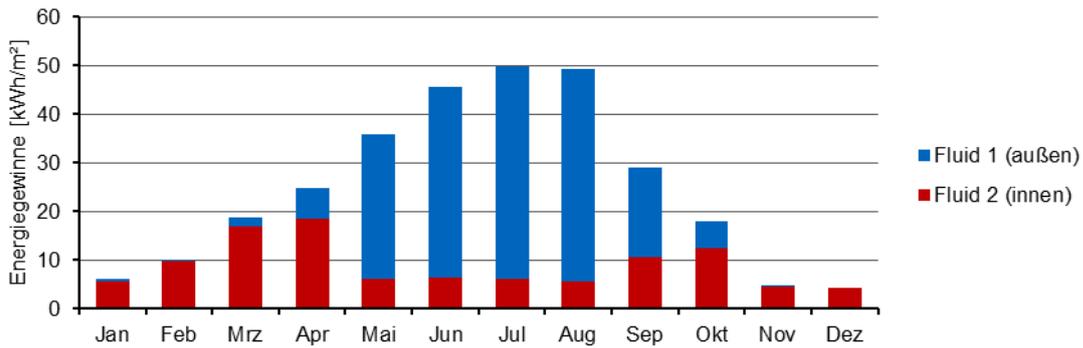


Abbildung 161: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m² Fassadenfläche [kWh/m²a]; München; Westorientierung

München Massenströme Fluid 1 (außen) 1 l/min·m, Fluid 2 (innen) 1 l/min·m

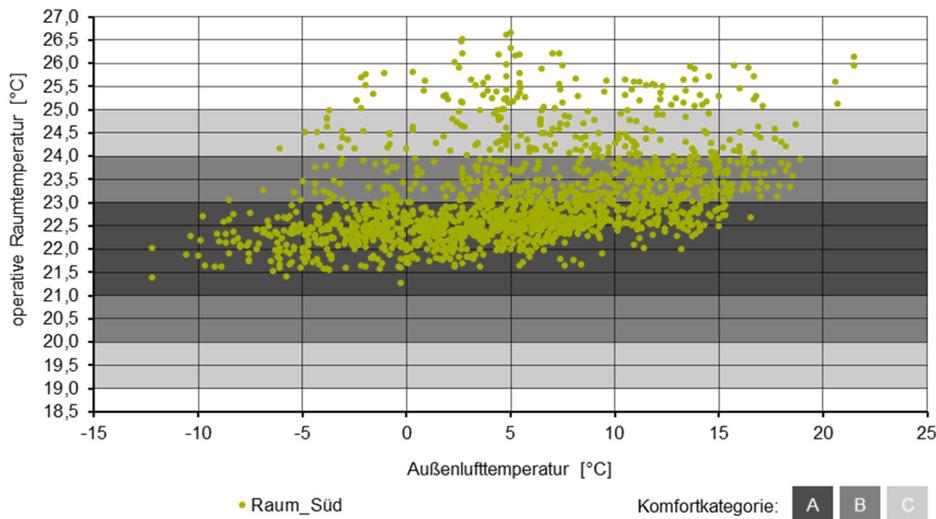


Abbildung 162: Operative Raumtemperaturen in der Heizperiode; Nutzungszeit; München; Südorientierung; Massenströme F1 und F2 1l/min·m

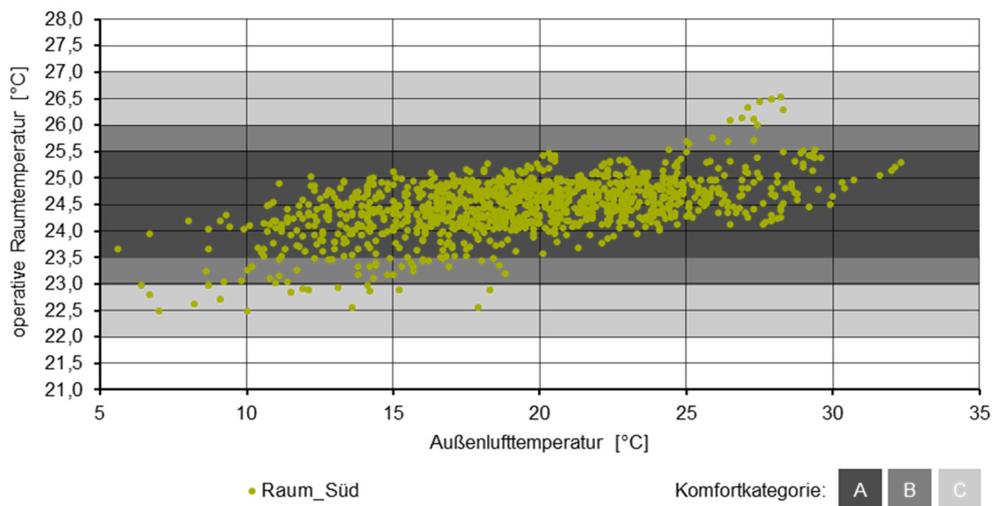


Abbildung 163: Operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode; Nutzungszeit; München; Südorientierung; Massenströme F1 und F2 1l/min·m

Thermischer Komfort

Komfortkategorie	Heizperiode		Kühlperiode	
	Temperaturbereich	Häufigkeit	Temperaturbereich	Häufigkeit
< C	(op. T: < 19,0°C)	0,0%	(op. T: < 22,0°C)	0,0%
C (< B)	(op. T: 19,0°C - 20,0°C)	0,0%	(op. T: 22,0°C -	1,6%
B (< A)	(op. T: 20,0°C - 21,0°C)	0,0%	(op. T: 23,0°C -	3,2%
A	(op. T: 21,0°C - 23,0°C)	60,0%	(op. T: 23,5°C -	93,6%
B (> A)	(op. T: 23,0°C - 24,0°C)	25,1%	(op. T: 25,5°C -	0,8%
C (> B)	(op. T: 24,0°C - 25,0°C)	8,7%	(op. T: 26,0°C -	0,7%
> C	(op. T > 25,0°C)	6,2%	(op. T > 27,0°C)	0,0%

Tabelle 100: Thermischer Komfort in der Heiz- und Kühlperiode; Nutzungszeit; München; Südorientierung; Massenströme F1 und F2 1l/min·m

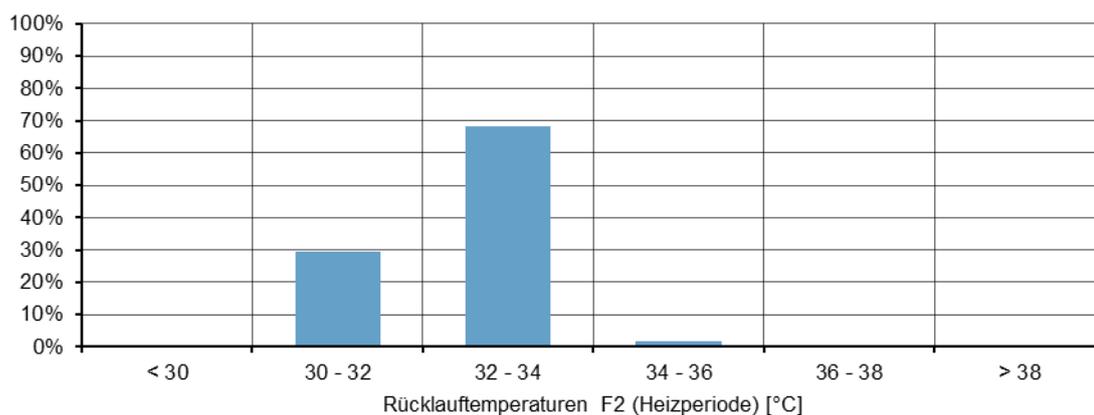


Abbildung 164: Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperaturen des inneren Fluids (F2) in der Heizperiode; München; Südorientierung; Massenstrom F1 und F2 mit 1 l/min·m

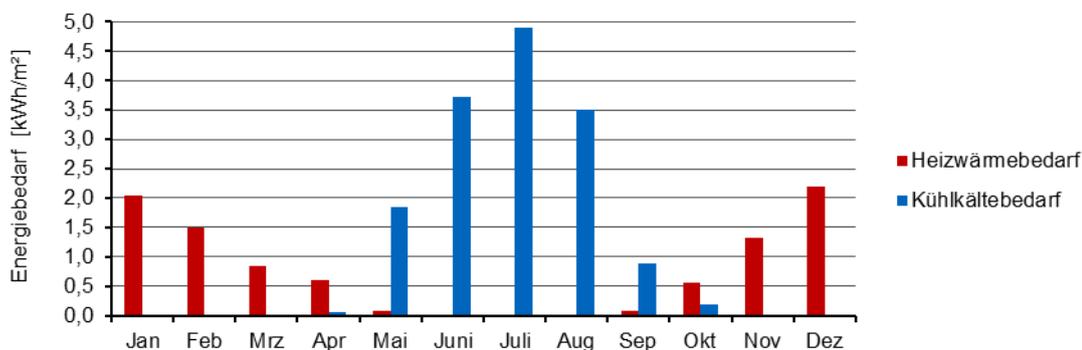


Abbildung 165: Heizwärme- und Kühlkältebedarf für einen Einzelbüroraum pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]; München; Südorientierung; Massenstrom F1 und F2 1 l/min·m

16.13.3 Riad

Thermischer Komfort

Komfortkategorie	Temperaturbereich	Nord	Süd	West
< C	(op. T: < 19,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
C (< B)	(op. T: 19,0°C - 20,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
B (< A)	(op. T: 20,0°C - 21,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
A	(op. T: 21,0°C - 23,0°C)	95,0%	73,3%	88,3%
B (> A)	(op. T: 23,0°C - 24,0°C)	5,0%	26,7%	11,7%
C (> B)	(op. T: 24,0°C - 25,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%
> C	(op. T > 25,0°C)	0,0%	0,0%	0,0%

Tabelle 101: Thermischer Komfort in der Heizperiode; Nutzungszeit; Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

Komfortkategorie	Temperaturbereich	Nord	Süd	West
< C	(op. T: < 22,0°C)	0,4%	0,0%	0,2%
C (< B)	(op. T: 22,0°C - 23,0°C)	0,8%	0,3%	0,5%
B (< A)	(op. T: 23,0°C - 23,5°C)	2,2%	0,3%	0,7%
A	(op. T: 23,5°C - 25,5°C)	72,1%	78,3%	61,3%
B (> A)	(op. T: 25,5°C - 26,0°C)	17,3%	15,2%	14,6%
C (> B)	(op. T: 26,0°C - 27,0°C)	7,0%	5,4%	20,3%
> C	(op. T > 27,0°C)	0,3%	0,5%	2,6%

Tabelle 102: Thermischer Komfort in der Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad; Einzelbüro; Nord-, Süd- und Westorientierung

Energiebedarfe

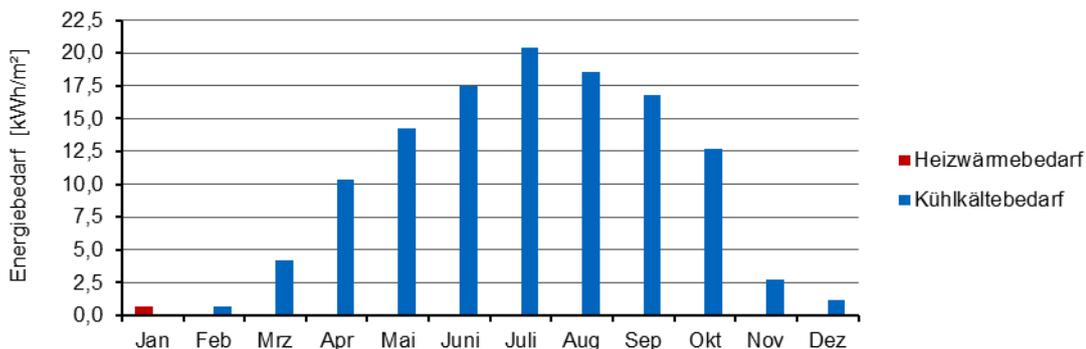


Abbildung 166: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]; Einzelbüroraum; Riad; Nordorientierung¹⁵⁸

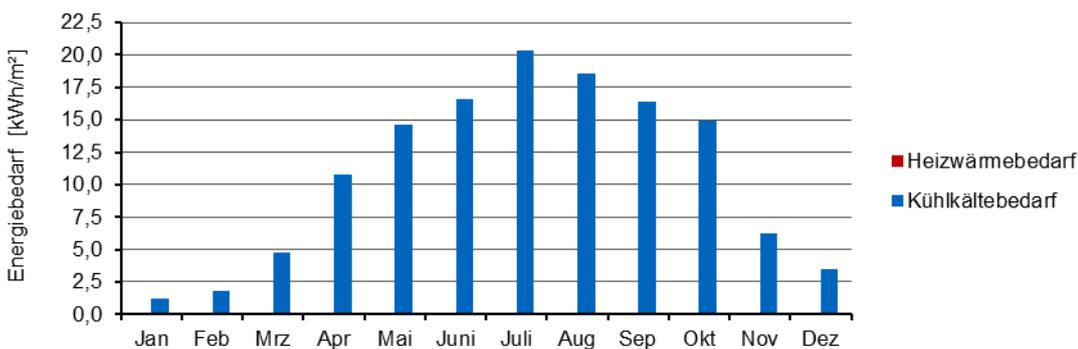


Abbildung 167: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]; Einzelbüroraum; Riad; Südorientierung

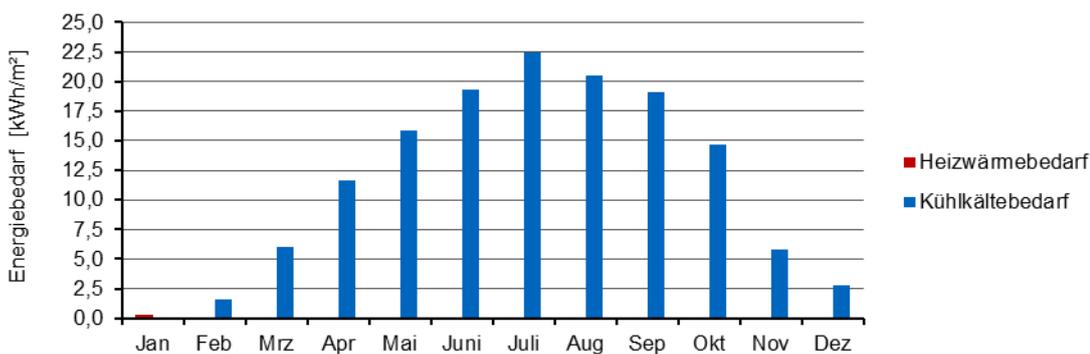


Abbildung 168: Heizwärme- und Kühlkältebedarf pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]; Einzelbüroraum; Riad; Westorientierung

¹⁵⁸ Wenn nicht anders angegeben ist die Vorlauftemperatur im Heizfall 35°C und im Kühlfall 18°C.



Abbildung 169: Energiebedarf für künstliche Beleuchtung (links: absolut [kWh/a], rechts: spezifisch pro m² Nutzfläche [kWh/m²a]); Nutzungszeit; Riad, Nord-, Süd- und Westorientierung

Energiegewinne

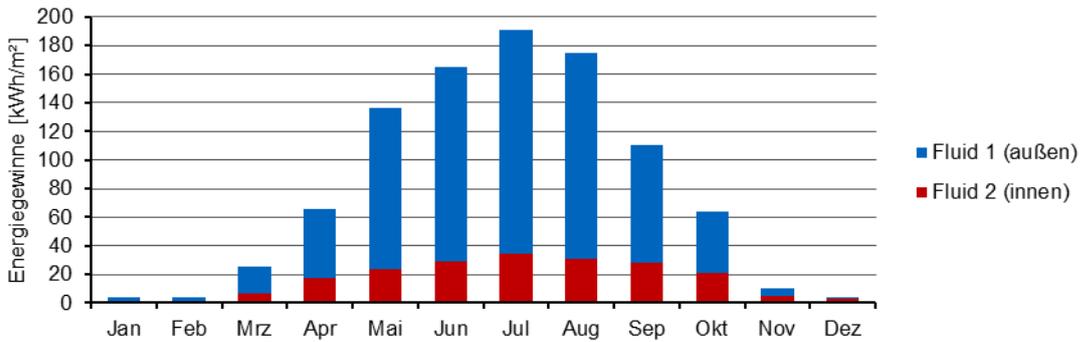


Abbildung 170: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m² Fassadenfläche [kWh/m²a]; Riad; Nordorientierung

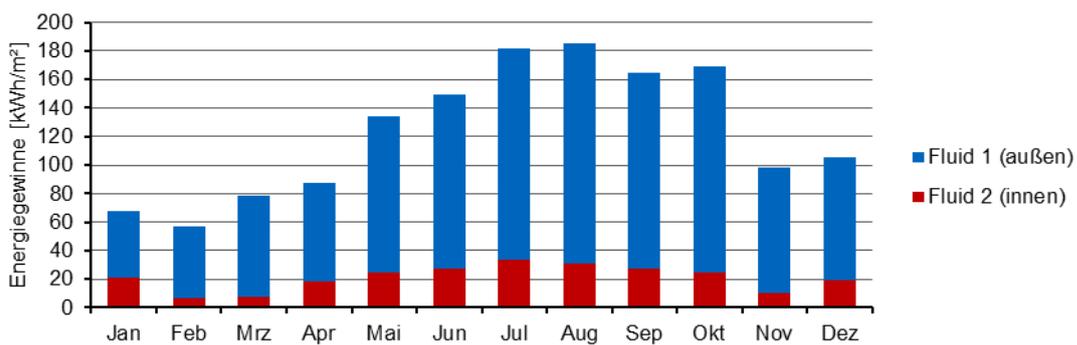


Abbildung 171: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m² Fassadenfläche [kWh/m²a]; Riad; Südorientierung

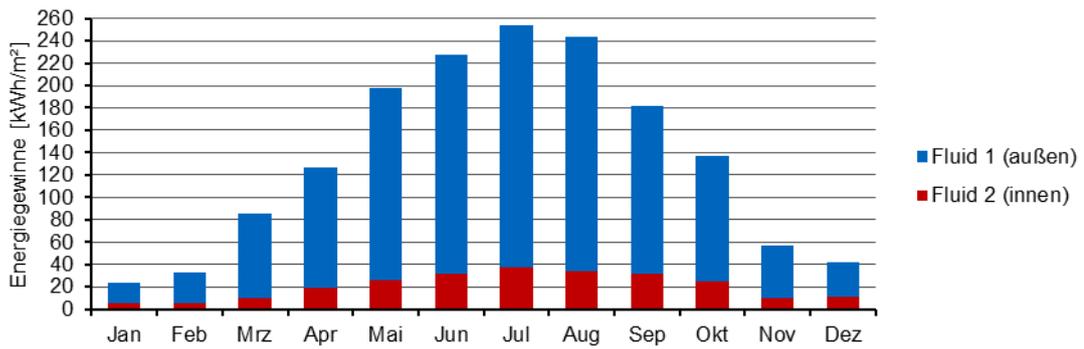


Abbildung 172: Thermische Energiegewinne der Fluidglasfassade (F1 und F2) pro m² Fassadenfläche [kWh/m²a]; Riad; Westorientierung

F1 1 l/min·m, F2 3 l/min·m

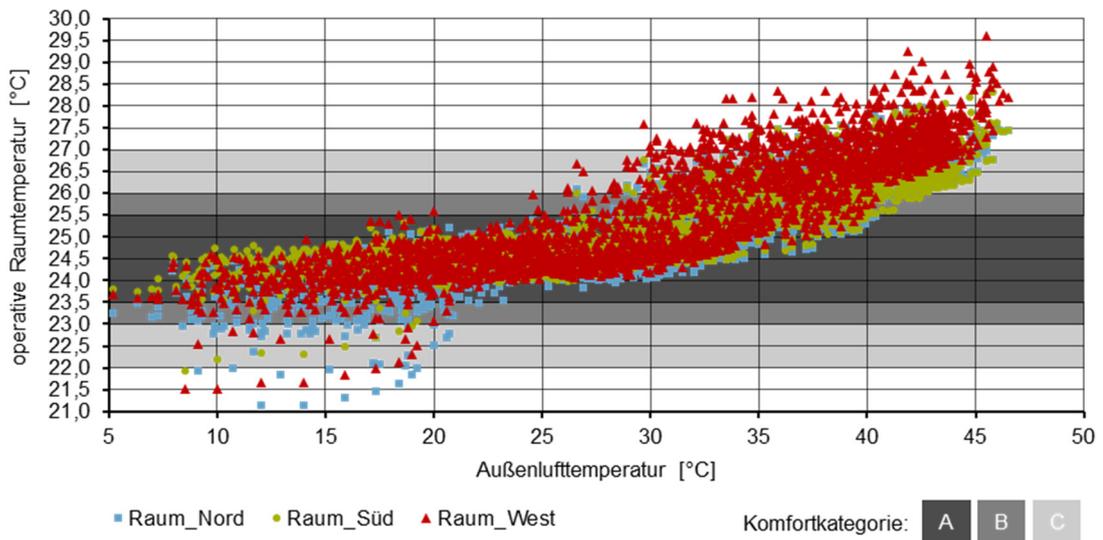


Abbildung 173: Operative Raumtemperaturen in der Kühlperiode;Nutzungszeit; Riad; F1 1 l/min·m, F2 3 l/min·m, T_F1_ein = 35°C; Nord-, Süd- und Westorientierung

Komfortkategorie	Temperaturbereich	Nord	Süd	West
< C	(op. T: < 22,0°C)	0,5%	0,0%	0,2%
C (< B)	(op. T: 22,0°C - 23,0°C)	1,1%	0,3%	0,4%
B (< A)	(op. T: 23,0°C - 23,5°C)	2,9%	0,2%	0,9%
A	(op. T: 23,5°C - 25,5°C)	56,3%	60,9%	52,7%
B (> A)	(op. T: 25,5°C - 26,0°C)	9,6%	11,6%	6,6%
C (> B)	(op. T: 26,0°C - 27,0°C)	26,2%	23,4%	21,4%
> C	(op. T > 27,0°C)	3,4%	3,5%	17,7%

Tabelle 103: Thermischer Komfort in der Kühlperiode;Nutzungszeit; Riad; F1 1 l/min·m, F2 3 l/min·m, T_F1_ein = 35°C; Einzelbüro; Nord-, Süd- und Westorientierung

Riad, Südorientierung, Variationen

Im Folgenden sind die Komfortbereichsveränderungen bei unterschiedlichen Volumenströmen im äußeren und inneren Fluid und bei unterschiedlichen Vorlauftemperaturen im äußeren Fluid dargestellt. Es sind Simulationsergebnisse aus SimulationX für die Komfortbereiche A, B > A, C > B und >C abgebildet.

Abkürzungen Variantenbezeichnungen:

a1 bis a18 = Volumenstrom Fluidkreislauf außen von 1 bis 18 l/min·m

i1 bis i8 = Volumenstrom Fluidkreislauf innen in von 1 bis 8l/min·m

Ta30 bis Ta40 = Vorlauftemperatur Fluidkreislauf außen von 30 bis 40°C

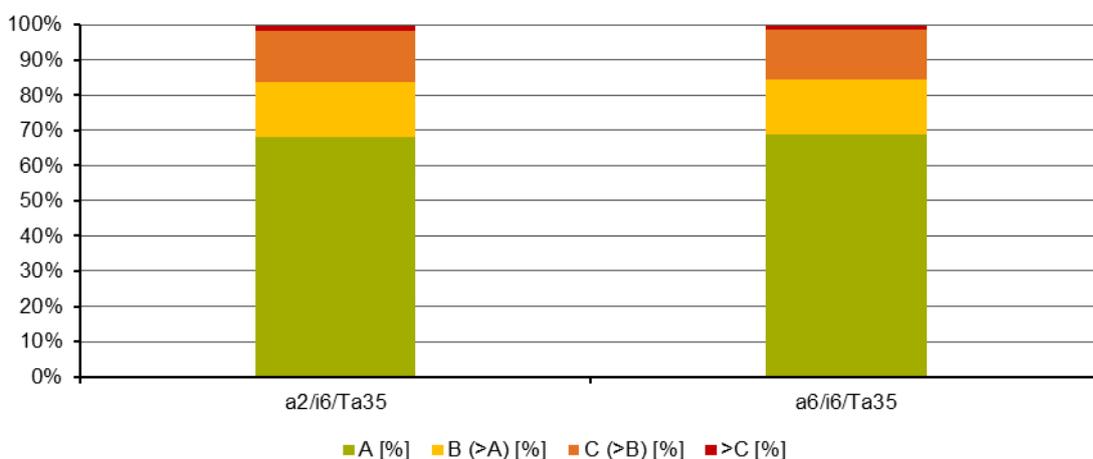


Abbildung 174: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung

	a2/i6/Ta35		a6/i6/Ta35	
	[%]	[Std.]	[%]	[Std.]
A	68,3	1787	68,7	1787
B (>A)	15,5	405	15,6	405
C (>B)	14,6	382	14,4	382
>C	1,4	37	1,1	37
gesamt	99,8	2611	99,8	2611

Tabelle 104: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung

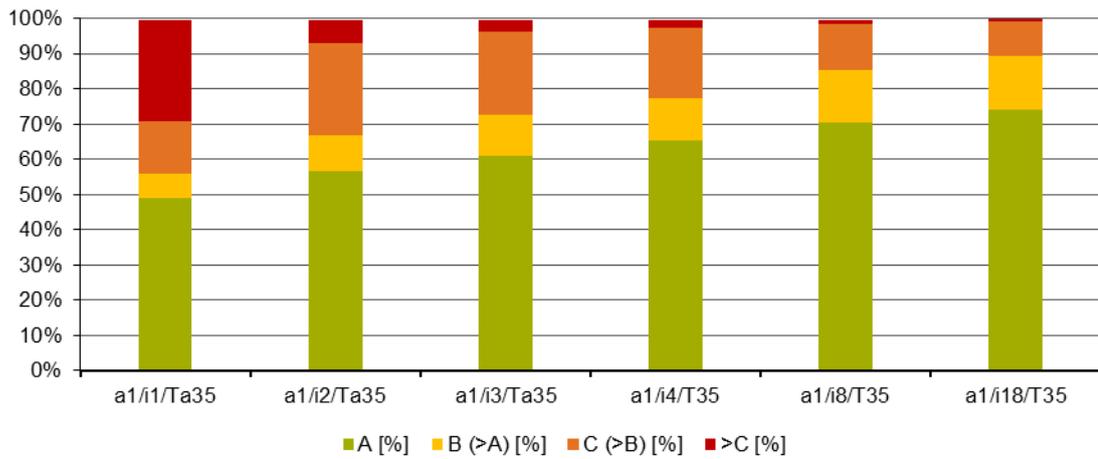


Abbildung 175: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im inneren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung

	a1/i1/Ta35		a1/i2/Ta35		a1/i3/Ta35		a1/i4/T35		a1/i8/T35		a1/i18/T35	
	[%]	[Std.]	[%]	[Std.]	[%]	[Std.]	[%]	[Std.]	[%]	[Std.]	[%]	[Std.]
A	49,1	1284	56,5	1478	61,1	1598	65,3	1708	70,5	1844	74,1	1938
B (>A)	7,0	183	10,5	275	11,6	303	12,1	317	14,9	390	15,4	403
C (>B)	14,6	382	26,0	680	23,4	612	19,9	521	13,2	345	9,6	251
>C	29,0	759	6,7	175	3,5	92	2,4	63	1,1	29	0,7	18
gesamt	99,7	2608	99,7	2608	99,6	2606	99,7	2608	99,7	2608	99,8	2611

Tabelle 105: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im inneren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung

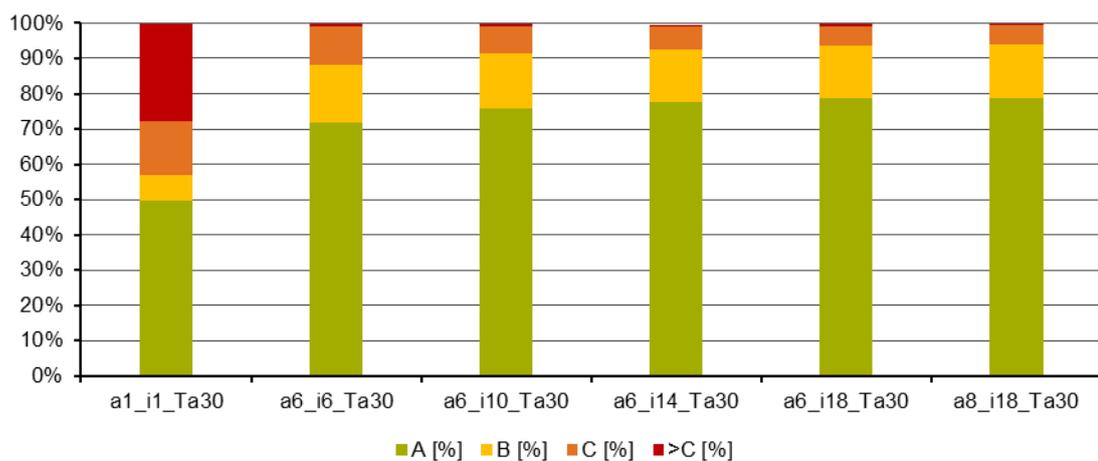


Abbildung 176: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im inneren und äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung

	a1_i1_Ta30	a6_i6_Ta30	a6_i10_Ta30	a6_i14_Ta30	a6_i18_Ta30	a8_i18/T35
--	------------	------------	-------------	-------------	-------------	------------

	[%]	[Std.]										
A	49,6	1298	71,9	1881	75,7	1980	77,5	2027	78,6	2056	78,7	2059
B (>A)	7,5	196	16,1	421	15,9	416	15,1	395	15,2	398	15,3	400
C (>B)	15,2	398	11,1	290	7,5	196	6,5	170	5,4	141	5,4	141
>C	27,4	717	0,7	18	0,6	16	0,5	13	0,5	13	0,4	10
gesamt	99,7	2608	99,8	2611	99,7	2608	99,6	2606	99,7	2608	99,8	2611

Tabelle 106: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Massenströmen im inneren und äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung

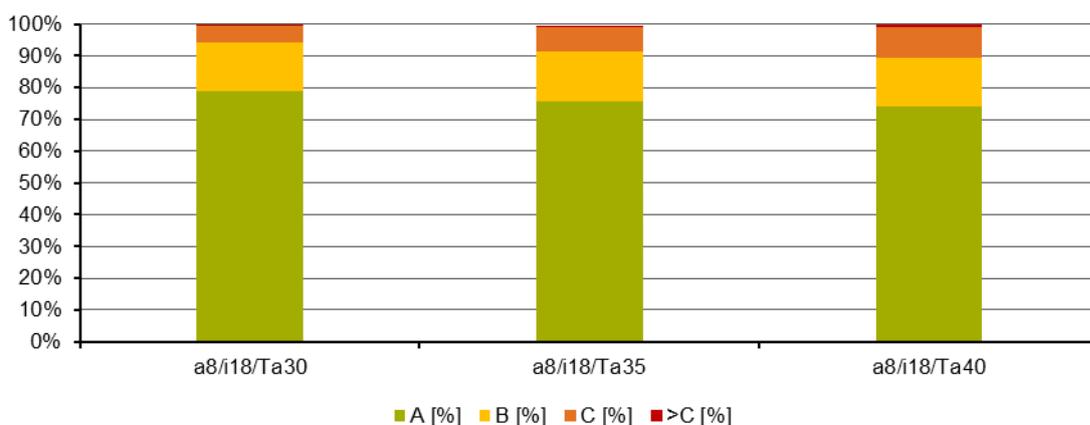


Abbildung 177: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Vorlauftemperaturen im äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung

	a8/i18/Ta30		a8/i18/Ta35		a8/i18/Ta40	
	[%]	[Std.]	[%]	[Std.]	[%]	[Std.]
A	78,7	2059	75,8	1983	74,1	1938
B (>A)	15,3	400	15,4	403	15,4	403
C (>B)	5,4	141	7,8	204	9,5	249
>C	0,4	10	0,6	16	0,7	18
gesamt	99,8	2611	99,6	2606	99,7	2608

Tabelle 107: Häufigkeitsverteilung der thermischen Komfortbereiche mit variierenden Vorlauftemperaturen im äußeren Fluidkreislauf; Kühlperiode; Nutzungszeit; Riad, Südorientierung

16.13.4 Gesamt

	Datum	T_amb	Gh	Dh-%	T_F1_ein	T_F1_aus	ΔT_{F1} (aus - ein)
	[TT.MM.JJ, HH:MM]	[°C]	[W/m ²]	[%]	[°C]	[°C]	[K]
Moskau							
Nord	20.6.13, 20:00	25,75	125	33	20	29,87	9,87
Süd	22.7.13, 11:30	29,03	527	60	20	39,57	19,57
West	25.8.13, 17:30	25,15	220	37	20	44,37	24,37
München							
Nord	20.6.13, 19:15	26,15	125	35	20	28,36	8,36
Süd	19.8.13, 12:45	29,80	793	18	20	38,21	18,21
West	7.21.13, 17:15	29,80	341	18	20	43,89	23,89
Riad							
Nord	8.31.13, 14:15	45,65	790	16	30	34,75	4,75
Süd	12.3.13, 12:45	27,10	724	11	30	36,38	6,38
West	7.22.13, 16:15	45,20	482	16	30	39,09	9,09

Tabelle 108: Maximale Temperaturdifferenzen (ΔT_{F1} (aus - ein)) zwischen Ein- (T_{F1_ein}) und Auslasstemperatur (T_{F1_aus}) des äußeren Fluids (F1); Moskau, München und Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung

Tamb = Außenlufttemperatur, Gh = Globalstrahlung auf die Horizontale, Dh-% = Anteil der Diffusstrahlung an der Globalstrahlung, T_F1_ein = Einlasstemperatur äußeres Fluid; T_F1_aus = Auslasstemperatur äußeres Fluid; ΔT_{F1} (aus - ein) = Temperaturdifferenz T_F1_aus - T_F1_ein; bei allen Werten ist das äußere Fluid maximal eingefärbt (3%-vol.)

	Moskau			München			Riad		
	Nord	Süd	West	Nord	Süd	West	Nord	Süd	West
Energiegewinne									
pro m² Fassade									
F1 [kWh/m²a]	96	198	208	91	169	190	754	1.226	1.366
F1 [kWh/m²a]	44	124	93	48	157	107	202	252	246
gesamt [kWh/m²a]	140	322	301	139	326	297	956	1.478	1.612
pro m² Nutzfläche									
F1 [kWh/m²a]	57	113	125	55	101	113	452	736	820
F2 [kWh/m²a]	26	74	56	29	94	64	121	151	148
gesamt [kWh/m²a]	83	187	181	84	195	177	573	887	968
Energiebedarf pro m² Nutzfläche									
Heizen [kWh/m²a]	27	21	22	16	13	13	0,7	0	0,3
Kühlen [kWh/m²a]	11	12	14	12	16	13	119	130	140
gesamt [kWh/m²a]	38	33	36	28	29	26	119,7	130	140,3
Energiegewinne zu Heiz- + Kühlkältebedarf									
	218%	567%	503%	300%	672%	681%	479%	682%	690%

Tabelle 109: Energiegewinne und Energiebedarf eines Einzelbüroraums mit Fluidglasfassade bezogen auf 17,5 m² Nutzfläche bzw. 10,5 m² Fluidglasfassade; Moskau, München und Riad; Nord-, Süd- und Westorientierung