

Walter Haase, Bürde Gültekin
Mohammed Metwally, Julian Rettig

TN-Technologie für den Einsatz in Architekturverglasungen

F 3047

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

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-7388-0085-2

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

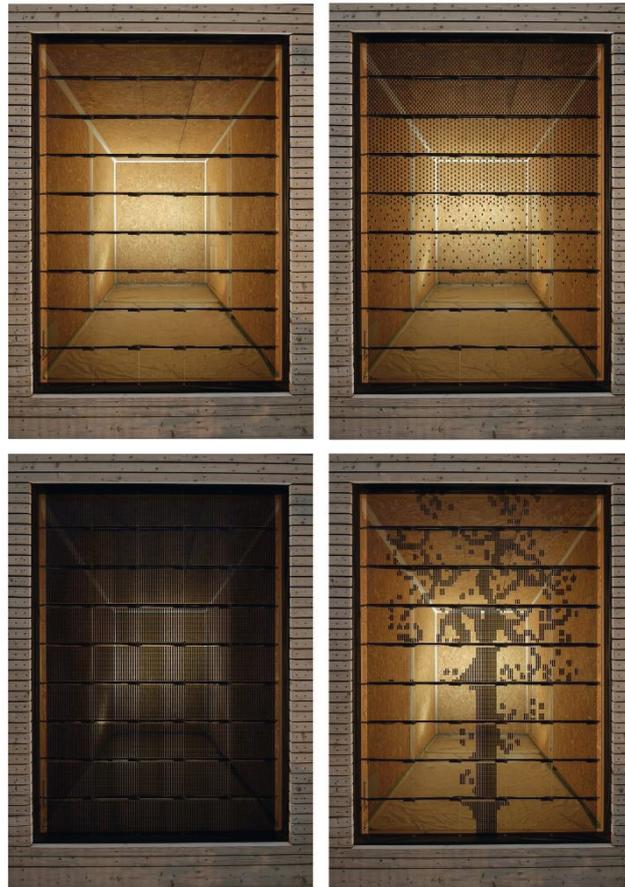
E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung



TN-Technologie für den Einsatz in Architekturverglasungen



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák
Jun.-Prof. Dipl.-Ing. Dirk A. Schwede, PhD



Vorhabenbezeichnung: TN-Technologie für den Einsatz in Architekturverglasungen

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Pfaffenwaldring 7 und 14
70569 Stuttgart

Förderkennzeichen: SWD-10.08.18.7-13.26

Förderstelle: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

Projektsumme: 400.293,74 €
Fördermittelanteil: 279.121,74 €

Projektleitung: Dr.-Ing. Walter Haase

Mitarbeiter: M.I.Arch., B.In.Dsn. Bürde Gültekin
Dipl.-Ing. Mohammed Metwally
Julian Rettig (Physikalisch-technischer Assistent)

Studentische Mitarbeiter: Christina Fuchs, Onur Solmaz, Ema Bllama

Projektlaufzeit: 18.07.2013 – 30.11.2016

Berichtszeitraum: 18.07.2013 – 30.11.2016

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Werner Sobek
Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák
Jun.-Prof. Dipl.-Ing. Dirk A. Schwede, PhD

Pfaffenwaldring 7 und 14
70569 Stuttgart

Telefon 0711 / 685 63599
Telefax 0711 / 685 63789

Dieser Forschungsbericht umfasst 112 Seiten.
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.
Stuttgart, 31.07.2017

Dr.-Ing. Walter Haase





Danksagung

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert (Aktenzeichen: II 3-F20-12-1-073 / SWD-10.08.18.7-13.26). Die Autoren bedanken sich für die gewährte Förderung und die überaus kompetente Begleitung des Projekts.

Unser Dank gilt zudem den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses:

- Klaus-Martin Hees, Research Director Europe, Alcoa Europe Commercial SAS und Jacques Breuils, Research & Development Engineer, Alcoa Europe Commercial SAS
- Dipl.-Ing. Thomas Thümmeler, Project Manager, DGNB Auditor, WSGreenTechnologies GmbH, vertreten durch B. Eng. Sebastian Janusz
- Dipl.-Ing. Lothar Rau, Institut für Großflächige Mikroelektronik der Universität Stuttgart

Ein besonderer Dank gilt den Industriepartnern, die das Projekt durch ihre großzügige Unterstützung möglich gemacht haben:

- alphaEOS AG – für die Beratung und Hardwarestellung im Bereich der Gebäudeautomation
- BMG MIS GmbH – für die Beratung im Bereich der Bildschirmtechnik und die Unterstützung durch die Bereitstellung von Displaykomponenten
- Bystronic Lenhardt GmbH – für Beratungsleistungen im Bereich der Anlagentechnik zur Isolierglasfertigung
- Itos Gesellschaft für Technische Optik mbH – für die Unterstützung mit Polarisatorfolien
- OKALUX GmbH – für Beratungsleistungen, die Glasbereitstellung sowie die Unterstützung bei der Isolierglasfertigung
- Rubner Haus AG/SpA für die Fertigung und die Montage des Fassadentestgebäudes

Weiterer Dank gilt Herrn Claus Engelhardt für seine überaus kompetente Beratung und Unterstützung im Bereich der Gebäudeautomation. Herrn Andreas Hauke und seinem Team der Schreinerei der Universität Stuttgart, dem Team der Materialprüfanstalt (Otto-Graf-Institut), Herrn Gerhard Bahr vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart sowie Herrn Udo Fuchs von FHD-GmbH Waiblingen gebührt ebenfalls unser Dank für die engagierte Mitwirkung beim Einbau und der Inbetriebnahme der Verglasungen im Fassadentestgebäude des ILEK.



INHALTSVERZEICHNIS

DANKSAGUNG 5

1 ALLGEMEINES 11

1.1 Ziel des Forschungsvorhabens 11

1.2 Motivation 11

1.3 Zeit- und Arbeitsplanung 11

1.4 Ergebnisverwertung und Veröffentlichungen 13

1.5 Testumgebung für Kurz- und Langzeitversuche..... 14

1.6 Marktpotentiale 16

1.6.1 Datengrundlage der Recherche, Marktanalyse 16

1.6.2 Primärerhebung 16

1.6.3 Sekundärerhebung 17

2 RECHERCHE ZU KOMPONENTEN UND FERTIGUNGSMÖGLICHKEITEN • AP 1..... 18

2.1 Aufbau einer TN-Zelle..... 18

2.2 Funktionsweise einer TN-Zelle 19

2.2.1 Folienpolarisatoren 19

2.2.2 Glassubstrate 19

2.2.3 Klebstoffe..... 19

2.2.4 Beschichtungen 20

2.2.5 Flüssigkristalle..... 20

2.3 Recherche zu den Fertigungsmöglichkeiten einer schaltbaren TN-Zelle 20

2.3.1 Herstellung von TN-Modulen 20

2.4 Verfügbare TN-Zellen-Varianten 21

2.4.1 Monopixel-Zelle (Shutter-Zelle)..... 21

2.4.2 Module (Multipixel-Zelle) 22

2.5 Einbindung der TN-Module in eine Isolierverglasung 23

2.5.1 Recherche zu Einbindungsmöglichkeiten der TN-Module in eine Isolierverglasung 23

2.5.2 Herstellung von Befestigungselementen zur Montage in der Isolierverglasung 24

3 CHARAKTERISIERUNG DER KOMPONENTEN UND DER ZELLEN • AP 2 UND AP 6..... 27

3.1 Monopixel-Zelle (Shutter-Zelle)..... 27

3.2 Spektrometrische Vermessung der Monopixel-Zelle 27

3.3 Spektrometrische Vermessung der Polarisatorfolien 30



3.4	Eigenschaften der Module	31
3.5	Werkstoffliche Bewertung einzelner Komponenten	33
4	AUSLEGUNG DES ZELLENAUFBAUS • AP 3	34
4.1	Simulation der TN-Zelle.....	35
5	HERSTELLUNG VON MUSTERZELLEN UND ISOLIERGLÄSER • AP 4	36
5.1	Monopixel-Zelle (Shutter-Zelle).....	36
5.2	Multipixel-Zelle	36
5.2.1	Ansteuerelektronik für die Multipixel-Zelle	36
5.2.2	Strukturierung in Bildpunkte	38
5.3	Module im Testrahmen	38
5.4	Musterisolierglas mit Multipixel-Zellen im Kleinformat	41
5.5	Musterglas mit Multipixel-Zellen im Großformat	41
5.5.1	Ausrichtung der Module sowie der Modultreiber für die Montage	41
5.5.2	Anbringen der Befestigungselemente bei der Firma OKALUX GmbH	42
6	ANSTEUERUNG DER SCHALTBAREN VERGLASUNGEN	46
6.1	Entwicklung von Software-Tools	51
7	KURZZEIT- UND LANGZEITVERSUCHE • AP 5	53
7.1	Monopixel-Zelle (Shutter-Zelle).....	53
7.1.1	Untersuchung der Schaltcharakteristik	53
7.1.2	Aufbau der Messschaltung	54
7.1.3	Vorversuche am Messsystem zur Schaltgeschwindigkeitserfassung	55
7.1.4	Messung zur Bestimmung der Schalteigenschaft der Shutter-Zelle.....	56
7.1.5	Auswertung der Messergebnisse zur Schaltzeitermittlung	58
7.1.6	Zusammenfassung der Messergebnisse	60
7.1.7	Ermittelte Schaltzeiten bei Extremtemperaturen	61
7.2	Multipixel-Zelle	61
7.2.1	Untersuchung der Schaltcharakteristik	61
7.2.2	Messungen zur Bestimmung der Schalteigenschaft der Multipixel-Module	62
7.2.3	Auswertung der Messergebnisse zur Schaltzeitermittlung	62
7.2.4	Zusammenfassung der Messergebnisse	64
7.2.5	Untersuchung der Leistungsaufnahme der Multipixel-Zelle.....	65
7.2.6	Versuchsdurchführung.....	65
7.2.7	Auswertung der Messergebnisse	66
7.3	Multipixel-Zellen in der Anordnung im Profilrahmen (3 x 5 Anordnung)	68
7.3.1	Versuche im Sonnensimulator	68
7.3.2	Messungen der Oberflächentemperatur an den Modulen	74



7.4	Voruntersuchungen zur Montage der Multipixel-Module in einem Isolierglasaufbau	79
7.4.1	Klebeversuche für Befestigungselemente	79
7.4.2	Tageslichtmessung im Fassadentestgebäude.....	84
7.5	Herstellung von Proben für Langzeitversuche im Freiland	95
7.5.1	Laminieren von Polarisationsfolien in einem Glasscheibenverbund mittels TPU-Folie	96
7.6	Vermessen der Langzeitproben	98
8	BEWERTUNG DER LANGZEITSTABILITÄT UND DER MARKTFÄHIGKEIT • AP 7.....	103
9	VERZEICHNISSE	105
9.1	Abbildungsverzeichnis	105
9.2	Tabellenverzeichnis	109
9.3	Abkürzungsverzeichnis	110
9.4	Literaturverzeichnis	111





1 Allgemeines

1.1 Ziel des Forschungsvorhabens

Für die Steuerung des Licht- und Energieeintrags in Gebäude stehen sowohl mechanische Sonnenschutzsysteme wie auch schaltbare Verglasungen auf Basis smarterer Materialien mit Wechseleigenschaften zur Verfügung. Kommerziell verfügbar sind derzeit elektrochrome Verglasungen, Systeme auf Basis von Partikelsuspensionen (engl. „suspended particle device“) sowie Flüssigkristallsysteme unter Verwendung von PDLC-Schichten (engl. „polymer dispersed liquid crystal“) oder von GHLC-Technologien (engl. „guest host liquid crystal“). PDLC-basierte Systeme finden derzeit überwiegend im Innenraum Anwendung. Bis auf die GHLC-Systeme erfüllen alle anderen Technologien die Anforderungen in Bezug auf die Schaltgeschwindigkeit, die Farbneutralität oder die Temperaturunempfindlichkeit nicht optimal.

Aus der Bildschirmtechnik bekannt sind Anzeigesysteme, die zur Regelung des Lichtdurchganges und damit zur Anzeige von Bildern und Schriften die sogenannte TN-Technologie (engl. „twisted nematic“) nutzen. Gegenüber den oben genannten elektrochromen, schaltbaren Verglasungen weisen TN-Zellen ein extrem schnelles Umschaltverhalten von transparent zu verdunkelt bei einer vernachlässigbar geringen Farbverfälschung beim Lichtdurchgang auf. Nachteilig bei der TN-Zelle ist jedoch die Tatsache, dass der maximale Transmissionsgrad im sichtbaren Spektrum durch die Notwendigkeit von gekreuzten Polarisatoren im System deutlich unter 50 % liegt.

Im genannten Forschungsvorhaben geht es daher um die Klärung der Frage, ob sich TN-Verglasungen als Alternative zu bisher bekannten schaltbaren Systemen eignen. Es erfolgte hierzu zunächst die Festlegung eines geeigneten Zellenaufbaus, die Herstellung der schaltbaren Module und deren Einbindung in eine Isolierverglasung wie auch die Charakterisierung der Komponenten und der TN-Zelle.

1.2 Motivation

Fast zeitgleich mit der Erfindung der Flüssigkristallanzeige auf Basis der TN-Technologie zu Beginn der 1970er Jahre wurde daran gedacht, diese auch in schaltbaren Verglasungen einzusetzen. Dort sind sie jedoch der Solarstrahlung und damit verbundenen hohen Temperaturwerten auf Grund der Erwärmung durch Absorption ausgesetzt. Einige der verwendeten Materialien der schaltbaren TN-Elemente hatten nach kurzer Exposition im Fenster ihre Funktion nicht mehr erfüllt [1], [2]. Daher war es bis vor kurzem nicht möglich, diese Technologie im Bereich von Fassadenverglasungen einzusetzen. Neue Untersuchungen zeigen nun, dass durch die Verbesserung der Langzeitstabilität der betroffenen Komponenten der TN-Module diese nun deutlich länger funktionsfähig bleiben könnten [3]. Die volle Funktionsfähigkeit entsprechender TN-Module, die sich seit 2010 in einem Freilandversuch befinden, konnte für einen Zeitraum von bisher ca. 6 Jahren nachgewiesen werden [3]. Hierbei wurden zwei unterschiedliche TN-Modultypen untersucht. Dies waren zum einen die bekannte TN-Technologie mit außenliegenden Polarisatorfolien und eine modifizierte TN-Technologie mit innerhalb des Moduls eingebrachten Polarisatoren. Die positiven Ergebnisse der vorangegangenen Forschungsaktivitäten sind Grundlage zu weiteren Eignungsuntersuchungen der TN-Technologie für den Fassadeneinsatz im Rahmen dieses Forschungsvorhabens.

1.3 Zeit- und Arbeitsplanung

Die reguläre Laufzeit des Projekts betrug 26 Monate (18.07.2013 bis 19.09.2015). Die ursprüngliche Zeitplanung wurde verlängert bis zum 30.11.2016.

Änderungen in der wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit haben sich nicht ergeben. Änderungen in der Zielsetzung sind nicht erfolgt.



Bisher gibt es keine auf Ergebnissen des Forschungsvorhabens gründenden Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen oder erteilte Schutzrechte.

Nachfolgende Arbeitspakete wurden bearbeitet:

AP1: Recherche zu geeigneten Komponenten und Fertigungsmöglichkeiten

- Recherche zu geeigneten Komponenten für den Bau einer schaltbaren TN-Zelle zur Anwendung in der Architektur:
 - o Polarisatoren
 - o Glassubstrate
 - o Klebstoffe
 - o Beschichtungen
 - o Flüssigkristalle
- Recherche zu Fertigungsmöglichkeiten einer schaltbaren Zelle:
 - o Beschichtungsauftrag
 - o Befüllung der Zellen
 - o Randverklebung
 - o Elektrische Anschlussmöglichkeiten
 - o Polarisator-Applikation

AP2: Charakterisierung der Komponenten

- Spektrometrische Vermessung der Polarisatoren als Grundlage für die Simulation der Zelleigenschaften
- Werkstoffprüfung der Komponenten (Polarisatoren, Klebstoffe)

AP3: Auslegung des Zellenaufbaus

- Berechnung der Zelleigenschaften: maximale Transmission, Schalhub, Schaltgeschwindigkeit, Schaltspannung, Winkelabhängigkeit
- Optimierung des Zellenaufbaus zur Erreichung einer maximalen Transparenz, eines maximalen Schalhubes sowie einer geringen Winkelabhängigkeit

AP4: Herstellung von Musterzellen und Isoliergläsern

- Herstellung von Kleinmustern (ca. 5 cm x 5 cm)
- Herstellung von Großmustern
- Einbindung in einen Isolierglasaufbau z.B. als zweite Scheibe eines Dreifachisolierglases

AP5: Kurzzeit- und Langzeitversuche

- Vorbereitung der Probekörper (Komponenten sowie schaltbare Elemente)
- Bestückung eines vorhandenen Freilandversuchsstandes:
 - o Exposition im Dachversuchsstand
 - o Exposition im Fassadenprüfstand (optional)
- Einbringen in eine Kühl-/Heizkammer zur Ermittlung der Schalteigenschaften unter Temperatureinfluss (von -15 °C bis 90 °C)
 - o Schaltgeschwindigkeit
 - o Leistungsbedarf
 - o Optische Degradation



AP6: Charakterisierung der Zellen und Musterisoliervläser

- Regelmäßige spektrometrische Vermessung der Proben
- Messung der Proben Temperaturen und Umweltdaten
- Untersuchung der Schaltgeschwindigkeiten, des Leistungsbedarfs und der eventuellen optischen Degradation unter Temperatureinfluss
- Messung des Wärmedurchgangskoeffizienten der Isolierverglasung* (zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht abgeschlossen)

AP7: Bewertung der Einsetzbarkeit der TN-Technologie als schaltbare Verglasung

- Bewertung der Langzeitstabilität der TN-Zellen
- Bewertung der Marktfähigkeit der TN-Zellen-basierten Isolierverglasungen

AP8: Vervollständigung der Dokumentation, Verfassen des Abschlussberichts

1.4 Ergebnisverwertung und Veröffentlichungen

Im Rahmen der Ergebnisverwertung wurden nachfolgend dargestellte Vorträge gehalten und dabei das Projekt und seine Ergebnisse präsentiert:

- Haase, W.: Structured Sun Protection Glazing, engineered transparency, International Conference at glasstec, Düsseldorf, 21.10.2014
- Haase, W.: Trends und Entwicklungen bei adaptiven Verglasungen, Fluidglass-Workshop, München, 03.11.2015
- Haase, W.: Potentiale strukturierter, schaltbarer Verglasungen, Glasbau 2016, Technische Universität Dresden, 17.03.2016
- Husser, M.: New Possibilities of Sun and Glare Protection with a Structured Switchable Glazing, Challenging Glass 5, Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Ghent University, 17.06.2016
- Haase, W.: Potentiale strukturierter, schaltbarer Verglasungen, Glasstec 2016, Bundesinnungsverband des Glaserhandwerks, 22.09.2016
- Haase, W.: Adaptive Verglasung und Großflächen-Display, Rosenheimer Fenstertage 2016, 13.10.2016
- Husser, M.: Subdivided Switchable Sun Protection Glazing, PowerSkin Conference, München, 19.01.2017
- Haase, W.: Potentiale strukturierter, schaltbarer Flüssigkristallverglasungen, MGT-Fachseminar, Mayer Glastechnik, Feldkirch, 18.05.2017

Auf der Basis der erzielten Forschungsergebnisse entstanden nachfolgend dargestellte Veröffentlichungen:

- Husser, M., Haase, W., Sobek, W., Kurz, E., Rau, L., Frühauf, N.: Structured Sun Protection Glazing [4]
- Husser, M., Haase, W., Sobek, W.: New Possibilities of Sun and Glare Protection with a Structured Switchable Glazing [5]
- Haase, W., Husser, M., Sobek, W.: Potentiale strukturierter, schaltbarer Verglasungen [6]
- Kaltenbach, F.: Performative Transluzenz [7]
- Haase, W., Husser, M., Sobek, W.: The Potential of Structured Switchable Glazing, in: Glass Performance Days, Tampere, 2017, (eingereicht und angenommen)

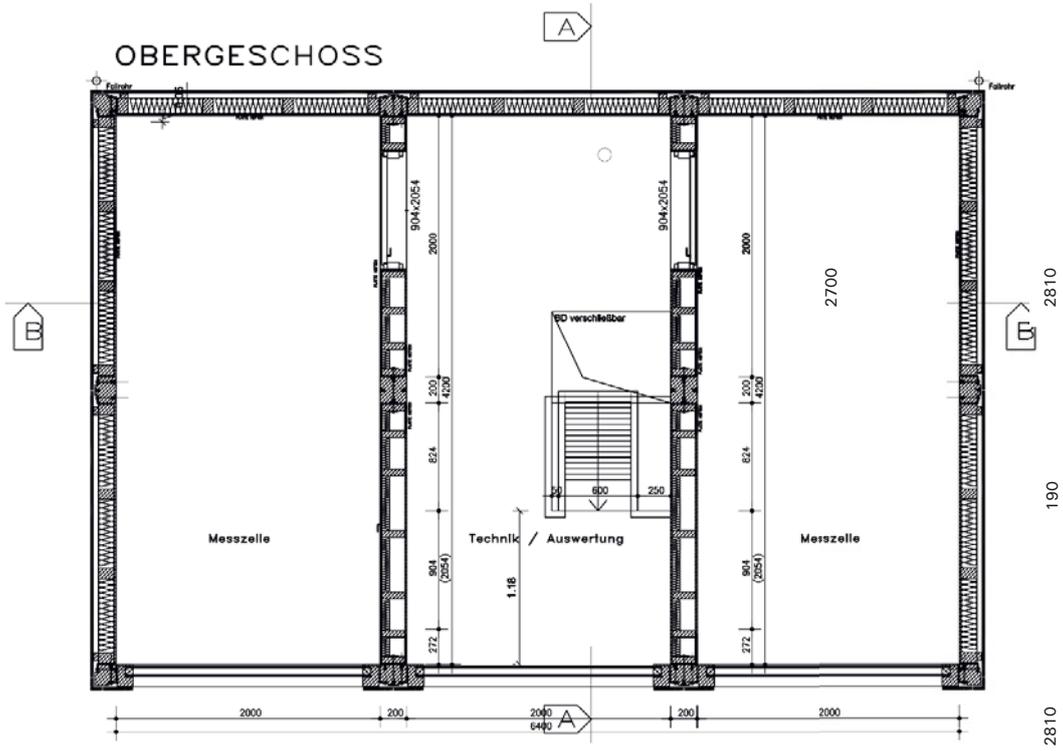


1.5 Testumgebung für Kurz- und Langzeitversuche

Dem Institut steht seit Beginn der Jahres 2015 ein Fassadentestgebäude (Abbildung 1 bis Abbildung 3) zur Verfügung. Dieses Gebäude verfügt über vier geometrisch identische Messräume auf zwei Etagen. Die Südfassade erlaubt den Einbau unterschiedlicher Testverglasungen. Im Rahmen des Projekts konnte eine Isolierverglasung hergestellt werden, die mit 45 schaltbaren TN-Modulen bestückt ist. Die Einbauposition dieser Verglasung ist der Abbildung 3 zu entnehmen.



Abbildung 1: Fassadenprüfstand (Foto: G. Metzger / ILEK)



SNITT B-B

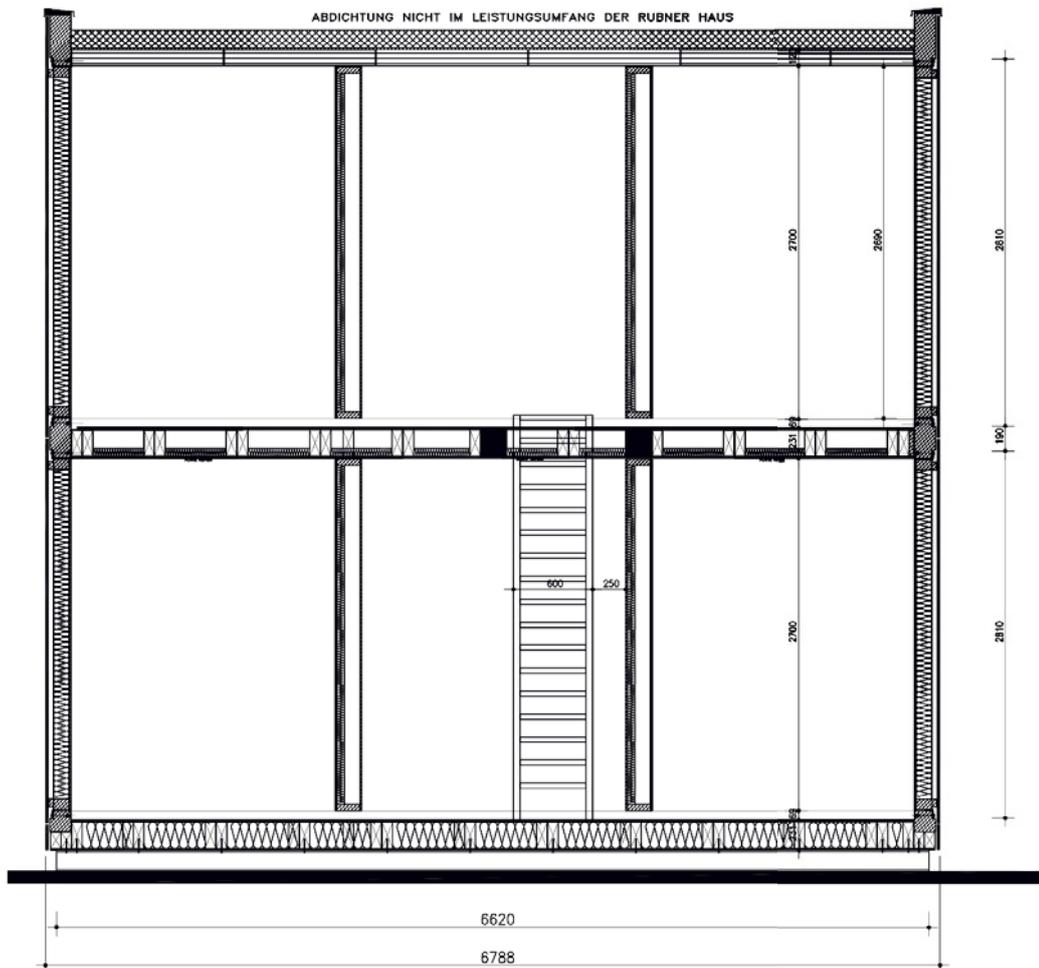


Abbildung 2: Fassadenprüfstand im Grundriss (Obergeschoss) und Schnitt (Copyright: Rubner Haus AG/SpA)

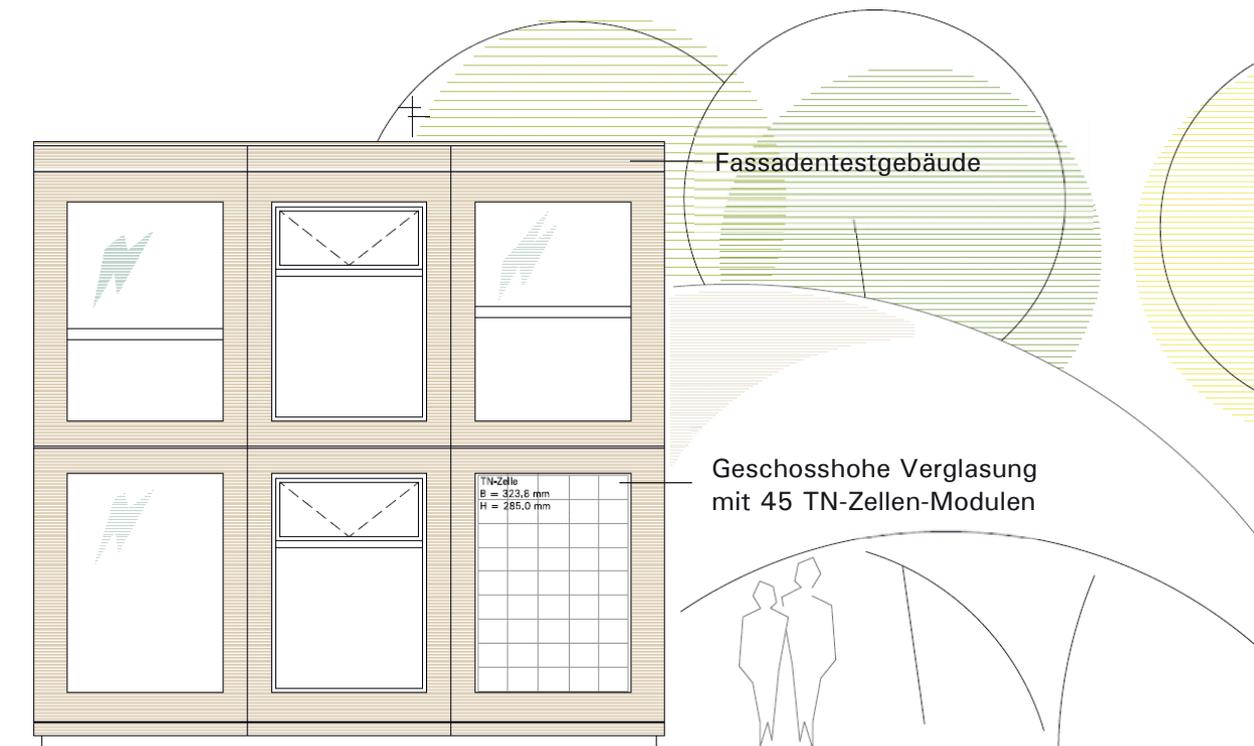


Abbildung 3: Ansicht der Südfassade (Copyright: M. Husser / ILEK). Die Isolierverglasung des Raumes rechts unten ist mit 45 TN-Modulen ausgestattet.

1.6 Marktpotentiale

1.6.1 Datengrundlage der Recherche, Marktanalyse

Im Rahmen der Projektbearbeitung erfolgte eine Datenanalyse zur Ermittlung des Marktpotentials schaltbarer Verglasungen. Es wurden dabei primäre und sekundäre Methoden der Datenerhebung angewendet, die nachfolgend erläutert werden.

1.6.2 Primärerhebung

Persönliche Befragungen von Architekten sowie von Entwicklern und Herstellern von adaptiven Verglasungssystemen zeigten ein wachsendes Marktpotential solcher Verglasungen auf.¹ Da ein Erfolg auf dem Architekturmarkt weniger voraussehbar ist als auf dem Automobilmarkt, fokussieren sich Hersteller mancher Systeme im ersten Schritt ihrer Markteintrittsstrategie auf Automobilverglasungen. Andere Hersteller, wie beispielsweise die Firma Active Glass Technologies plc, sehen Marktnischen im Bereich kostengünstiger, technologisch einfacher Systeme und der Reduzierung des Energieverbrauchs von Verschattungssystemen. Die Aufwertung der lichttechnischen Fragestellungen im Kontext der Optimierung der Tageslichtsituation in Innenräumen wird als eine der wichtigsten Aufgaben bei der Entwicklung von zukunftsfähigen Fassadensystemen gesehen. Aus architektonischer Sicht ist vor allem die Konkurrenzfähigkeit mit bewährten, konventionellen Verschattungssystemen hinsichtlich der Funktionsfähigkeit gefragt. Darüber hinaus sind klare Aussagen zur Gewährleistung, Haftung und zu den Schnittstellen zu Haustechnikkomponenten für die Verbreitung der innovativen Verglasungen in der Praxis unabdingbar. Sobald in größerem Umfang gelungene Praxisbeispiele verfügbar sind, wird

¹ Befragt wurden die Architekten Andreas Pfeiffer (archis Architekten + Ingenieure GmbH) und Irina Auernhammer (auernhammer wohlrab architektur gbr) sowie Vertreter der Entwickler und Hersteller Research Frontiers Inc., Active Glass Technologies plc und MicroShade A/S.



dies zu einer weiteren Verbreitung der Systeme beitragen. Das breite Spektrum verfügbarer, adaptiver Verglasungen mit unterschiedlichen Eigenschaften scheint überdies einen verstärkten Marktzugang zu befördern.

1.6.3 Sekundärerhebung

Es konnten mehrere Studien [8]–[10] recherchiert werden, die mithilfe statistischer Daten eine große Nachfrage des Markts nach Funktionsverglasungen aufzeigen. Für die Anwendung der adaptiven Verglasungen zur Steuerung des Licht- und Energiedurchgangs sind vor allem die Prognosen für Sonnenschutzglas von Interesse. Laut einer von der Freedonia Group zum Zeitpunkt des Projektbeginns durchgeführten Marktstudie [9] sollte beispielsweise die Nachfrage nach Sonnenschutzgläsern in den USA zwischen 2012 und 2017 jährlich um ca. 12,3 % steigen.

Laut BCC Research ist der Umsatz intelligenter Verglasungen (engl. "smart glass-based product") seit 2009 ständig gewachsen: "\$ 883.1 million [ca. 714 Mio. €] in 2009 to \$ 1.2 billion [ca. 1 Mrd. €] in 2010, and was valued at nearly \$ 1.6 billion [ca. 1.3 Mrd. €] in 2011. The market is forecast to grow at a compound annual growth rate (CAGR) of 21.6 % from 2011 to 2016, reaching global revenues of nearly \$ 4.2 billion [ca. 3.4 Mrd. €] in 2016" [10].

Die relativ hohen Kosten adaptiver Verglasungen sind dabei derzeit der größte Hemmfaktor für ein noch schnelleres Wachstum der Nachfrage nach diesen Verglasungssystemen. Andere entscheidende Faktoren sind laut Aussage der Firma Active Glass Technologies plc die Notwendigkeit der Stromzufuhr für die Ansteuerung, mangelnde Dauerhaftigkeit mancher Systeme sowie lange Schalt- und Reaktionszeiten [8].

2 Recherche zu Komponenten und Fertigungsmöglichkeiten • AP 1

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurden Recherchen zu geeigneten Komponenten für den Bau einer schaltbaren TN-Zelle für die Anwendung in der Architektur durchgeführt. Zudem erfolgte eine Recherche zu Fertigungsmöglichkeiten für die Herstellung einer schaltbaren Zelle.

Bevor auf die Rechercheergebnisse eingegangen wird, soll zunächst der Aufbau und die Funktion eines TN-Moduls erläutert werden.

2.1 Aufbau einer TN-Zelle

Zunächst soll der prinzipielle Aufbau einer Flüssigkristallzelle mit einer nematischen Phase und einer passiven Ansteuerung anhand der schematischen Darstellung in Abbildung 4 und Abbildung 5 erläutert werden. Die Zelle ist als transmissives Element mit lediglich einem adressierbaren Feld aufgebaut. Im nicht angesteuerten Fall ($U=0$) ist sie lichtdurchlässig (engl. „normally white“, NW). Die außenliegenden Polarisatoren sind gegeneinander um 90° gedreht. Bei paralleler Anordnung der Polarisatoren wäre die Zelle im nichtangesteuerten Zustand lichtundurchlässig (engl. „normally black“, NB). Neben den zwei außenliegenden Polarisatoren besteht die Zelle aus zwei Trägersubstraten, vorzugsweise aus Glas, die die Funktionsschichten tragen und den Flüssigkristall einschließen. Die elektrisch leitfähige Schicht dient dem Aufbau eines elektrischen Feldes. Die Orientierungsschicht bewirkt, dass sich der Flüssigkristall an der Grenzfläche jeweils in definierter Richtung ausrichtet. Die Richtung der Orientierungsschicht ist jeweils parallel zur Polarisationsrichtung des nächstgelegenen Polarisators. Abstandshalter (engl. „spacer“) sorgen für einen konstanten Abstand zwischen den Trägersubstraten. Wird ein alkalihaltiges Trägerglas verwendet, so verhindert eine Siliziumdioxid-Schicht das Wandern von Alkaliionen in die übrigen Schichten. Eine Randverklebung aus einem UV-härtenden Klebstoff schließt die Zelle ab [2].

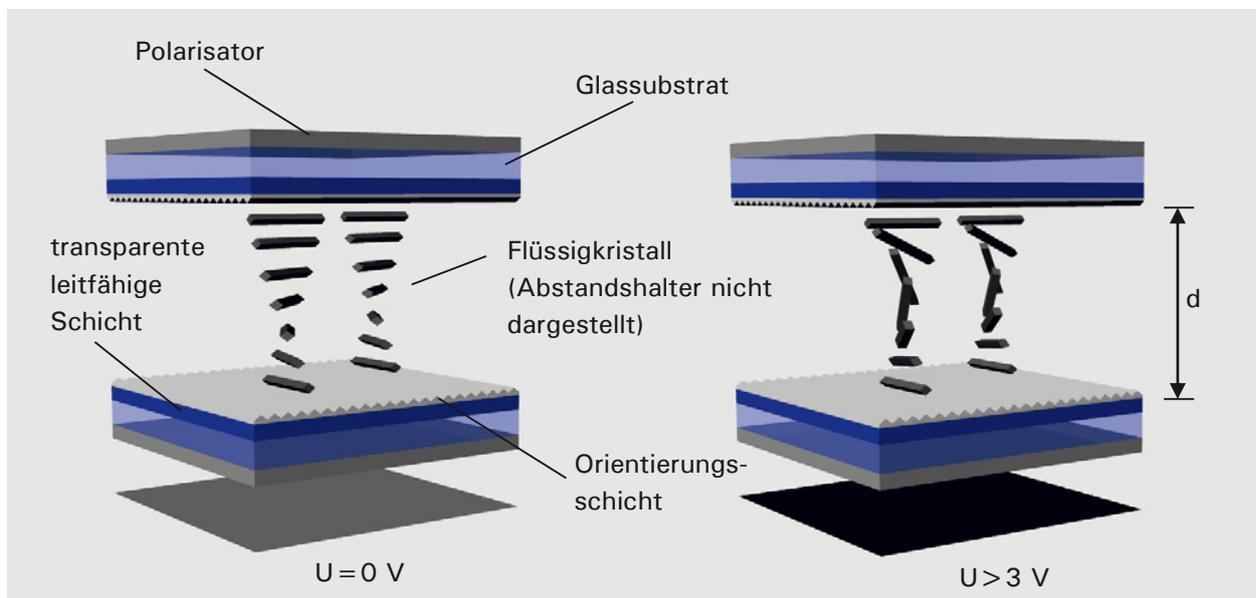


Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer transmissiven, passiv angesteuerten TN-Zelle im NW-Modus bei $U=0\text{ V}$. Die Zelle ist lichtdurchlässig.

Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer transmissiven, passiv angesteuerten TN-Zelle im NW-Modus bei $U>3\text{ V}$. Die Zelle ist lichtundurchlässig.



2.2 Funktionsweise einer TN-Zelle

Trifft unpolarisiertes Licht auf den vorderen Polarisator der TN-Zelle, so wird von diesem lediglich eine Schwingungsrichtung des Lichtes hindurchgelassen. Dieses üblicherweise linear polarisierte Licht gelangt nun in die Flüssigkristallschicht. Während der Direktor (Richtungsvektor) der obersten Flüssigkristalllage parallel zur Polarisationsrichtung des oberen Polarisators ausgerichtet ist, erfolgt in der Flüssigkristallschicht eine Drehung des Direktors um 90° , so dass die untere Lage mit der Direktorrichtung parallel zum unteren Polarisator orientiert ist. Ursache für die Ausrichtung der Flüssigkristallmoleküle in den Grenzschichten ist die Orientierungsschicht. Die Direktordrehung der Flüssigkristallphase bewirkt, dass die Polarisationsrichtung des durchlaufenden Lichtes ebenfalls um 90° mitgedreht wird und am Austritt aus dem Flüssigkristall nun parallel zur Polarisationsrichtung des unteren Polarisators verläuft. Das Licht kann daher den unteren Polarisator passieren. Die Zelle erscheint in diesem nichtangesteuerten Zustand durchsichtig (Abb. 4). Überschreitet die an die Zelle angelegte Spannung einen bestimmten Wert U_{th} (engl. „threshold“ = Grenzwert), so werden die Direktoren im Flüssigkristall parallel zum elektrischen Feld (E-Feld) ausgerichtet. In diesem Zustand des Lichtdurchganges in Richtung der optischen Achse der Flüssigkristallmoleküle erfolgt keine Doppelbrechung und auch keine Drehung des E-Feld-Vektors der Strahlung mehr. Die Schwingungsrichtung des E-Feld-Vektors der durchlaufenden Strahlung steht nun senkrecht zur Polarisationsrichtung des unteren Polarisators. Daher wird das Licht durch diesen weitestgehend absorbiert. Die Zelle erscheint undurchsichtig. Die Lichttransmission der TN-Zelle wird funktionsbedingt wesentlich von den Eigenschaften der eingesetzten Polarisatoren bestimmt.

Weil der Schaltvorgang zwischen voller Transmission und geringster Transmission mit zunehmender Dicke der Flüssigkristallschicht an Dauer zunimmt, werden dünne Flüssigkristallschichten für die Bildschirmtechnik angestrebt. Dickere Zellen sind träger beim Ansteuern [2].

2.2.1 Folienpolarisatoren

Für die im Rahmen des Forschungsprojets durchgeführten Untersuchungen wurden die TN-Module mit zwei unterschiedlichen Polarisatoren bestückt (Tabelle 1). Für den Einbau in den Testrahmen wurden 15 Module mit einer Polarisationsfolie der Firma Nitto Denko beklebt. Weitere 45 Module für den Einsatz im Fassadentestgebäude weisen eine Polarisationsfolie der Firma Sanritz auf.

Tabelle 1: Verwendete Polarisatorfolien

Firma	Produktbezeichnung der Folienpolarisatoren
Nitto Denko Corporation	NPF-TEG465DUHC
Sanritz Corporation	HLC2-5618

2.2.2 Glassubstrate

Das verwendete Glassubstrat für die Herstellung der TN-Zelle ist ein Display-Weißglas.

2.2.3 Klebstoffe

Im Herstellungsprozess kommen Klebstoffe zum Einsatz, um die Randverklebung auszuführen. Allerdings sind die genauen Informationen hierüber Teil des Firmengeheimnisses der Firma BMG MIS GmbH.



2.2.4 Beschichtungen

Zwei Beschichtungen im Zellenaufbau bestimmen im Wesentlichen die Funktion der Zelle. Das ist zum einen die transparente leitfähige Schicht und zum anderen die Orientierungsschicht. Als leitfähige Schicht wurde Indium-Zinnoxid und als Orientierungsschicht eine Polyimidlage verwendet.

2.2.5 Flüssigkristalle

Beim verwendeten Flüssigkristall handelt es sich um ein Produkt der Firma Merck KGaA mit der Produktbeschreibung ZLI-3412-000.

2.3 Recherche zu den Fertigungsmöglichkeiten einer schaltbaren TN-Zelle

2.3.1 Herstellung von TN-Modulen

Die Herstellung einer TN-Zellen-Einheit verlangt große Präzision und höchste Sauberkeit. Aus diesem Grunde erfolgt der Herstellungsprozess unter Reinraumbedingungen. Nur so kann gewährleistet werden, dass bei der Fertigung keine Verunreinigungen in und zwischen die einzelnen Schichten gelangen. Nach der Reinigung der Glassubstrate, deren Dicke für "display"-Anwendungen derzeit zwischen 0,7 mm und 1,1 mm beträgt, wird, falls es der Glastype erfordert, zunächst eine diffusionshemmende Schicht beispielsweise aus Siliziumdioxid (SiO_2) im Aufstäubeverfahren (engl. „sputter“, Kathodenzerstäubungsverfahren) aufgebracht. Sie verhindert bei der Verwendung von alkalihaltigen Weichgläsern das Wandern von Alkaliionen aus dem Glas in die Flüssigkristallschicht. Zu einer solchen Wanderung kann es kommen, wenn die im Herstellungsprozess durchlaufenen Temperaturen über 400 °C liegen. Bei der Verwendung alkaliarmer Hartgläser wird eine Grundlagenschicht nur aufgebracht, wenn es gilt, die Haftung der nachfolgenden Materialien zu verbessern oder deren gleichmäßige Aufbringung zu erleichtern. Das Aufbringen der transparenten leitfähigen Schicht kann ebenfalls durch Aufstäuben erfolgen. Bei diesem Prozess wird durch eine kontinuierliche Gasentladung in einer Vakuumkammer ein Plasma erzeugt. Die im Plasma enthaltenen Ionen treffen, durch elektrische Felder beschleunigt, auf ein Zielmaterial und schlagen dort Moleküle heraus. Diese wiederum treffen auf das zu beschichtende Substrat, lagern sich dort an und bilden die gewünschte Schicht. Ein übliches Material zur Erzeugung der Elektrodenschicht ist Indium-Zinnoxid (engl. „indium-tin-oxid“, ITO) [2].

Auf die ITO-Schicht wird die sogenannte Orientierungsschicht aufgebracht, die die Ausrichtung der Flüssigkristallmoleküle an den Grenzflächen bewirkt. Ein einfaches Verfahren ist dabei das Aufschleudern (engl: „spin coating“) eines geeigneten flüssigen Kunststoffes. Für dieses Verfahren kommen üblicherweise Polyimide (PI) zum Einsatz. Nach dem Aufschleudern wird das Substrat zur Polymerisation des Kunststoffes einer Temperaturbehandlung unterzogen. Großflächig kann der PI-Kunststoff beispielsweise mittels Schlitzdüsenbeschichtungsverfahren aufgebracht werden. Die Orientierungsschicht muss nachfolgend mechanisch gerieben werden, um an der Oberfläche die Polymerketten des PI in Reiberichtung zu orientieren. Dies bewirkt die entsprechende Ausrichtung der Flüssigkristall-Molekülachsen parallel zur Reiberichtung. Das Reiben erfolgt hierbei mittels einer rotierenden Walze, die mit Samt bespannt ist. Die jeweilige Reiberichtung an den beiden Substraten einer Zelle ist dabei um den als Verdrillungswinkel (engl. "twist") bezeichneten Wert gegeneinander verdreht. Im Falle der TN-Zelle beträgt dieser 90 °. Zur Sicherung eines gleichmäßigen Zellenabstandes (d) nach Abbildung 4 dienen Abstandshalter (engl. "spacer"). Diese Abstandshalter in Form winzig kleiner Polymerkugeln werden mit einer leichtflüchtigen Flüssigkeit gemischt und auf eines der Substrate aufgebracht. Nach dem Verdunsten der Flüssigkeit bleiben sie auf dem Substrat zurück [2].

Auf das zweite Substrat wird der Kleberahmen in Form eines unter ultravioletter Strahlung aushärtenden Klebstoffbandes am Rand aufgebracht. Dabei bleibt noch eine Einfüllöffnung zur Einbringung des Flüssigkristalles erhalten.



Nach dem als Zellenbau bezeichneten Ausrichten (engl. "align") und Verpressen der Glassubstrate mit nachfolgendem Verkleben wird die Zelle befüllt. Dieser Vorgang erfolgt wiederum in einer Vakuumkammer. Zunächst wird hierbei die Luft aus der Kammer evakuiert. Dabei wird auch aus der noch offenen Zelle die Luft herausgesaugt. Nach dem Erreichen eines bestimmten Unterdruckes erfolgt das Benetzen der Einfüllöffnung mit Flüssigkristall, so dass die Füllöffnung vollständig mit Flüssigkristall getränkt ist und sich ein kleiner Flüssigkristallsee um die Öffnung bildet. Beim anschließenden Belüften der Vakuumkammer wird der Flüssigkristall in die Zelle hineingezogen und die gesamte Zelle füllt sich gleichmäßig. Nach dem Befüllen kann die Zelle nun auch an der Einfüllöffnung verschlossen werden. Nach einer entsprechenden elektrischen Verdrahtung ist die Zelle in Verbindung mit zusätzlich angebrachten Polarisatoren funktionsfähig [2]. Das beschriebene Unterdruckbefüllverfahren ist zielführend für Modulformate bis maximal 16" (~40 cm x 40 cm). Bei der Herstellung großflächiger Zellen, die über dieses Format hinausgehen, sind Klebespacer in Verbindung mit einem als ODF-Füllprozess (engl. „one drop fill“ oder auch „open drop fill“) bezeichneten Verfahrens einsetzbar [3].

Sofern eine Strukturierung in einzelne Bildpunkte (engl. "pixel") erfolgen soll, wird mittels Fotolithografie eine Unterteilung der leitfähigen Fläche durchgeführt. Dabei erhält jeder Bildpunkt eine eigene elektrische Zuleitung. Die zunächst vollflächige leitfähige Beschichtung einer der Glassubstrate wird demnach in einzelne Bildpunkte mit jeweils eigener Zuleitung strukturiert. Die zweite leitfähige Beschichtung am zweiten Glas verbleibt als eine Fläche. Eine derart aufgebaute gepixelte TN-Zelle wird als passiv angesteuertes Modul bezeichnet. Im Gegensatz dazu verfügen Module mit aktiv angesteuerten Bildpunkten jeweils über einen eigenen Ansteuertransistor je Bildpunkt und sind daher komplexer aufgebaut.

Um die jeweiligen Bildpunkte ansteuern zu können wird jedes Modul mit einem Modultreiber-Element versehen. Diese Ansteuerelektronik ermöglicht das unabhängige Schalten jedes einzelnen Bildpunktes. Es wurden zwei unterschiedliche Polarisatoren für die Herstellung der TN-Module verwendet (Tabelle 1). Die Polarisatoren werden nach dem Füllen und Schließen der Module auf die Außenseiten aufgeklebt. Das Bekleben sollte ebenfalls unter Reinraumbedingungen vorgenommen werden, um auch hier Einschlüsse von Staub und anderen Fremdkörpern zu vermeiden.

2.4 Verfügbare TN-Zellen-Varianten

2.4.1 Monopixel-Zelle (Shutter-Zelle)

Zur Untersuchung des Schaltverhaltens sowie der optischen Kennwerte der vorgesehenen TN-Module (Tabelle 2) erfolgten Messungen an einer Monopixelzelle. Diese lässt sich ganzflächig ansteuern. Die wesentlichen Daten dieser Zelle sind nachfolgend gegeben.

Tabelle 2: Eigenschaften der Monopixel-Zelle

Eigenschaft	Wert
Abmessungen	15 cm x 15 cm
Zellabstand	6,5 μm
Flüssigkristall	Merck ZLI-3412-000
Polarisator	Sanritz HLC2-5618



2.4.2 Module (Multipixel-Zelle)

Zwei unterschiedliche Modul-Typen konnten im Rahmen der Recherche hinsichtlich des Pixellayouts als geeignet identifiziert werden. Beschafft wurden Module vom Typ GV66 der Firma BMG MIS GmbH. Diese eignen sich besonders gut für eine Addition zur Belegung einer größeren Verglasungsfläche. Die Eigenschaften dieser Module können Tabelle 3 entnommen werden. Die Strukturierung der Module wird in Abbildung 6 dargestellt.

Tabelle 3: Eigenschaften der Module des Typs GV66

Eigenschaft	Wert
Abmessungen	32,3 cm x 28,5 cm
Unterteilung	26 Pixel x 16 Pixel (Anzahl-horizontal x Anzahl-vertical)
Zellabstand	6,5 μm
Flüssigkristall	Merck ZLI-3412-000
Polarisator der Module für den Testrahmen (15 Stück)	Nitto Denko NPF-TEG465DUHC
Polarisator der Module für den Fassaden-einbau	Sanritz HLC2-5618

Das Modul GV66 ist als Passiv-Matrix-Modul ausgeführt. Jeder Bildpunkt verfügt über eine eigene elektrische Zuleitung und kann dadurch einzeln angesteuert werden. Die Bildpunkte der Module lassen sich im vorliegenden Fall in den Zustand „An“ (minimale Durchlässigkeit) und „Aus“ (maximale Durchlässigkeit) schalten. Die Entwicklung einer speziellen Graustufentreiber-Elektronik konnte im Rahmen der verfügbaren Projektmittel nicht umgesetzt werden. Diese ist notwendig für eine Schaltung der Bildpunkte in Zwischenwerte (Graustufen) der Lichtdurchlässigkeit.

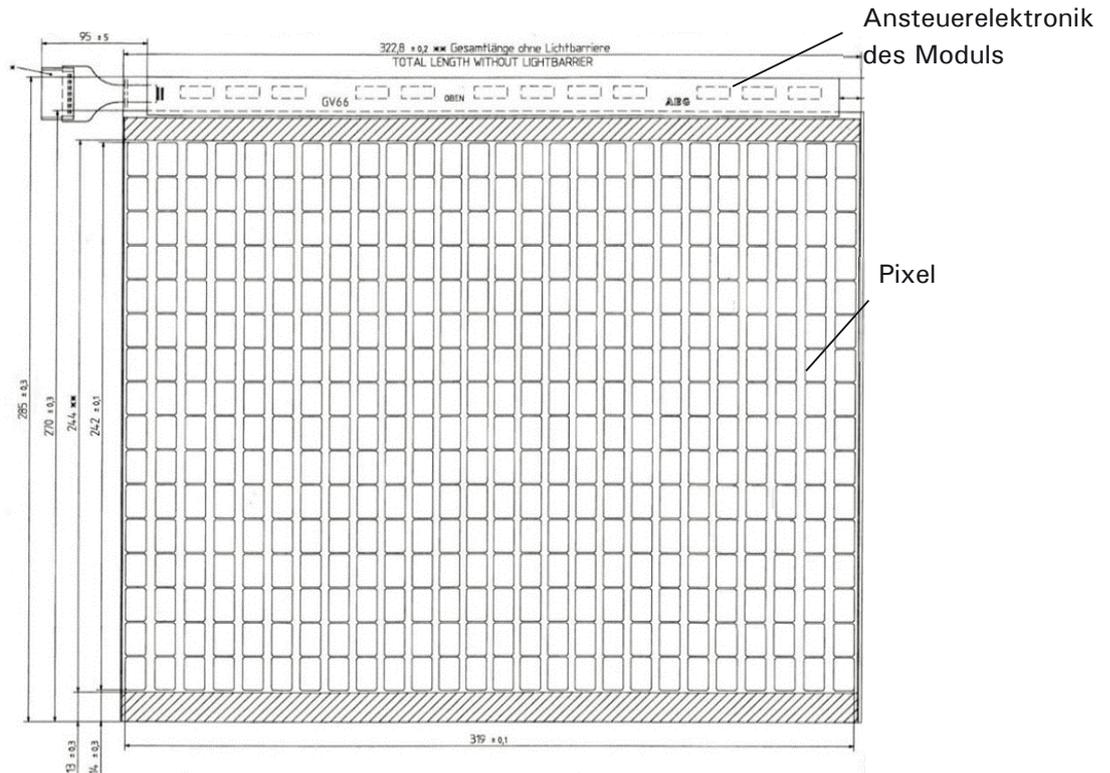


Abbildung 6: Pixeleinteilung beim Modul GV66 (Zeichnung: BMG MIS GmbH)

2.5 Einbindung der TN-Module in eine Isolierverglasung

2.5.1 Recherche zu Einbindungsmöglichkeiten der TN-Module in eine Isolierverglasung

Um zusätzlich zu den Labortests auch Feldversuche durchführen zu können, wurde ein Isolierglas eines Raumes des Fassadentestgebäudes mit 45 schaltbaren Modulen ausgestattet. In Abbildung 7 ist der entsprechende Aufbau skizziert. Für das eigentliche Einbinden der Module in das Isolierglas standen drei unterschiedliche Methoden zur Auswahl:

- Ankleben der Module an die Innenseite der Außenscheibe
- Anlaminieren der Module an die Innenseite der Außenscheibe mittels Laminierfolie
- Mechanische Klemmbefestigung mittels Klemmhalter



Als nicht geeignet nach derzeitigem Forschungsstand wurde die Klebemethode eingestuft. Beim Defekt eines Moduls wäre das Austauschen desselben nicht mehr möglich. Ähnlich verhält es sich mit dem Laminieren. Ein weiteres Ausschlusskriterium sind fehlende Kenntnisse über die Alterungsbeständigkeit von geklebten oder laminierten Modulen mit außen aufgeklebten Polarisationsfolien. Aus dem genannten Grund erfolgt die Einbindung der Module in die Isolierverglasung mittels an die Innenseite der Außenscheibe geklebten Klemmhaltern aus Kunststoff.

TN-Module:
B = 323.8 mm
H = 285 mm

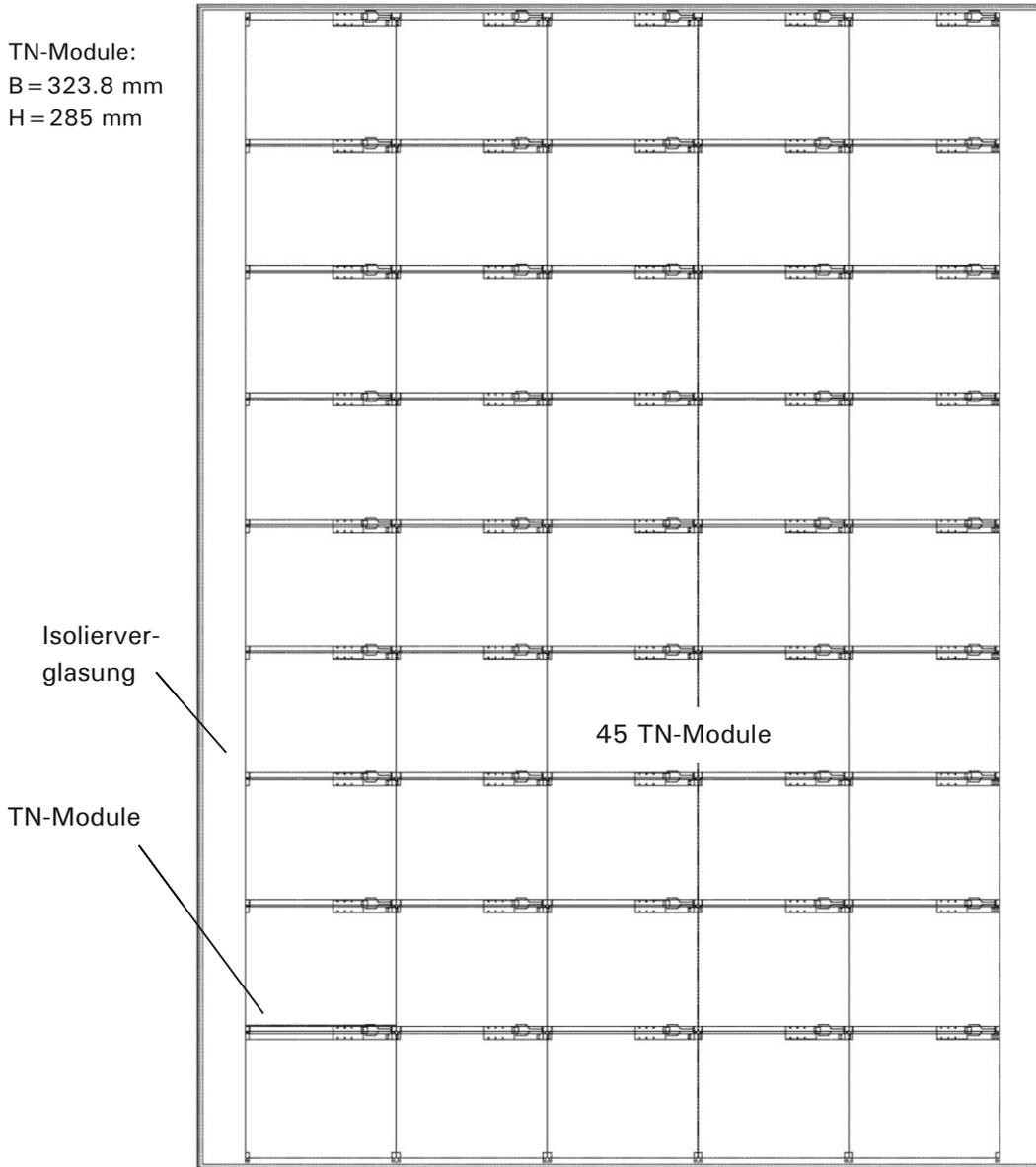


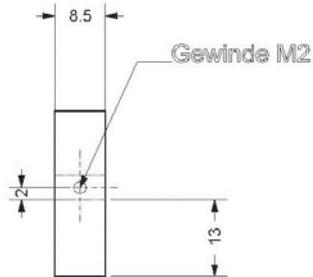
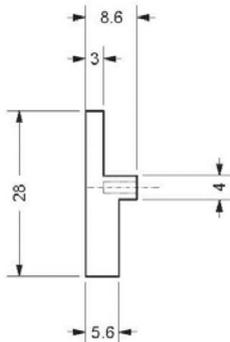
Abbildung 7: Anordnung der einzelnen TN-Module im Isolierglasaufbau

2.5.2 Herstellung von Befestigungselementen zur Montage in der Isolierverglasung

Als Werkstoff für die Befestigungselemente wurde Polyethylen auf Grund seiner hohen Alterungs- und Temperaturbeständigkeit gewählt. Mit den Erfahrungen aus dem Bau des Rahmensystems zur Unterbringung der 15 Module konnten die Befestigungselemente für das Isolierglas hergestellt werden. Auf derselben Grundlage wie zuvor wurden die Befestigungselemente zweiteilig ausgeführt (Abbildung 8). Die Modulhalter (Teil A) wurden an die Innenseite der Außenscheibe angeklebt. Daran wurden die Module mit den Fixierern (Teil B) mittels Kunststoffschrauben arretiert.



Modulhalter
Teil A



Fixierer
Teil B

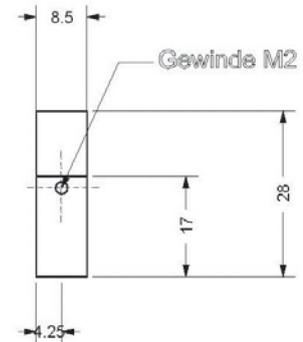
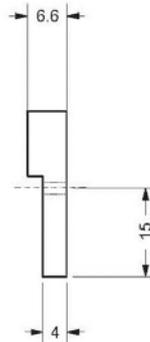


Abbildung 8: CAD-Zeichnung der Befestigungselemente in der Feldmitte: Halter und Fixierer

Als Erweiterung für dieses Befestigungselement gibt es einen Halter für die Modultreiber (Teil D). Die Treiber müssen sich aus technischen Gründen in unmittelbarer Nähe zu den Modulen befinden (Abbildung 9 und Abbildung 10).

Halter für den Modultreiber
Teil D

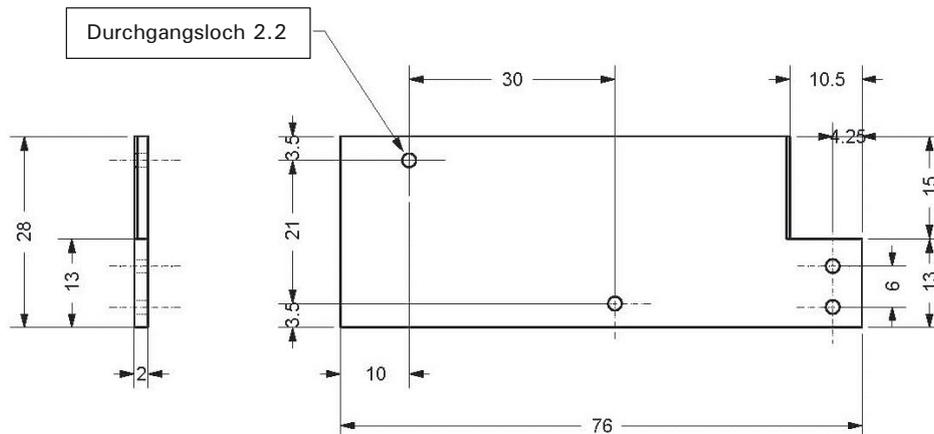


Abbildung 9: CAD-Zeichnung der Halter für die Modultreiber



Zusammenbau
Modulhalter (Teil A), Fixierer (Teil B),
Halter für Modultreiber (Teil D)

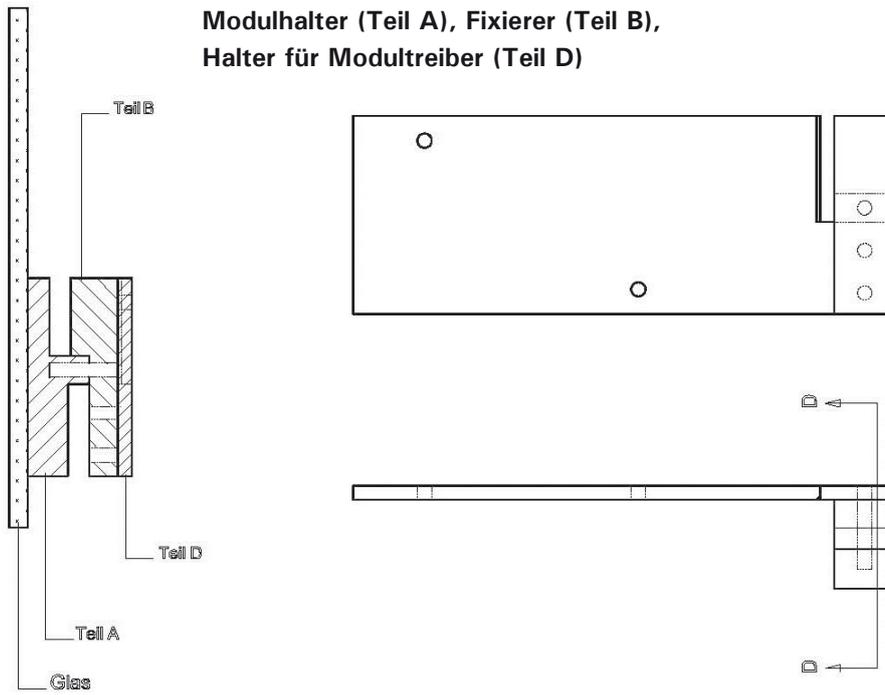


Abbildung 10: CAD-Zeichnung des Zusammenbauprinzips der Befestigungsteile



3 Charakterisierung der Komponenten und der Zellen • AP 2 und AP 6

3.1 Monopixel-Zelle (Shutter-Zelle)

Für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts wurde eine Shutter-Zelle mit den Maßen 15 cm x 15 cm hergestellt und mit dem Polarisator HLC2-5618 beklebt (Abbildung 11). Alle folgenden Messungen, die sich auf eine Shutter-Zelle beziehen, wurden mit diesem TN-Modul durchgeführt. Die Zelle selbst ist zur Hälfte mit einer zusätzlichen Entspiegelungsfolie beklebt, auf der restlichen Hälfte ist lediglich der Polarisator angebracht.



Abbildung 11: Seitlicher Blick auf die TN-Shutter-Zelle

3.2 Spektrometrische Vermessung der Monopixel-Zelle

Zur Ermittlung der strahlungsphysikalischen Kenngrößen erfolgte die Vermessung der Shutter-Zelle mit einem Spektrometer vom Typ „Varian 5000 UV-VIS-NIR“. Hierzu wurde die Zelle in zwei Ausrichtungen (0° -Anordnung und 90° -Anordnung) nach Abbildung 12 vermessen.

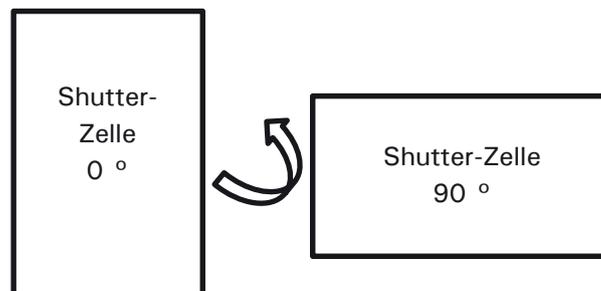


Abbildung 12: Lage der Shutter-Zelle bei 0° und 90°

Für beide Anordnungen wurden die spektralen Transmissionswerte in den Zuständen „Aus“ und „An“ gemessen. Die spektralen Messdaten ermöglichen die Bestimmung der licht- und strahlungstechnischen Kennwerte der Transmission nach DIN EN 410 [11].

Abbildung 13 zeigt den Messaufbau am Spektrometer. Bei der Transmissionsmessung befand sich die Zelle im Gerät (Abbildung 13, links). Für die Messung der Reflexion wurde die Zelle außen platziert (Abbildung 13 rechts).

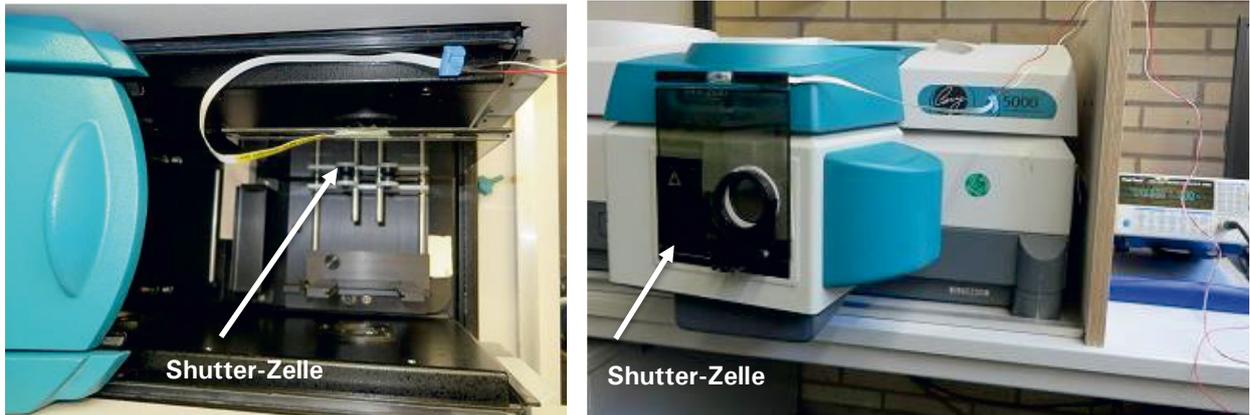


Abbildung 13: Versuchsaufbau zur Transmissions- und Reflexionsmessung an der Shutter-Zelle

Die Ergebnisse der Messungen können Tabelle 4 und den Diagrammen in Abbildung 14 bis Abbildung 17 entnommen werden.

Tabelle 4: Berechnete licht- (vis) und strahlungstechnische (sol) Kennwerte der Transmission (T), der Reflexion (R) sowie der Absorption (A) nach DIN EN 410

	Shutter-Zelle mit Antireflexionsfolie „Aus“ U = 0 V	Shutter-Zelle mit Antireflexionsfolie „An“ U = 8 V	Shutter-Zelle ohne Antireflexionsfolie „Aus“ U = 0 V	Shutter-Zelle ohne Antireflexionsfolie „An“ U = 8 V
T _{vis}	0,3824	0,0125	0,3678	0,0109
T _{sol}	0,4659	0,2756	0,4646	0,2792
R _{vis}	0,0345	0,0262	0,079	0,0577
R _{sol}	0,1282	0,1217	0,1349	0,123
A _{vis}	0,5813	0,9613	0,5532	0,9314
A _{sol}	0,4059	0,6027	0,4005	0,5978

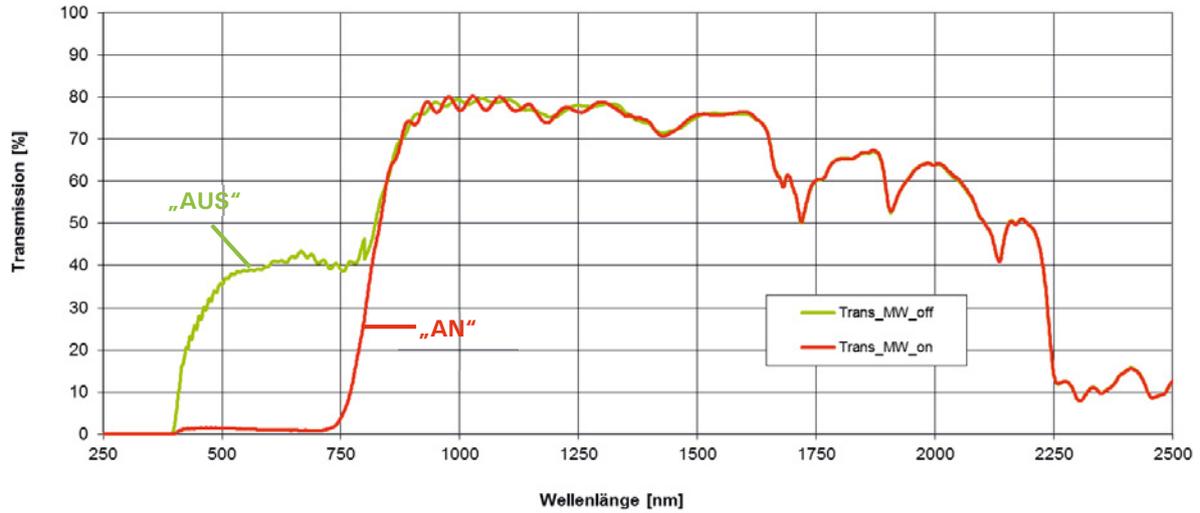


Abbildung 14: Gerichtete Transmissionsmessung (normal-normal). Probe: TN-Shutter-Zelle mit AR (Antireflexionsfolie). Messdatum: 12.01.2015.

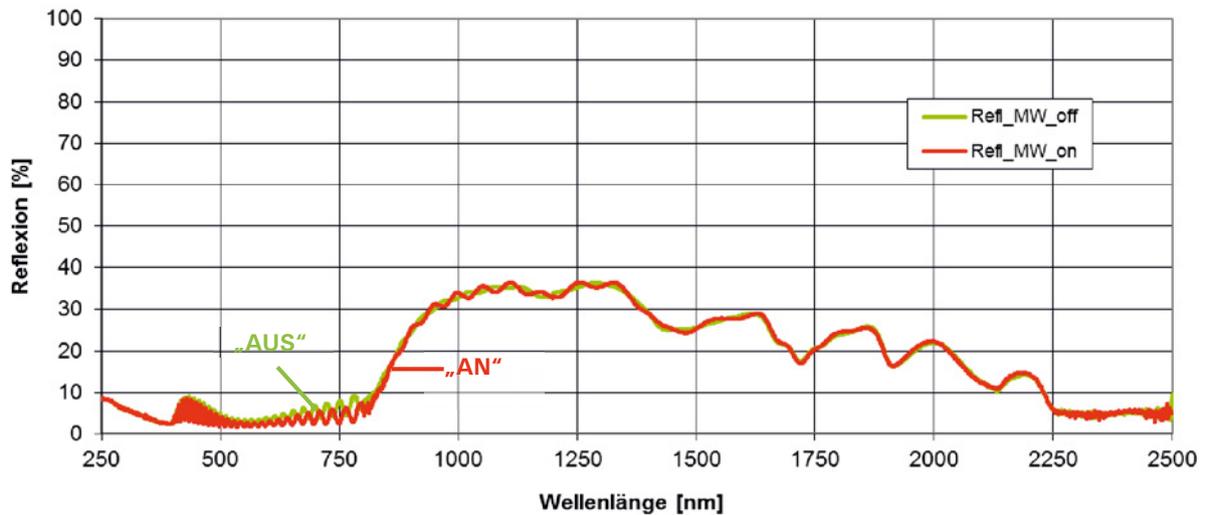


Abbildung 15: Gerichtete Reflexionsmessung (normal-normal). Probe: TN-Shutter-Zelle mit AR (Antireflexionsfolie). Messdatum: 13.01.2015.

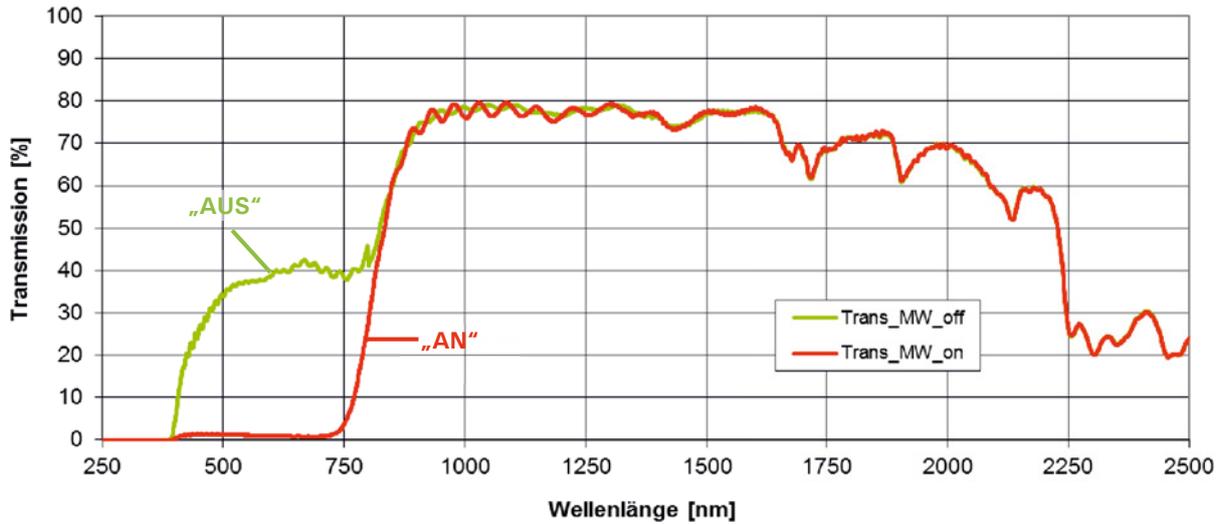


Abbildung 16: Gerichtete Transmissionsmessung (normal-normal). Probe: TN-Shutter-Zelle ohne AR. Messdatum: 12.01.2015.

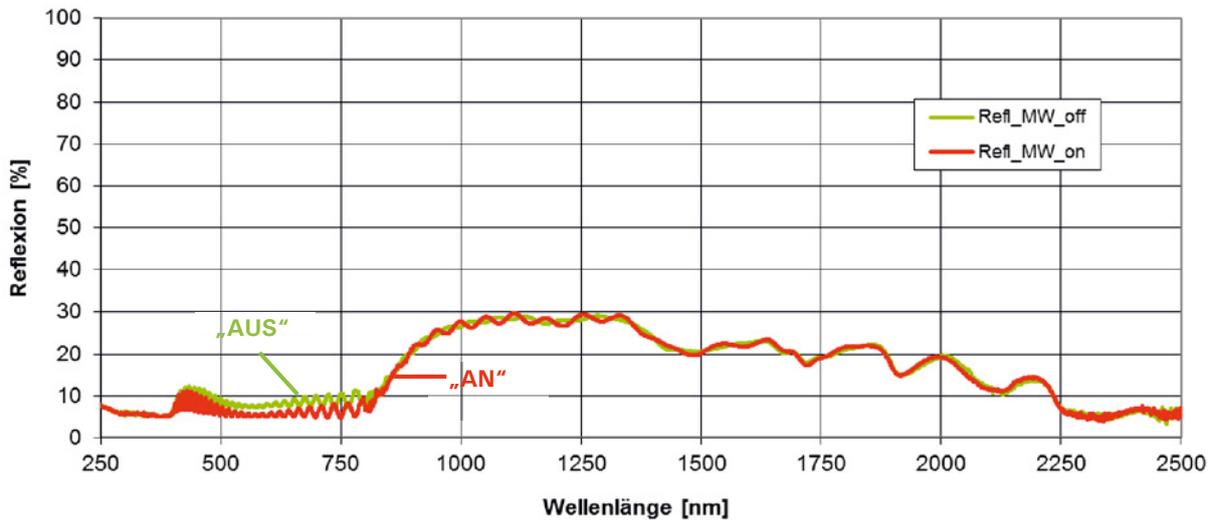


Abbildung 17: Gerichtete Reflexionsmessung (normal-normal). Probe: TN-Shutter-Zelle ohne AR. Messdatum 13.01.2015.

3.3 Spektrometrische Vermessung der Polarisatorfolien

Zur Bewertung der Eigenschaften der beiden in Frage kommenden Polarisortypen der Firmen Sanritz und Nitto erfolgte deren spektrale Vermessung. Hierbei wurden folgende Konstellationen untersucht.

- a) Einzelne Polarisatorfolie auf Display-Glas
- b) Zwei Proben aus a) in paralleler Anordnung der Durchlassrichtungen
- c) Zwei Proben aus a) in gekreuzter Anordnung der Durchlassrichtungen

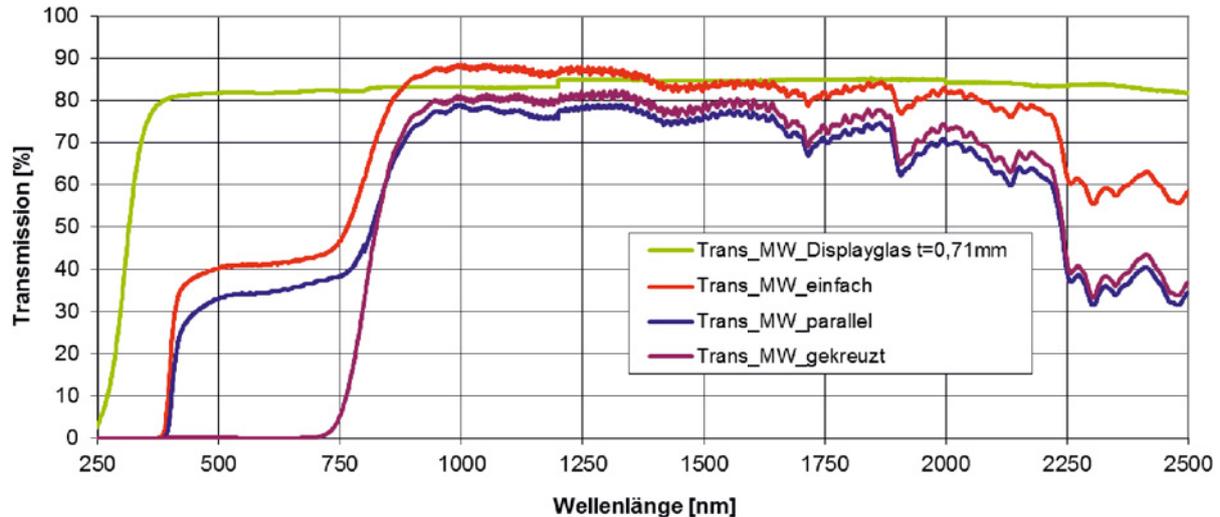


Abbildung 18: Gerichtetes Transmissionsmessung (normal-normal). Proben unter 0 ° und 90 ° vermessen und Mittelwert gebildet. Probe: Nitto Denko Polarisator (NPF TEG 1465 DUHC) auf Displayglas der Dicke $d = 0,71$ mm auflaminiert.

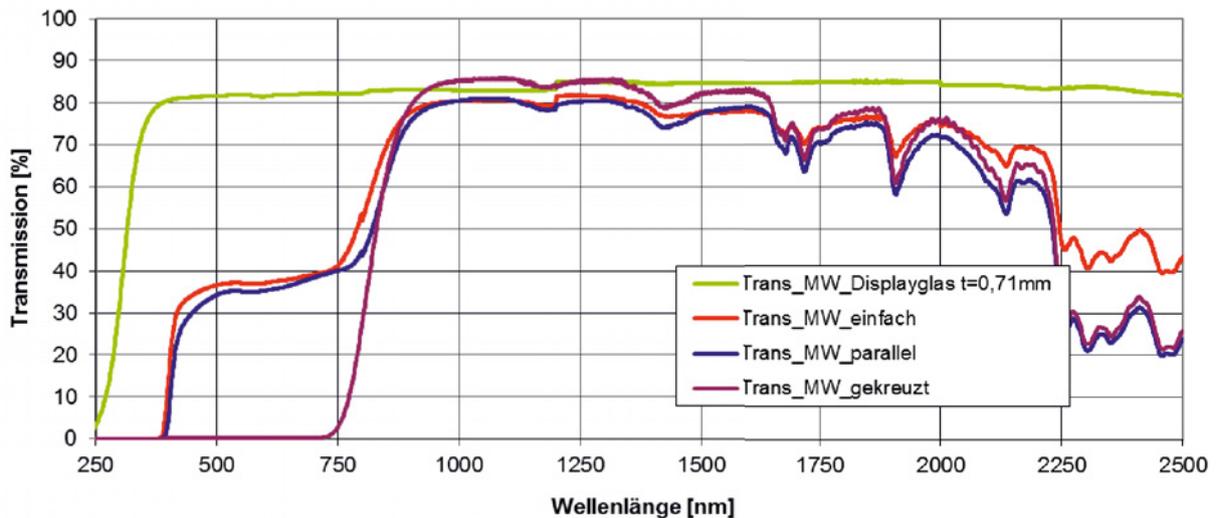


Abbildung 19: Gerichtetes Transmissionsmessung (normal-normal). Proben unter 0 ° und 90 ° vermessen und Mittelwert gebildet. Probe: Sanritz Polarisator (HLC2-5618) auf Displayglas der Dicke $d = 0,71$ mm auflaminiert.

Bei genauer Auswertung der Spektralwerte zeigt sich, dass die Polarisatorfolie der Firma Sanritz in paralleler Anordnung (Abbildung 19) einen leicht besseren Wert für die Transmission aufweist als die Nitto Denko Folie (Abbildung 18).

3.4 Eigenschaften der Module

Bei dem in Abbildung 6 dargestellten Modul der Multipixel-Zelle fällt auf, dass die Modulfläche unterteilt ist in die ansteuerbaren Pixel und die nicht ansteuerbaren Zwischenräume. Im Wesentlichen beeinflussen die Abmessungen der elektrischen Zuleitungen die Größe der Fläche zwischen den Bildpunkten.

Der sogenannte Füllfaktor beschreibt das Flächenverhältnis zwischen der ansteuerbaren Fläche und der einem Bildpunkt zugeordneten Gesamtfläche. Mit den Maßen nach Abbildung 20 wird der flächenbezogene Füllfaktor für die Module des Typs GV 66 berechnet (Tabelle 5).

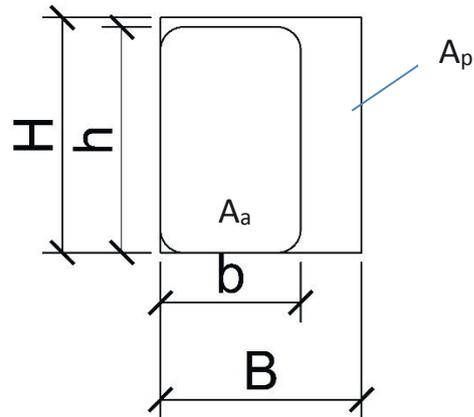


Abbildung 20: Flächeneinteilung für die Zelle GV66

Tabelle 5: Flächenbezogener Füllfaktor für die Zelle GV66

Höhe [mm]	Breite [mm]	A_a [mm ²]	A_p [mm ²]	f (A_a/A_p)
h = 14,56	b = 8,98	130,75	195,26	0,67
H = 15,16	B = 12,88			

Zur Berechnung der optischen und strahlungsphysikalischen Kennwerte eines Moduls unter Beachtung des Füllfaktors wurden nachfolgende Gleichungen angewendet:

$$T_{PmP,vis,on} = \frac{((A_p - A_a) \times T_{vis,off} + A_a \times T_{vis,on})}{(A_p)} \quad (1)$$

$$T_{PmP,vis,off} = \frac{((A_p - A_a) \times T_{vis,off} + A_a \times T_{vis,off})}{(A_p)} \quad (2)$$

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefasst.



Tabelle 6: Messwerte für die Transmission, Reflexion und Absorption der Shutter-Zelle und daraus berechnete Werte für das Modul unter Beachtung des Füllfaktors

Shutter-Zelle	Zelle mit Folienpolarisator und Antireflexionsfolie		Zelle mit Folienpolarisator	
	„Aus“	„An“	„Aus“	„An“
T_{vis}	0,38	0,01	0,37	0,01
T_{sol}	0,47	0,28	0,46	0,28
R_{vis}	0,03	0,03	0,08	0,06
R_{sol}	0,13	0,12	0,13	0,12
A_{vis}	0,58	0,96	0,55	0,93
A_{sol}	0,41	0,60	0,40	0,60
Modul				
Flächenbezogene Werte unter Beachtung des Füllfaktors	„Aus“	„An“	„Aus“	„An“
$T_{PMP,vis}$	0,38	0,13	0,37	0,13
$T_{PMP,sol}$	0,47	0,34	0,46	0,34
$R_{PMP,vis}$	0,03	0,03	0,08	0,06
$R_{PMP,sol}$	0,13	0,12	0,13	0,13
$AP_{PMP,vis}$	0,58	0,84	0,55	0,81
$AP_{PMP,sol}$	0,41	0,54	0,40	0,53
Modul (AUS - AN)				
Schalhub (AUS - AN)	„Aus“	„An“	„Aus“	„An“
$T_{PMP,vis}$		0,25		0,24
$T_{PMP,sol}$		0,13		0,12
$R_{PMP,vis}$		0,00		0,01
$R_{PMP,sol}$		0,01		0,01
$AP_{PMP,vis}$		-0,25		-0,25
$AP_{PMP,sol}$		-0,13		-0,13

3.5 Werkstoffliche Bewertung einzelner Komponenten

Alle Komponenten der schaltbaren TN-Module wie der Polarisator, der Flüssigkristall und die Randverklebung (vgl. Kap. 2.2) sind im Einbauzustand in einer Isolierverglasung der dauerhaften Exposition gegenüber wechselnden Temperatureinflüssen und der solaren Bestrahlung ausgesetzt. Wichtig für die Funktionsfähigkeit der Verglasung ist daher die Dauerhaftigkeit der Komponenten gegenüber diesen Einflüssen.

Um die Dauerhaftigkeit der Komponenten nachzuweisen, wurden im Rahmen des Projekts und vorausgehender Vorhaben Muster vorbereitet, die im Freiland in einem Dachversuchsstand ausgebracht wurden und regelmäßig inspiziert werden. Die entsprechenden Probenbeschreibungen zusammen mit den Auswertungen finden sich in Kapitel 7.6.



4 Auslegung des Zellenaufbaus • AP 3

Zur Auslegung der Zellenparameter wurde die Software DIMOS 1D eingesetzt. Mit der Software lässt sich die Transmission einer TN-Zelle in Abhängigkeit von der Wellenlänge berechnen. Simuliert wurde mit der 4x4-Matrix-Methode. Untersucht wurde eine TN-Zelle mit einem aufgeklebten Folienpolarisator. Das Simulationsmodell ist in Abbildung 21 dargestellt.

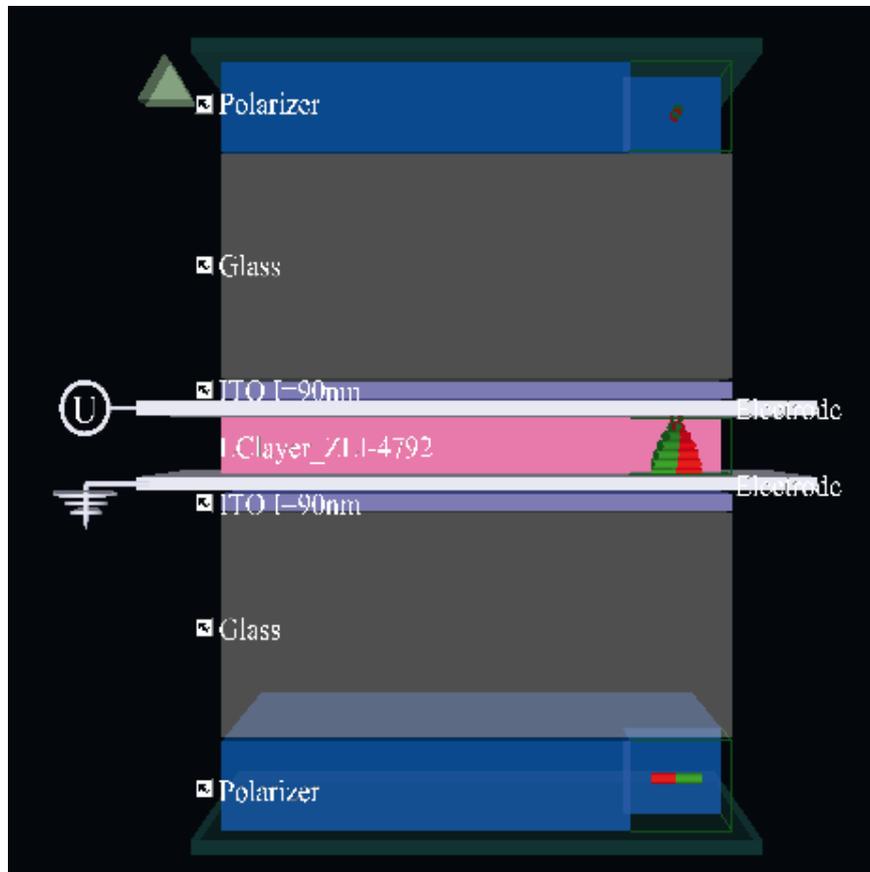


Abbildung 21: Modell der TN-Zelle für die Simulation mit dem Programm DIMOS 1D

Die optimale Schichtdicke des Flüssigkristalls (Zellabstand) wurde mit der Formel nach Gooch & Tarry [12] ermittelt.

$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{2} \sqrt{1+u^2}\right)}{1+u^2} \quad (3)$$

mit

$$u = 2 \frac{d \Delta n}{\lambda} \quad (4)$$

Mit d ist die Schichtdicke des Flüssigkristalls bezeichnet. Die optische Anisotropie des verdrillten nematischen Flüssigkristalls wird mit Δn beschrieben. Die Wellenlänge des Lichts erhält die Bezeichnung λ . Mit Hilfe der Gleichung 3 lassen sich die ersten zwei Minima für $u_1 = \sqrt{3}$ und $u_2 = \sqrt{15}$ bestimmen. Dies wird in Abbildung 22 dargestellt. Für das erste Minimum im sichtbaren Spektrum (380 nm bis 780 nm) liegt der Zellabstand zwischen $3 \mu\text{m}$ und circa $7 \mu\text{m}$. Beim zweiten Minimum liegt die Schichtdicke zwischen $6,5 \mu\text{m}$ und $16 \mu\text{m}$. Für die Berechnung wurde die optische Anisotropie des nematischen Flüssigkristalls vom Typ Merck ZLI-3412-000 herangezogen. Der gewählte Zellabstand von $6,5 \mu\text{m}$ führt demnach zu einem Zelldesign mit gutem Schalhub.

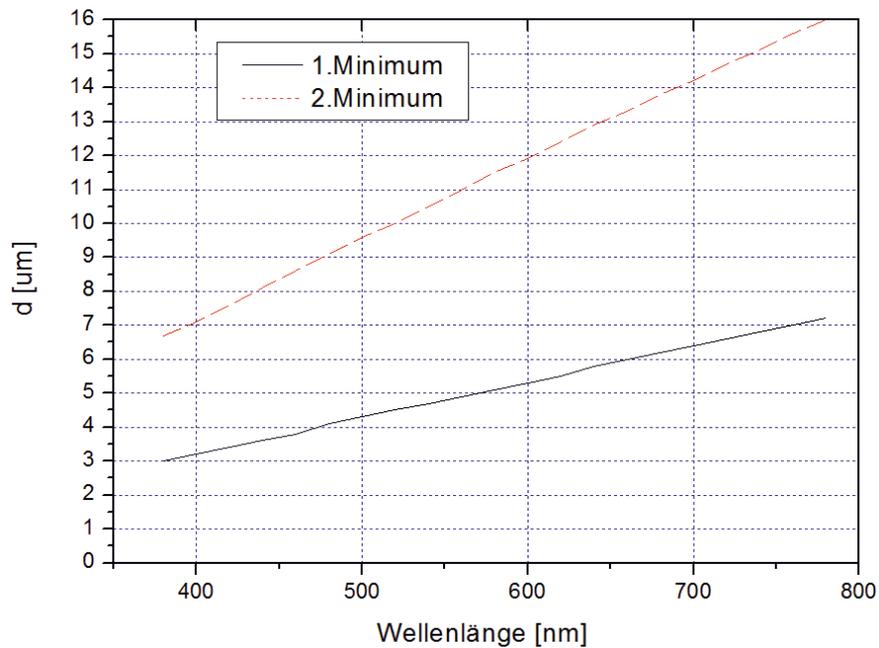


Abbildung 22: Optimierung der Dicke der Flüssigkristallschicht (Gooch & Tarry)

4.1 Simulation der TN-Zelle

Mit dem in Abbildung 21 dargestellten Zellaufbau erfolgten Simulationen zur Ermittlung der Transmissionseigenschaften. Hierbei wurden drei unterschiedliche Flüssigkristallschichtdicken berücksichtigt ($3 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$). Die Ergebnisse sind als spektrale Transmissionswerte in Abbildung 23 dargestellt.

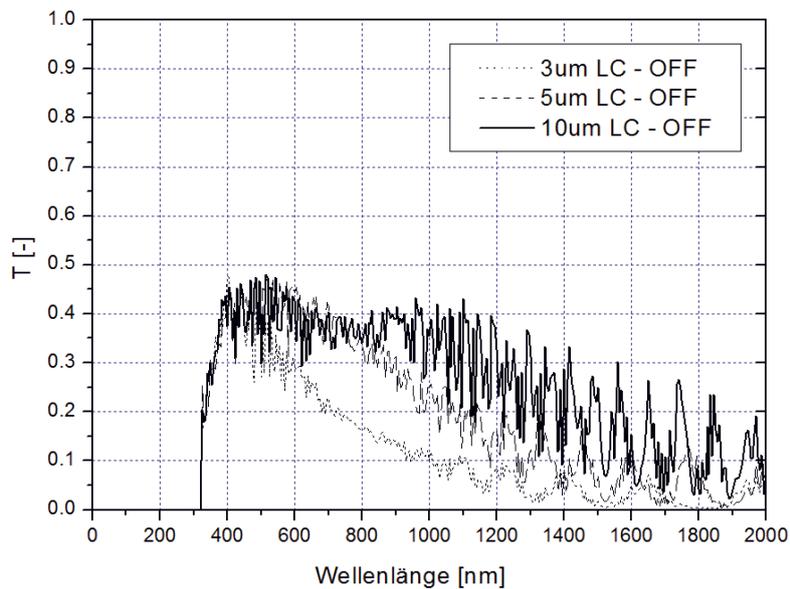


Abbildung 23: Spektrale Kennwerte einer TN-Zelle mit außenliegendem Folienpolarisator ($100 \mu\text{m}$) und Flüssigkristall ZLI 4792 bei drei Flüssigkristallschichtdicken

Bei einer Wellenlänge von 550 nm ergibt sich die optimale Zelldicke von ca. $5 \mu\text{m}$. Auf Grund der Verfügbarkeit kamen jedoch Abstandhalter mit einem Durchmesser von $6,5 \mu\text{m}$ zum Einsatz. Für die jeweils untersuchte Wellenlänge wird eine möglichst hohe Transmission im nicht angesteuerten Zustand angestrebt. Die minimale Durchlässigkeit soll dabei möglichst klein sein, um einen großen Schalt-
hub zu erzielen.

5 Herstellung von Musterzellen und Isoliergläser • AP 4

5.1 Monopixel-Zelle (Shutter-Zelle)

Als Kleinmuster wurde die bereits erwähnte Shutter-Zelle im Format 15 cm x 15 cm hergestellt (siehe Kap. 3.1).

5.2 Multipixel-Zelle

Die Herstellung der Multipixel-Zellen erfolgte von der Firma BMG MIS GmbH. Jedes Modul weist die Maße 28,5 cm x 32,3 cm auf (Abbildung 6). Zwei unterschiedliche Polarisationsfolien kamen bei den Modulen zum Einsatz. Mit dem Nitto Denko-Polarisator wurden 15 Module bestückt, die beim Testrahmen eingesetzt wurden. Für die Isolierverglasung wurden weitere 45 Module mit dem Sanritz-Polarisator produziert.

5.2.1 Ansteuerelektronik für die Multipixel-Zelle

Die Hardware zur elektronischen Ansteuerung der Module besteht aus den Modultreibern (an jedem Modul montiert), den Zeilentreibern (Zeilendecoder, ZD) und der Steuerelektronik, nachfolgend auch GSC200 genannt. Für die Kommunikation zwischen der Steuerelektronik und dem Computer wird ein Schnittstellenkonverter eingesetzt, nachfolgend als X-Port bezeichnet. Dieser X-Port empfängt Informationen vom Computer via Ethernet und gibt sie über eine serielle Schnittstelle an die Steuerelektronik weiter. Auf elektrotechnischer Ebene wird die Ansteuerung des Prototypen in drei Cluster unterteilt. Der vereinfachte Schaltplan hierzu kann der Abbildung 25 entnommen werden. Abbildung 24 zeigt einen Testaufbau der Ansteuerung der Module.

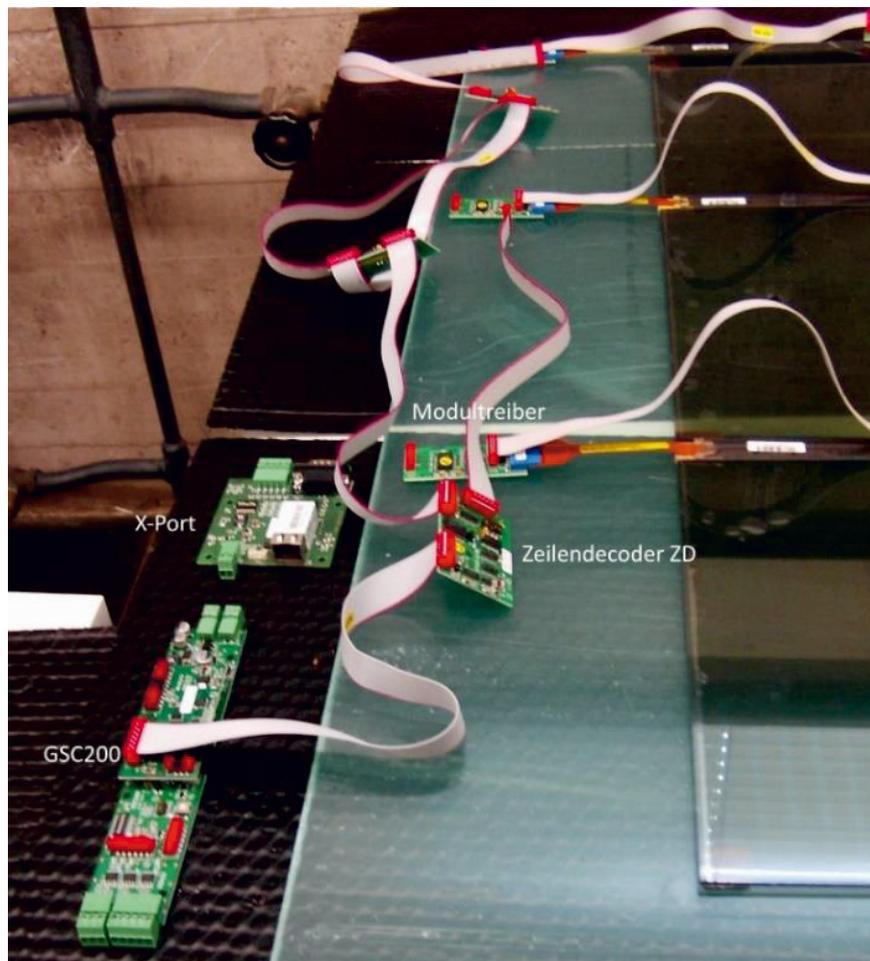


Abbildung 24: Testaufbau der elektronischen Ansteuerung der Module

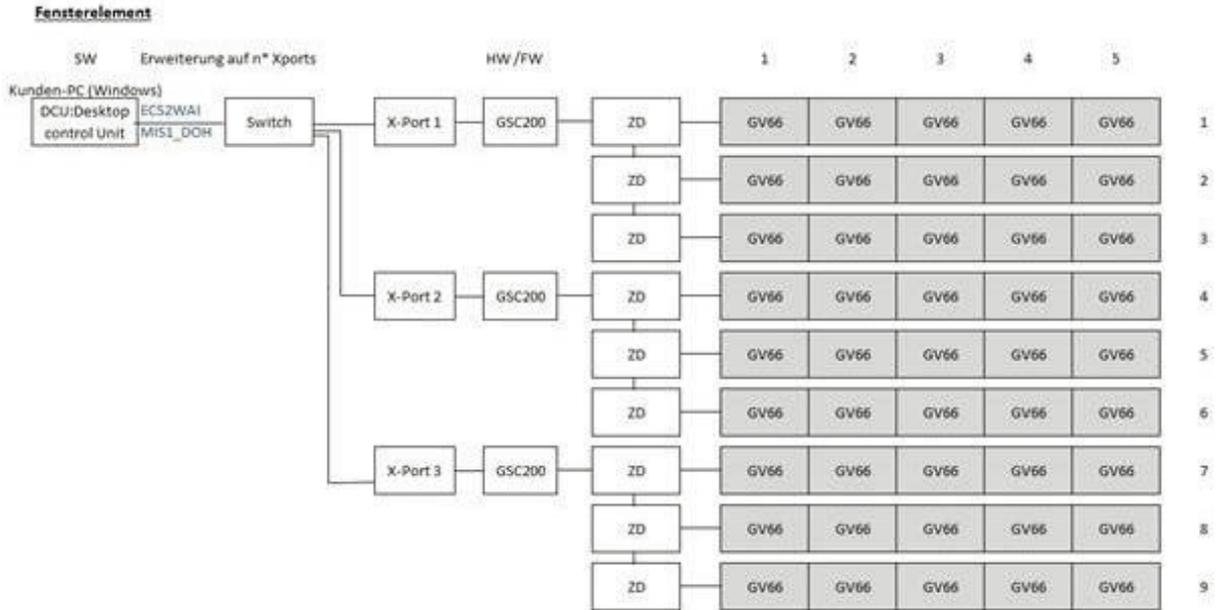


Abbildung 25: Ansteuerhardware für eine Anordnung von 5 x 9 Multipixel-Zellen (Zeichnung: BMG MIS GmbH)

Abbildung 26 zeigt ein Modul im nicht angesteuerten Zustand („Aus“). Jedes Modul wird mit dem 95 mm langen Flexkabel (Abbildung 27) an die Modultreiber angeschlossen. Die Zellen ermöglichen die Darstellung von Grafiken im Pixelfeld.

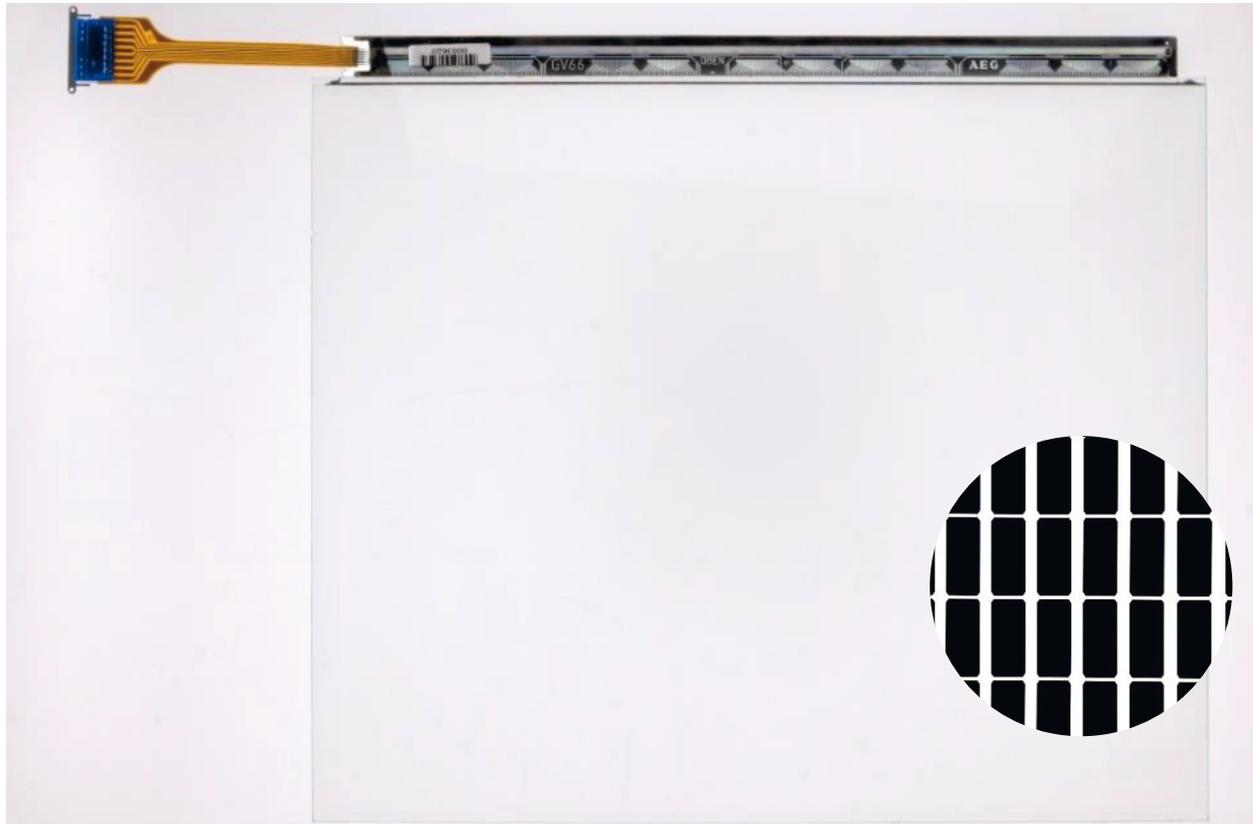


Abbildung 26: TN-Modul GV66 im ausgeschalteten Zustand mit einer Detailansicht der Pixel im Dunkelzustand (nicht maßstäblich) (Foto: G. Metzger / ILEK)



Abbildung 27: Flexkabel mit Stecker der GV66 Module (Foto: G. Metzger / ILEK)

5.2.2 Strukturierung in Bildpunkte

Jede einzelne Multipixel-Zelle, auch als Modul bezeichnet, verfügt über 16 Pixel-Zeilen und 26 Pixel-Spalten (Abbildung 6).

5.3 Module im Testrahmen

Für den Testaufbau erfolgte die Montage von 15 Modulen in einer Rahmenkonstruktion. Die Module wurden mit Befestigungselementen mechanisch in den Rahmen eingebaut. Zunächst erfolgten hierzu der Entwurf und die Herstellung der Befestigungselemente (Kap. 2.5.2). Die genauen Abmessungen der Rahmenkonstruktion können der Abbildung 28 entnommen werden. Die Module sind in drei Reihen und 5 Spalten angeordnet (Abbildung 29). Insgesamt acht Aluminium-Profile (1714 mm x 30 mm x 10 mm) - vier auf der Vorder- und vier auf der Rückseite – wurden horizontal in den Rahmen eingesetzt, um daran die Befestigungselemente zu befestigen. Die elektronische Ansteuerung wurde ebenfalls hinter den Aluminium-Profilen montiert. Von vorne sind die Befestigungselemente, Treibermodule und Kabel nicht zu sehen, da die Profile als Blenden fungieren. Abbildung 30 zeigt die Rahmenkonstruktion mit den eingebauten Modulen im angesteuerten und nichtangesteuerten Zustand.

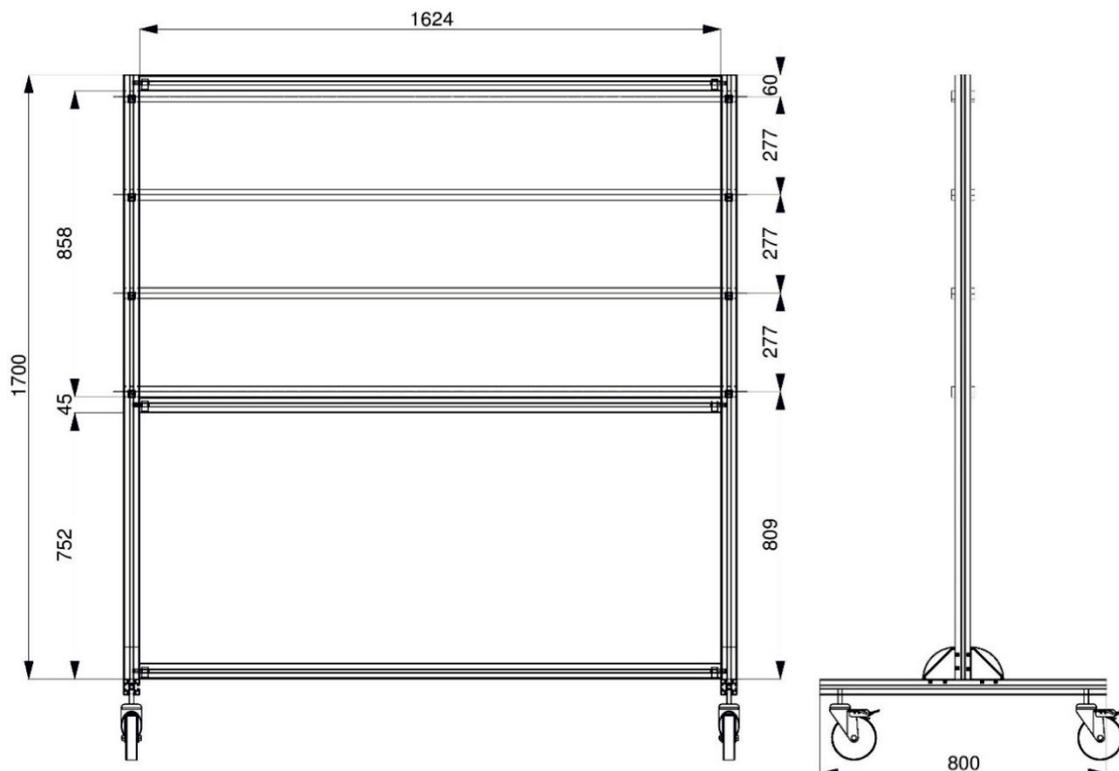


Abbildung 28: CAD-Zeichnung der Rahmenkonstruktion ohne Module

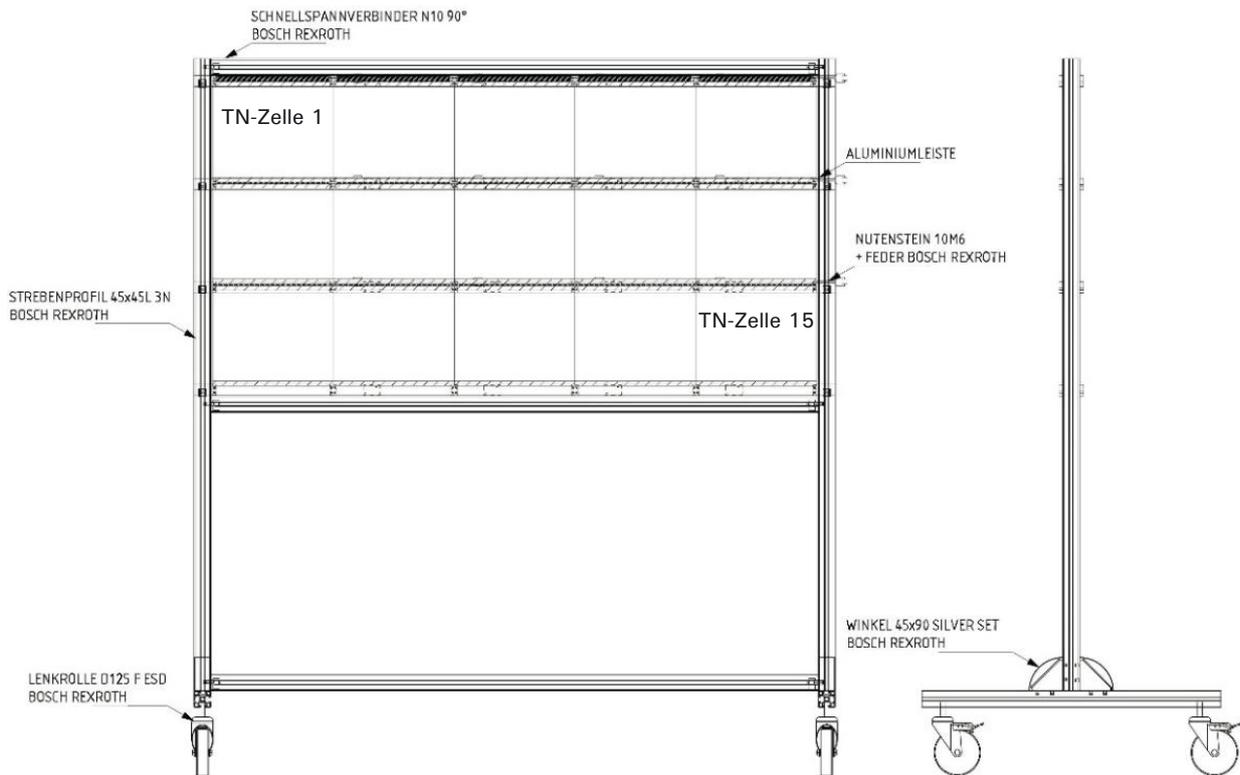


Abbildung 29: CAD-Zeichnung der Rahmenkonstruktion mit den 15 Modulen

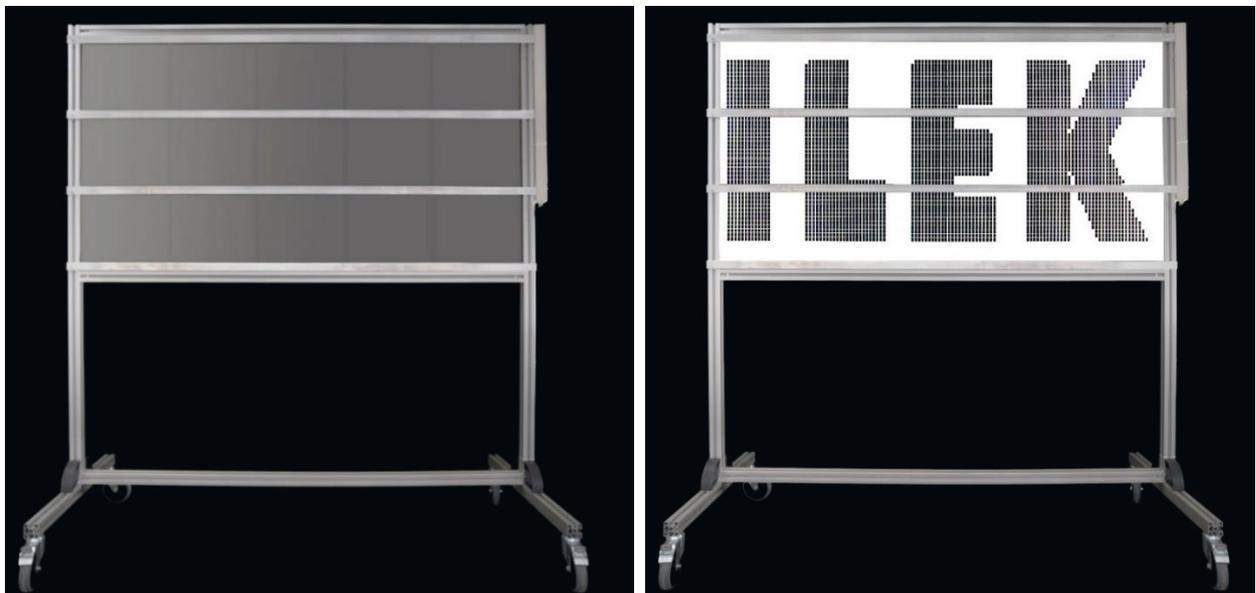


Abbildung 30: Rahmenkonstruktion mit Modulen in Betrieb. Links im nicht angesteuerten Zustand. Rechts mit der Darstellung des Institutslogos (Foto: G. Metzger / ILEK).

Das Einbinden der Module in das Rahmensystem wird durch Befestigungselemente realisiert. Besonderes Augenmerk wurde beim Entwurf der Befestigungselemente auf einen einfachen Montagevorgang und die Austauschbarkeit defekter Module gerichtet. Aus diesem Grund bestehen die Elemente aus zwei Teilen: dem Modulhalter und dem Fixierer (Abbildung 31). Abbildung 32 zeigt ein zusammengesetztes Befestigungselement.

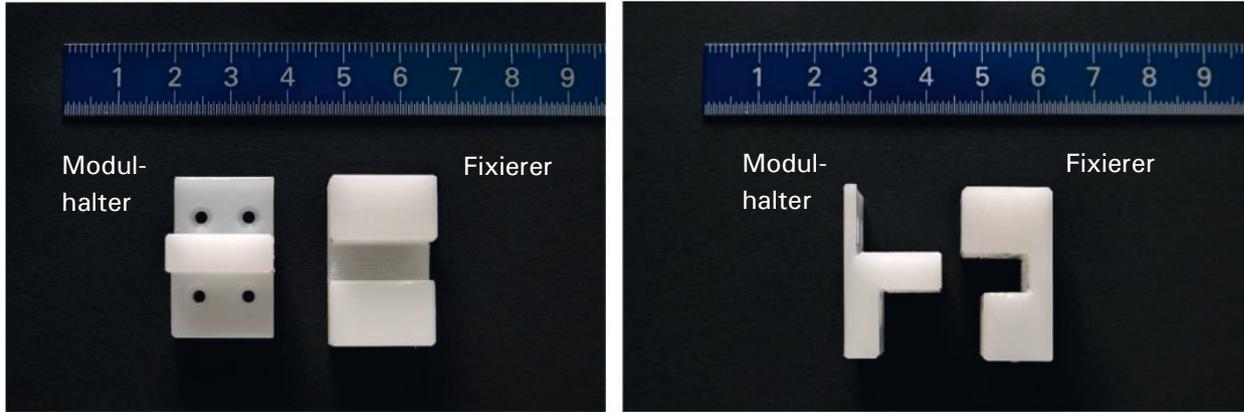


Abbildung 31: Befestigungselemente für die Feldmitte: Modulhalter und Fixierer (Foto: G. Metzger / ILEK)

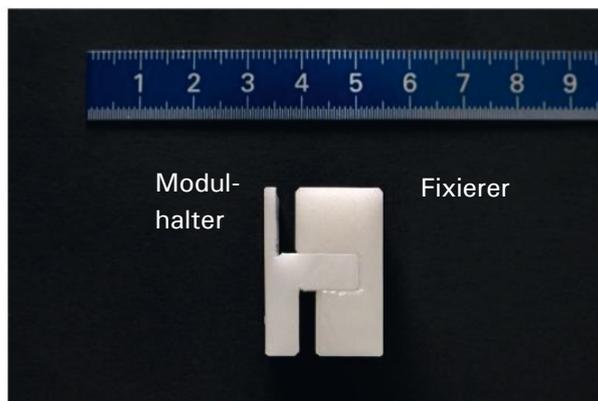


Abbildung 32: Befestigungselemente für die Feldmitte: Zusammenbauzustand (Foto: G. Metzger / ILEK)

Im ersten Arbeitsschritt wurden die Modulhalter an die Aluminium-Profile geschraubt. Anschließend konnten die Module eingesetzt werden und mit den Fixierern positioniert werden. Der Aufbau ist in Abbildung 33 zu sehen.

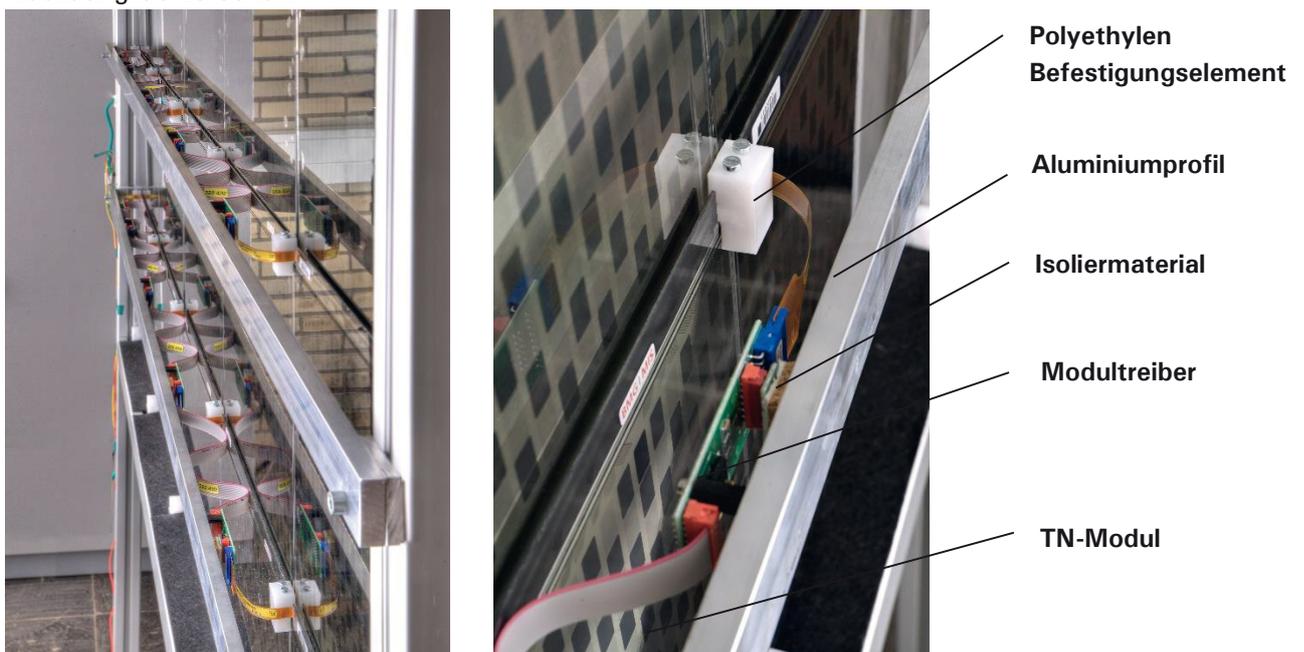


Abbildung 33: Foto vom Einbauzustand der Module im Rahmen. Die Module sind mit den Befestigungselementen am Rahmen fixiert (Foto: G. Metzger / ILEK).

Beim Einbau der Treibermodule war die elektrische Isolation der Elektronik zum Aluminium-Rahmen zu beachten, da diese am Profil befestigt wurde. Um einen leitfähigen Kontakt zu verhindern, erfolgte die Befestigung an der Rahmenkonstruktion der Platinen mit Kunststoffschrauben.

5.4 Musterisoliertglas mit Multipixel-Zellen im Kleinformat

Als weiterer Demonstrator wurde ein Isolierglas mit vier Modulen hergestellt. Auf die Innenseite einer der beiden Isolierglasscheiben wurden die Modulhalter angeklebt (Kap. 7.4.1). Daran konnten die Module mit den Fixierern angebracht werden.

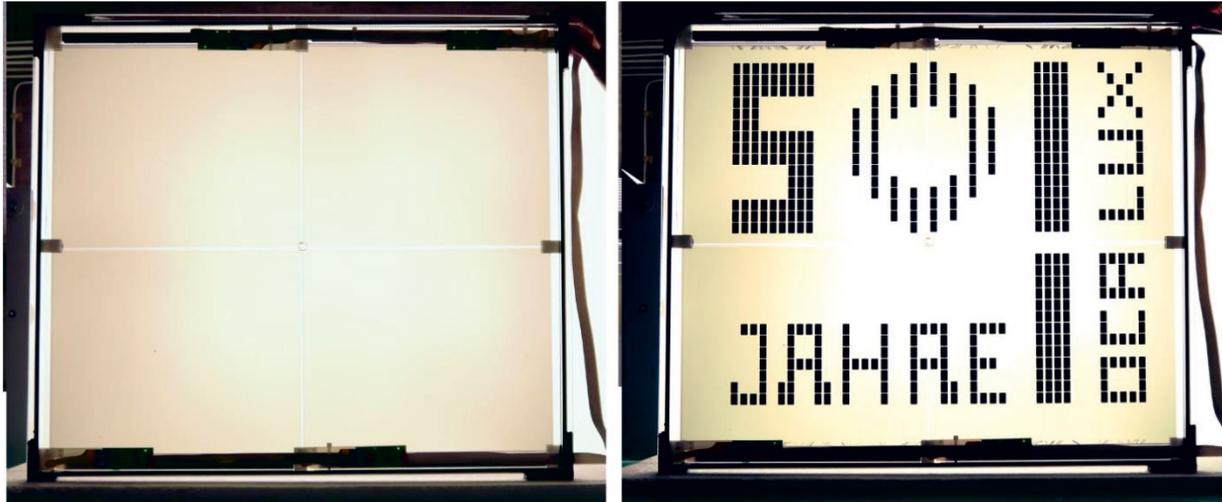


Abbildung 34: Isolierglasmuster mit 4 Multipixel-Modulen. Links nicht angesteuert. Rechts mit Darstellung einer einfachen Grafik (Foto: J. Rettig / ILEK).

Mit diesem Prototyp konnten Erfahrungen für die Fertigung des Isolierglases für den Einbau im Fassadenprüfstand gesammelt werden. Des Weiteren konnte an diesem Muster das Zusammenspiel von Hardware und Software weiter erprobt werden.

Anlässlich des 50-jährigen Firmenjubiläums der Firma OKALUX wurde der Prototyp als Demonstrator an einem Informationsstand einem interessierten Publikum vorgestellt (Abbildung 34).

5.5 Musterglas mit Multipixel-Zellen im Großformat

Die Verglasung mit den integrierten 45 TN-Zellen-Modulen für den Einsatz im Fassadentestgebäude erlaubt eine realitätsnahe und daher repräsentative Untersuchung der Effektivität kleinteilig strukturierter schaltbarer Verglasungen im Gebäudeeinsatz. Die Südfassade des Testraumes ist als vollflächige Verglasung ausgeführt. Es bietet sich mit einer Anordnung von 45 TN-Modulen die Möglichkeit, die Fensterfläche fast vollständig zu füllen und erstmals eine Fassadenverglasung in gepixelter Ausführung zu untersuchen (Abbildung 39 und 40). Zum Einbinden der Module in das Isolierglas wurden Befestigungselemente entworfen und aus Polyethylen gefertigt. Eine ausführliche Beschreibung dazu findet sich in Kapitel 2.5.2.

5.5.1 Ausrichtung der Module sowie der Modultreiber für die Montage

Das Layout für die Befestigungen konnte zuvor im Labor getestet werden (Abbildung 35). Dazu wurden die Befestigungselemente mit doppelseitigem Klebeband auf ein Acrylglas geklebt und Testzellen in die verschiedenen Positionen eingesetzt. In diesem Arbeitsschritt traten zwei Schwachstellen zum Vorschein und es erfolgten Modifikationen am Haltekonzept. Die schmalen Halter an der Unterkante



wurden durch breitere ersetzt und die zu komplizierte Kabelführung der Treibermodule konnte durch eine optimierte Anordnung der Halter vereinfacht werden.

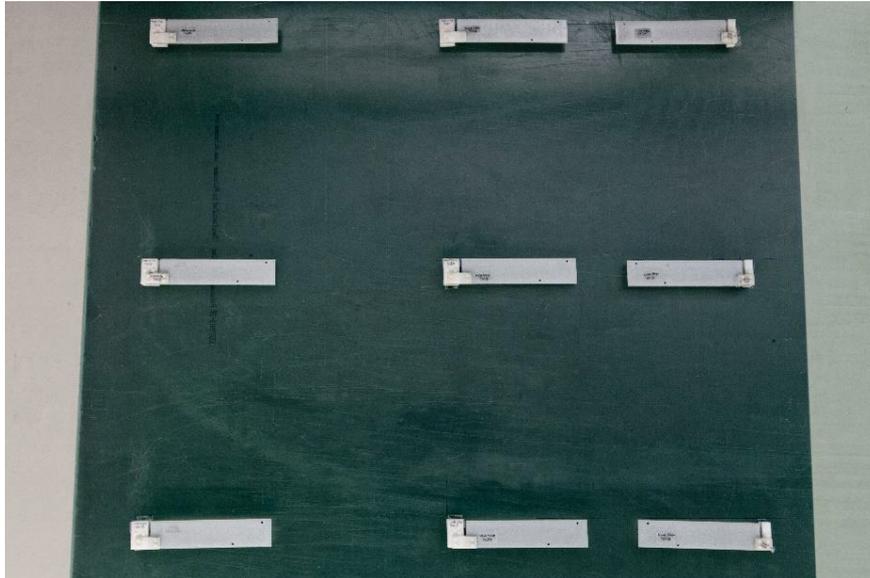


Abbildung 35: Draufsicht auf den Testaufbau. In dieser Version ist die ursprüngliche Ausrichtung der Modulhalter zu sehen, sie wurde nachfolgend optimiert (Foto: G. Metzger / ILEK).

Als Klebstoff für die Halterbefestigung kam der Flüssigklebstoff Bohle Verifix Zwei-Komponenten-Acrylat zur Anwendung. Nach durchgeführten Testreihen blieben drei mögliche Varianten zur Befestigung übrig. Im Vergleich zu den zwei Klebebändern versprach der Flüssigklebstoff eine größere Flexibilität (Kap. 7.4.1). Es erfolgte vor dem Kleben eine gründliche Reinigung aller Befestigungselemente mit Isopropanol.

Bei der Klebung zeigte es sich, dass der Zwei-Komponenten-Klebstoff sehr schnell aushärtete. Zum einen musste deshalb in regelmäßigen Abständen die Kanüle der Klebepistole gewechselt werden. Zum anderen war sorgfältiges Arbeiten nötig. Die Passgenauigkeit konnte stichprobenartig an einzelnen Punkten mit zwei Musterzellen überprüft werden.

5.5.2 Anbringen der Befestigungselemente bei der Firma OKALUX GmbH

Im Juni 2015 erfolgte bei der Firma OKALUX GmbH die Montage der Befestigungselemente an die Trägerglasscheibe. Die OKALUX GmbH stellte hierfür eine Glasscheibe mit einer Selektivbeschichtung zur Verfügung. Randentschichtet und gereinigt wurde sie auf zwei Böcke gelagert und in einer Nebenhalle des Werks aufgebaut. Um die vielen Koordinaten der Klebepunkte einzumessen, kamen mehrere Richtschnüre, die über die Scheibe gespannt wurden, zur Anwendung (Abbildung 36). So entstand ein Gittermuster, dessen Kreuzungspunkte als Koordinaten genutzt werden konnten. Nach mehrmaligem Überprüfen, Austesten und Nachjustieren waren die Klebepunkte so eingemessen, wie in der Zeichnung definiert. Vor der letzten Kontrollmessung und dem anschließenden Kleben wurde die Scheibe ein letztes Mal mit Druckluft von Staub und Fremdkörpern befreit. Nachdem alle Befestigungselemente angebracht waren, wurden die Richtschnüre wieder entfernt und das Randprofil mit dem Primär-Dichtstoff aufgeklebt. Das Besondere am Randprofil ist die Zweiteilung der einen Längsseite. Diese ist nötig, um die Kabel der Modulsteuerung aus dem Zwischenraum der Isolierverglasung herausführen zu können. Sie besteht aus zwei kleineren Randprofilen, die aufeinander gesetzt wurden. In Abbildung 37 ist eines der beiden Profile zu sehen.

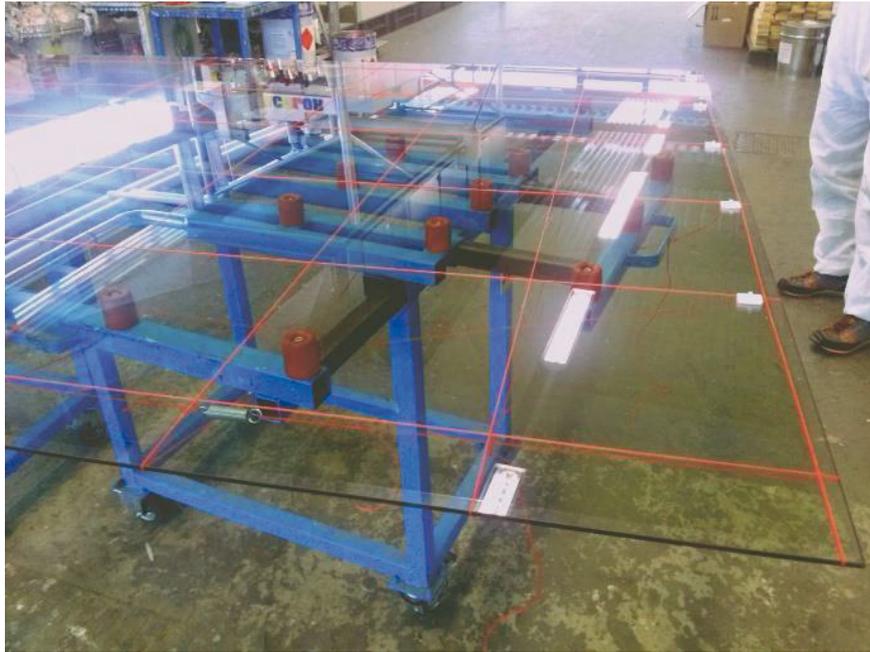


Abbildung 36: Die rote Richtschnur gibt die Koordinaten für die Klebepunkte an. Die rechte Reihe der Modulhalter ist bereits am Gitter ausgerichtet aufgeklebt worden (Foto: W. Haase / ILEK).



Abbildung 37: Randprofil und angeklebte Modulhalter. Richtschnüre sind entfernt. (Foto: W. Haase / ILEK)

Im weiteren Verlauf hat die OKALUX GmbH das Randprofil mit einem Sekundärdichtstoff stabilisiert und für den Transport die zweite Scheibe mit einer Butylschnur aufgeklebt. Alle weiteren Arbeitsschritte am Prototyp wurden am ILEK durchgeführt. Dies umfasste die Montage der Außenscheibe des Isolierglases im Öffnungsausschnitt der Fassade, die Montage der einzelnen Module in den Befestigungen (Abbildung 40), den elektrischen Anschluss der Module und das Verschließen des Isolierglases mit der Innenscheibe. In Abbildung 38 ist der vertikale Schnitt durch die Verglasung ausschnittsweise dargestellt. Das Foto in Abbildung 39 zeigt das entsprechende Detail der Befestigung des Moduls im



Blick vom Innenraum nach Außen bei teilweise angesteuerten Pixeln der Module. Der Einbau der einzelnen Module an die Innenseite der Außenscheibe der Isolierverglasung ist in der Fotosequenz in Abbildung 40 dargestellt.

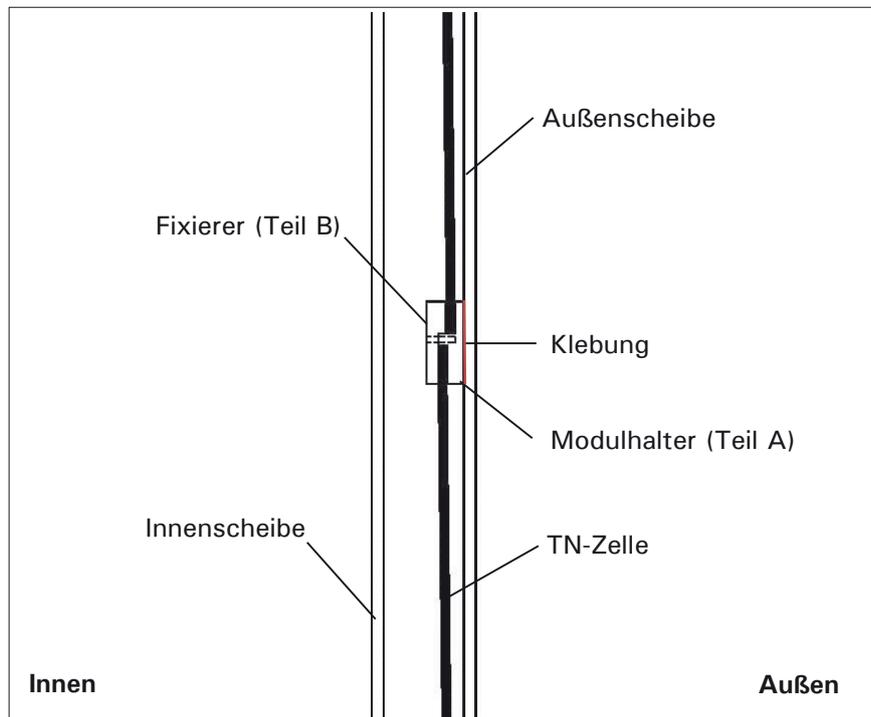


Abbildung 38: Prinzipschnitt durch das Isolierglas mit Modulen

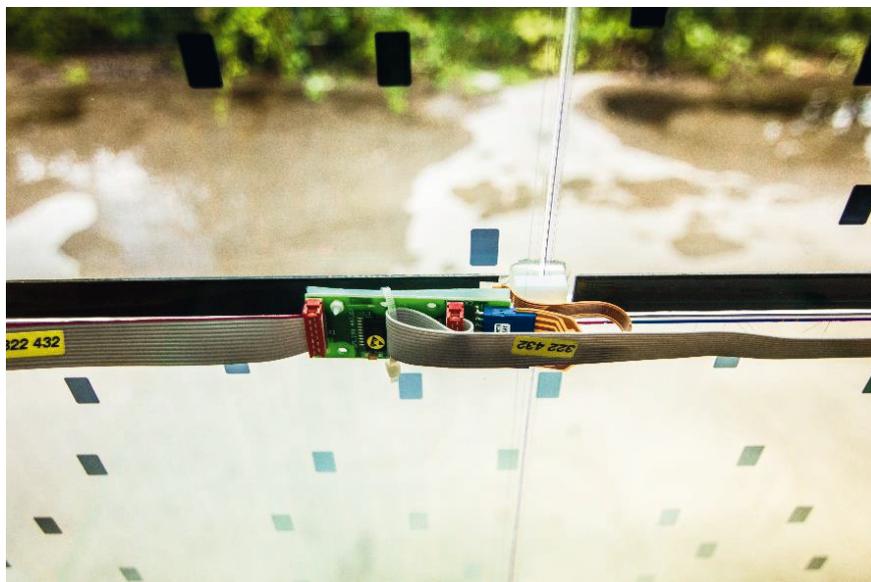


Abbildung 39: Befestigungselemente in Feldmitte mit Modulhalter, Fixierer und Halter für den Modultreiber (Foto: J. Rettig / ILEK)

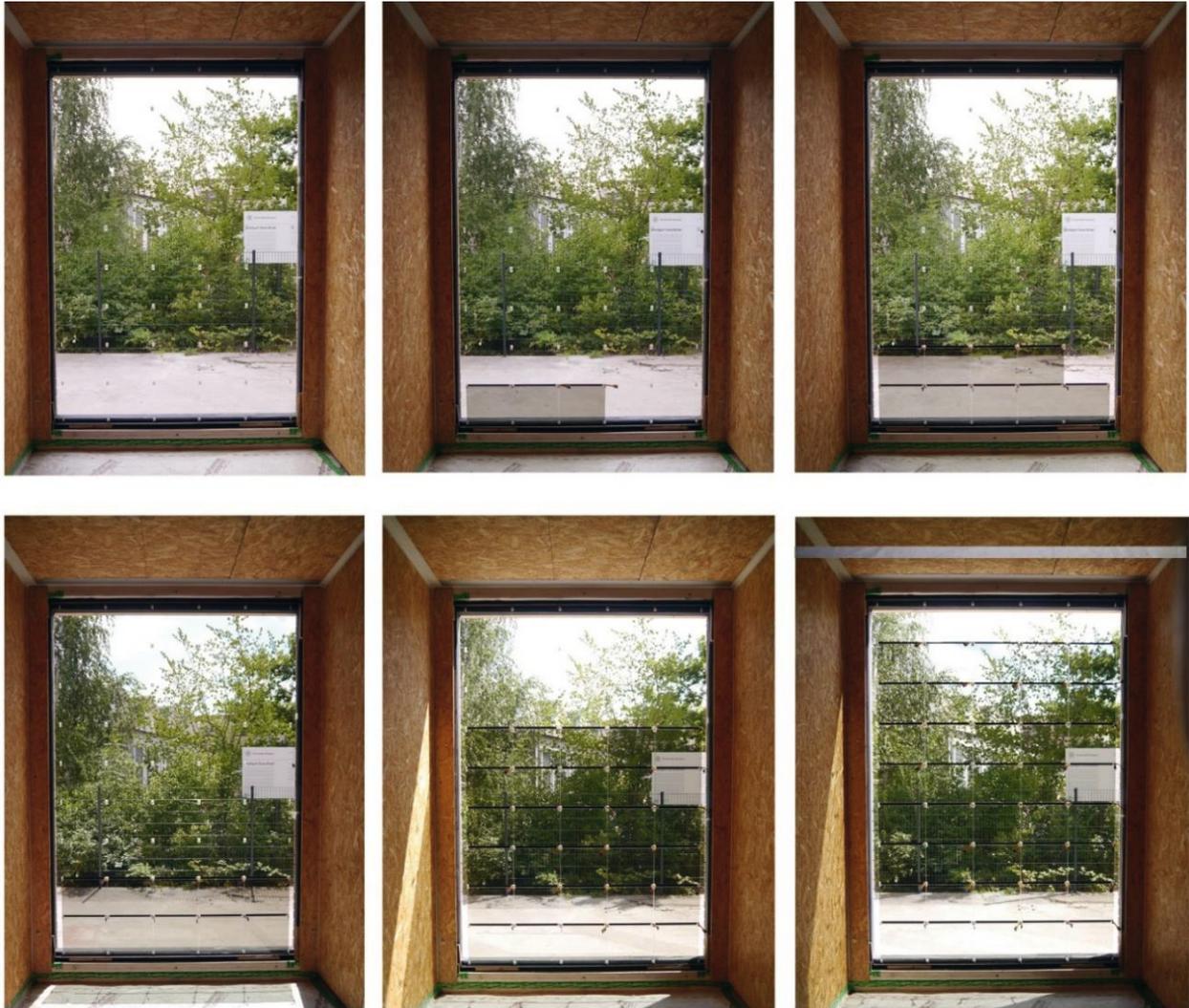


Abbildung 40: Fotoserie zum Einsetzen der Module (Juli 2015) an die Innenseite der Außenscheibe der Isolierverglasung, unten beginnend (Foto: J. Rettig / ILEK)



6 Ansteuerung der schaltbaren Verglasungen

Die in die Isolierverglasung eingesetzten Module sind in der Lage, bei entsprechender Ansteuerung Grafiken darzustellen. Zur Darstellung der Grafiken können die einzelnen Bildpunkte im Zustand „An“ oder „Aus“ betrieben werden. Die Grafiken, die auf den Modulen dargestellt werden sollen, werden mit Bildbearbeitungsprogrammen – wie beispielsweise GIMP, Photoshop oder Paint – generiert und über die BMG-Software „BMG MIS Display and Content Management Console“ und „ApplicationApp“ von einem Computer an das Modulsystem übertragen. Die Steuersoftware erlaubt die Darstellung von Bildern oder Animationen (Gif-Dateien) in einer definierten zeitlichen Folge.

Die Display-Tests wurden zuerst mit den in die Rahmenkonstruktion eingesetzten Modulen (3 x 5) durchgeführt (vgl. Kap. 5.3). In Abbildung 41 sind verschiedene Grafikmuster dargestellt. In Abbildung 42 ist ein kleiner Bildflächenbereich bei zwei unterschiedlichen Bildinhalten vergrößert dargestellt.



Abbildung 41: Anordnung der Module im Rahmen im Format 5 x 3. Dargestellt sind unterschiedliche Muster.

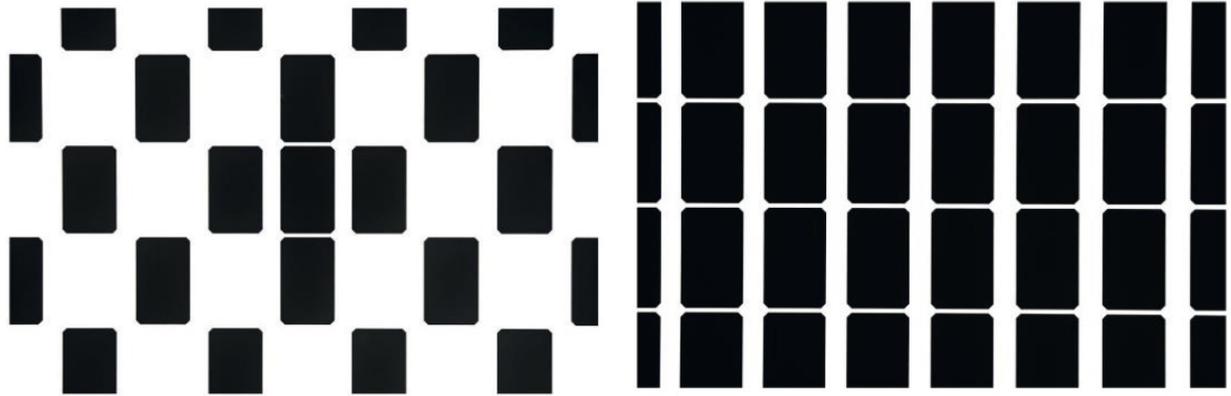


Abbildung 42: Ausschnittsdarstellung von zwei unterschiedlichen Graphiken

Nach dem Einbau der schaltbaren Module im Fassadenprüfstand wurden einige Displaytests durchgeführt. Abbildung 43 zeigt die Module im Isolierglas in einer Matrixanordnung von neun Modulreihen und fünf Modulspalten, also 45 Modulen. Die Fassadenverglasung ist in den Zuständen „alle Pixel dunkel“ und „alle Pixel hell“ in der Außenansicht der Verglasung in Abbildung 44 dargestellt.



Abbildung 43: Innenansicht der Isolierverglasung mit eingebauten schaltbaren Modulen. Auf die Module wurde eine Grafik mit einem Abdunklungsgradienten übertragen (Foto: J. Rettig / ILEK).

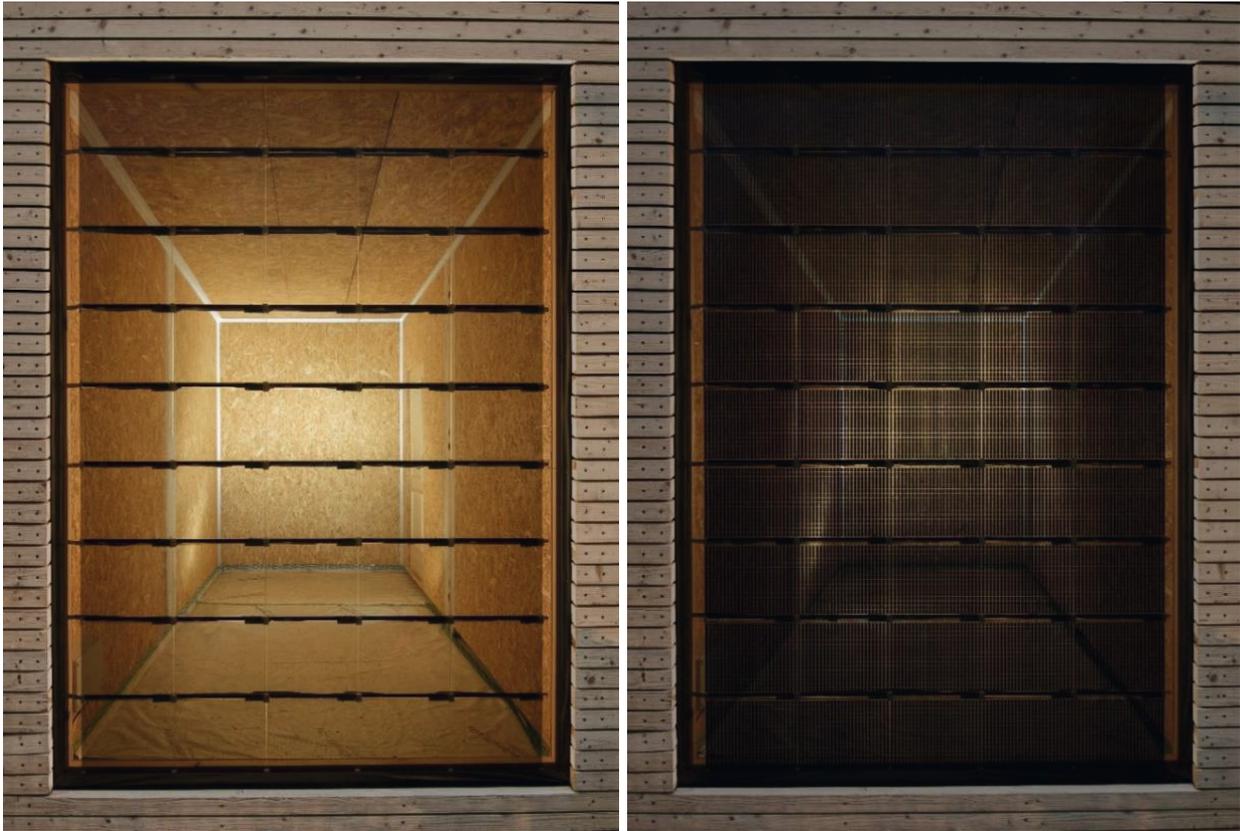


Abbildung 44: Blick von außen auf die schaltbare Verglasung in den Zuständen maximaler (links) und minimaler (rechts) Transmission (Foto: J. Rettig / ILEK)

Neben der Regelung des Licht- und Energiedurchgangs ist die Anzeigefunktion, die durch die Strukturierung ermöglicht wird, eine deutliche Erweiterung der Funktionalität der Verglasung. Die nachfolgenden Abbildung 45 und 46 zeigen eine Serie unterschiedlicher Transparenzzustände der Verglasung.



Abbildung 45: Die schaltbare Verglasung mit unterschiedlichen Abdunklungsmustern zur Steuerung des einfallenden Lichts (Foto: J. Rettig / ILEK)



In Abbildung 46 ist die Darstellung von Grafiken realisiert worden, die möglich ist durch die Unterteilung der Verglasung in 18720 Bildpunkte (45 Module x 416 Bildpunkte je Modul).



Abbildung 46: Links: Darstellung des Holzschnitts „Sky and Water I“ von M. C. Escher - Juni 1938; Rechts: Darstellung eines Baumes auf der Verglasung (Foto: J. Rettig / ILEK)



Abbildung 47 zeigt eine mit der Sonne mitlaufende, abgedunkelte Kreisscheibe auf der Verglasung, die durch ihren Schattenwurf den Nutzer vor direkter Sonneneinstrahlung und Blendung schützt. Dies wird dadurch erreicht, dass der Verschattungsbereich im Schnittpunkt der Positionen von Sonne und Nutzer auf der Verglasung dargestellt wird (vgl. Kap. 7.4.2).



Abbildung 47: Darstellung einer Kreisscheibe auf der Verglasung, die dem Sonnenverlauf folgt (Foto: J. Rettig / ILEK)

Die Displaytests wurden begonnen mit einfachen Grafiken, wie in Abbildung 45 dargestellt, die mit den Programmen Photoshop oder Gimp erstellt wurden.

Als schwierig erwies sich mit dieser Methode die Erstellung komplexerer Grafiken, wie beispielsweise in Abbildung 46 gezeigt. Die Programmierung einer Sequenz wie der wandernde Sonnenschatten aus Abbildung 47 erforderte die Erstellung eines Programmes zur Lösung der Aufgabe. Hierbei waren die geographische Lage, die Orientierung der Fassade und die Benutzerposition im Raum zu berücksichtigen.

6.1 Entwicklung von Software-Tools

Zwei Software-Tools wurden für die folgenden zwei Hauptaufgaben entwickelt: die Stapelbearbeitung von Grafiken und die Projektion sonnenstandsabhängiger Grafiken zur Verschattung. Aufgrund der Einbausituation der TN-Zellen-Reihen muss jede Grafik vor der Projektion transformiert, d.h. in Bereichen gespiegelt, werden. Diese Bearbeitungsschritte sind mit konventioneller Grafiksoftware zeitaufwendig und ungenau. Diese Aufgabe wird von den erstellten Programmen ausgeführt.



Mit dem Programm „subtransform“ werden Grafiken für die Darstellung auf der Verglasung vorbereitet, indem diese entsprechend in Teilen gespiegelt werden, wie dies in Abbildung 48 dargestellt ist. Das Programm „project_single_image“ platziert eine kleinformatige Grafik so auf der Verglasung, dass diese dem Sonnenverlauf folgt und jeweils dafür sorgt, dass an einer definierten Nutzerposition eine Verschattung erfolgt.

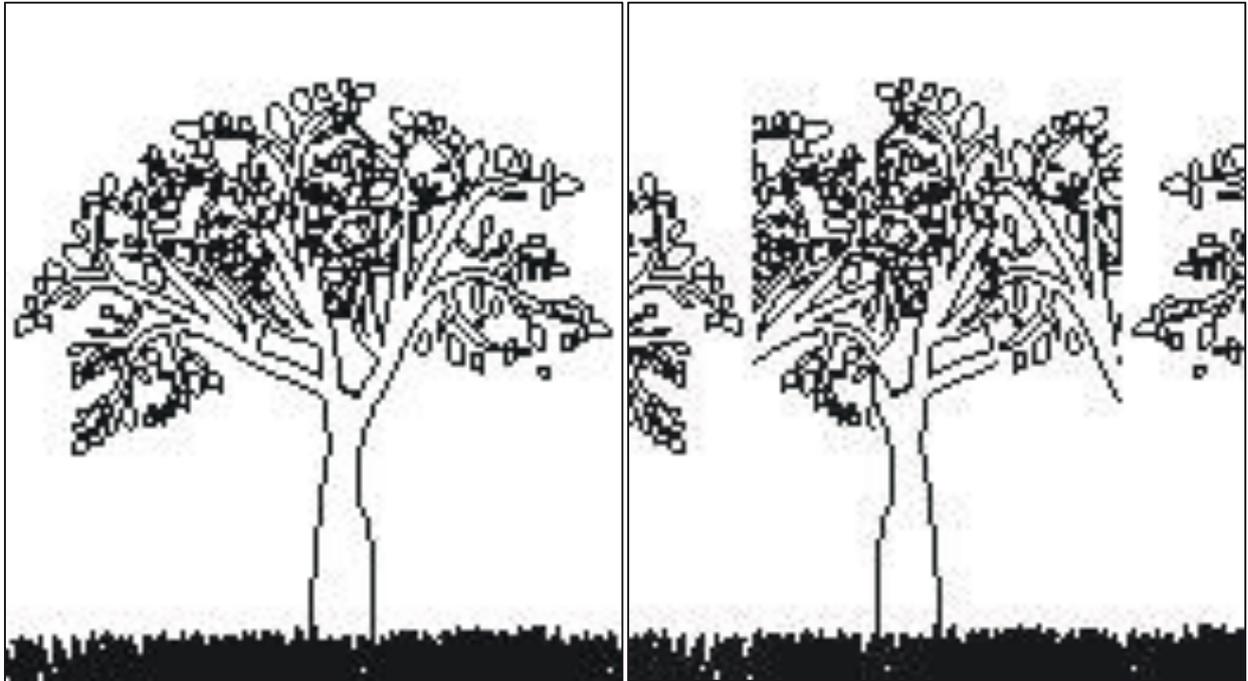


Abbildung 48: Grafik vor (links) und nach (rechts) dem spaltenweisen Drehen



7 Kurzzeit- und Langzeitversuche • AP 5

Im Rahmen der Projektbearbeitung erfolgten umfangreiche empirische Untersuchungen an den hergestellten Funktionsmustern. Ziel war es dabei, die Eigenschaften der schaltbaren Elemente (Schaltgeschwindigkeit, fotometrische sowie radiometrische Kennwerte, Alterungsbeständigkeit) zu erfassen. Zudem sollte die Effektivität im Hinblick auf die Licht- und Energiedurchgangsregelung sowie die Blendvermeidung bestimmt werden.

Nachfolgend dargestellt sind die Messmethoden, die durchgeführten Versuche sowie deren Ergebnisse. Dabei wird zunächst auf die Bestimmung der Schaltzeiten der hergestellten Muster eingegangen. Anschließend erfolgt die Darstellung der Versuche zur Ermittlung des Einflusses des Schattenwurfes auf den Nutzer bei Teilansteuerung der Module. Die Bestimmung der Oberflächentemperaturen der Module unter großer Bestrahlung schließt sich an. Die Wirkung der Fassadenverglasung auf die Tageslichtsituation bei unterschiedlicher Ansteuerung wird ebenfalls ausführlich dargelegt. Untersuchungen zur Langzeitstabilität schließen das Kapitel ab.

7.1 Monopixel-Zelle (Shutter-Zelle)

7.1.1 Untersuchung der Schaltcharakteristik

Die Messung der Umschaltgeschwindigkeit von transparent auf verdunkelt sowie umgekehrt erfolgte mit Hilfe der Shutter-Zelle. Diese wurde hierzu in den Strahlengang eines Messaufbaus gestellt. Der charakteristische Umschaltvorgang der Shutter-Zelle kann bestimmt werden, wenn der Lichtstrom während des Schaltvorgangs präzise aufgezeichnet wird. Zur Untersuchung dieses Vorgangs wurde eine Oberfläche der Shutter-Zelle mit einer Leuchtdiode (LED) beleuchtet und auf der Rückseite das transmittierte Licht mit einer Fotodiode erfasst. Die Fotodiode liefert einen elektrischen Strom in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke. Durch das Verdunkeln der Zelle wird die durchgelassene Strahlungsleistung reduziert. Der transmissionsabhängige elektrische Strom wird durch einen sogenannten Transimpedanzverstärker in eine - über ausreichend große Bereiche lineare - Spannung umgeformt und aufgezeichnet. Die Transmissionswerte ermöglichen zusammen mit den Zeitwerten die Berechnung der Schaltzeiten der Shutter-Zelle. In Tabelle 7 werden die erforderlichen Messgeräte zur Messung der Schaltgeschwindigkeit aufgeführt. In Tabelle 8 sind die eingesetzten Bauteile für den Transimpedanzverstärker aufgelistet.

Tabelle 7: Messgeräte zur Messung der Schaltgeschwindigkeit der Shutter-Zelle

Prüfmittel	Name
Messkarte	DAQ (<i>data acquisition</i>) Ni USB 6002
Messcomputer	Notebook Fujitsu Siemens
Labor-Netzteil	EA-Elektro-Automatik Laboratory Power Supply
Frequenzgenerator	Peak Tech 3 MHz DDS
Multimeter	Voltcraft VC 404

Tabelle 8: Verwendete Bauteile für den Transimpedanzverstärker

Art	Typ
Operationsverstärker	LM358N (Texas Instruments)
Kohleschichtwiderstand	470 k Ω \pm 5% 1 W (k. A.)
Fotodiode	Opto SFH 203 Fotodiode IR + Visible (Osram)
LED	Rot, 2 V (Kingbright)



7.1.2 Aufbau der Messschaltung

Der Transimpedanzverstärker besteht aus einem Operationsverstärker und einem Widerstand. Der nicht invertierende Eingang (+) des Operationsverstärkers wird auf das Potential null geführt und die Fotodiode an dem invertierenden Eingang (-) in Sperrrichtung betrieben. Da die Impedanzen der beiden Eingänge naturgemäß sehr gering ausfallen, befindet sich die Diode in einer Kurzschlusschaltung und gibt in diesem Zustand einen zum Lichteinfall nahezu linearen Fotostrom ab. Der Fotostrom wird durch die Verstärkerschaltung in eine Spannung umgewandelt. Außerdem minimiert der Kurzschlussbetrieb die Kapazität der Fotodiode und verhindert dadurch einen kritischen inneren Ladungsaufbau. Dieser Effekt begünstigt die Reaktionszeit der Messschaltung. Der Widerstand (R) reguliert in der Verstärkerschaltung den Verstärkungsfaktor und somit die Ausgangsspannung (U_a). Die Sensitivität der Fotodiode und die spektrale Strahlstärke der Leuchtdiode (LED) sind aufeinander abgestimmt, um eine möglichst gute Empfindlichkeit zu erzielen (Abbildung 50 und Abbildung 51). Abbildung 49 zeigt das Schaltbild des Transimpedanzverstärkers.

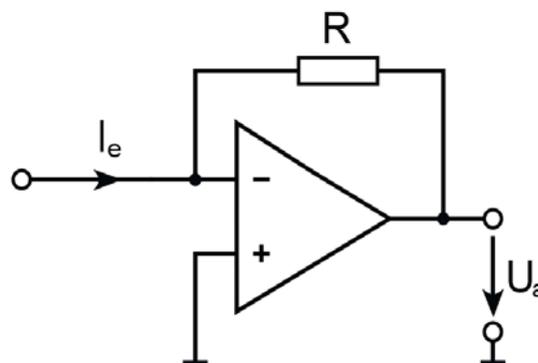


Abbildung 49: Vereinfachtes Schaltbild des eingesetzten Transimpedanzverstärkers [13]

I_e	Stromquelle (Fotodiode)	$[\mu\text{A}]$
U_a	Ausgangssignal	$[\text{V}]$
R	Widerstand, der als Proportionalitätsfaktor dient	$[\text{k}\Omega]$

Die drei Größen Strom, Spannung und Widerstand stehen durch das Ohmsche Gesetz in folgendem Zusammenhang: $U_a = -R \cdot I_e$. Diese Gleichung wird für die Berechnung des Verstärkungsfaktors angewendet. Bei einem erwarteten maximalen Fotostrom von $10 \mu\text{A}$ und einer gewünschten maximalen Ausgangsspannung von 5 V ergibt sich ein Proportionalitätsfaktor von $500 \text{ (k}\Omega)$; verbaut wurde ein $470 \text{ k}\Omega$ Widerstand aus der E24-Reihe.

Relative Spectral Sensitivity
SFH 203 P, $S_{rel} = f(\lambda)$

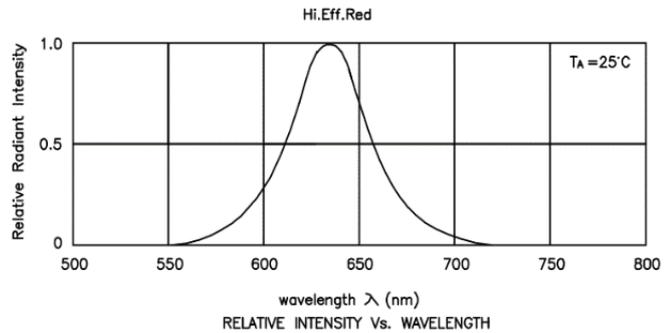
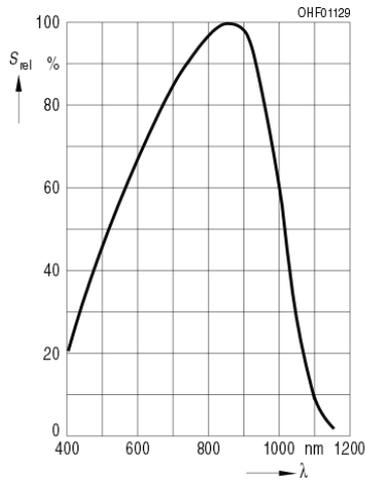


Abbildung 50: Spektrale Sensibilität der Fotodiode [14] **Abbildung 51: Emittierter Wellenlängenbereich der LED [15]**

7.1.3 Vorversuche am Messsystem zur Schaltgeschwindigkeitserfassung

Die Ausgangsspannung der Messschaltung wurde mit einem hochauflösenden und schnellen Datenerfassungsmodul erfasst, um den Schaltvorgang später genau auswerten zu können. Ein erster Vorversuch stellte sicher, dass die Schaltung das Messsignal schnell genug nachführen kann und nicht ihre eigene Trägheit abzeichnet. Dazu wurde die Fotodiode mit einer schnell gepulsten LED angeregt, deren Periodendauer um ein Vielfaches geringer war als die erwartete Schaltzeit der Shutter-Zelle. Zudem konnte mit diesem Signal die Zeitmessung des Datenerfassungsmoduls validiert werden.

Vergleichsmessung - 1 kHz

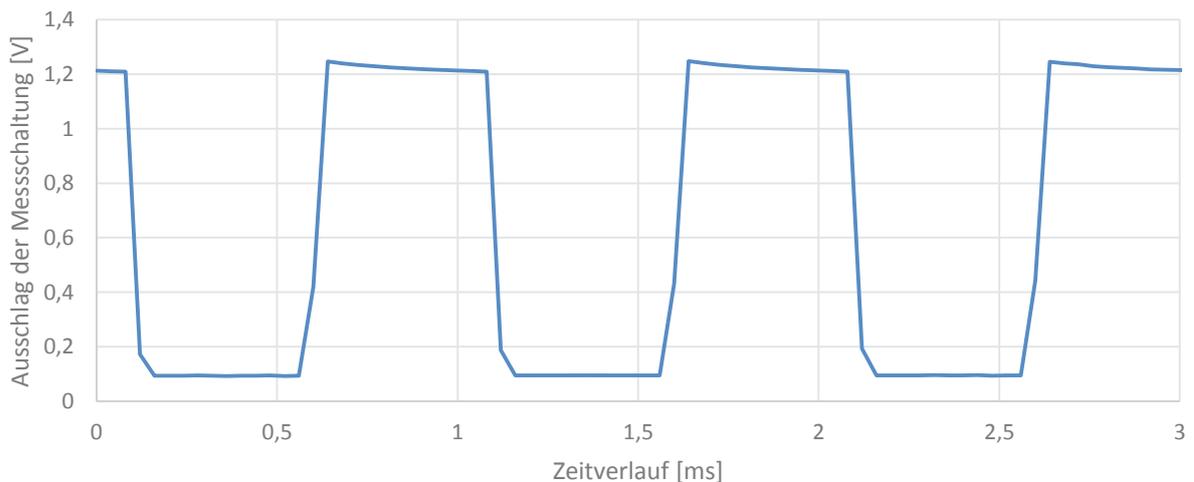


Abbildung 52: Potentialverlauf des Messsignals, aufgezeichnet mit einer Abtastrate von 25 kHz

Die gepulste LED (1 kHz) erzeugt eine Spannung von ca. 1,2 V. Das Ergebnis des Vorversuchs war ein Graph mit sehr deutlichen Flanken, die nahezu senkrecht anliegen (Abbildung 52). Die Frequenz der gepulsten LED entspricht einer Periodendauer von 1 ms und deckt sich mit der aus dem Graphen



ermittelten Periodendauer. Die erwarteten 5 V Auslenkung des Messsignals werden jedoch auf Grund der zu schwachen Lichtemission der LED nicht erreicht. Das Auflösungsvermögen ist in Hinblick auf die Spannung aber dennoch ausreichend genau. Das verwendete Datenerfassungsmodul hat einen Messbereich von -10 V bis +10 V und arbeitet mit einer Auflösung von 16 Bit. Dies ergibt eine kleinste Messeinheit von 0,3 mV. Der Prüfaufbau ist daher trotzdem ausreichend präzise, um auch Spannungen in der Größenordnung bis 200 mV zuverlässig analysieren zu können.

Das Kalibrieren der Ausgangsspannung des Transimpedanzverstärkers auf die tatsächliche physikalische Größe des Fotostroms war nicht notwendig. In der Auswertung und im Ergebnis spielt der Fotostrom nur in Form relativer Verhältnisse eine Rolle. Verhältnisse und physikalische Größe müssen lediglich proportional zueinander sein. Dies kann auf Grundlage der Datenblätter vorausgesetzt werden [14].

7.1.4 Messung zur Bestimmung der Schalteigenschaft der Shutter-Zelle

Zur Bestimmung der Schaltcharakteristik der Shutter-Zelle wurde diese mit einem Rechtecksignal periodisch in die Zustände der minimalen bzw. maximalen Transmission geschaltet. Dabei liegen während beider Zustände konstante Spannungen an. Die Amplitude wurde jeweils auf 5 V und 10 V eingestellt. In Tabelle 9 sind die Messeinstellungen zur Bestimmung der Schaltcharakteristika der Shutter-Zelle aufgelistet.

Tabelle 9: Messeinstellungen zur Bestimmung der Schaltcharakteristik der Shutter-Zelle

Messeinstellung	Option
Signaltyp	Rechteck
Amplitude (Upp)	5 V, 10 V
Offset	0 V
Umschaltfrequenz	0,5 Hz
Abtastrate (Datenerfassungsmodul)	25 kHz pro Kanal



Die Messschaltung wurde bei allen Versuchen an der Shutter-Zelle mit einer Betriebsspannung von 4,5 V versorgt. Bei dieser Einstellung ist das Signalrauschen relativ gering und die erzeugten Messspannungen sind aussagekräftig. Die korrekte Ausrichtung von LED und Fotodiode (Abbildung 53) wurde durch Verschieben des oberen Teils der Messschaltung auf zwei orthogonalen Achsen empirisch bestimmt. Zeigt die gemessene Spannung hierbei einen maximalen Ausschlag, ist der Aufbau korrekt justiert (Abbildung 54).

Eine Messreihe mit den unterschiedlichen Steuersignalen (5 V und 10 V) wurde auf der Zellenhälfte ohne Antireflexionsfolie durchgeführt und eine weitere auf der zweiten Hälfte mit Antireflexionsfolie. Jede Messreihe bestand aus einer ersten Messung und zur Kontrolle aus einer zweiten Messung. Für die zweite Messung wurden LED und Fotodiode um wenige Zentimeter verschoben und neu justiert.

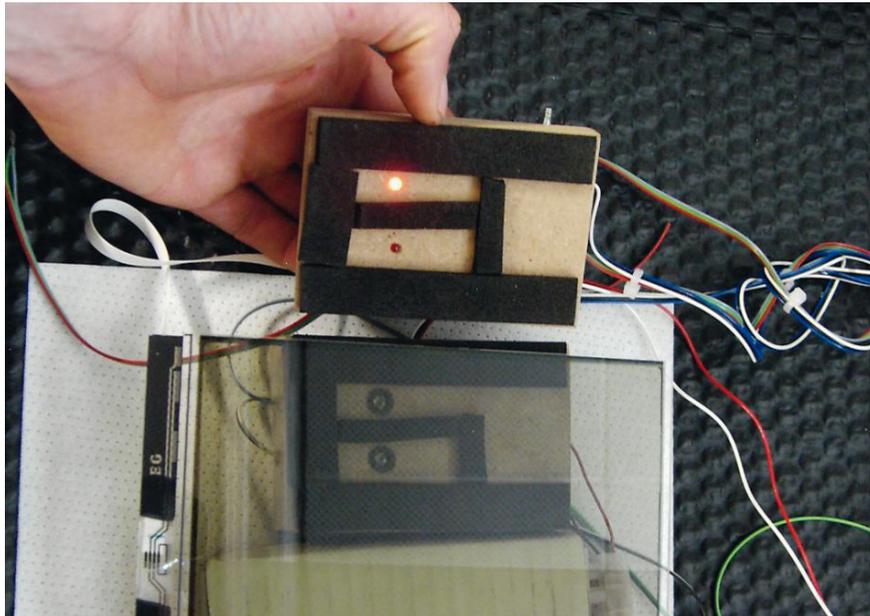


Abbildung 53: Beleuchtungseinheit mit LEDs (oben) und Anordnung mit Fotodioden (unten) unter der Shutter-Zelle (Foto: J. Rettig / ILEK)

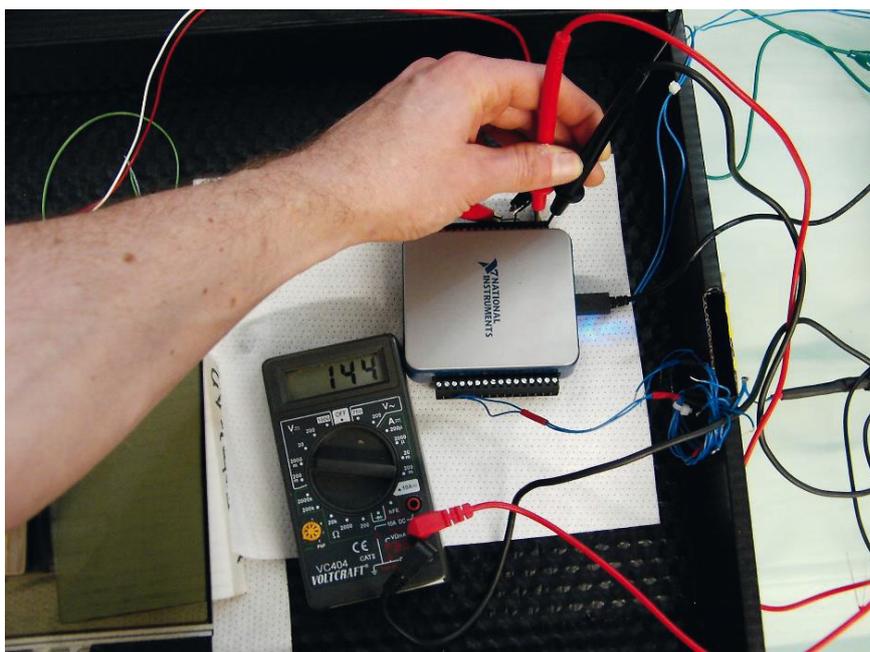


Abbildung 54: Messung des Ausschlags der Steuerspannung (Foto: J. Rettig / ILEK)

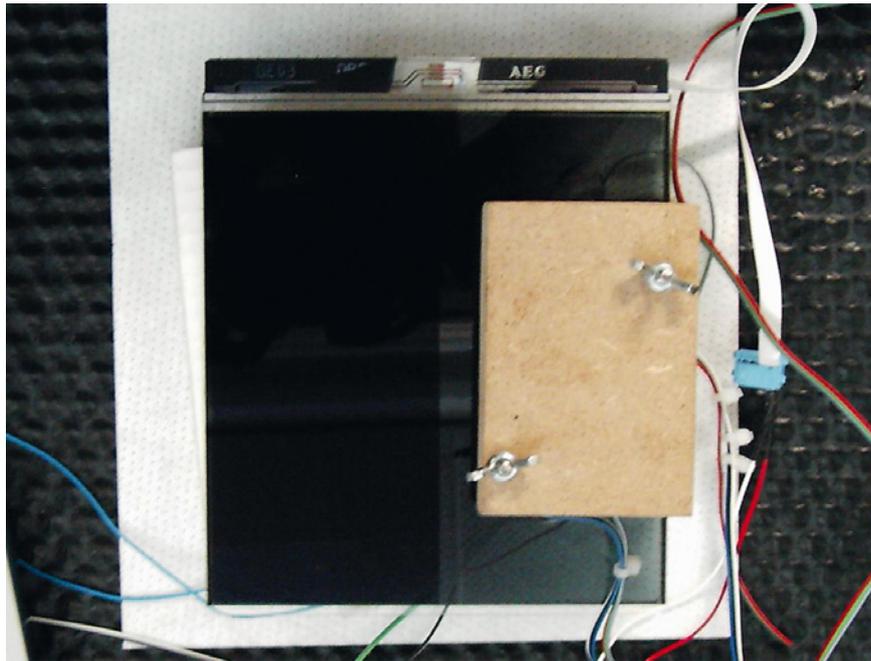


Abbildung 55: Shutter-Zelle mit Messaufbau zur Schaltzeitermittlung. Auf der linken Seite ist die Hälfte mit Antireflex-Eigenschaft zu sehen. Auf der rechten Seite ist die Hälfte mit lediglich dem Polarisator zu erkennen. Auf der rechten Hälfte liegt der obere Teil des Messaufbaus (Foto: J. Rettig / ILEK).

7.1.5 Auswertung der Messergebnisse zur Schaltzeitermittlung

Jede Messreihe lieferte einen Wert für das Abdunkeln und einen Wert für das Aufhellen der Shutter-Zelle. In der Summe entstanden acht Messreihen, die nach folgendem Schema ausgewertet wurden:

- Festlegen des maximalen und minimalen Spannungswertes der Fotodiode (Ordinatenwert). Dazu wurden aus der Ausgangsspannung die zeitlichen Mittelwerte gebildet, sobald sich diese auf dem höchsten bzw. niedrigsten Pegel stabilisiert hatten.
- Berechnen der Bezugspunkte. Die Schaltzeit definiert sich durch die Dauer, die die Zelle benötigt, um vom Zustand 10 % auf den Zustand 90 % der maximalen Transmission umzuschalten.
- Schnittpunkte ermitteln. Aus der entsprechenden Grafik (Abbildung 56 und Abbildung 57) wurden die Schnittpunkte der Transmission des 10 %- und 90 %-Niveaus bestimmt.
- Berechnen der Schaltzeit. Aus den beiden Schnittpunkten konnte die Schaltzeit berechnet werden (Tabelle 10 und Tabelle 11).

Nachfolgend dargestellt sind die Ergebnisse der Messungen bei Raumtemperatur. Die ermittelten Schaltzeiten bei erhöhter Temperatur von ca. 90 °C sowie bei niedriger Temperatur von ca. -9 °C werden in Kapitel 7.1.7 vorgestellt.

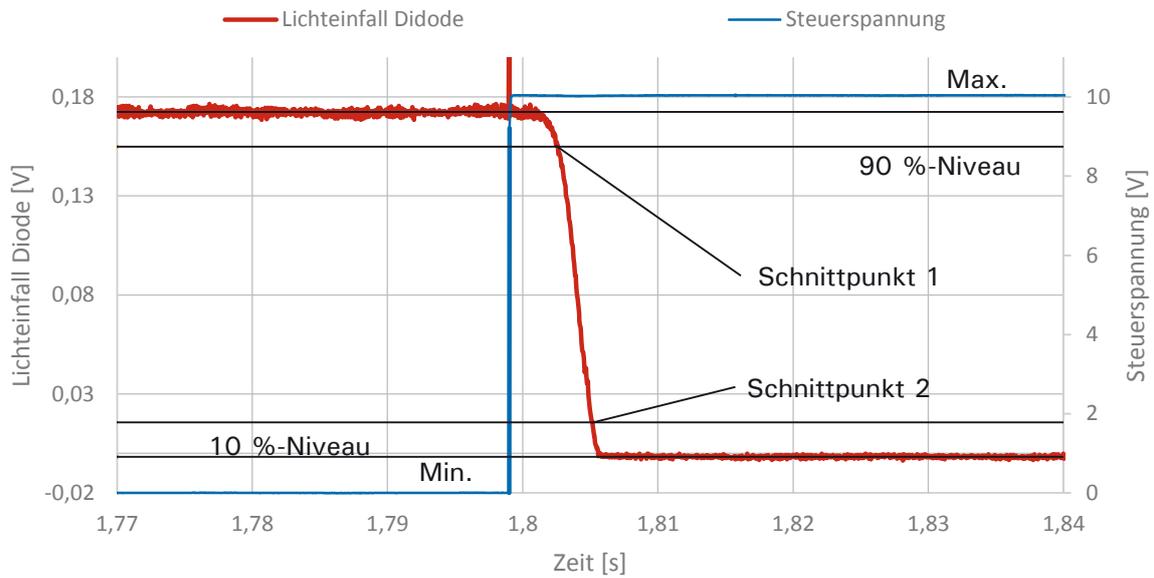


Abbildung 56: Hochfrequente Messung der Shutter-Zelle während des Abdunkelns (Seite mit Antireflexbeschichtung / 10 V)

Tabelle 10: Zusammenfassung der Messung „Abdunkeln (Seite mit Antireflexionsfolie / 10 V)“

Kenngröße	Wert
maximaler Pegel	0,172 V
minimaler Pegel	-0,002 V
90 %-Niveau	0,155 V
10 %-Niveau	0,016 V
Schaltzeit	2,6 ms

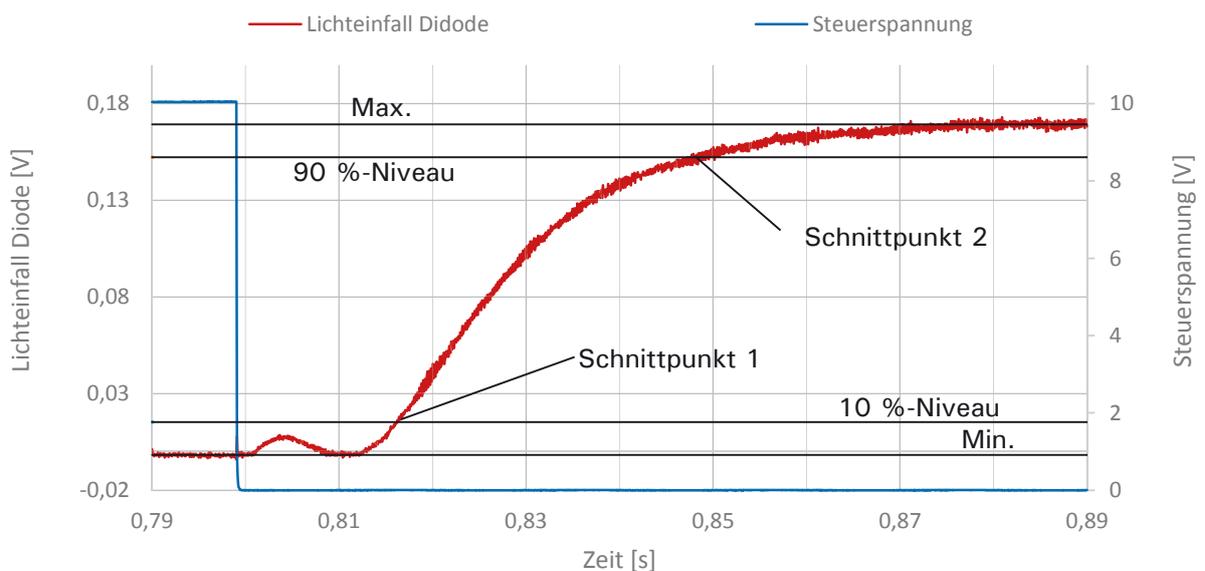


Abbildung 57: Hochfrequente Messung der Shutter-Zelle während des Aufhellens (Seite mit Antireflexionsfolie / 10 V)



Tabelle 11: Zusammenfassung der Messung „Aufhellen (Seite mit Antireflexionsfolie / 10 V)“

Kenngröße	Wert
maximaler Pegel	0,169 V
minimaler Pegel	-0,002 V
90 %-Niveau	0,152 V
10 %-Niveau	0,015 V
Schaltzeit	30,9 ms

7.1.6 Zusammenfassung der Messergebnisse

Eine Zusammenfassung der ermittelten Schaltzeiten für die beiden Arbeitsspannungen von 5 V und 10 V ist nachfolgend in Tabelle 12 und Tabelle 13 gegeben.

Tabelle 12: Einschaltzeiten zum Abdunkeln der Shutter-Zelle

Steuerspannung	Seite mit Antireflexionsfolie [ms]		Seite ohne Antireflexionsfolie [ms]	
	1)	2)	1)	2)
10 V	2,6	2,6	2,9	2,8
Mittelwert bei 10 V	2,6		2,9	
5 V	19,3	16,4	22,2	16,8
Mittelwert bei 5 V	17,9		19,5	

Tabelle 13: Ausschaltzeiten zum Aufhellen der Shutter-Zelle

Steuerspannung	Seite mit Antireflexionsfolie [ms]		Seite ohne Antireflexionsfolie [ms]	
	1)	2)	1)	2)
10 V	30,9	34,8	64,3	102,1
Mittelwert 10 V	32,9		83,2	
5 V	27,3	38,2	286,6	36,1
Mittelwert 5 V	32,8		161,4	

Die Messungen lassen folgendes Fazit zu:

- Das Abdunkeln der Shutter-Zelle erfolgt in wenigen Millisekunden.
- Mit einem höheren Steuersignal läuft dieser Prozess schneller ab.
- Der Vorgang des Abdunkelns läuft schneller ab als der des Aufhellens.

Die Tatsache, dass beim Aufhellen der Zelle im Bereich ohne Antireflexionsfolie mehr Zeit verstreicht als beim selben Vorgang im Bereich mit Antireflexionsfolie, geht nicht auf die Folie zurück. Mit einem langsamen, sinusförmigen Steuersignal ist deutlich zu erkennen, dass sich die Zelle nicht über die gesamte Fläche gleichmäßig abdunkelt bzw. aufhellt. Es kommt zu einem verzögerten Schalten, verbunden mit einer ungleichmäßigen Aufhellung im entsprechenden Zellenbereich. Dies könnte auf eine unterschiedliche Schichtdicke der Flüssigkristallschicht hindeuten oder durch eine Beeinflussung der Orientierungsschicht beim nachträglichen Anbringen der Polarisationsfolie ohne Antireflexionsschicht verursacht worden sein.



7.1.7 Ermittelte Schaltzeiten bei Extremtemperaturen

Die an der Monopixel-Zelle ermittelten Schaltzeiten bei hoher (90 °C) und tiefer (-9 °C) Temperatur wurden nach dem bereits beschriebenen Verfahren auf der Seite mit Antireflexionsfolie ermittelt. Die Monopixel-Zelle wurde vor der jeweiligen Messung für drei Stunden bei Zieltemperatur konditioniert. Zuvor erfolgte die Ausrichtung des Messaufbaus, wodurch die Messkammer für die Messwerterfassung nicht mehr geöffnet werden musste. Die Ergebnisse der Auswertung sind nachfolgend dargestellt.

Tabelle 14: Schaltzeiten bei Extremtemperaturen mit einer Steuerspannung von 10 V

Steuerspannung 10 V	Schaltzeit bei -9 °C [ms]	Schaltzeit bei 23 °C (aus Kap. 7.1.6) [ms]	Schaltzeit bei 90 °C [ms]
Abdunkeln (Einzelmessung)	43,6 45,6	2,6 2,6	0,7 0,7
Abdunkeln (Mittelwert)	44,6	2,6	0,7
Aufhellen (Einzelmessung)	189,6 228,4	30,9 34,8	12,8 13,0
Aufhellen (Mittelwert)	209,0	32,9	12,9

Tabelle 15: Schaltzeiten bei Extremtemperaturen mit einer Steuerspannung von 5 V

Steuerspannung 5 V	Schaltzeit bei -9 °C [ms]	Schaltzeit bei 23 °C (aus Kap. 7.1.6) [ms]	Schaltzeit bei 90 °C [ms]
Abdunkeln (Einzelmessung)	95,0 109,9	19,3 16,4	2,4 2,5
Abdunkeln (Mittelwert)	102,5	17,9	2,5
Aufhellen (Einzelmessung)	163,3 182,0	27,3 38,2	29,6 25,5
Aufhellen (Mittelwert)	172,7	32,8	27,6

7.2 Multipixel-Zelle

7.2.1 Untersuchung der Schaltcharakteristik

Die Messungen an den entsprechenden Modulen wurde an der Rahmenkonstruktion im Sonnensimulator bei Raumtemperatur vorgenommen. Die Schaltcharakteristik der Module wurde weitestgehend analog zum Vorgehen an der Shutter-Zelle durchgeführt. Allerdings kam hierbei die Modulansteuer-elektronik zum Einsatz. Zur Aufzeichnung der Messwerte wurde die Messschaltung an einem Pixel in

der unteren rechten Ecke positioniert (Abbildung 58). Die Schaltung der Pixel in die Extremzustände erfolgte durch die Steuersoftware. Auf das Abgreifen der Steuersignale wurde verzichtet.

7.2.2 Messungen zur Bestimmung der Schalteigenschaft der Multipixel-Module

Zur Messung wurden die Beleuchtungs- sowie die Fotodiodeeinheit mit einer Klemme an der Rahmenkonstruktion befestigt. Das Einstellen eines Frequenzgenerators entfiel bei diesem Versuch. Das Einspielen eines Bildes auf die untersuchte Multipixel-Zelle erfolgte mit der Ansteuersoftware des Modulherstellers. Dabei wurde der zu vermessende Bildpunkt von hell nach dunkel geschaltet. In Tabelle 16 sind die Messeinstellungen zur Bestimmung der Schaltcharakteristika der TN-Module aufgeführt.

Tabelle 16: Messeinstellungen zur Bestimmung der Schaltcharakteristik der TN-Module

Messeinstellung	Option
Signaltyp	Software
Amplitude (Upp)	durch Hersteller vorgegeben
Offset	durch Hersteller vorgegeben
Umschaltzeit	3 s
Abtastrate (Datenerfassungsmodul)	25 kHz

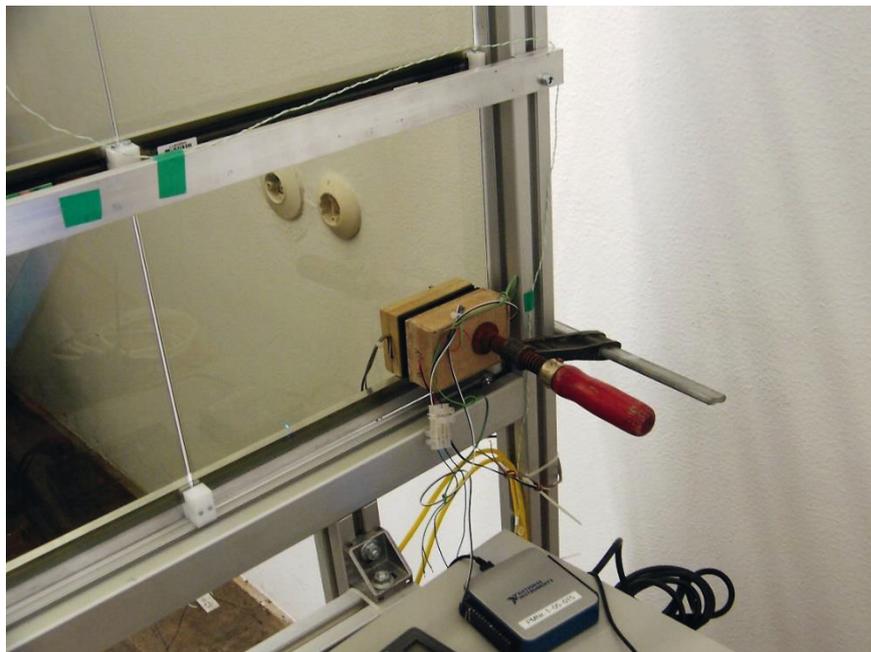


Abbildung 58: Messaufbau an einem Multipixel-Modul vom Typ GV66 (Foto: J. Rettig / ILEK)

7.2.3 Auswertung der Messergebnisse zur Schaltzeitermittlung

Für die Auswertung der Messergebnisse wurde das gleiche Verfahren wie bei der Shutter-Zelle angewendet (Kap. 7.1.5). Dies ist nachfolgend noch einmal zusammengefasst:

- Festlegen des maximalen und minimalen Spannungswerts der Fotodiode
- Berechnen der Bezugspunkte
- Schnittpunkte ermitteln
- Berechnen der Schaltzeit

Die Ergebnisse der Messung sind den Diagrammen in Abbildung 59 und Abbildung 60 sowie der Tabelle 17 und der Tabelle 18 zu entnehmen.

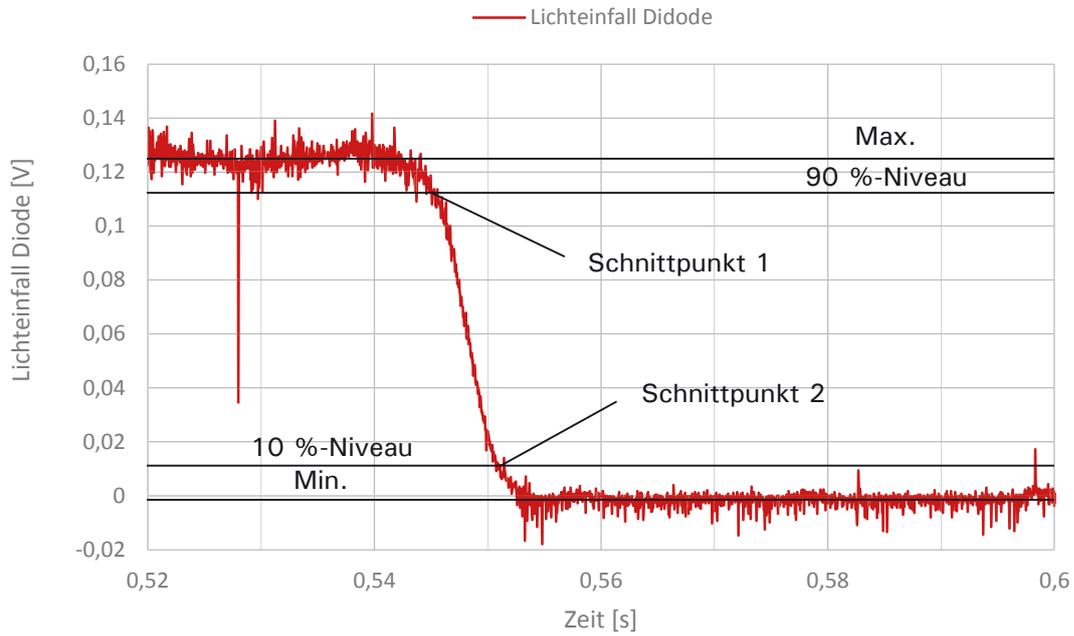


Abbildung 59: Hochfrequente Messung der Schaltzeit beim Abdunkeln der Zelle GV66 im Teststrahlen

Tabelle 17: Zusammenfassung der Messung zum Schaltverhalten eines Pixels einer GV66-Zelle im Teststrahlen

KenngroÙe	Wert
maximaler Pegel	0,125 V
minimaler Pegel	-0,001 V
90 %-Niveau	0,112 V
10 %-Niveau	0,011 V
Schaltzeit für die Abdunklung	5,7 ms

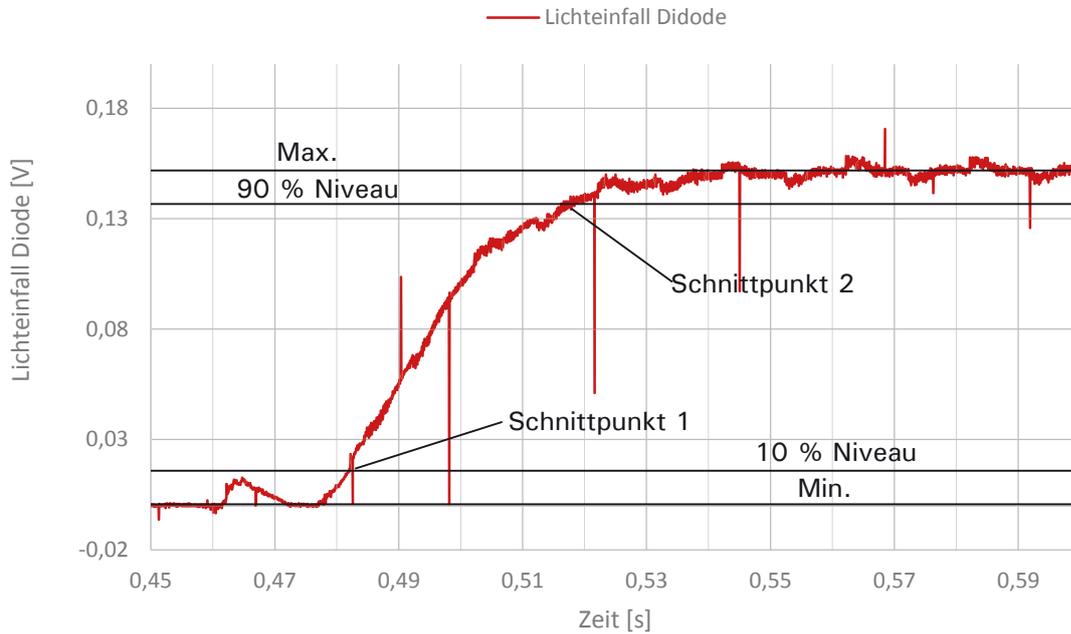


Abbildung 60: Hochfrequente Messung der Schaltzeit beim Aufhellen der Zelle GV66 im Teststrahlen

Tabelle 18: Zusammenfassung der Messung zum Schaltverhalten eines Pixels einer GV66-Zelle im Teststrahlen

Kenngröße	Wert
maximaler Pegel	0,152 V
minimaler Pegel	0,001 V
90 %-Niveau	0,137 V
10 %-Niveau	0,016 V
Schaltzeit für das Aufhellen	34,4 ms

7.2.4 Zusammenfassung der Messergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Schaltzeitermittlung aus jeweils zwei Messungen für die Multipixel-Zelle GV66 in Tabelle 19 und Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 19: Abdunkeln eines Pixels auf dem Modul GV66

Steuerspannung	Modul GV66 [ms]	
	Messung 1	Messung 2
durch Hersteller vorgegeben	5,7	5,6
Mittelwert	5,7	

Tabelle 20: Aufhellen eines Pixels auf der TN-Zelle

Steuerspannung	Modul GV66 [ms]	
	Messung 1	Messung 2
durch Hersteller vorgegeben	34,4	30,6
Mittelwert	32,5	

Die Umschaltzeiten beim Abdunkeln und Aufhellen sind damit wesentlich kürzer als bei elektrochromen Verglasungen oder mechanischen Jalousien. Dies stellt einen wesentlichen Vorteil gegenüber den genannten Systemen dar und erlaubt eine Echtzeitanpassung an sich schnell ändernde Außenbedingungen durch die TN-Verglasung.

7.2.5 Untersuchung der Leistungsaufnahme der Multipixel-Zelle

Die Leistungsermittlung erfolgte am Aufbau im Testrahmen. Die elektrische Leistung des Aufbaus verteilt sich auf das Netzteil (1), einen Schnittstellen-Konverter (X-Port, 2), eine GSC200 Einheit sowie drei Zeilentreiber und die 15 Modultreiber mit Modulen (zusammengefasst als 3), wie in Abbildung 61 dargestellt. In der Gesamtbetrachtung wurde vernachlässigt, dass der X-Port über ein Netzkabel mit einem Notebook verbunden ist und dabei auch Ströme fließen, was eine weitere Leistungsaufnahme impliziert. Um eine Aussage über die Leistungsaufnahme tätigen zu können, wurde der Testrahmen unter Laborbedingungen betrieben und die Stromaufnahme in Abhängigkeit der angelegten Versorgungsspannung ermittelt. Durch die Messung der beiden physikalischen Größen können Aussagen über die Leistungsaufnahme erfolgen. Als Messgerät kam ein Gerät des Typs HM8115-2 der Firma HAMEG zum Einsatz. Dieses Messinstrument kann die Leistungsaufnahmen von Verbrauchern an Gleich- und Wechselspannungen messen.

7.2.6 Versuchsdurchführung

Das Netzteil E3610 (1) der Firma Agilent ist im Schaltbild (Abbildung 61) schematisch als Transformator dargestellt. Das Netzteil war an das Stromnetz angeschlossen und lieferte die Arbeitsspannung. Der Stromkreis hinter dem Netzteil versorgte zwei Verbraucher. Es handelte sich dabei um den X-Port (2) und weitere Ansteuerungselektronik (3) in Form von einem GSC200, drei Zeilentreibern und 15 Multipixel-Modulen mit jeweils einem Modultreiber.

Für die Bestimmung der Leistungsaufnahme erfolgten Messungen an drei unterschiedlichen Aufbauten:

- (I) Multipixel-Module, Treibermodule, X-Port und Netzteil
- (II) Multipixel-Module, Treibermodule und X-Port
- (III) Multipixel-Module und Treibermodule

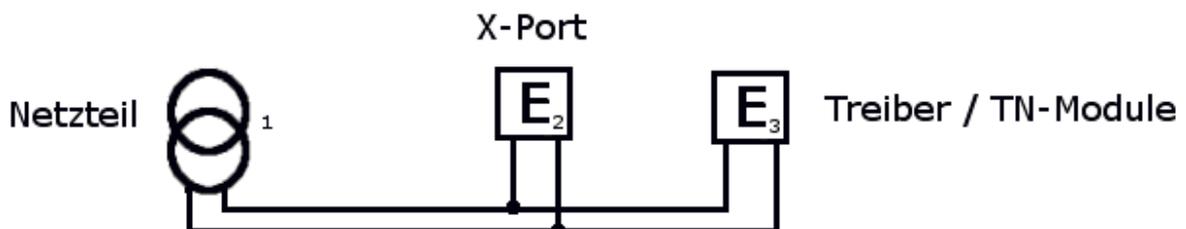


Abbildung 61: Prinzipieller Aufbau der Messschaltung



Zur Vermessung wurde der Testrahmen mit acht unterschiedlichen Pixel-Bildern angesteuert. Beim ersten Bild waren alle Pixel in den Zustand der maximalen Transmission geschaltet. Beim zweiten Bild erfolgte die vollständige Abdunklung der Pixel. Die weiteren untersuchten Bilder entsprachen den unterschiedlichen Grafiken aus Abbildung 41 (Kap. 6). Sowohl der Testrahmen als auch das Messgerät wurden mit 30-minütiger Vorlaufzeit zum „Aufwärmen“ eingesetzt.

Zur Messung erfolgte die Anzeige der Bilder fortlaufend und jeweils für 10 Sekunden. Danach wurde das nächste Bild eingespielt. Die angezeigten Werte konnten bis auf eine Nachkommastelle genau erfasst werden. Jede Größe wurde dreimal gemessen und der jeweilige Mittelwert bestimmt. Im Aufbau I stellt das Netzteil eine induktive Last dar. Dadurch trat neben der Wirkleistung auch eine Scheinleistung auf, die gemessen wurde. An Aufbau II und III gab es lediglich Gleichspannungen, die keine Scheinleistungen hervorrufen.

7.2.7 Auswertung der Messergebnisse

In den Tabellen 21 bis 23 sind die absoluten Leistungsaufnahmen dargestellt. Die Messung des ersten Bildes (alle Pixel bei maximaler Transmission) lieferte den Referenzwert für alle anderen dargestellten Bilder. Durch die Differenzbildung der jeweiligen Leistungswerte zwischen Bild 1 (alle Pixel hell) und den anderen Bildern können relative Leistungswerte ermittelt werden. Die entsprechenden Leistungswerte wurden mit der nachfolgenden Formel bestimmt und in Tabelle 24 bis Tabelle 26 aufgelistet.

$$\Delta P_{(I)} = |P_{(I) \text{ Bild } 1} - P_{(I) \text{ Bild } i}| \quad i = 2 \text{ bis } 8 \quad (5)$$

Tabelle 21: Leistungsmessung des Aufbaus (I)

	Bild							
	1 (alle Pixel max. Transm.)	2 (alle Pixel min. Transm.)	3	4	5	6	7	8
Wirkleistung [W]	13,7	14,1	13,8	13,9	13,8	13,7	13,6	13,8
Scheinleistung [VA]	19,1	19,7	19,4	19,4	19,3	19,3	19,0	19,3

Tabelle 22: Leistungsmessung des Aufbaus (II)

	Bild							
	1 (alle Pixel max. Transm.)	2 (alle Pixel min. Transm.)	3	4	5	6	7	8
Leistung [W]	1,9	2,2	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0	2,1



Tabelle 23: Leistungsmessung des Aufbaus (III)

	Bild							
	1 (alle Pixel max. Transm.)	2 (alle Pixel min. Transm.)	3	4	5	6	7	8
Leistung [W]	1,0	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1

Tabelle 24: Differenzen zwischen Leistungsbedarf für Bild 1 und Bedarf bei Bildern mit unterschiedlich abgedunkelten Pixeln – Aufbau (I)

	Bild							
	1 (alle Pixel max. Transm.)	2 (alle Pixel min. Transm.)	3	4	5	6	7	8
Δ Wirkleistung [W]	-	0,40	0,20	0,20	0,10	0,20	0,10	0,30
Δ Scheinleistung [VA]	-	0,70	0,30	0,30	0,30	0,30	0,00	0,30

Tabelle 25: Differenzen zwischen Leistungsbedarf für Bild 1 und Bedarf bei Bildern mit unterschiedlich abgedunkelten Pixeln – Aufbau (II)

	Bild							
	1 (alle Pixel max. Transm.)	2 (alle Pixel min. Transm.)	3	4	5	6	7	8
Δ Leistung [W]	-	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2

Tabelle 26: Differenzen zwischen Leistungsbedarf für Bild 1 und Bedarf bei Bildern mit unterschiedlich abgedunkelten Pixeln – Aufbau (III)

	Bild							
	1 (alle Pixel max. Transm.)	2 (alle Pixel min. Transm.)	3	4	5	6	7	8
Δ Leistung [W]	-	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1

Der größte Teil des Leistungsbedarfs wird von der Steuerelektronik und dem Netzteil verursacht. Durch eine Anpassung des Netzteils und eine Optimierung der elektronischen Komponenten lässt sich die Leistungsaufnahme voraussichtlich deutlich verbessern. Ein gutes Schaltnetzteil dürfte mit einem spürbar besseren Wirkungsgrad arbeiten als das verwendete Labornetzteil. Zudem würde ein Gleichrichter

nach der Spannungstransformation durch den Trafo entfallen. Der elektronische Aufbau ist nicht auf die Bedürfnisse einer schaltbaren Verglasung hin entwickelt worden. An dieser Stelle ließen sich mit einem optimierten Layout unter Umständen einige Baugruppen zusammenfassen oder auf andere Art und Weise die Performance und Leistungsaufnahme verbessern. Die dargestellten Bildinhalte wirken sich hingegen nicht wesentlich auf die Leistungsaufnahme aus.

7.3 Multipixel-Zellen in der Anordnung im Profilrahmen (3 x 5 Anordnung)

7.3.1 Versuche im Sonnensimulator

Im Sonnensimulator wurde unter definierten und reproduzierbaren Bedingungen untersucht, wie die Schattenwürfe der Module auf einen Nutzer wirken und wie die Leuchtdichten dabei beeinflusst werden. Bei den Tests im Labor wie auch bei den nachfolgenden Versuchen im Fassadenprüfstand werden Schattenbilder im Sichtfeld hinter den Versuchsaufbauten erwartet. Darum sollte untersucht werden, ob die Schattenwürfe von einem Betrachter als störend wahrgenommen werden und ob der Komfort ggf. darunter leidet. Aus diesem Grund wurden mit dem Sonnensimulator die Schattenbilder beobachtet, um den Einfluss des Schattenwurfs zu ermitteln. Der Rahmenaufbau befand sich hierzu im Strahlengang des Sonnensimulators, wie in Abbildung 62 und Abbildung 64 dargestellt. Zwei Versuche sollten Aufschluss darüber geben, welche Effekte bei der Darstellung unterschiedlicher Bilder auftreten.

Versuch 1 zur Ermittlung des Schattenwurfs

Der verwendete Testaufbau ist in Abbildung 62 dargestellt. Die Rahmenkonstruktion mit den Modulen wurde direkt vor dem Sonnensimulator aufgebaut. Mit dem Eintritt von Fremdlicht musste nicht gerechnet werden, da alle Fenster des Prüfraums lichtundurchlässig verhängt worden waren. Zum Abbilden der Schattenfiguren kam eine 1630 mm x 1530 mm große Leinwand hinter den Modulen zum Einsatz. Die Bestrahlung erfolgte mit Strahlern, die ein sonnenähnliches Strahlungsspektrum lieferten. Hinter den Modulen befand sich die Projektionsleinwand. Diese wurde in Abständen von 0,5 m, 1 m, 1,5 m und 2 Meter zum Testaufbau positioniert.

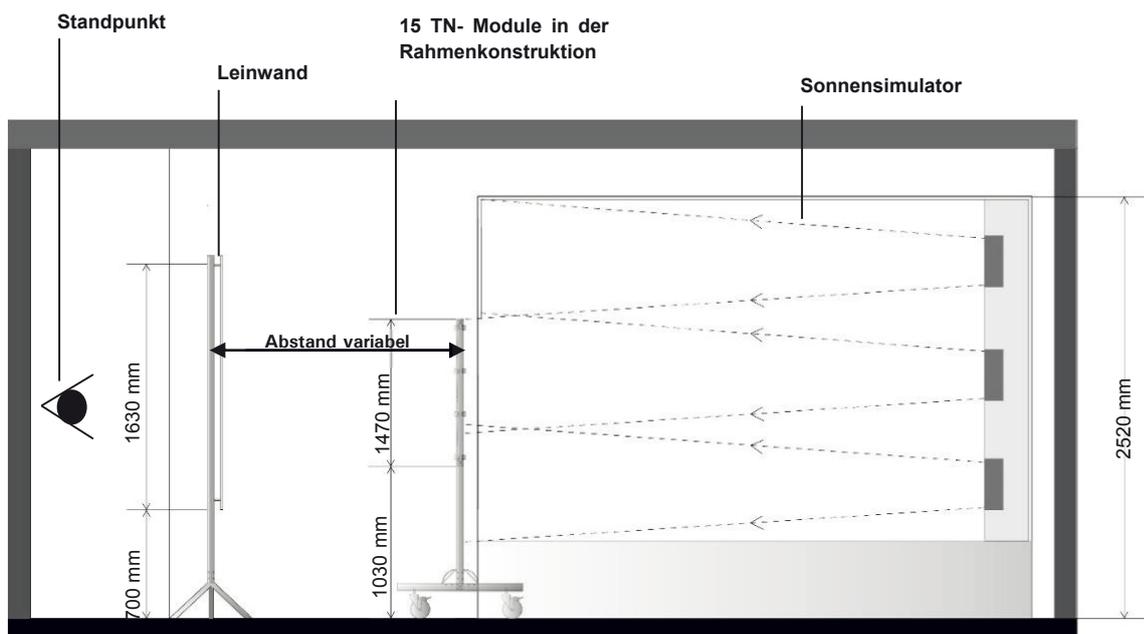


Abbildung 62: Versuchsaufbau mit Sonnensimulator, Modulrahmen und Projektionsleinwand [16]

Nachfolgend sind in Abbildung 63 für jeweils unterschiedliche Grafiken die Schattenwurfbilder bei den unterschiedlichen Abständen zwischen Modulrahmen und Leinwand dargestellt.

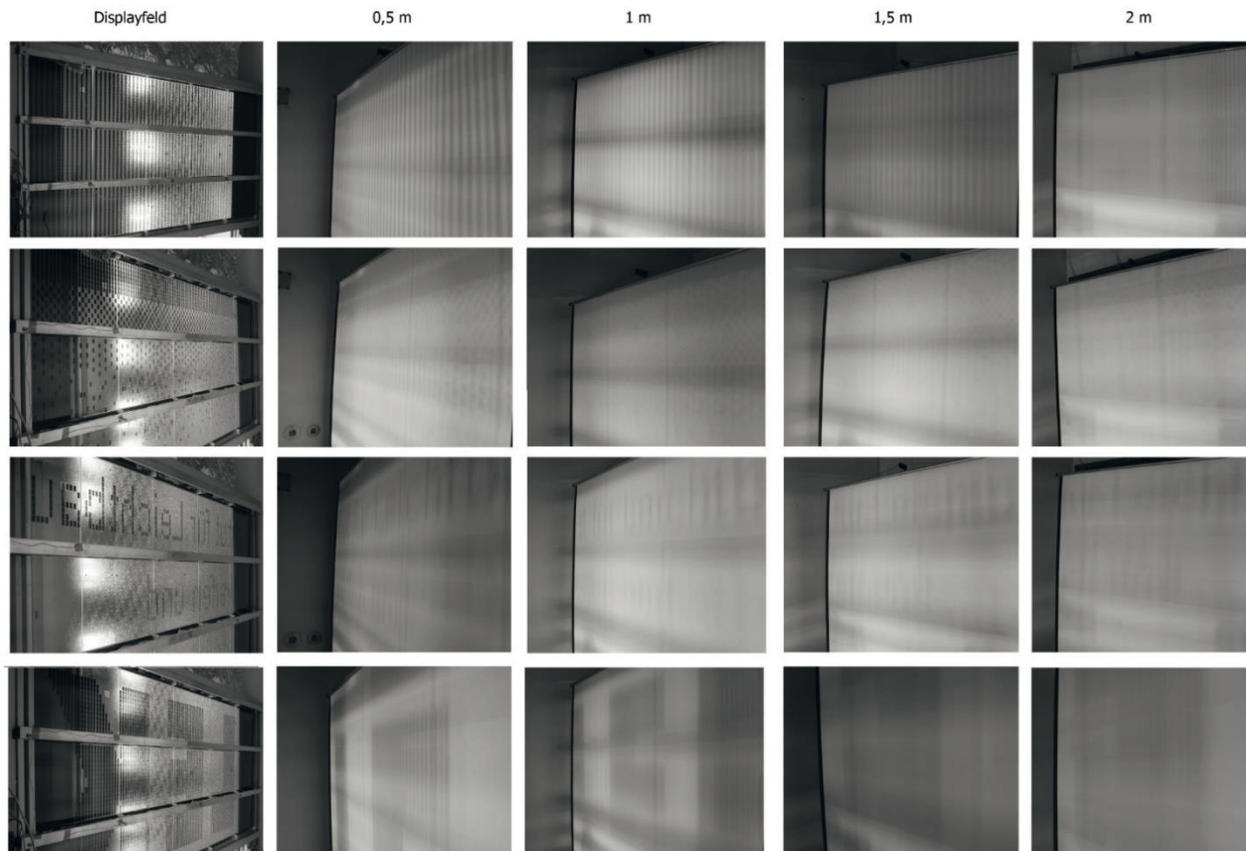


Abbildung 63: Sonnensimulator-Test mit Schattenwurfbildern

Während sich bei geringer Entfernung zwischen dem Modulteststrahlen und der Leinwand die auf den Modulen dargestellten Bilder noch recht klar abzeichnen, verschwimmen die Konturen der Bilder mit zunehmendem Abstand deutlich. Bei kleinteilig strukturierten Grafiken zeigt sich ab einer Entfernung zwischen Modulrahmen und Leinwand von ca. 2 m ein sehr kontrastarmes Bild. Der Betrachter in diesem Abstand wird eine gleichmäßige Leuchtdichte der Module wahrnehmen, die nicht irritierend wirkt. Größer strukturierte Grafiken, wie in der untersten Fotoserie dargestellt, verlieren mit zunehmender Entfernung an Randkonturschärfe. Die Einzelpixel sind dabei bereits ab einer Distanz von ca. 0,5 m zwischen Modulrahmen und Leinwand nicht mehr unterscheidbar. Dies führt zu einer homogenisierten Leuchtdichte in den größerflächigen Schattenbereichen. Die Übergänge an den Randkonturen der Schatten sind weich. Die Verwendung von kleinteilig strukturierten Grafiken mit unterschiedlichen Dunkelanteilen im Darstellungsmuster erscheinen auf Grund der ermittelten Ergebnisse eine geeignete Methode zur Abdunklung zu sein, die den Nutzer nicht irritieren sollte. Auch das Projizieren von größerflächigen Verdunklungsbereichen zur Blendvermeidung bei hoher solarer Direkteinstrahlung sollte als angenehm vom Nutzer empfunden werden.

Versuch 2 zur Ermittlung des Schattenwurfs

Für einen zweiten Versuch wurde eine größere Leinwand (2420 mm x 1740 mm) aufgebaut. Bei den nachfolgenden Tests erfolgten Untersuchungen bei Abständen von 1 m und 2 m zwischen Leinwand und Modulrahmen. Im Vergleich zu den vorher beschriebenen Versuchen wurden nicht alle Lampen, sondern lediglich die mittlere Lampe gezündet (Abbildung 64). Die dazugehörigen Schattenbilder sind in Abbildung 65 dargestellt. Die Ergebnisse sind denen aus dem vorigen Versuch sehr ähnlich.

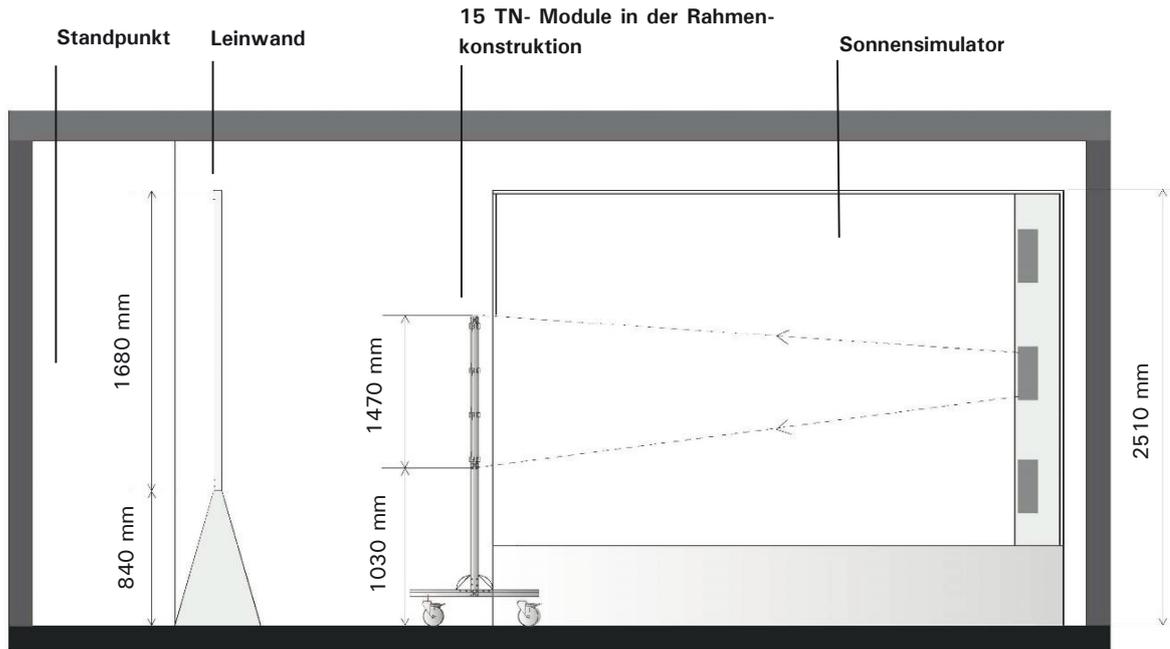
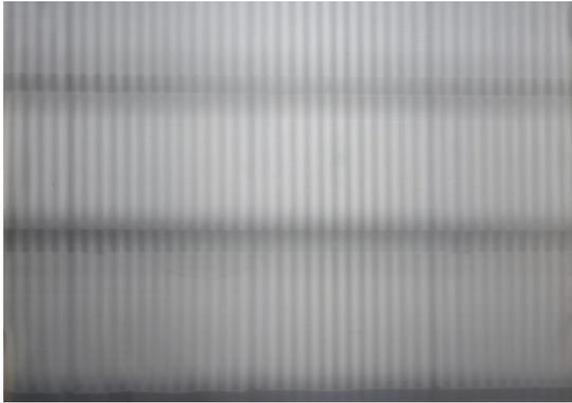


Abbildung 64: Sonnensimulator-Prüfung mit der mittleren Lampe und einer 2420 mm x 1740 mm großen Leinwand [16]



1 Lampe, 1 m Abstand



1 Lampe, 2 m Abstand

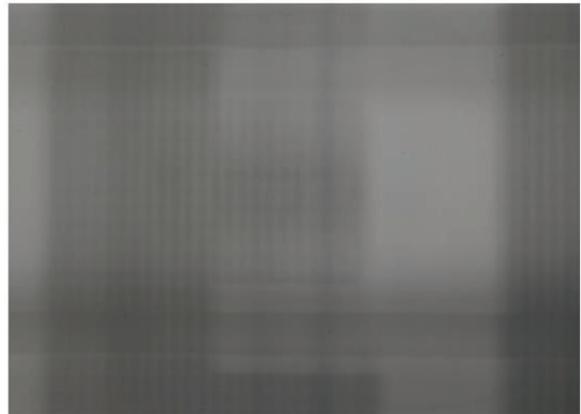
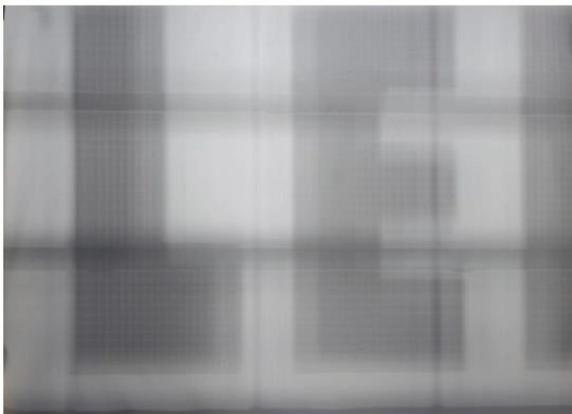
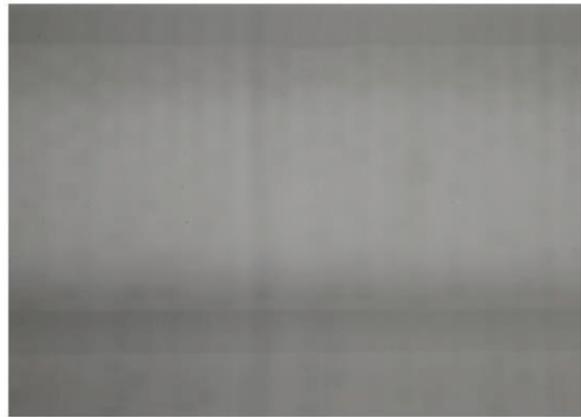
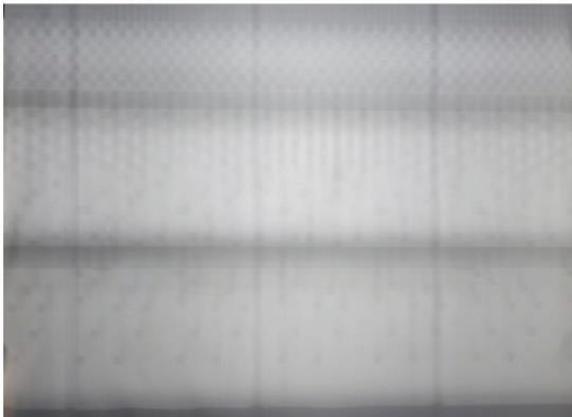
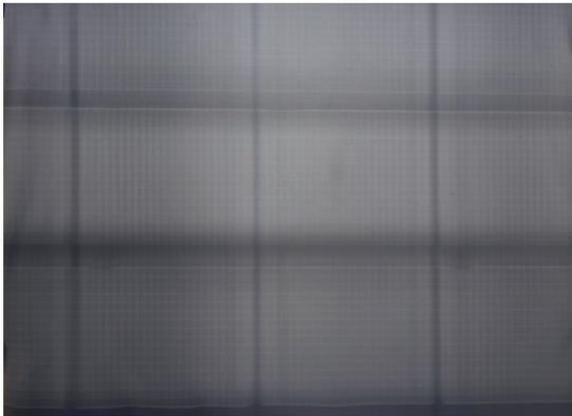


Abbildung 65: Sonnensimulator-Test mit Schattenwurfbildern bei gezündeter mittlerer Lampe. Die projizierten Bilder entsprechen Abbildung 63.

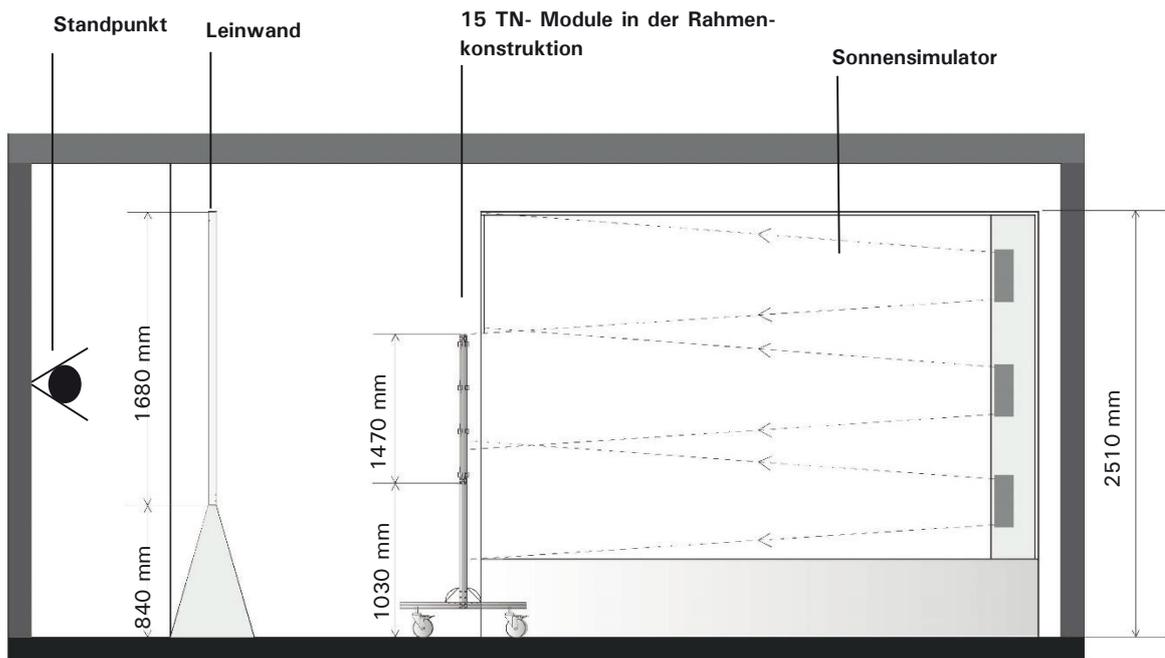


Abbildung 66: Sonnensimulator-Prüfung mit drei Lampen und einer 2420 mm x 1740 mm großen Leinwand [16]

Versuch 3 zur Ermittlung des Schattenwurfs

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen kam die große Leinwand mit Bestrahlung durch 3 Lampen, wie bei der Versuchsreihe 1, zum Einsatz. Hierbei erfolgte die Platzierung der Leinwand im Abstand von 1 m sowie 2 m vom Modulrahmen. Die bereits in Versuch 1 ermittelten Ergebnisse konnten bestätigt werden.

Bei den anschließenden Untersuchungen wurden alle Lampen gezündet (Abbildung 66) und der komplette erste Versuch wiederholt. Die Schattenwurfbilder wurden bei Abständen von 1 m und von 2 m (Abbildung 67) betrachtet. Beim größeren Abstand werden die Schatten größer und die Ränder entsprechend unscharf (Abbildung 67).



3 Lampen, 1 m Abstand

3 Lampen, 2 m Abstand

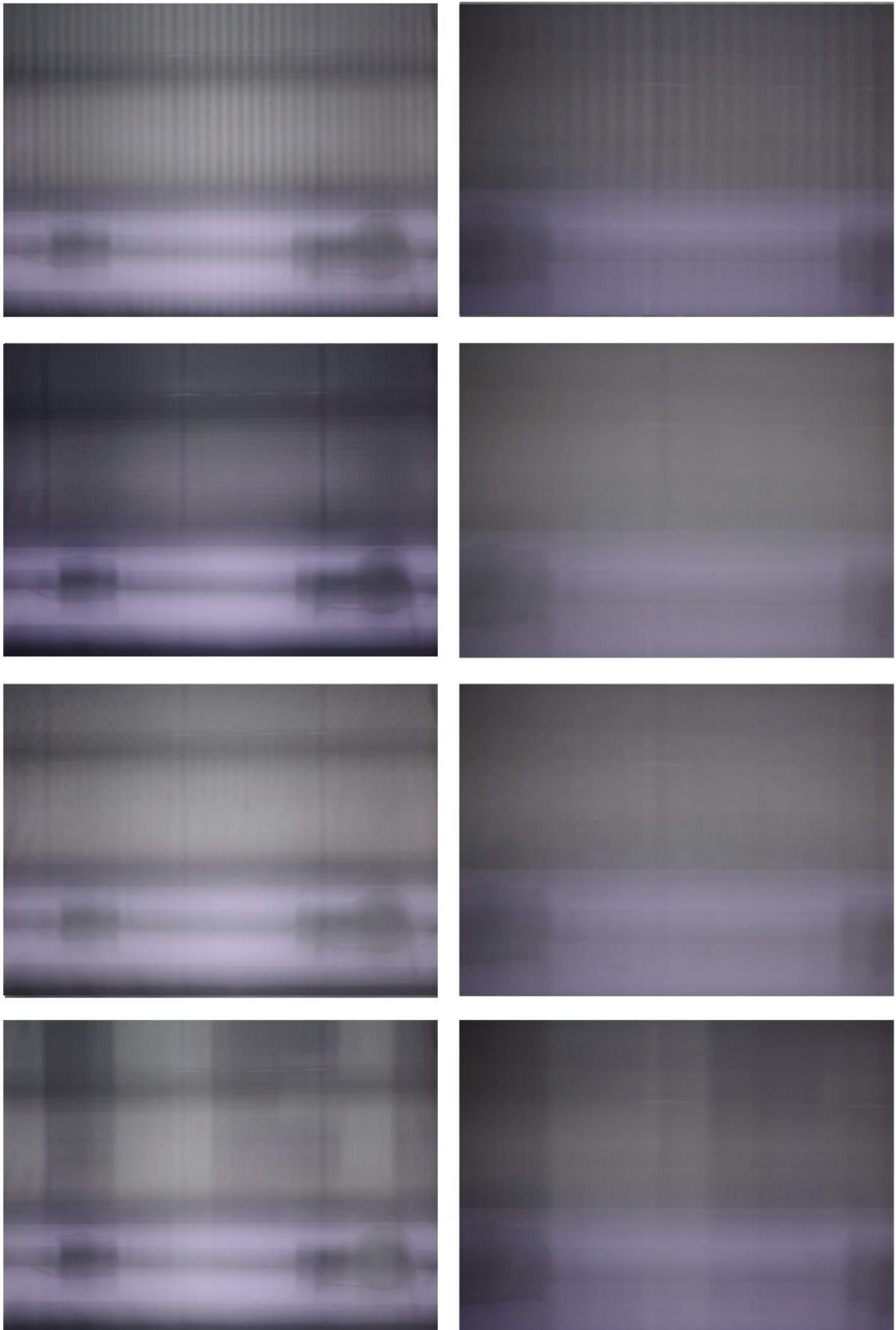


Abbildung 67: Sonnensimulator-Test mit Schattenwurfbildern und mit drei gezündeten Lampen

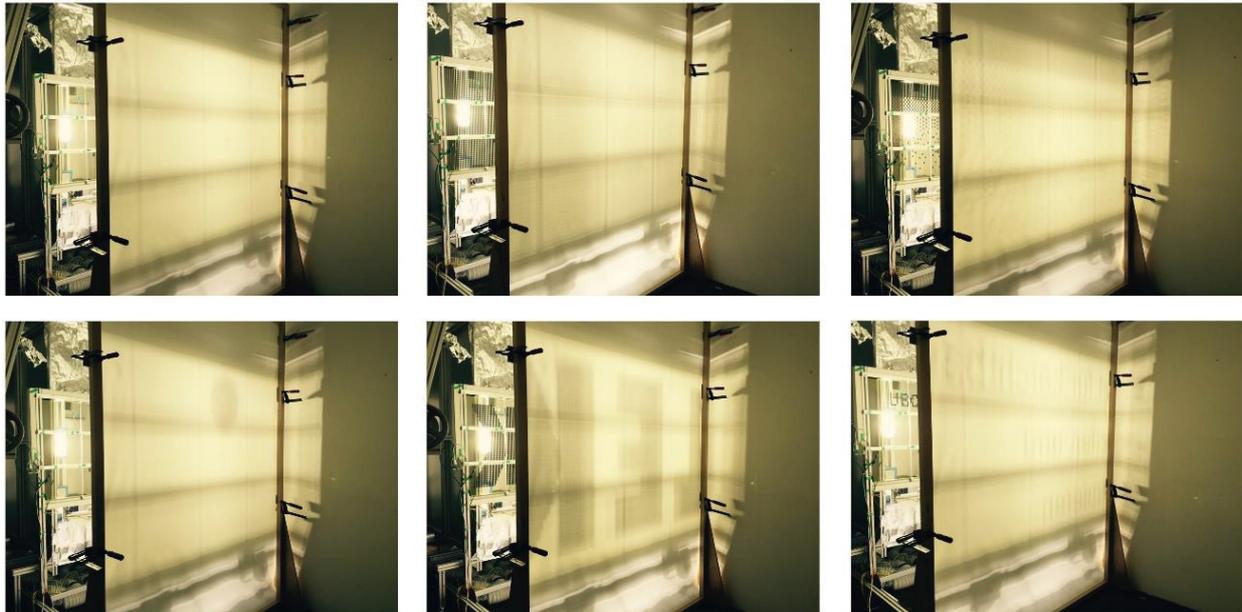


Abbildung 68: Sonnensimulator-Test mit Schattenwurfbildern (mittlere Lampe, Abstand 1 m) [16]

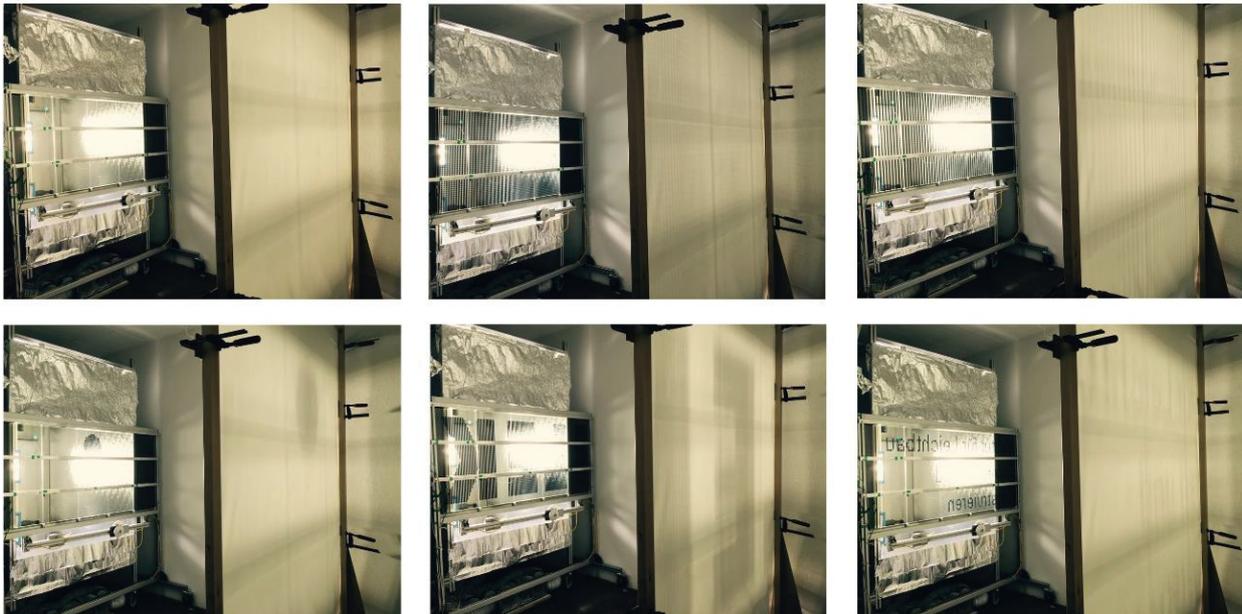


Abbildung 69: Sonnensimulator-Test mit Schattenwurfbildern (drei Lampen, Abstand 2 m) [16]

7.3.2 Messungen der Oberflächentemperatur an den Modulen

Die auf eine Verglasung eintreffende Globalstrahlung erreicht in den Sommermonaten ihre Maximalwerte [17]. Sie bewirkt eine Aufheizung der Glaselemente. Um festzustellen, ob die Aufheizung aus der Absorption der auftretenden Solarstrahlung an den Modulen zu kritisch hohen Temperaturwerten führen könnte, wurden entsprechende Versuche durchgeführt. Die bereits beschriebene Rahmenkonstruktion mit 15 Modulen kam hierfür zum Einsatz. Die Bestrahlung erfolgte mit dem Sonnensimulator. Unmittelbar an den Oberflächen der Zellen waren Thermoelemente zur Temperaturmessung befestigt. Jeweils ein Temperaturfühler befand sich auf der zu den Strahlern gerichteten Seite (Position 2 und 4) und auf der rückwärtigen Seite (Position 1 und 3) der Module. Die Positionen der Temperaturfühler im Rahmenaufbau sind in Abbildung 70 aufgezeigt. Ein weiteres Messgerät wurde zur Aufnahme der Raumtemperaturwerte verwendet.

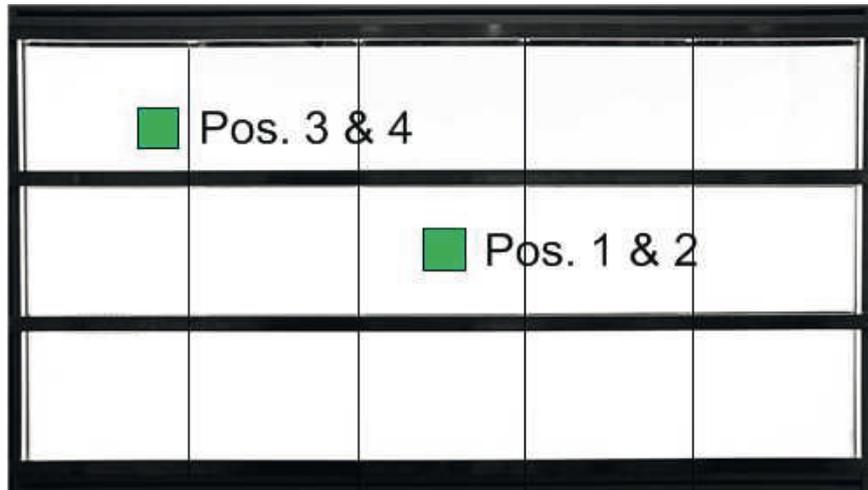


Abbildung 70: Position der vier Thermoelemente an den Multipixel-Modulen zur Oberflächentemperaturmessung [16]

Die Leistung der drei Strahler des Sonnensimulators wurde auf 64 % reduziert. Dies entsprach einer Bestrahlungsstärke von ca. 740 W/m^2 an der Moduloberfläche. Dieser Wert ist für Orte mittlerer Breitengrade bei einem klaren Himmel an vertikalen Südfassaden repräsentativ.

Zu Beginn des Tests herrschte eine Raumtemperatur von $14,2 \text{ °C}$. Die Oberflächentemperaturen waren ähnlich. In der ersten Zeitspanne der Bestrahlung der Module von 4,5 Stunden wurden die Zellen im spannungsfreien, nicht abgedunkelten Zustand bestrahlt. Um zu vergleichbaren Startbedingungen den zweiten Abschnitt einzuleiten, wurde das System heruntergefahren. In den folgenden 3,6 Stunden konnte das Temperaturverhalten im „An“-Modus (alle Pixel dunkel geschaltet), aufgezeichnet werden. Die zwei unterschiedlichen Messkampagnen sind klar unterscheidbar in Abbildung 71 dargestellt. Die Temperaturen an der dem Sonnensimulator zugewandten Seite (Pos. 2 und 4) sind jeweils höher als die Temperaturwerte auf der raumseitigen Oberfläche (Pos. 1 und 3).

In beiden Abschnitten steigen die Oberflächen- und Raumtemperatur im Laufe der Bestrahlungszeit an. Nach etwa 2,5 Stunden bzw. 1,3 Stunden gibt es jedoch einen unerklärlichen Rückgang. Vermutlich entstand ein Luftzug durch eine geöffnete Tür im Nebenraum.

Bereits in Tabelle 6 (Kap. 3.4) wurde das Absorptionsvermögen der TN-Zellen aufgezeigt. Deutlich wird aus den Daten, dass die Verglasung im „An“-Modus einen höheren Absorptionsgrad aufweist als im spannungsfreien Zustand. Rund 53 % der eingehenden Strahlung werden im Zustand „An“ absorbiert, wohingegen im Zustand „Aus“ die Absorption bei 40 % liegt. Dieses unterschiedliche Verhalten in den zwei Zuständen wirkt sich auf die Temperaturen an den Moduloberflächen im stationären Zustand aus.

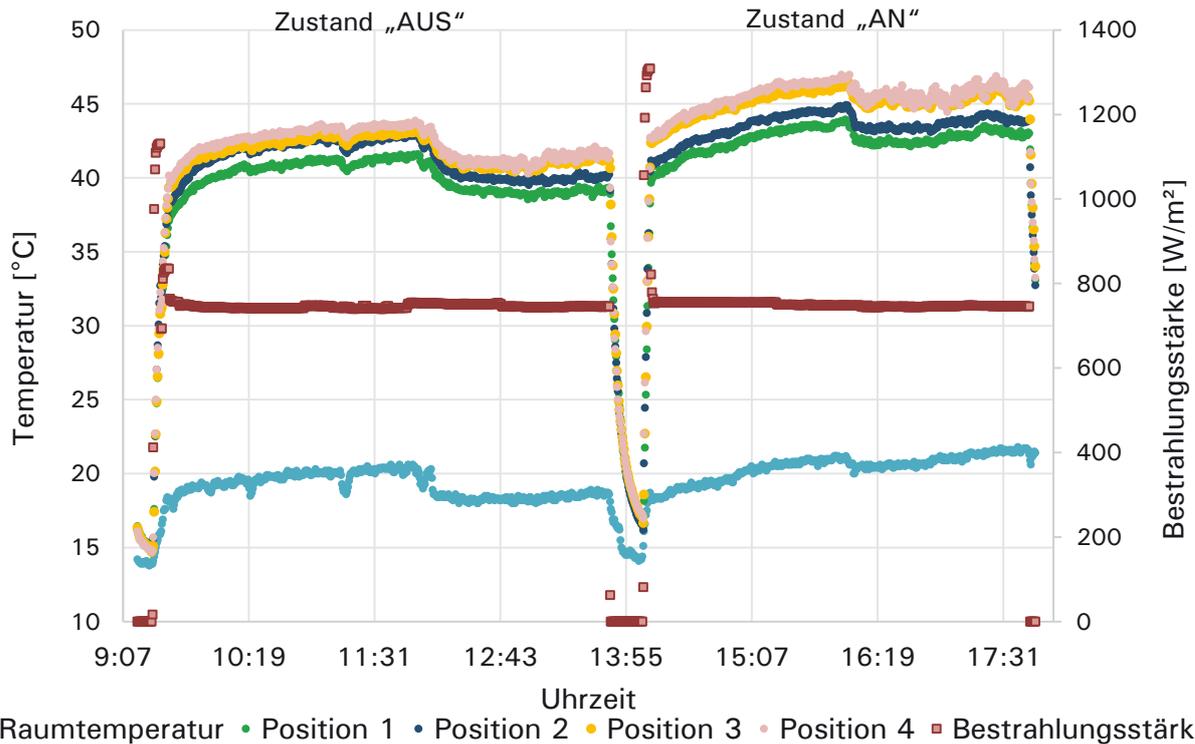


Abbildung 71: Oberflächentemperaturmessung an den Multipixel-Zellen bei zwei Schaltzuständen und konstanter Bestrahlungsstärke

Im ersten Messzeitraum erreichte die maximale Temperatur einen Wert von 43,9 °C an Position 4. An Position 1 wurden 41,6 °C erreicht. Im Durchschnitt lag die Raumtemperatur bei 18,8 °C, maximal jedoch bei 20,4 °C. Bei Abdunklung aller Pixel im zweiten Testabschnitt wurden durchschnittlich 20,7 °C im Raum erreicht. Insgesamt lagen dabei die gemessenen Temperaturwerte der Module höher. Bis zu 47 °C wurden auf der Oberfläche an Position 4 in diesem Messzeitraum ermittelt. An Position 1 wurden Werte von 43,9 °C erreicht. Die gemessenen Höchsttemperaturen sowie die jeweiligen Mittelwerte der einzelnen Positionen einschließlich der Raumtemperatur sind in Tabelle 27 aufgezeigt.

Tabelle 27: Maximaltemperaturwerte sowie Mittelwerte der Oberflächentemperatur an den Zellen und im Raum

		Pos. 1	Pos. 2	Pos. 3	Pos. 4	Raum-temp.
		[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Messzeitraum 1 (alle Pixel aus)	Max. Temp.	41,6	43,0	43,2	43,9	20,4
	Mittelw. Temp.	38,8	40,0	40,5	40,9	18,8
Messzeitraum 2 (alle Pixel an)	Max. Temp.	43,9	44,9	46,4	47,0	22,3
	Mittelw. Temp.	42,2	43,1	44,7	45,1	20,7

Die Betriebstemperatur der Module sollte 85 °C nicht überschreiten. Trotz starker Einstrahlung stiegen die Oberflächentemperaturen nicht über 50 °C. Eine Überhitzung ist demnach nicht zu erwarten. Die Untersuchungen zum Temperaturverhalten unter Bestrahlung im Sonnensimulator erfolgten im Rahmen einer Bachelorarbeit von Christina Fuchs am ILEK [16].

Ergänzt wurde die Untersuchung zur Modulerwärmung durch Messungen am verbauten Isolierglas im Fassadentestgebäude. Das Isolierglas wurde mit Thermoelementen ausgestattet, um die Temperatur an den Außenoberflächen der Isolierverglasung sowie an den Modulen an mehreren Stellen bestimmen zu können. Die Temperaturwerte wurden auf der Innenseite der Innenscheibe, auf einem Pixel der Multipixel-Zelle und an beiden Seiten der Außenscheibe gemessen (Abbildung 72 und Abbildung 73). Der Messpunkt auf der Außenseite der Außenscheibe wurde mit einer hinterlüfteten Aluminiumfolie überdeckt, um eine direkte Einstrahlung durch die Sonne zu verhindern.

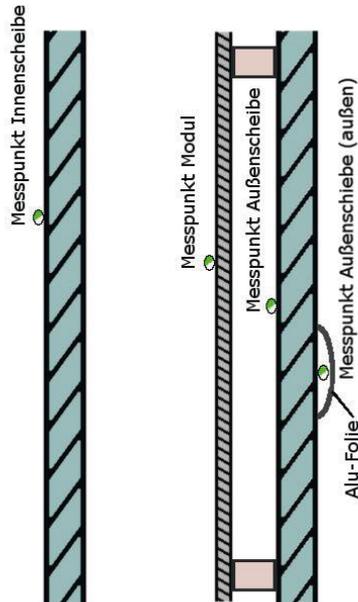


Abbildung 72: Schnitt durch die Isolierverglasung mit Positionen der Messpunkte zur Temperaturmessung

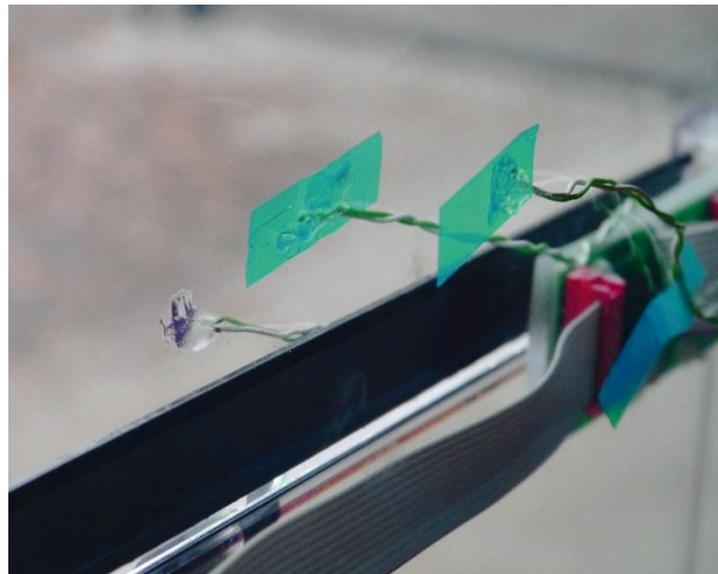


Abbildung 73: Anordnung der Thermoelemente in der Mitte des Isolierglases. Der zweite Messpunkt auf der Außenscheibe ist verdeckt und auf dem Foto nicht zu sehen. Zur Messung wurden alle Pixel in den Zustand minimaler Transmission geschaltet (Foto: J.Rettig / ILEK).

Anknüpfend an die Messungen im Labor wurde das Isolierglas im Fassadenprüfstand im Zustand minimaler Transmission (und dadurch maximaler Absorption) betrieben. Das entstehende Temperaturprofil sollte zeigen, ob auch beim Isolierglasaufbau die Temperaturen unterhalb des kritischen Wertes verbleiben. Am 25. August 2016, einem wolkenlosen Sommertag, wurde der Fassadenprüfstand von morgens bis abends durch die Sonne beschienen. Die auf die Fassadenfläche einwirkende maximale horizontale Solarstrahlung lag an diesem Tag bei 804 W/m^2 (Abbildung 74). Auf dem Dach des Prüfstands wurde an diesem Tag eine maximale Außentemperatur von $34,1 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Die auf der Moduloberfläche gemessene maximale Temperatur betrug $60,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Die höchste Temperatur am Isolierglasaufbau wurde auf der Innenseite der Außenscheibe registriert und betrug $68,3 \text{ }^\circ\text{C}$. Diese Temperaturwerte sind unkritisch und noch deutlich vom zulässigen Wert von $85 \text{ }^\circ\text{C}$ entfernt.

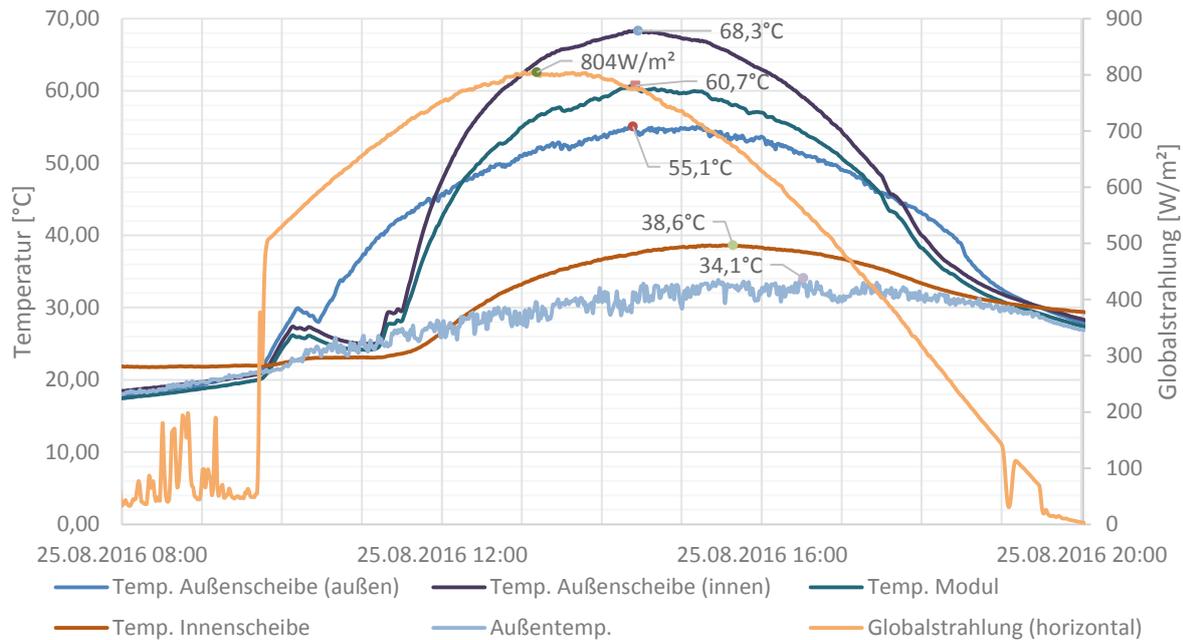


Abbildung 74: Temperaturen im Isolierglas an einem warmen, wolkenlosen Sommertag (25. August 2016)

Zwei Tage später (27. August 2016) wurden im Rahmen derselben Versuchsreihe etwas höhere Temperaturwerte im Isolierglas festgestellt. An diesem Tag mit fast wolkenfreiem Himmel betrug der Maximalwert der Außentemperatur 36,2 °C (Abbildung 75). Dabei erhitzte sich die Innenseite der Außenscheibe mit 68,9 °C wieder am stärksten. Die maximale Temperatur auf der Multipixel-Zelle betrug 61,5 °C.

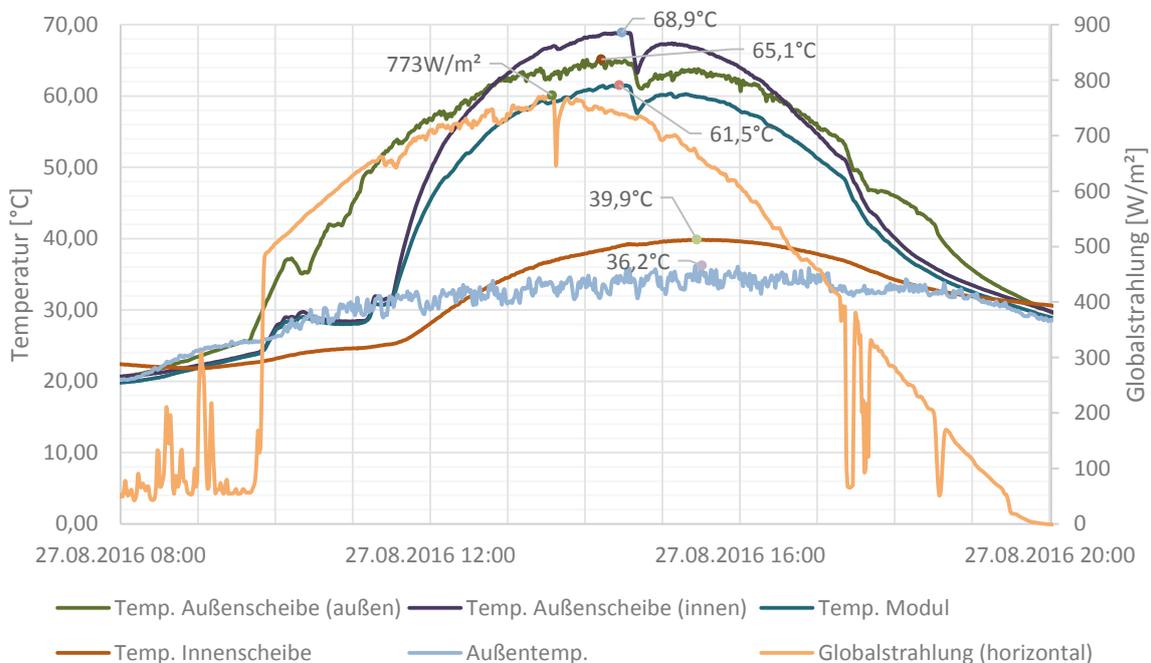


Abbildung 75: Temperaturen im Isolierglas an einem warmen Sommertag mit sehr wenig Bewölkung (27. August 2016)

Eine Überhitzung der Module über die bereits erwähnte maximale Betriebstemperatur von 85 °C erfolgte dabei ebenfalls nicht. Die Module befinden sich seit Juli 2015 im Isolierglasaufbau der Südfassade des Testgebäudes und zeigen keine optischen oder funktionalen Veränderungen.

7.4 Voruntersuchungen zur Montage der Multipixel-Module in einem Isolierglasaufbau

7.4.1 Klebeversuche für Befestigungselemente

Im Zwischenraum des Isolierglases werden hohe Temperaturen erwartet. Deshalb gehört zum Anforderungsprofil an die Befestigungsmethode eine gute Alterungsbeständigkeit bei erhöhten Temperaturen. Für diesen Zweck wurden mehrere Klebebänder und Flüssigklebstoffe untersucht, die für eine Fixierung der Halteelemente zur Modulbefestigung an der Außenscheibe der Isolierverglasung (vgl. Kap. 2.5.2) in Frage kamen.

Als Trägersubstrat für entsprechende Klebeversuche dienten Glasscheiben des Formats 150 mm x 100 mm x 10 mm. Als Probekörper dienten Polyethylen-Körper (PE-Körper) mit einer Grundfläche von 15 mm x 28 mm (Abbildung 76). Das Trägersubstrat und die Probekörper wurden mit Isopropanol gereinigt. Anschließend erfolgte die Anbringung der PE-Körper mit den verschiedenen Klebstoffen auf das Trägersubstrat. Danach erfolgte ein Anpressen der PE-Körper über einen Zeitraum von 48 Stunden mit 26,5 kg pro sechs Probekörper Anpressmasse. Nach dieser Konditionierung wurden die einzelnen Klebepunkte mit 120 g Massen belastet (Abbildung 77). Das entspricht der Masse der elektrischen Bauteile und dem Modulmassenanteil, den jeder Halter aufzunehmen hat. Anschließend erfolgten die Untersuchungen zum Temperaturverhalten im Heizschrank. Eine Probeserie ist in Abbildung 77 dargestellt.

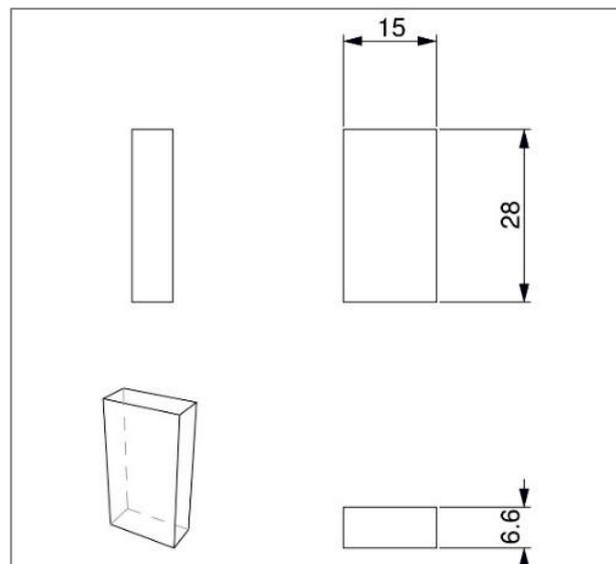


Abbildung 76: Maße der Polyethylen-Probekörper

Die Proben wurden in den Heizschrank gestellt, der auf 60 °C vorgewärmt war. Nach einer ausreichenden Aufwärmphase, nach der alle Proben diese Temperatur erreicht hatten, wurde der Heizschrank weiter auf 85 °C erhitzt. Bei dieser Temperatur erfolgten die Dauerstandsversuche.

Im Verlauf der Tests versagten die Klebungen zwischen Glas und PE-Körper bei folgenden Klebstoffen:

- Flüssigklebstoff Bohle Verifix 420 VIS
- 3M VHB Tape 4918 F
- 3M VHB Tape 5915
- 3M VHB Tape 5925
- 3M VHB Tape 5952



Abbildung 77: Proben im Heizschrank. Die Polyethylen-Körper sind auf das Trägersubstrat geklebt und mit einer angehängten Masse belastet worden.

In den letzten vier Tagen des Versuchs erfolgte die Abschaltung des Heizschrankes in der Zeit zwischen 12:00 Uhr und 15:00 Uhr. Bei geöffneter Ofentür konnten die Proben während dieser Zeit auf Raumtemperatur (23 °C) abkühlen. Während der restlichen 21 Stunden lief der Heizschrank mit einer Temperatur von 85 °C durch. Folgende Klebstoffe haben alle thermischen Einwirkungen bei der beschriebenen Schubbeanspruchung durch die angehängten Massen erfolgreich bestanden:

Flüssigklebstoff Bohle Verifix Zwei-Komponenten-Acrylat
3M VHB Tape DT 4941-3006-5
3M VHB Tape 4932

In Tabelle 28 sind die untersuchten Klebemittel und die Prüfergebnisse festgehalten.



Tabelle 28: Prüfergebnisse der Klebeversuche

Untersuchte Klebstoffe und Klebebänder			85 °C
Name	Type	Dicke (mm)	
Flüssigklebstoff Bohle Verifix 420 VIS, UV-Adhesive	Klebstoff	-	durchgefallen
Flüssigklebstoff Bohle Verifix Zwei-Komponenten-Acrylat	Klebstoff	-	bestanden
3M VHB Tape 4918 F (transparent) Abgelaufen 2012	Klebeband	2 mm	durchgefallen
3M VHB Tape DT 4941-3006-5 (grau) Abgelaufen 2012	Klebeband	1,1 mm	bestanden
3M VHB Tape 5915 (schwarz)	Klebeband	0,4 mm	durchgefallen
3M VHB Tape 5925 (schwarz)	Klebeband	0,6 mm	durchgefallen
3M VHB Tape 5952 (schwarz)	Klebeband	1,1 mm	durchgefallen
3M VHB Tape 4932 (transparent)	Klebeband	0,6 mm	bestanden

Um die Klebeeigenschaften auf einer beschichteten Glasscheibe zu ermitteln, erfolgten mit den drei Klebemitteln, die den ersten Test erfolgreich durchlaufen hatten (Tabelle 29), weitere Klebeversuche. Dazu wurden erneut Polyethylen-Körper auf eine Glasscheibe geklebt. Als Trägersubstrat diente hierbei eine 400 mm x 401 mm große Glasscheibe, auf der einseitig eine „Silverstar select“-Beschichtung (Glas Trösch GmbH) aufgebracht war. Auf diese Beschichtung wurden pro Klebesystem zwei mit Isopropanol gereinigte Probekörper auf der Schichtseite aufgebracht. Dieselbe Beschichtung befindet sich auf der Innenseite des Isolierglases, an die die Befestigungselemente angebracht werden sollten.

Die Verpressdauer für die Klebestellen betrug 72 Stunden und erfolgte mittels einer 26,5 kg Masse. Während der eigentlichen Prüfung im Heizofen wurden wiederum je Klebekörper 120 g Zusatzmasse an die Polyethylen-Körper gehängt (Abbildung 78). Zur Temperaturüberwachung war mittig auf der Glasscheibe ein Thermoelement befestigt.



Tabelle 29: Klebesysteme für die Klebung an der beschichteten Glasscheibe

Klebstoffe
Flüssigklebstoff Bohle Verifix Zwei-Komponenten-Acrylat
3M VHB Tape DT 4941-3006-5
3M VHB Tape 4932



Abbildung 78: Die Polyethylen-Körper wurden auf das Trägersubstrat geklebt und im Ofen gelagert

Es folgte wiederum das Vorheizen des Ofens auf 60 °C. Nach einer ausreichenden Aufwärmphase, nach der die Proben die Temperatur erreicht hatten, erfolgte das weitere Erwärmen des Heizschanks auf ca. 80 °C. Am dritten Versuchstag betrug die Temperatur 81,2 °C. Am siebten Versuchstag lag die Temperatur bei 81,9 °C. Ab dem zehnten Tag wurde der Heizschrank täglich für drei Stunden ausgeschaltet, wobei die Proben im Ofeninneren auf Raumtemperatur (23 °C) abkühlten. An den Wochenenden und an den Feiertagen blieb der Heizschrank im Dauerbetrieb. Eine detaillierte Darstellung des Prüfablaufs liefert Tabelle 30. Am Ende von Versuchsreihe 2 lieferten alle Klebstoffe ein positives Ergebnis. Tabelle 31 zeigt – neben den spezifischen Eigenschaften – das endgültige Prüfergebnis.



Tabelle 30: Prüfablauf der Versuche an Klebeverbindungen mit beschichtetem Glas

Tage	Aus- schatzeit	Einschalt- zeit	Flüssigklebstoff Bohle Verifix Zwei- Komponenten- Acrylat	3M VHB Tape DT 4941- 3006-5 Abgelaufen 2012	3M VHB Tape 4932
13.03.2015		12:50	Hinzugefügt	Hinzugefügt	Hinzugefügt
14.03.2015	W*	W*			
15.03.2015	W*	W*			
16.03.2015					
17.03.2015					
18.03.2015					
19.03.2015					
20.03.2015					
21.03.2015	W*	W*			
22.03.2015	W*	W*			
23.03.2015	15:15	18:15			
24.03.2015	12:40	15:45			
25.03.2015	12:00	15:35			
26.03.2015	12:35	16:00			
27.03.2015	12:25	15:55			
28.03.2015	W*	W*			
29.03.2015	W*	W*			
30.03.2015	12:35	15:55			
31.03.2015	12:40	15:35			
01.04.2015	12:30	16:45			
02.04.2015	12:45	16:15			
03.04.2015	F*	F*			
04.04.2015	W*	W*			
05.04.2015	W*	W*			
06.04.2015	F*	F*			
07.04.2015	14:00	18:00			
08.04.2015	12:30	16:15			
09.04.2015	12:40	16:10			
10.04.2015	13:00		Test bestanden	Test bestanden	Test bestanden

F* = Feiertag

W* = Wochenende



Tabelle 31: Prüfergebnisse der Klebeversuche

Untersuchte Klebstoffe und Klebebänder				Temperatur 80 °C
Bezeichnung	Typ	Dicke [mm]	Geklebte Seite	
Flüssigklebstoff Bohle Verifix Zwei-Komponenten-Acrylat	Klebstoff	-	auf Schichtseite geklebt	bestanden
3M VHB Tape DT 4941-3006-5 (grau) Abgelaufen 2012	Klebeband	1,1	auf Schichtseite geklebt	bestanden
3M VHB Tape 4932 (transparent)	Klebeband	0,6	auf Schichtseite geklebt	bestanden

Nachdem alle drei Proben auch diesen Test bestanden hatten, musste ein Kriterium zur Auswahl eines Klebesystems festgelegt werden. Es zeichnete sich ab, dass ein präzises Positionieren der Halter mit einem Flüssigklebstoff einfacher sein würde, als es beim Umgang mit Klebebändern möglich gewesen wäre. Deshalb fiel die Wahl auf den einzig verbliebenen Flüssigklebstoff „Bohle Verifix Zwei-Komponenten-Acrylat“. Dieser fand Verwendung zur Anbringung der Modulhalter an die Außenscheibe der Isoliergläser.

7.4.2 Tageslichtmessung im Fassadentestgebäude

Im Rahmen von Untersuchungen zum Einfluss der schaltbaren Verglasung auf die Helligkeitsverteilung im Innenraum und die Blendvermeidung erfolgten am Fassadenprüfstand des ILEK seit Dezember 2015 entsprechende Messungen.

Die maximale Transmission (T_{vis}) der Isolierverglasung mit eingebauten schaltbaren Modulen liegt bei unter 40 % und damit deutlich niedriger als bei einem Zweifach- oder Dreifach-Isolierglas aus Kalknatronglas (2 x 4 mm: $T_{vis} = 74 \%$; 3 x 4 mm: $T_{vis} = 64 \%$). Daher stellte sich die Frage, ob damit dennoch die Anforderungen hinsichtlich der nötigen Beleuchtungsstärken im Innenraum zu erfüllen sind. Nachfolgend dargestellt sind die entsprechenden Untersuchungen hierzu.

Der Testraum des Fassadenprüfstands weist Abmessungen von 2 m Breite, 4,20 m Tiefe sowie eine Höhe von 2,70 m auf. Die Flüssigkristallverglasung ist nach Süden orientiert und bedeckt eine Fläche von 1,61 m (Breite) x 2,45 m (Höhe). Für kleine Räume wird laut DIN 12464-1 ein Messraster von 0,60 m x 0,60 m für die Helligkeitsmessung im Innenraum empfohlen (Abbildung 79).

Empfohlenes Rastermaß für Räume und Bereiche		
	Längste Bereichs- oder Raumausdehnung	Rastermaß
Bereiche der Sehaufgabe	ca. 1 m	0,2 m
kleine Räume/ Raumzonen	ca. 5 m	0,6 m
mittlere Räume	ca. 10 m	1 m
große Räume	ca. 50 m	3 m

Abbildung 79: Empfohlenes Rastermaß [18]



	Horizontal E_H [m über dem Boden]	Vertikal E_V [m über dem Boden]
überwiegend stehende Tätigkeiten	0,85	1,60
überwiegend sitzende Tätigkeiten	0,75	1,20
Verkehrswege z. B. Flure und Treppen	bis 0,20	

Abbildung 80: Vorgaben zur Höhe der horizontalen Messebene für die Beleuchtungsstärkemessung [18]

Zusätzlich soll entlang der raumumschließenden Flächen ein Streifen von 0,50 m unberücksichtigt bleiben [18]. Die horizontale Messebene liegt, wie in der Arbeitsschutzrichtlinie (ASR) A3.4 beschrieben, 0,75 m über dem Boden (Abbildung 80). Aufgrund der geringen Breite des Testraumes wurde die Rasterbreite von 0,60 m auf 0,50 m und der nicht zu berücksichtigende Randstreifen auf 0,25 m bzw. 0,30 m reduziert. Somit ergeben sich 18 Messpunkte (Abbildung 81). Punkt 0 ist ein zusätzlicher Messpunkt in Raummitte mit dem Abstand zur Glasfassade von 1,0 m. Dieser stellt den Punkt dar, an dem der Kopf einer Testperson an ihrem Schreibtisch sitzend angenommen wird (Abbildung 82).

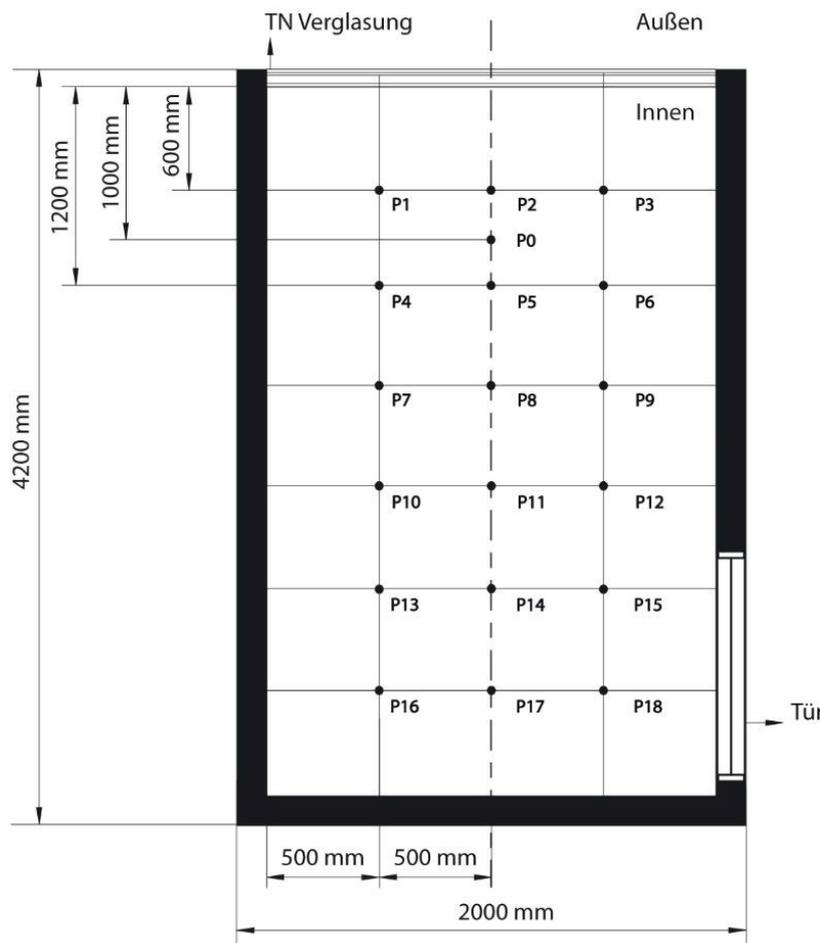


Abbildung 81: Raster der Messstellen für die Beleuchtungsstärkemessung (Raumgrundriss) im Testraum des Fassadentestgebäudes

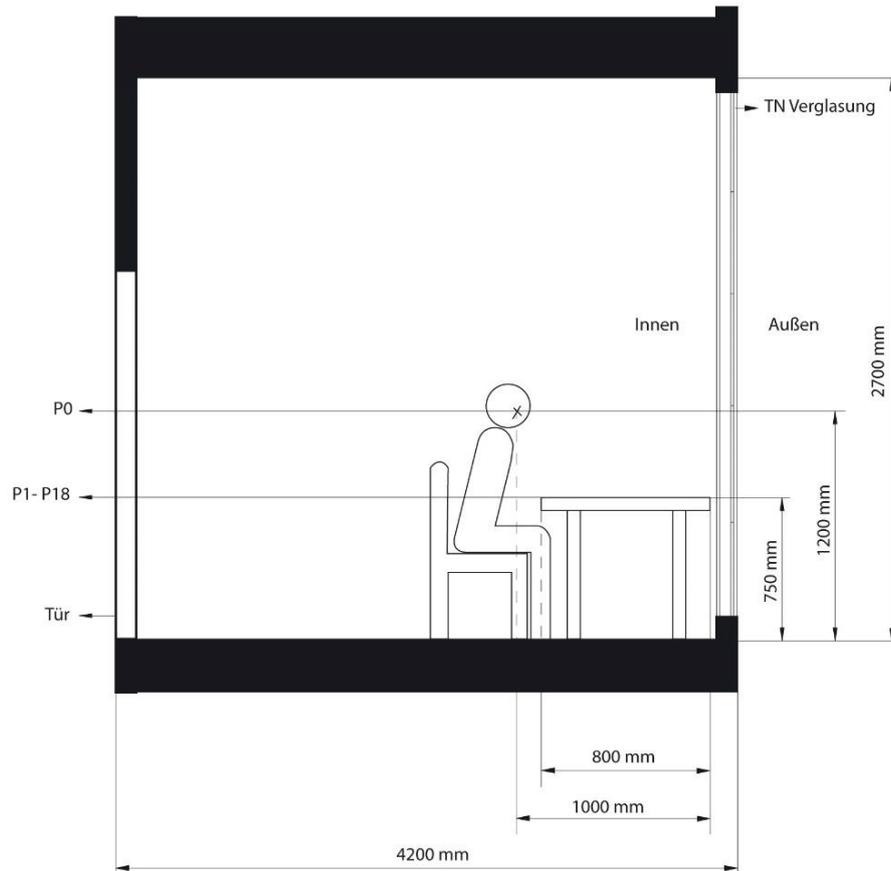


Abbildung 82: Messhöhe der Helligkeitsmesspunkte (P1- P18: 0,75 m, P0: 1,2 m)

Messtechnik

Zur messtechnischen Ausrüstung gehörten unter anderem zwei Beleuchtungsstärkemessköpfe der Firma Ahlborn vom Typ FLA 623 VL. Diese messen die Helligkeit mit entsprechender Gewichtung mit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges und geben die Beleuchtungsstärke mit einem absoluten Fehler von weniger als 5 % wieder (Abbildung 83).

Gemeinsame Technische Daten

Diffusor:	PTFE
cos-Korrektur:	Fehler f2 < 3 %
Linearität:	< 1 %
absoluter Fehler:	< 10 % (< 5 % für FLA623VL)
V-Lambda Anpassung:	< 3 % (nur für FLA623VL)
Nenntemperatur:	22°C ±2 K
Arbeitstemperatur:	-20°C bis +60°C
Signalausgang:	0 bis 2 V
Einschaltzeit:	< 1 s
Energieversorgung:	über ALMEMO® Stecker (5 bis 15 V DC)

Abbildung 83: Technische Daten Beleuchtungsstärkemessköpfe [19]

Ergänzt werden sie durch ein Ahlborn Almemo 2890-9 Datenerfassungsgerät. Dieses verarbeitet die empfangenen Messwerte der Sensoren und gibt die gemessenen Beleuchtungsstärken auf dem Gerätedisplay wieder. Die Beleuchtungsstärkemessköpfe besitzen jeweils zwei Messkanäle:



Messkanal 1: bis ca. 20.000 lx

Messkanal 2: bis ca. 170 klx

Für Werte < 1000 lx wurde ausschließlich der erste Messkanal benutzt, um eine möglichst große Messgenauigkeit zu erzielen.

Messverfahren

Die Messungen erfolgten wie nachfolgend beschrieben. Der erste Messkopf wurde auf einem 75 cm hohen Stativ befestigt und diente als Innensensor. Der zweite Messkopf wurde, auf derselben Höhe, außen vor der Glasfassade angebracht. In Kombination mit der Mehrkanalanzeige des Präzisionsmessgerätes konnten somit der Wert des Außensensors und der Wert des Innensensors gleichzeitig gemessen und verglichen bzw. ins Verhältnis gesetzt werden. Das Stativ mit dem Innensensor wurde nacheinander auf alle 18 Messpunkte gestellt und die jeweilige Beleuchtungsstärke für außen und innen erfasst und aufgezeichnet. Die Messungen erfolgten an den Messtagen von 8:30 Uhr bis 16:30 Uhr jeweils einmal pro Stunde. Beginn der Messungen war der 02.12.2015. Die Vermessung erfolgte einmal pro Woche bis zum 11.05.2016, um auch verschiedene Wettersituationen zu erfassen. Die genauen Messtermine sind in Tabelle 32 aufgeführt.

Tabelle 32: Übersicht der Messtage der Beleuchtungsstärkemessungen im Testraum

Tag / Zeit	08:30	09:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30
02.12.2015	X	X	X	X	X	X	X	X	X
09.12.2015	X	X	X	X	X	X	X	X	X
16.12.2015	X	X	X	X	X	X	X	X	X
13.01.2016	X	X	X	X	X	X	X	X	X
20.01.2016	X	X	X	X	X	X	X	X	X
27.01.2016	X	X	X	X	X	X	X	X	X
24.02.2016		X	X	X	X		X	X	X
09.03.2016	X	X	X	X	X	X	X	X	X
23.03.2016	X	X	X	X	X	X	X	X	X
01.04.2016	X	X	X	X	X	X	X	X	X
06.04.2016	X	X	X	X		X	X	X	X
20.04.2016		X	X	X	X	X	X	X	X
27.04.2016		X	X	X	X	X	X	X	X
02.05.2016		X	X	X	X	X	X	X	X
11.05.2016	X	X	X	X	X	X	X	X	X

X=Messung durchgeführt

Messungen mit einem Verschattungsleck zur Blendvermeidung

Zur Vermeidung von Blendung an der Position der sitzenden Person nach Abbildung 82 erfolgten Untersuchungen mit einem Verdunklungsleck. Die Darstellung des Flecks erfolgte an der jeweils zur Blendvermeidung nötigen Stelle der Verglasung.

In Abbildung 84 ist der kreisflächenförmige Verschattungsbereich dargestellt. Die Vermessung der Innenraumhelligkeit erfolgte zur Evaluierung der Effektivität dieser Blendschutzmaßnahme.

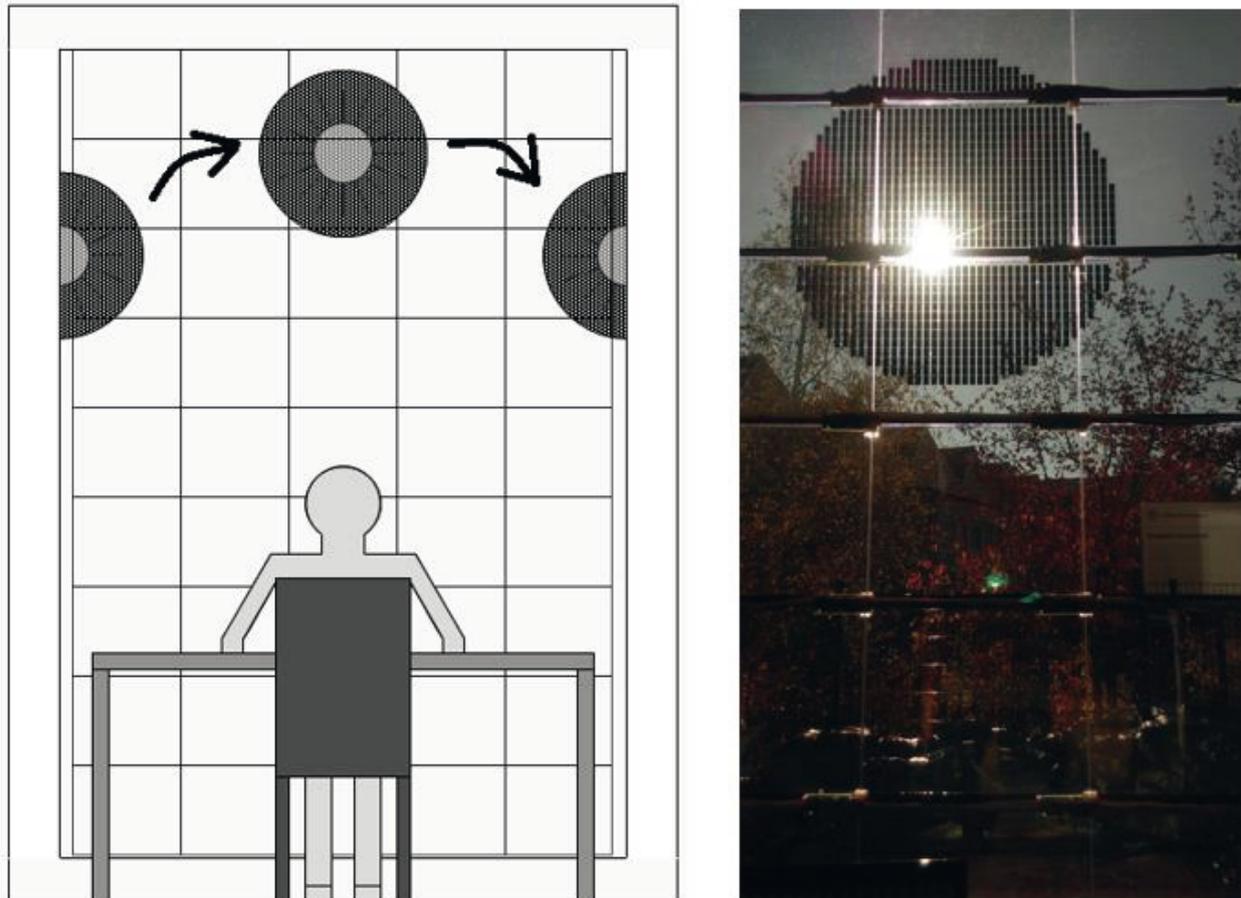


Abbildung 84: Funktionsprinzip der Blendvermeidung durch Projektion einer Verschattungsfläche (links). Foto der Verglasung mit Verschattungsfläche (rechts).

Eine Person im Raum soll über den gesamten Tagesverlauf vor der direkten Blendung durch die Sonne geschützt werden können. Dies ist vor allem im Frühling, Herbst und Winter bei niedrigen Sonnenständen sinnvoll. Zum einen wird eine direkte Blendung durch die tief stehende Sonne gemindert oder im Idealfall sogar ganz vermieden, zum anderen bleibt der solare Wärmegewinn maximal, da nur ein sehr kleiner Teil der Fassade für die direkte Sonnenstrahlung undurchlässig gemacht wird. Die Einstrahlung auf die übrige Verglasungsfläche kann zur Tageslichtnutzung sowie zur Raumbeheizung verwendet werden. Bei den durchgeführten Versuchen wurde vorausgesetzt, dass die Position des Kopfs der fiktiven Person sich am Punkt 0 befand. Die Höhe wurde auf 1,2 m festgelegt (Abbildung 82), was der Augenhöhe einer sitzenden Person entspricht [20]. Der Verschattungsleck hatte einen Durchmesser von ca. 50 cm auf der Fassade.



Auswertung der Messungen

Untersucht wurden die Transmissionswerte der pixelierten Flüssigkristallfassade bei verschiedenen Wettersituationen und zu verschiedenen Jahreszeiten. Es sollte hierbei die Praxistauglichkeit der Fassade bezüglich der Blendvermeidung, speziell für die Büronutzung, überprüft werden. Des Weiteren ging es um die Ermittlung des Einflusses der schaltbaren Verglasung auf die Gesamthelligkeit im Raum sowie die Helligkeitsverteilung im Raum. Zudem sollte geklärt werden, inwiefern ein gezieltes Abdunkeln bestimmter Pixel der Fassade (durch den Verschattungsleck) bei tiefstehender Sonne, die auftretende Blendung mindert beziehungsweise verhindert.

Einfluss der Verschattung auf die Helligkeit im Raum

Zunächst erfolgte eine Messung zur Bestimmung des Einflusses des Verschattungspunktes auf die Helligkeit im Testraum. Hierfür wurden an einem klaren, sonnigen Tag die einzelnen Messpunkte pro Messdurchgang jeweils zweimal vermessen – einmal mit eingeschaltetem und einmal mit ausgeschaltetem Verschattungspunkt. Um Veränderungen des Sonnenstandes und der Strahlungsleistung näherungsweise auszuschließen, erfolgten die beiden Messungen an den einzelnen Messpunkten jeweils zeitlich unmittelbar hintereinander.

Die Auswertung der Messdaten zeigt, dass der Einfluss des Verschattungspunktes auf die Gesamthelligkeit des Raumes in knapp 88 % der vermessenen Fälle zu einer Reduktion der Gesamthelligkeit von weniger als 1 % führt und einen Wert von 2,5 % nie übersteigt (Tabelle 33 und Abbildung 85). Aus der Auswertung ausgeschlossen wurden jene Messpunkte, bei denen der Sensor des Messkopfes im Verschattungsbereich lag.

Das Verhältnis der Flächen von Verdunkelungsleck zur mit Modulen belegten Verglasungsfläche errechnet sich zu 4,9 %. Der geringe Einfluss des Verdunkelungsflecks auf die Gesamtbeleuchtungsstärke im Raum ist daher plausibel.

Schlussfolgerung ist also, dass bei Sonneneinstrahlung der Verschattungsleck die Gesamthelligkeit des Raumes nicht nennenswert beeinflusst.

Tabelle 33: Einfluss des Verschattungsflecks auf die Gesamthelligkeit im Raum. Für die Helligkeitsreduktions-Klassen sind die Auftretenshäufigkeiten angegeben. Klassen entsprechen der prozentualen Reduktion der Gesamthelligkeit.

<i>Klasse</i>	<i>Häufigkeit</i>	<i>Kumuliert %</i>
≤ 0,5	89	75,42%
[0,51-1,0]	15	88,14%
[1,01-1,5]	6	93,22%
[1,51-2,0]	5	97,46%
[2,01-2,5]	3	100,00%
> 2,5	0	100,00%
Gesamt	118	

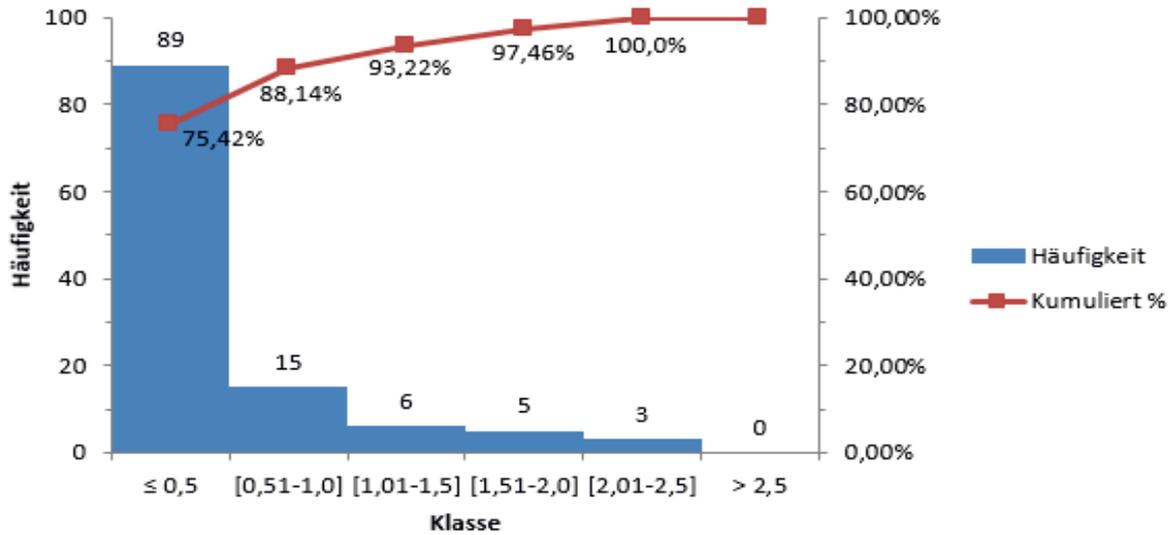


Abbildung 85: Häufigkeitsverteilung der prozentualen Reduktion der Gesamthelligkeit im Raum

Helligkeitsverteilung mit Verschattungsleck

Durch den Verschattungsleck auf der Verglasung entsteht ein Schattenwurf in den Raum, der sich bei der Helligkeitsverteilung im Raum bemerkbar macht. Die Helligkeitswerte im Schatten des Fleckes werden durch diesen reduziert. Dies ist für einen wolkenlosen Tag im Januar 2016 exemplarisch in Abbildung 86 dargestellt.

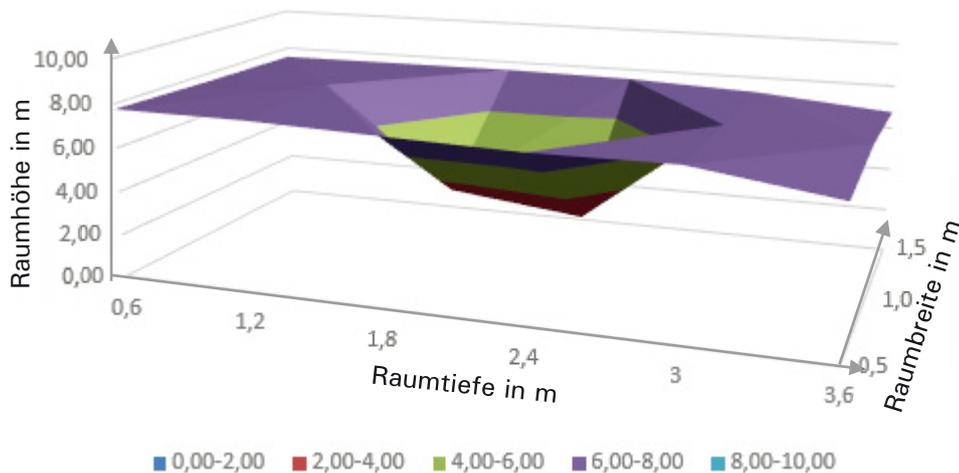


Abbildung 86: Beleuchtungsstärkeverteilung [klx] am 20.01.2016 um 12:30 Uhr bei wolkenlosem Himmel und Einsatz des Verschattungsleckes

Blendbewertung

Den anspruchsvollsten Teil der Auswertung von Helligkeitsmessungen in Räumen stellt die Bewertung eventuell auftretender Blendung dar. In der Literatur wird prinzipiell zwischen drei Blendungsarten unterschieden: die grelle Blendung, auch als Vollblendung bezeichnet, die physiologische und die psychologische Blendung. Die drei Blendungsarten [21] werden im Folgenden kurz erläutert:

- Grelle Blendung

Verstanden wird darunter eine Blendung, die ein klares Sehen unmöglich macht und dazu zwingt, instinktiv die Augen zu schließen oder sich wegzudrehen. Dies kann die Sehfunktion



auch in der Zeit nach der eigentlichen Blendung noch stark beeinflussen. Die Augen müssen sich nach der Blendung erst regenerieren.

- Physiologische Blendung

Eine messbare Herabsetzung der Sehleistung wird nach DIN EN 12665 als physiologische Blendung bezeichnet. Die physiologische Blendung beeinträchtigt die Sehleistung messbar, ohne jedoch das Sehen ganz zu verhindern. Je nach Helligkeit der Blendquelle beziehungsweise deren Position im Sichtfeld wird diese als mehr oder weniger störend empfunden. Es zeigt sich eine negative Beeinflussung der Kantenschärfe, Farbwahrnehmung und des Kontrasts des zu betrachtenden Objekts.

- Psychologische Blendung

Im Gegensatz zur physiologischen Blendung ist die psychologische Blendung messtechnisch weder quantifizierbar noch optisch-visuell nachweisbar. Sie kommt häufig in Innenräumen vor und tritt dann in Erscheinung, wenn ein aufgrund des qualitativen Urteils eines Beobachterkollektivs ermittelter Grenzwert von gerade noch annehmbarer hin zu gerade unannehmbare Blendung überschritten wird [21].

Die psychologische Blendung stellt die sensibelste der drei Arten der Blendung dar, da sie schon bei deutlich geringeren Leuchtdichten auftreten kann als die physiologische oder gar die grelle Blendung. Wenn es gelingt, psychologische Blendung zu vermeiden, so kann ein Auftreten der anderen beiden Blendungsarten ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund werden die Messergebnisse in Bezug auf psychologische Blendung ausgewertet. Mit der Suche nach einer Methode zur Bewertung haben sich in der Vergangenheit schon einige Wissenschaftler beschäftigt, allerdings meist bezogen auf den Einfluss aus künstlicher Beleuchtung. Das erste anerkannte Verfahren zur Blendungsmessung aufgrund von Tageslicht stellte Jan Wienold 2009 in seiner Dissertation „Daylight Glare in Offices“ vor [22]. Das hierin beschriebene Verfahren wird zur Bewertung der Messdaten in Bezug auf Blendung herangezogen. Die zwei wichtigsten Faktoren in diesem Verfahren sind zum einen die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge der fiktiven Testperson und zum anderen die verschiedenen Leuchtdichten im Blickfeld bzw. das Verhältnis dieser zur vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge.

Das entwickelte Blendungsbewertungsverfahren ist bekannt als „Daylight Glare Probability“ (DGP). Die Formel ist empirischer Natur und basiert auf der vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge sowie einem Term, der die einzelnen Blendquellen berücksichtigt [22].

$$DGP = 5,87 \cdot 10^{-5} \cdot E_v + 9,18 \cdot 10^{-2} \cdot \log\left(1 + \sum_i \frac{L_{s,i}^2 \cdot \omega_{s,i}}{E_v^{1,87} \cdot P_i^2}\right) + 0,16 \quad (6)$$

E_v	= vertikale Beleuchtungsstärke am Auge [lx]
L_s	= Leuchtdichte der Blendquelle [cd/m ²]
ω_s	= Raumwinkel Blendquelle [rad]
P_i	= Positionsindex [-]

Der Gültigkeitsbereich der DGP-Formel liegt im Bereich von 0,2 bis 0,8 und einer minimalen vertikalen Beleuchtungsstärke am Auge von 380 Lux. Bei Werten unter 0,4 besteht keine Blendgefahr.

Einige Messungen der vertikalen Beleuchtungsstärke am Messpunkt 0 bei Sonnenschein haben ergeben, dass der Verschattungspunkt die gemessene Beleuchtungsstärke um bis zu 55 % senkt. Demzufolge kann in Bezug auf die vertikale Beleuchtungsstärke am Auge davon ausgegangen werden, dass eine deutliche Senkung des DGP-Werts erzielt werden kann. Ob allerdings DGP-Werte erzielt werden



können, die unter 0,4 liegen, konnte mit der einfachen Helligkeitsmessung nicht ermittelt werden. Die entsprechenden Untersuchungen sind vorgesehen unter Verwendung einer erweiterten Messausrüstung.

Aus gekoppelten Simulationen zum Innenraumklima und der Tageslichtbeleuchtung für den Testraum mit der TN-Verglasung [23] ist bekannt, dass ein Wert für die Lichtdurchlässigkeit von $T_{vis} < 0,03$ zur vollständigen Blendvermeidung erforderlich ist. Der Wert von $T_{vis} = 0,13$, der mit den eingebauten Modulen erreichbar werden kann, ist für eine vollständige Blendvermeidung noch zu hoch. Um einen geringeren Wert zu erzielen, muss der Füllfaktor (Tabelle 5) vergrößert werden. Mit einem geeigneten Pixellayout ist ein entsprechend geringer Durchlässigkeitswert aber durchaus erreichbar.

Helligkeitsverteilung im Raum ohne Verschattungspunkt an bewölkten Tagen

Bei vollständiger Bewölkung erfolgt der Solarstrahlungseintrag auf die Verglasung überwiegend durch diffuse Bestrahlung. Das Setzen eines Verschattungsflecks ist in diesem Fall nicht zielführend, da Blendung dabei eher selten auftritt. An entsprechenden Tagen erfolgten Helligkeitsmessungen im Zustand maximaler Transmission der Fassade. Die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben. Exemplarisch dargestellt sind nachfolgend zwei charakteristische Beleuchtungsstärkediagramme. Der typische Helligkeitsabfall mit zunehmender Raumtiefe ist gut erkennbar. Zudem wird deutlich, dass die Helligkeitsunterschiede mit zunehmender Raumtiefe abnehmen (Abbildung 87, Abbildung 88).

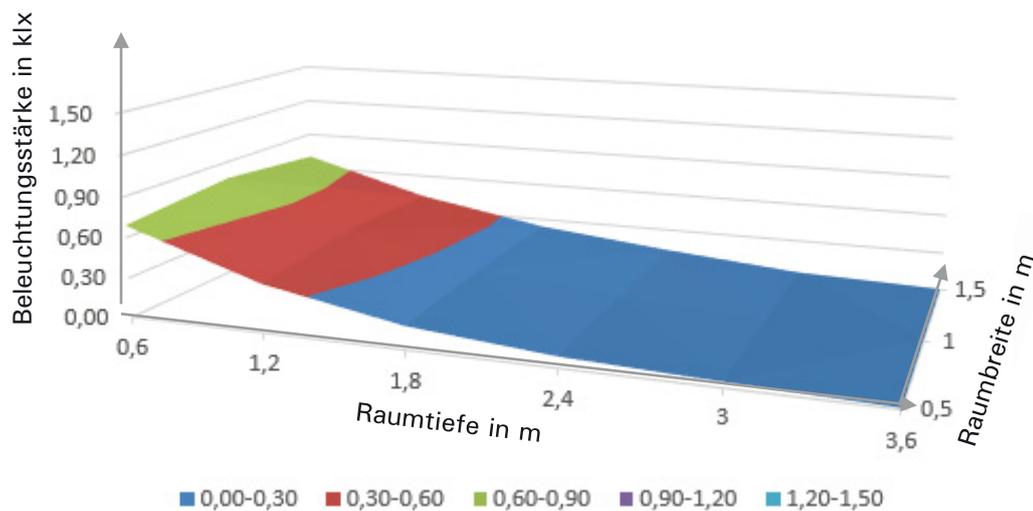


Abbildung 87: Beleuchtungsstärke [klx] am 09.12.2015 um 11:30 Uhr bei maximaler Transmission der Verglasung

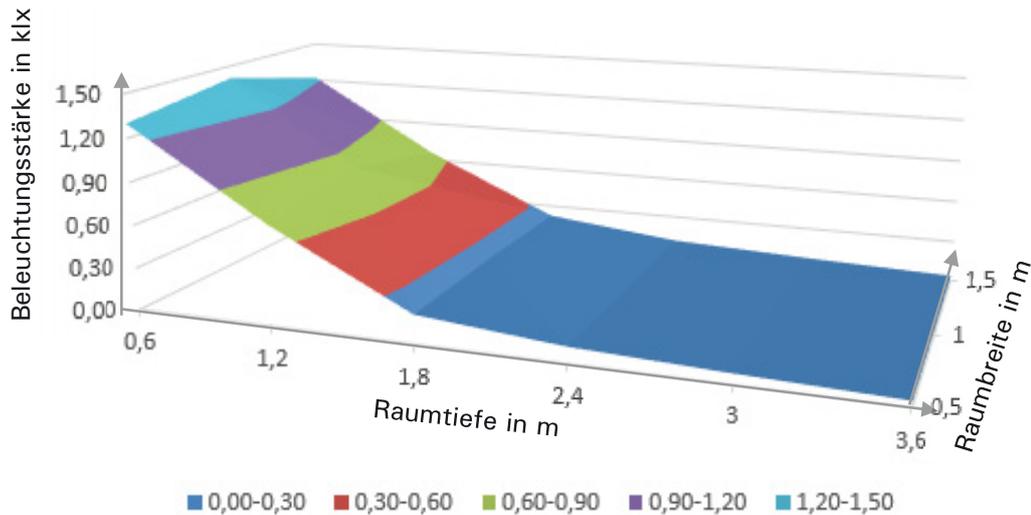


Abbildung 88: Beleuchtungsstärke [klx] am 23.03.2016 um 11:30 Uhr bei maximaler Transmission der Verglasung

Um den Helligkeitsverlauf bewerten zu können, muss dieser mit anderen Fassaden vergleichbar gemacht werden. Hierfür kann der Tageslichtquotient D herangezogen werden. Dieser beschreibt das Verhältnis der Helligkeit an einem Punkt im Raum zum Helligkeitswert vor der Fassade auf gleicher Höhe:

$$\frac{E_i}{E_a} 100 = D \quad (7)$$

E_i = Beleuchtungsstärke innen [lx]

E_a = Beleuchtungsstärke außen [lx]

D = Tageslichtquotient [%]

Die innen im Raum gemessene Beleuchtungsstärke des jeweiligen Messpunktes wird durch die zum gleichen Zeitpunkt außen gemessene Beleuchtungsstärke geteilt. Das Ergebnis, der Tageslichtquotient D , gibt somit den prozentualen Anteil der Außenhelligkeit an, die am jeweiligen Messpunkt ankommt. In der DIN 5034 ist der Tageslichtquotient lediglich für bedeckten Himmel definiert. Der Tageslichtquotient wird bei den hier durchgeführten Untersuchungen auch unter wolkenfreien Verhältnissen verwendet. Um den Abfall des Tageslichtquotienten mit der Raumtiefe darzustellen, wurden die Messpunkte in Raummitte nach Abbildung 81 herangezogen (P2, P5, P8, P11, P14, P17).

Mindestbeleuchtungsstärke für Büroarbeitsplätze

Der Mindestwert der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz hängt maßgeblich von der Art des Arbeitsplatzes bzw. von der zu verrichtenden Sehaufgabe ab. Die DIN 12464-1 fordert für gewöhnliche Bildschirmarbeitsplätze eine Mindestbeleuchtungsstärke von 500 Lux, um die dabei anfallende Sehaufgabe zuverlässig erledigen zu können (Abbildung 89) [23]. Entsprechend den Angaben in DIN 3034-1 genügt bei der ausschließlichen Beleuchtung mit Tageslicht jedoch der 0,6-fache Wert des in DIN 12464-1 geforderten Mindestwertes. Dies würde in dem betrachteten Fall eines Bildschirmarbeitsplatzes eine Mindestbeleuchtungsstärke von 300 Lux bedeuten. Verschiedene Studien haben ergeben, dass Probanden bei der ausschließlichen Versorgung des Arbeitsplatzes mit Tageslicht deutlich toleranter sind als bei Beleuchtung mit künstlichem Licht. Das heißt, dass auch bei geringeren Beleuchtungsstärken durch Tageslicht dieses noch als ausreichend hell empfunden wird. Zudem zeigte sich dabei, dass bei



Tageslichtversorgung auch höhere Beleuchtungsstärken akzeptiert werden, die bei künstlicher Beleuchtung schon als unangenehm hell empfunden werden.

Im Messzeitraum vom 2.12.2015 bis zum 11.05.2016 (Tabelle 32) erfolgte die Erfassung der Beleuchtungsstärke im Innenraum an den ausgewählten Messpunkten sowie außen direkt vor der Verglasung auf jeweils gleicher Höhe (mittig zur Verglasung). Aus den Wertepaaren der Beleuchtungsstärke innen sowie außen konnten die Diagramme Abbildung 90 und Abbildung 91 erstellt werden. Der Grenzwert der Innenraumbeluchtungsstärke von 300 Lux wird bei einer Außenbeleuchtungsstärke von ca. 5000 Lux erreicht (Abbildung 90). Beim Ansatz eines Grenzwertes von 500 Lux für die Innenraumbeluchtungsstärke ist ein Außenwert von ca. 9000 Lux erforderlich (Abbildung 91). Betrachtet wurden dabei die Punkte der ersten Reihe (P1, P2, P3 nach Abbildung 81), da diese im Bereich des festgelegten, fiktiven Arbeitsplatzes lagen.

Ref. Nr.	Art des Innenraum(bereich)s, des Bereichs der Sehaufgabe oder des Bereichs der Tätigkeit	\bar{E}_m lx	UGR_L –	U_o –	R_a –	Spezifische Bedingungen
5.26.1	Ablegen, Kopieren, usw.	300	19	0,40	80	
5.26.2	Schreiben, Schreibmaschinenschreiben, Lesen, Datenverarbeitung	500	19	0,60	80	Bildschirmarbeit siehe 4.9.
5.26.3	Technisches Zeichnen	750	16	0,70	80	
5.26.4	CAD-Arbeitsplätze	500	19	0,60	80	Bildschirmarbeit siehe 4.9.
5.26.5	Konferenz- und Besprechungsräume	500	19	0,60	80	Beleuchtung sollte regelbar sein.
5.26.6	Empfangstheke	300	22	0,60	80	
5.26.7	Archive	200	25	0,40	80	

Abbildung 89: Mindestbeleuchtungsstärke für Büros [23]

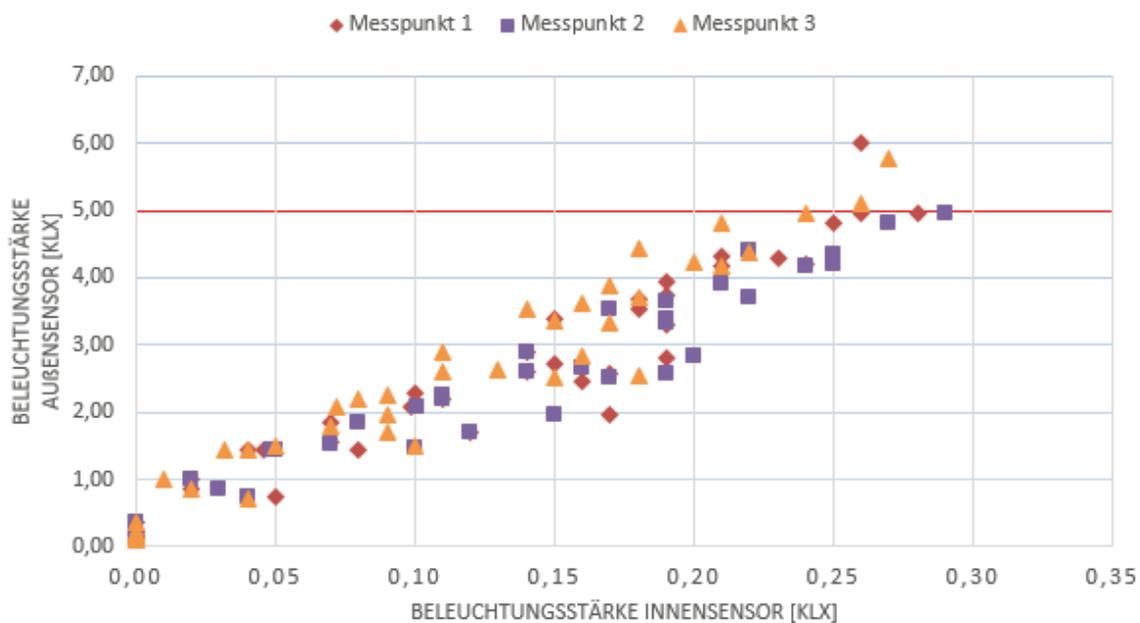


Abbildung 90: Messergebnisse für Punkt 1, Punkt 2 und Punkt 3; $E_i < 300$ lx

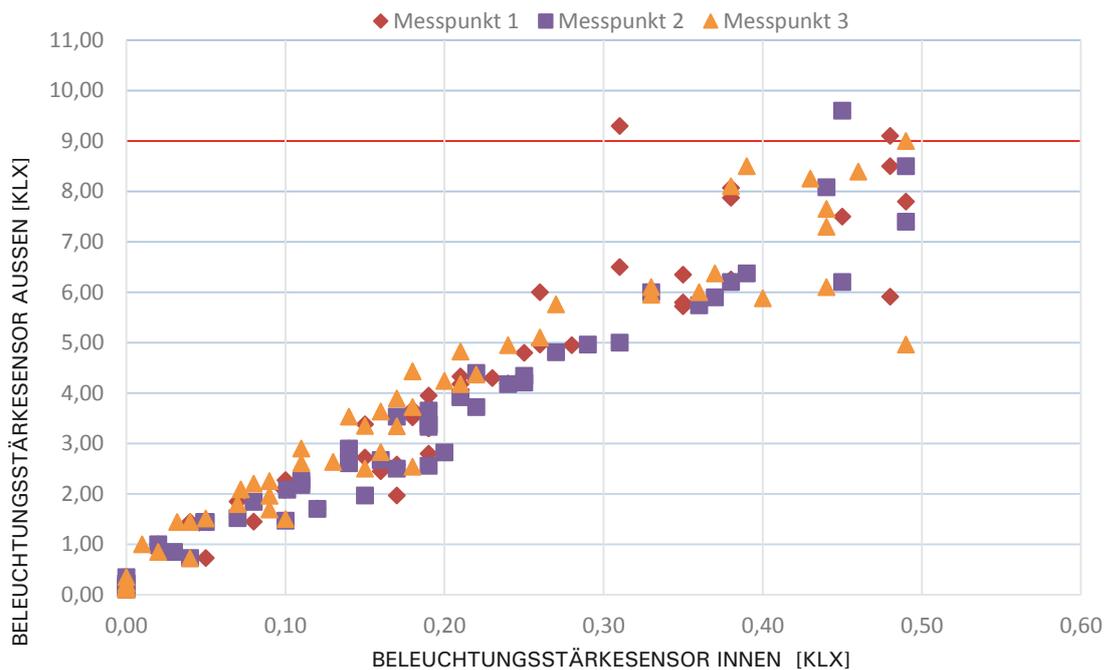


Abbildung 91: Messergebnisse für Punkt 1, Punkt 2 und Punkt 3; $E_i < 500$ lx

Eine deutlich umfangreichere statistische Auswertung der Beleuchtungsstärke auf die Horizontale bezüglich des Zusammenhangs von Außen- und Innenraumbeleuchtungsstärke umfasst den Zeitraum vom 1.2. bis zum 31.10.2016. Die Messdatenerfassung der Sensorwerte erfolgte dabei im Abstand von jeweils einer Minute. Ausgewertet wurde der Zeitraum von 8:00 Uhr morgens bis 17:00 Uhr abends, um einen üblichen Büroarbeitstag zu umfassen. Der Innenraumsensor befand sich dabei auf Position 1 nach Abbildung 81. Der Außensensor war rechts außen neben der Verglasung auf gleicher Höhe montiert. Der Grenzwert der Beleuchtungsstärke auf die Horizontale am Punkt 1 von 300 Lux wurde in ca. 98,4 % der Arbeitszeit überschritten. Eine Grenzwertüberschreitung der Beleuchtungsstärke von 500 Lux erfolgte in ca. 92,6 % der Arbeitszeit. Die entsprechenden Messungen werden fortgeführt, um ein vollständiges Jahr auswerten zu können.

Der Nachweis der Langzeitstabilität der TN-Modulverglasung ist für deren spätere Einsetzbarkeit eminent wichtig. Im Rahmen der Projektlaufzeit kann ein solcher nicht vollständig erbracht, sondern lediglich begonnen werden. Aus Vorläuferprojekten erwähnt in [2] und [3] ist bekannt, dass die Polarisationsfolien hierbei besondere Beachtung finden sollten.

7.5 Herstellung von Proben für Langzeitversuche im Freiland

Zur Untersuchung der Alterung der Polarisatorfolien und deren Verklebung auf Glas wurden geeignete Muster hergestellt. Nach einer spektrometrischen Vermessung konnten diese im Freilandversuchsstand des Instituts dem Alterungstest ausgesetzt werden. Sie werden fortlaufend weiter beobachtet und vermessen.

Die Module im Isolierglasaufbau sollen ebenfalls noch weitere Jahre im Testgebäude verbleiben und dort beforscht werden. Hierbei ist vorgesehen, deren Einfluss auf die Licht- und Energieregulung bei Anwendung unterschiedlicher Regelungsstrategien zu untersuchen.

7.5.1 Laminieren von Polarisationsfolien in einem Glasscheibenverbund mittels TPU-Folie

Zur Realisierung einer bestmöglichen thermischen Anbindung der Module an die Außenscheibe der Isolierverglasung sollte das Anlaminieren mittels einer Verbundfolie untersucht werden. Die entsprechenden Probenaufbauten bestanden aus einem Träger- und einem Deckglas, zwei Polarisatorfolien sowie Verbundfolien wie in Abbildung 92 dargestellt. Als Verbundfolie kam eine TPU-Folie vom Typ Duraflex A4700 der Firma Bayer zum Einsatz.

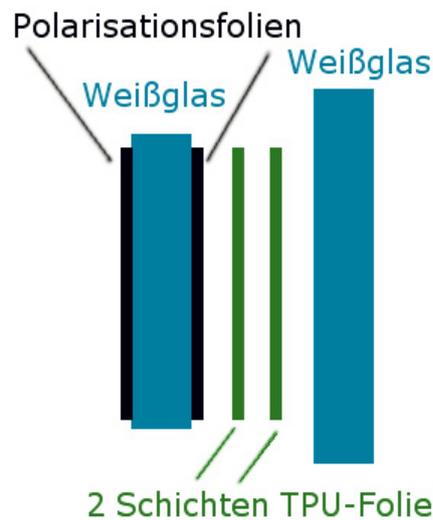


Abbildung 92: Aufbau der Langzeitproben

Im ersten Schritt erfolgte der Zuschnitt von elf kleinen (5 cm x 5 cm) und elf größeren (7,5 cm x 7,5 cm) Glassubstraten der jeweiligen Glasdicke von 2 mm. Die Außenkanten wurden zur Sicherheit geschliffen und die Glasscheiben mit Spülmittel und Isopropanol gereinigt. Es folgte das Aufkleben der Polarisationsfolie vom Typ Nitto Denko NPF_TEG465DUHC. Die Zinnseiten der Gläser ließen sich mit einem Detektor bestimmen. Die Lamination mit der zweiten Scheibe erfolgte an der zinnfreien Seite.

Die thermische Behandlung zum Laminieren des Substrats fand in einem Trockenschrank statt. Die einzelnen Substrate und die TPU-Folien wurden mittels Klebeband miteinander fixiert, in eine Vakuumverpackung gelegt und mit einem Vlies umrahmt. Das Vlies sollte das vollständige Evakuieren der Vakuumpackung sichern und Lufteinschlüsse verhindern. Die eingepackte Probe wurde bereits eine halbe Stunde vor dem Einschalten des Ofens evakuiert und beim Beheizen weiterhin abgesaugt (Abbildung 93).



Abbildung 93: Vakuumverpackung im Ofen - mit Schlauch zur Vakuumpumpe und Kabel des Thermoelements zur Temperaturmessung

Da der Trockenschrank des Instituts nicht programmierfähig ist, musste der Temperaturverlauf von Hand nachgeführt werden. Dazu wurde ab dem Startzeitpunkt im Schnitt alle 18 Minuten eine Temperaturerhöhung von etwa 10 K eingeleitet, bis die Zieltemperatur von 90 °C erreicht war. Das Abkühlen der Proben erfolgte durch das Öffnen der Schranktür. Zur Temperaturüberwachung war auf der Vakuumverpackung ein Thermoelement befestigt. In Abbildung 94 sind das Temperaturprofil und die gemessene Oberflächentemperatur dargestellt. Alle weiteren Laminierungsversuche wurden auf dieselbe Art durchgeführt.

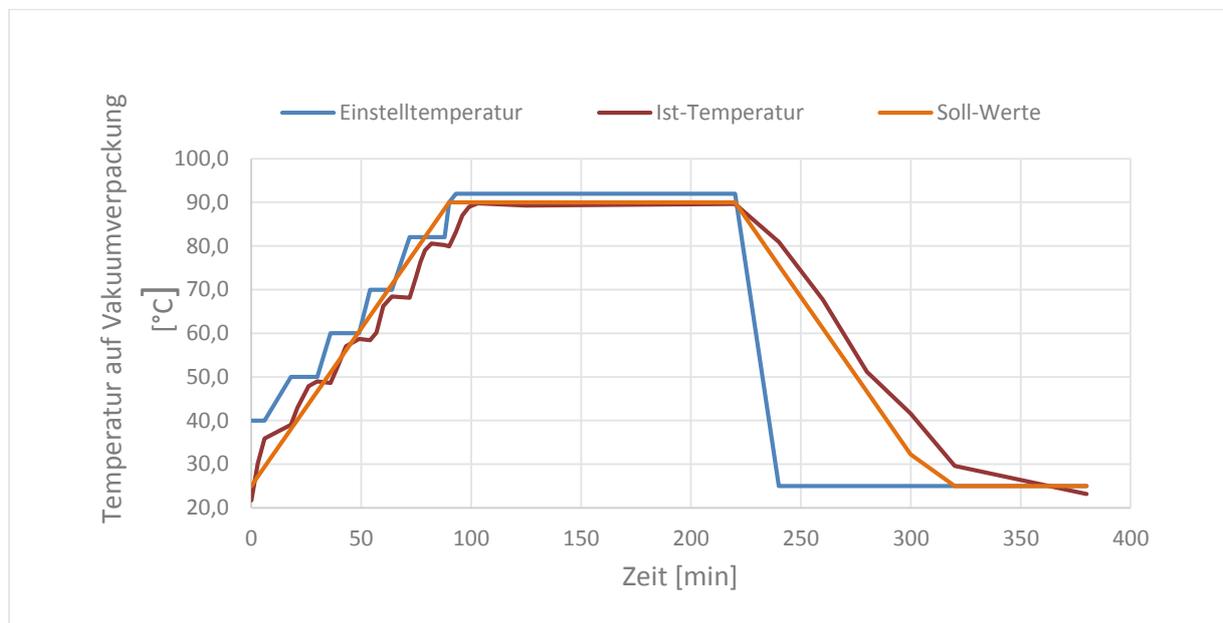


Abbildung 94: Temperaturprofil während der Herstellung der Probe

Die ersten fünf Probekörper unterscheiden sich von den restlichen sechs dadurch, dass der Polarisator bereits vor dem Laminieren beidseitig aufgeklebt worden war. Allerdings verschlechterte sich die Oberflächengüte des oberen Polarisators während des Laminierens im Ofen - die Vakuumverpackung drückte sich in der Polarisationsfolie ab. Als erste Gegenmaßnahme wurde zum Schutz der Folie eine Kunststoffform bzw. eine Glasscheibe testweise zwischen Probekörper und Vakuumverpackung geschichtet. Doch auch diese Vorkehrung führte nicht zum gewünschten Ergebnis. Vielmehr entstanden



weitere Unebenheiten im Polarisator (Abbildung 95). Aus diesem Grund sind die letzten sechs Probekörper erst nachträglich mit dem oberen Polarisator beklebt worden.

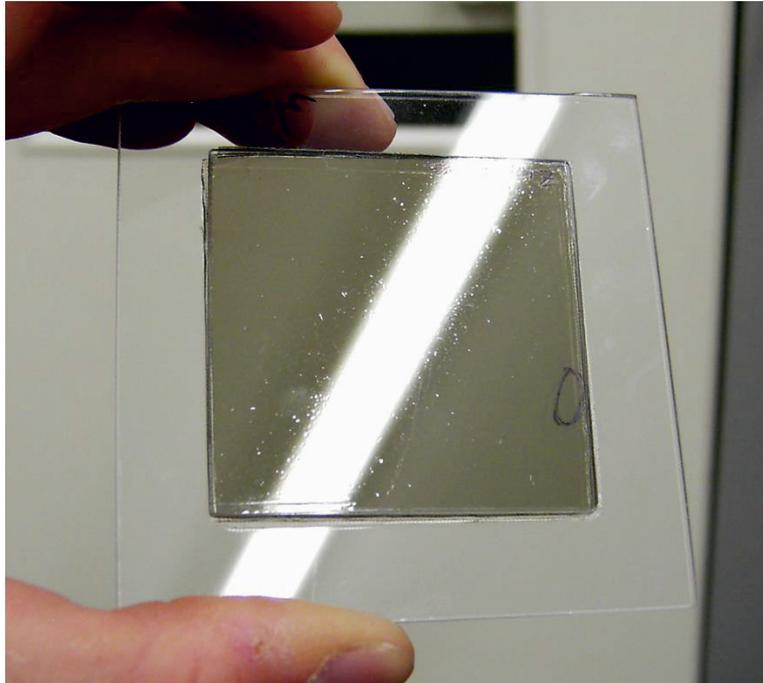


Abbildung 95: Als Reflexionen erkennbare Beschädigungen der Polarisationsfolie. Abgebildet ist Probe 4 nach dem Laminieren.

Es entstanden auf diese Art elf Probekörper. Die ersten fünf Proben (1 bis 4 b) weisen plastische Verformungen auf dem oberen Polarisator auf. Die restlichen sechs Proben (5 a bis 5 f) haben diesen Makel nicht. An den Proben 5 d, 5 e und 5 f wurden die Polarisationsfolien um 90° zueinander gedreht aufgebracht. Diese Muster weisen hierdurch eine nur noch minimale Lichttransmission auf. An allen anderen Proben sind die Polarisatoren parallel zueinander ausgerichtet.

Alle Proben wurden im Spektrometer untersucht und bis auf die Referenzprobe im Dachprüfstand der Witterung und der Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Die Proben sind in einem Isolierglasaufbau (Abbildung 96) eingebracht. Sie werden fortlaufend spektrometrisch vermessen, um Veränderungen im optischen Verhalten zu beobachten.

7.6 Vermessen der Langzeitproben

Die Probenaufnahme für den Einsatz im Freilandversuchsstand ist in Abbildung 96 zu sehen. Die Proben befinden sich dabei auf einem Halteblech im Zwischenraum eines Isolierglases. Dieses weist eine Öffnungsabdeckung an einer der Kanten auf, die zur Entnahme der Probe abgeschraubt werden kann.



Abbildung 96: Isolierglasaufbau mit Probenhalteblech



Die beschriebenen Substrate mit TPU-Folie und Folienpolarisator befinden sich seit dem 18.09.2015 eingebaut im Isolierglas im Freilandprüfstand zum Alterungstest. In regelmäßigen Abständen werden die Proben spektrometrisch untersucht. Entsprechend hergestellte Referenzproben werden in einer dunklen Box unter Innenraumbedingungen gelagert. Diese dienen dem Vergleich mit den Freilandproben. Dadurch kann eine quantitative Aussage über das Alterungsverhalten des Verbunds aus Gläsern, TPU-Folie und Polarisationsfolien unter Freilandbedingungen getätigt werden.



Tabelle 34: Bezeichnung und Kurzbeschreibung der Proben

Probenbezeichnung	Verwendet	Herstellungsdatum	Messung vor dem Ausbringen	Ausgebracht am	Messung nach dem Ausbringen	Laminiervorgang	Polarisatoranordnung
1	Freilandversuch	15.04.2015	25.08.2015	18.09.2015	08.06.2016	ohne weitere Vorkehrungen	parallel
2	nicht verwendet (abweichender Laminiervorgang)	22.04.2015		-	-	Kunststoffform gegen Beschädigung des Polarisators verwendet	parallel
3	nicht verwendet (abweichender Laminiervorgang)	24.04.2015		-	-	Verbesserte Kunststoffform gegen Beschädigung des Polarisators verwendet	parallel
4a	Freilandversuch	11.05.2015	25.08.2015	18.09.2015	08.06.2016	Glasplatte gegen Beschädigung des Polarisators verwendet	parallel
4b	Referenzprobe	11.05.2015	25.08.2015	-	08.06.2016	Glasplatte gegen Beschädigung des Polarisators verwendet	parallel
5a	Freilandversuch	29.05.2015	25.08.2015	18.09.2015	08.06.2016	Polarisator nachträglich aufgeklebt	parallel
5b	Freilandversuch	29.05.2015	25.08.2016	18.09.2015	08.06.2016	Polarisator nachträglich aufgeklebt	parallel
5c	Referenzprobe	29.05.2015	25.08.2016	-	08.06.2016	Polarisator nachträglich aufgeklebt	parallel
5d	Freilandversuch	29.05.2015	25.08.2016	18.09.2015	08.06.2016	Polarisator nachträglich aufgeklebt (min. Transmission) in gekreuzter Position	gekreuzt
5e	Freilandversuch	29.05.2015	25.08.2016	18.09.2015	08.06.2016	Polarisator nachträglich aufgeklebt (min. Transmission) in gekreuzter Position	gekreuzt
5f	Referenzprobe	29.05.2015	25.08.2016	-	08.06.2016	Polarisator nachträglich aufgeklebt (min. Transmission) in gekreuzter Position	gekreuzt

Bei der Messung mit dem Spektrometer ist zu beachten, dass das Licht aus dem Monochromator bereits polarisiert ist. Um von dieser Polarisation unabhängige Ergebnisse zu erhalten, werden jeweils zwei Messungen pro Probe durchgeführt: Eine im 0 °-Zustand und eine im 90 ° dazu gedrehten Zustand. Aus beiden Messungen wird der Mittelwert gebildet und zur Bewertung der Ergebnisse festgehalten.

Vor dem Versuchsstart wurden alle Proben in einer ersten Untersuchung spektrometrisch analysiert. Diese Messung wurde kontinuierlich wiederholt. Der Versuchsstand, in dem die Proben der Langzeitversuche eingebaut sind, befindet sich auf dem Dach eines Gebäudes der Universität Stuttgart (Abbildung 97). Der Versuchsstand besteht aus einem nach Süden ausgerichteten Gestell. In diesem Gestell sind die Isolierglasprobenaufnahmen zur Horizontalen hin mit einem 45 ° Winkel gekippt.

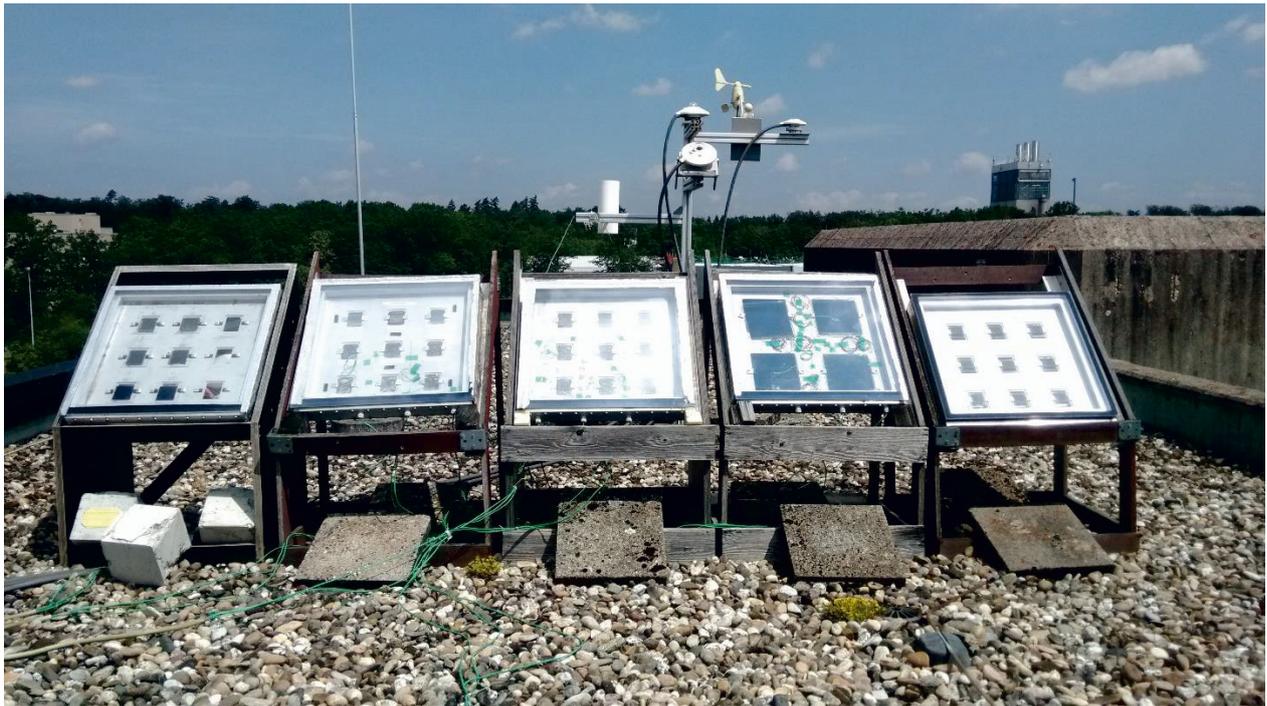


Abbildung 97: Die Langzeitproben befinden sich in dem Gestell links außen (Foto: B. Gültekin / ILEK)

Der Zeitablauf des Freilandversuchs ist in Tabelle 34 dokumentiert.

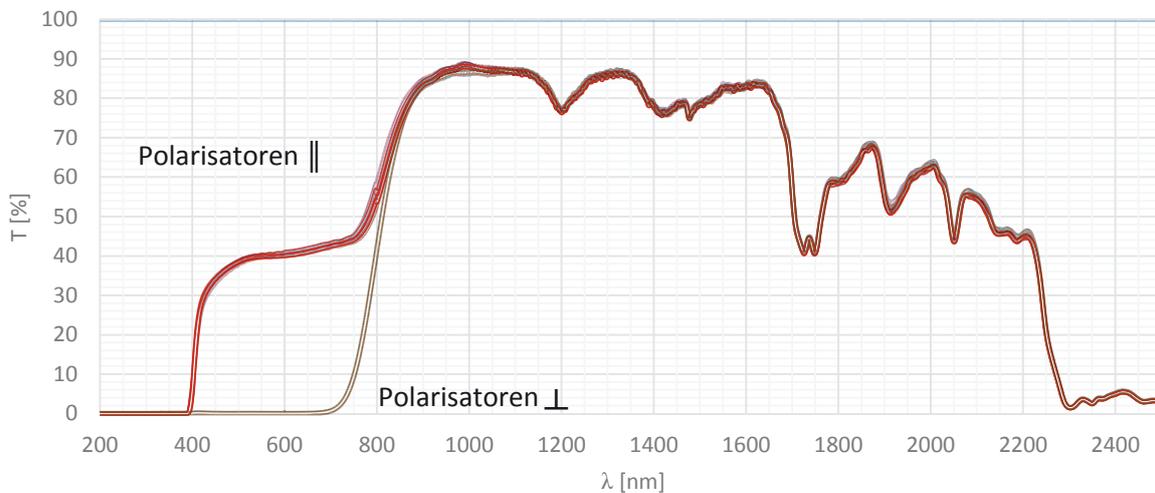


Abbildung 98: Spektrometrische Vermessung der Polarisatorlaminare vor der Freilandausbringung. Probenaufbau: Polarisator, Glassubstrat, Polarisator, 2 x TPU-Folie, Glassubstrat. Glassubstrate aus Weißglas. Messung vom 25.08.2015.

Es gilt zu beachten, dass die Polarisatoren der Proben 5d, 5e und 5f senkrecht zueinander orientiert sind. In Durchlassrichtung (parallel angeordnete Polarisatoren) wird eine Transmission im Wellenlängenbereich um 600 nm von ca. 40 % erreicht. Bei den gekreuzten Polarisatoren liegt der entsprechende Wert etwa bei null.

Nach 264 Tagen im Freilandtest wurden die Proben aus dem Versuchsstand genommen und erneut spektrometrisch untersucht (Abbildung 99).

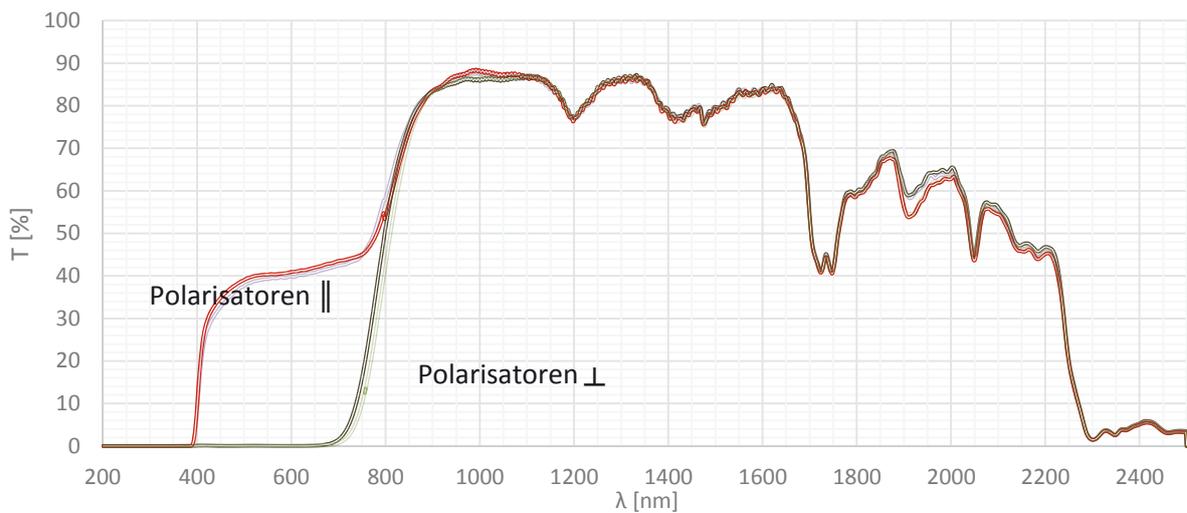


Abbildung 99: Spektrometrische Vermessung der Polarisatorlaminare nach 264 Tagen Freilandausbringung. Probenaufbau: Polarisator, Glassubstrat, Polarisator, 2 x TPU-Folie, Glassubstrat. Glassubstrate aus Weißglas. Messung vom 08.06.2016

Im direkten Vergleich der spezifischen spektralen Transmissionswerte nach der Exposition auf dem Dachversuchsstand mit den vor der Ausbringung ermittelten Transmissionswerten aller Proben ergibt sich eine große Deckungsgleichheit. Für einzelne Wellenlängenbereiche ergeben sich allerdings erkennbare Abweichungen. Für den Bereich um 800 nm kann eine leichte Verschiebung der Transmissionswerte abgelesen werden. Im Bereich um 1900 nm hat sich die Transmission nach der Exposition angehoben.



8 Bewertung der Langzeitstabilität und der Marktfähigkeit • AP 7

Die in diesem Forschungsprojekt neu entwickelte schaltbare Verglasung erlaubt es erstmalig, die Funktion der Blendvermeidung sowie der Raumhelligkeitsregelung voneinander zu entkoppeln und beide Aspekte zu bedienen. Zudem ermöglicht die Verglasung durch die kleinteilige Strukturierung in viele, einzeln ansteuerbare Bildpunkte, sowohl grafische Inhalte wie auch Texte auf der Verglasung darzustellen. In Erweiterung bisheriger Verglasungen wird das Fenster damit auch zum Bildschirm, auf dem für den Nutzer relevante Inhalte dargestellt werden können.

Kommerzielle mechanische Sonnenschutzsysteme sind für gewöhnlich träge, d.h. nicht schnell an die Außensituation anpassbar, und wirken meist großflächig über die gesamte Fensterfront. Dies führt dazu, dass bei der Verwendung dieser Sonnenschutzsysteme die Gesamthelligkeit im Raum stark reduziert wird. Schaltbare Verglasungen auf der Grundlage elektrochromer Werkstoffe sind ebenfalls meist träge und reagieren mit minütiger Verzögerung zum Umschaltimpuls. Mit den in diesem Forschungsprojekt entwickelten schaltbaren Verglasungen ist es möglich, in Sekundenbruchteilen einzelne Bereiche der Verglasung unabhängig voneinander anzusteuern sowie die Verdunklungsintensität zu variieren, um damit auch auf schnelle Änderungen der Bestrahlungsstärke zu reagieren. Dadurch wird eine gezielte Sonnen- und Blendschutzfunktionalität bei einer bestmöglichen Gesamthelligkeit im Raum erreicht.

Die im Projekt eingesetzten TN-Module verfügen noch nicht über einen ausreichend hohen Füllfaktor, um Blendeffekte vollständig zu eliminieren. Dies kann jedoch durch eine Modifikation der Anordnung und Größe der einzelnen Bildpunkte erreicht werden. Ziel ist es hierbei, die minimale Transmission der Module unter einen Wert von ca. 3 % zu verringern. Im Rahmen eines Nachfolgeprojekts konnte bereits durch ein verändertes Layout der Strukturierung der TN-Module der Füllfaktor drastisch erhöht und die minimale Lichtdurchlässigkeit auf etwa 5 % reduziert werden. Dies ist gegenüber der im Projekt untersuchten TN-Zelle mit 13 % minimaler Lichtdurchlässigkeit eine deutliche Verbesserung. Es sind allerdings noch weitere Maßnahmen zur Optimierung nötig.

Auch sind noch weitere Anstrengungen bezüglich der Erweiterung der Funktionalität der Ansteuerung der Module nötig, damit die einzelnen Bildpunkte nicht nur im „An“- und „Aus“-Modus betrieben werden können, sondern in Graustufen. Dies erweitert gegenüber der untersuchten TN-Modulart die Funktionalität nochmals wesentlich.

Die im Rahmen des Projekts hergestellte TN-Verglasung wurde im Fassadenprüfstand des ILEK als raumhohe Verglasung eingesetzt und mit einer einfachen temperaturbasierten Regelung betrieben. Bei höherer solarer Einstrahlung auf die Verglasung, die zu einer Erwärmung des Innenraumes führt, wurde temperaturabhängig die Licht- und Energiedurchlässigkeit der Verglasung mit zunehmender Innentemperatur verringert. Ziel war es dabei, die Raumtemperatur möglichst stabil und in einem für den Nutzer komfortablen Bereich zu halten. Hierbei zeigte sich, dass die Verglasung diese Aufgabe sehr gut erfüllen konnte. Es sind allerdings noch weitere Untersuchungen nötig, um diese ersten qualitativen Ergebnisse auch quantitativ zu verifizieren. Diese weitergehenden Untersuchungen sind bereits begonnen worden und werden die Grundlagen liefern, um die Effektivität der TN-Verglasung detailliert beurteilen zu können. Das große Potential der TN-Verglasung konnte allerdings bereits im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen schon ermittelt werden.

Die im Projektrahmen begonnenen Untersuchungen zur Langzeitstabilität sowie die im Rahmen anderer Projekte erzielten Ergebnisse zur Alterung von Polarisatoren sind vielversprechend im Hinblick darauf, dass der Einsatz der TN-Module im Fassadenbereich den dort üblichen Austauschzyklen von ca. 15 bis 20 Jahren genügen muss. Es sind diesbezüglich jedoch noch längere Zeiträume zu untersuchen, bevor eine abschließende Beurteilung möglich sein wird.

Erste Kostenermittlungen zur Abschätzung der Produktionskosten von TN-Modulen und damit versehenen Isolierverglasungen lassen erkennen, dass diese durchaus in einem zu verfügbaren elektrochromen Verglasungen konkurrenzfähigen Verhältnis stehen können. Produktionskosten je Quadratmeter für die TN-Module von ca. 250 € scheinen realisierbar zu sein.



Sinnvolles Ziel bei der weiteren Entwicklung der TN-Verglasung wird die Skalierung auf größere Modulformate sein. Im Idealfall entspricht dabei das Modulformat dem gewünschten Verglasungsanteil des Fensters oder der Fassade. Produktionstechnisch möglich ist die Herstellung großformatiger Module, wie die jüngsten Großformat-LC-Bildschirme (Diagonalenabmessungen > 178 cm) zeigen.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Bereich der Entwicklung geeigneter Regelungsstrategien für die Einbindung der TN-Verglasungen in ein ganzheitliches Konzept der Innenraumklimatisierung. Hierzu gehört die Einbindung in die Gebäudetechnik. Zudem wird die Interaktionsfähigkeit der Verglasung mit dem Nutzer zu thematisieren sein.

Die Integration der TN-Module im Isolierglasaufbau wird ebenfalls noch bauphysikalisch und konstruktiv verbessert werden müssen. Insbesondere unter dem Aspekt einer vollflächigen Anbindung an die Außenscheibe der Isolierverglasung.

Abschließend soll jedoch hervorgehoben werden, dass trotz weiterer zu lösender Aufgaben, die TN-Verglasung ein überaus großes Potential besitzt, um sowohl den Nutzerkomfort zu steigern wie auch den Energieverbrauch zur Gebäudekonditionierung zu reduzieren.



9 Verzeichnisse

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fassadenprüfstand (Foto: G. Metzger / ILEK) 14

Abbildung 2: Fassadenprüfstand im Grundriss (Obergeschoss) und Schnitt (Copyright: Rubner Haus AG/SpA) 15

Abbildung 3: Ansicht der Südfassade (Copyright: M. Husser / ILEK). Die Isolierverglasung des Raumes rechts unten ist mit 45 TN-Modulen ausgestattet. 16

Abbildung 4: Schematischer Aufbau einer transmissiven, passiv angesteuerten TN-Zelle im NW-Modus bei $U=0$ V. Die Zelle ist lichtdurchlässig. 18

Abbildung 5: Schematischer Aufbau einer transmissiven, passiv angesteuerten TN-Zelle im NW-Modus bei $U>3$ V. Die Zelle ist lichtundurchlässig. 18

Abbildung 6: Pixeleinteilung beim Modul GV66 (Zeichnung: BMG MIS GmbH) 23

Abbildung 7: Anordnung der einzelnen TN-Module im Isolierglasaufbau 24

Abbildung 8: CAD-Zeichnung der Befestigungselemente in der Feldmitte: Halter und Fixierer 25

Abbildung 9: CAD-Zeichnung der Halter für die Modultreiber..... 25

Abbildung 10: CAD-Zeichnung des Zusammenbauprinzips der Befestigungsteile 26

Abbildung 11: Seitlicher Blick auf die TN-Shutter-Zelle..... 27

Abbildung 12: Lage der Shutter-Zelle bei 0° und 90° 27

Abbildung 13: Versuchsaufbau zur Transmissions- und Reflexionsmessung an der Shutter-Zelle ... 28

Abbildung 14: Gerichtete Transmissionsmessung (normal-normal). Probe: TN-Shutter-Zelle mit AR (Antireflexionsfolie). Messdatum: 12.01.2015. 29

Abbildung 15: Gerichtete Reflexionsmessung (normal-normal). Probe: TN-Shutter-Zelle mit AR (Antireflexionsfolie). Messdatum: 13.01.2015. 29

Abbildung 16: Gerichtete Transmissionsmessung (normal-normal). Probe: TN-Shutter-Zelle ohne AR. Messdatum: 12.01.2015..... 30

Abbildung 17: Gerichtete Reflexionsmessung (normal-normal). Probe: TN-Shutter-Zelle ohne AR. Messdatum 13.01.2015..... 30

Abbildung 18: Gerichtete Transmissionsmessung (normal-normal). Proben unter 0° und 90° vermessen und Mittelwert gebildet. Probe: Nitto Denko Polarisator (NPF TEG 1465 DUHC) auf Displayglas der Dicke $d=0,71$ mm auflaminiert. 31

Abbildung 19: Gerichtete Transmissionsmessung (normal-normal). Proben unter 0° und 90° vermessen und Mittelwert gebildet. Probe: Sanritz Polarisator (HLC2-5618) auf Displayglas der Dicke $d=0,71$ mm auflaminiert. 31

Abbildung 20: Flächeneinteilung für die Zelle GV66 32

Abbildung 21: Modell der TN-Zelle für die Simulation mit dem Programm DIMOS 1D..... 34

Abbildung 22: Optimierung der Dicke der Flüssigkristallschicht (Gooch & Tarry) 35

Abbildung 23: Spektrale Kennwerte einer TN-Zelle mit außenliegendem Folienpolarisator ($100\ \mu\text{m}$) und Flüssigkristall ZLI 4792 bei drei Flüssigkristallschichtdicken 35

Abbildung 24: Testaufbau der elektronischen Ansteuerung der Module 36

Abbildung 25: Ansteuerhardware für eine Anordnung von 5×9 Multipixel-Zellen (Zeichnung: BMG MIS GmbH) 37

Abbildung 26: TN-Modul GV66 im ausgeschalteten Zustand mit einer Detailansicht der Pixel im Dunkelzustand (nicht maßstäblich) (Foto: G. Metzger / ILEK) 37

Abbildung 27: Flexkabel mit Stecker der GV66 Module (Foto: G. Metzger / ILEK) 38

Abbildung 28: CAD-Zeichnung der Rahmenkonstruktion ohne Module 38

Abbildung 29: CAD-Zeichnung der Rahmenkonstruktion mit den 15 Modulen 39

Abbildung 30: Rahmenkonstruktion mit Modulen in Betrieb. Links im nicht angesteuerten Zustand. Rechts mit der Darstellung des Institutslogos (Foto: G. Metzger / ILEK). 39



Abbildung 31: Befestigungselemente für die Feldmitte: Modulhalter und Fixierer (Foto: G. Metzger / ILEK) 40

Abbildung 32: Befestigungselemente für die Feldmitte: Zusammenbauzustand (Foto: G. Metzger / ILEK) 40

Abbildung 33: Foto vom Einbauzustand der Module im Rahmen. Die Module sind mit den Befestigungselementen am Rahmen fixiert (Foto: G. Metzger / ILEK). 40

Abbildung 34: Isolierglasmuster mit 4 Multipixel-Modulen. Links nicht angesteuert. Rechts mit Darstellung einer einfachen Grafik (Foto: J. Rettig / ILEK). 41

Abbildung 35: Draufsicht auf den Testaufbau. In dieser Version ist die ursprüngliche Ausrichtung der Modulhalter zu sehen, sie wurde nachfolgend optimiert (Foto: G. Metzger / ILEK). 42

Abbildung 36: Die rote Richtschnur gibt die Koordinaten für die Klebepunkte an. Die rechte Reihe der Modulhalter ist bereits am Gitter ausgerichtet aufgeklebt worden (Foto: W. Haase / ILEK). 43

Abbildung 37: Randprofil und angeklebte Modulhalter. Richtschnüre sind entfernt. (Foto: W. Haase / ILEK) 43

Abbildung 38: Prinzipschnitt durch das Isolierglas mit Modulen 44

Abbildung 39: Befestigungselemente in Feldmitte mit Modulhalter, Fixierer und Halter für den Modultreiber (Foto: J. Rettig / ILEK) 44

Abbildung 40: Fotoserie zum Einsetzen der Module (Juli 2015) an die Innenseite der Außenscheibe der Isolierverglasung, unten beginnend (Foto: J. Rettig / ILEK) 45

Abbildung 41: Anordnung der Module im Rahmen im Format 5 x 3. Dargestellt sind unterschiedliche Muster. 46

Abbildung 42: Ausschnittsdarstellung von zwei unterschiedlichen Graphiken..... 47

Abbildung 43: Innenansicht der Isolierverglasung mit eingebauten schaltbaren Modulen. Auf die Module wurde eine Grafik mit einem Abdunklungsgradienten übertragen (Foto: J. Rettig / ILEK). .. 47

Abbildung 44: Blick von außen auf die schaltbare Verglasung in den Zuständen maximaler (links) und minimaler (rechts) Transmission (Foto: J. Rettig / ILEK) 48

Abbildung 45: Die schaltbare Verglasung mit unterschiedlichen Abdunklungsmustern zur Steuerung des einfallenden Lichts (Foto: J. Rettig / ILEK) 49

Abbildung 46: Links: Darstellung des Holzschnitts „Sky and Water I“ von M. C. Escher - Juni 1938; Rechts: Darstellung eines Baumes auf der Verglasung (Foto: J. Rettig / ILEK) 50

Abbildung 47: Darstellung einer Kreisscheibe auf der Verglasung, die dem Sonnenverlauf folgt (Foto: J. Rettig / ILEK)..... 51

Abbildung 48: Grafik vor (links) und nach (rechts) dem spaltenweisen Drehen 52

Abbildung 49: Vereinfachtes Schaltbild des eingesetzten Transimpedanzverstärkers [13] 54

Abbildung 50: Spektrale Sensibilität der Fotodiode [14] 55

Abbildung 51: Emittierter Wellenlängenbereich der LED [15] 55

Abbildung 52: Potentialverlauf des Messsignals, aufgezeichnet mit einer Abtastrate von 25 kHz... 55

Abbildung 53: Beleuchtungseinheit mit LEDs (oben) und Anordnung mit Fotodioden (unten) unter der Shutter-Zelle (Foto: J. Rettig / ILEK) 57

Abbildung 54: Messung des Ausschlags der Steuerspannung (Foto: J. Rettig / ILEK) 57

Abbildung 55: Shutter-Zelle mit Messaufbau zur Schaltzeitermittlung. Auf der linken Seite ist die Hälfte mit Antireflex-Eigenschaft zu sehen. Auf der rechten Seite ist die Hälfte mit lediglich dem Polarisator zu erkennen. Auf der rechten Hälfte liegt der obere Teil des Messaufbaus (Foto: J. Rettig / ILEK). 58

Abbildung 56: Hochfrequente Messung der Shutter-Zelle während des Abdunkelns (Seite mit Antireflexbeschichtung / 10 V) 59

Abbildung 57: Hochfrequente Messung der Shutter-Zelle während des Aufhellens (Seite mit Antireflexionsfolie / 10 V) 59

Abbildung 58: Messaufbau an einem Multipixel-Modul vom Typ GV66 (Foto: J. Rettig / ILEK) 62



Abbildung 59: Hochfrequente Messung der Schaltzeit beim Abdunkeln der Zelle GV66 im Testrahmen 63

Abbildung 60: Hochfrequente Messung der Schaltzeit beim Aufhellen der Zelle GV66 im Testrahmen 64

Abbildung 61: Prinzipieller Aufbau der Messschaltung..... 65

Abbildung 62: Versuchsaufbau mit Sonnensimulator, Modulrahmen und Projektionsleinwand [16]. 68

Abbildung 63: Sonnensimulator-Test mit Schattenwurfbildern..... 69

Abbildung 64: Sonnensimulator-Prüfung mit der mittleren Lampe und einer 2420 mm x 1740 mm großen Leinwand [16] 70

Abbildung 65: Sonnensimulator-Test mit Schattenwurfbildern bei gezündeter mittlerer Lampe. Die projizierten Bilder entsprechen Abbildung 63. 71

Abbildung 66: Sonnensimulator-Prüfung mit drei Lampen und einer 2420 mm x 1740 mm großen Leinwand [16]..... 72

Abbildung 67: Sonnensimulator-Test mit Schattenwurfbildern und mit drei gezündeten Lampen.... 73

Abbildung 68: Sonnensimulator-Test mit Schattenwurfbildern (mittlere Lampe, Abstand 1 m) [16] 74

Abbildung 69: Sonnensimulator-Test mit Schattenwurfbildern (drei Lampen, Abstand 2 m) [16] ... 74

Abbildung 70: Position der vier Thermoelemente an den Multipixel-Modulen zur Oberflächentemperaturmessung [16] 75

Abbildung 71: Oberflächentemperaturmessung an den Multipixel-Zellen bei zwei Schaltzuständen und konstanter Bestrahlungsstärke 76

Abbildung 72: Schnitt durch die Isolierverglasung mit Positionen der Messpunkte zur Temperaturmessung 77

Abbildung 73: Anordnung der Thermoelemente in der Mitte des Isolierglases. Der zweite Messpunkt auf der Außenscheibe ist verdeckt und auf dem Foto nicht zu sehen. Zur Messung wurden alle Pixel in den Zustand minimaler Transmission geschaltet (Foto: J.Rettig / ILEK). 77

Abbildung 74: Temperaturen im Isolierglas an einem warmen, wolkenlosen Sommertag (25. August 2016) 78

Abbildung 75: Temperaturen im Isolierglas an einem warmen Sommertag mit sehr wenig Bewölkung (27. August 2016) 78

Abbildung 76: Maße der Polyethylen-Probekörper..... 79

Abbildung 77: Proben im Heizschrank. Die Polyethylen-Körper sind auf das Trägersubstrat geklebt und mit einer angehängten Masse belastet worden. 80

Abbildung 78: Die Polyethylen-Körper wurden auf das Trägersubstrat geklebt und im Ofen gelagert 82

Abbildung 79: Empfohlenes Rastermaß [18] 84

Abbildung 80: Vorgaben zur Höhe der horizontalen Messebene für die Beleuchtungsstärkemessung [18]..... 85

Abbildung 81: Raster der Messstellen für die Beleuchtungsstärkemessung (Raumgrundriss) im Testraum des Fassadentestgebäudes..... 85

Abbildung 82: Messhöhe der Helligkeitsmesspunkte (P1- P18: 0,75 m, P0: 1,2 m) 86

Abbildung 83: Technische Daten Beleuchtungsstärkemessköpfe [19] 86

Abbildung 84: Funktionsprinzip der Blendvermeidung durch Projektion einer Verschattungsfläche (links). Foto der Verglasung mit Verschattungsfläche (rechts). 88

Abbildung 85: Häufigkeitsverteilung der prozentualen Reduktion der Gesamthelligkeit im Raum 90

Abbildung 86: Beleuchtungsstärkeverteilung [klx] am 20.01.2016 um 12:30 Uhr bei wolkenlosem Himmel und Einsatz des Verschattungsflecks..... 90

Abbildung 87: Beleuchtungsstärke [klx] am 09.12.2015 um 11:30 Uhr bei maximaler Transmission der Verglasung..... 92

Abbildung 88: Beleuchtungsstärke [klx] am 23.03.2016 um 11:30 Uhr bei maximaler Transmission der Verglasung..... 93



Abbildung 89: Mindestbeleuchtungsstärke für Büros [23]	94
Abbildung 90: Messergebnisse für Punkt 1, Punkt 2 und Punkt 3; $E_i < 300$ lx.....	94
Abbildung 91: Messergebnisse für Punkt 1, Punkt 2 und Punkt 3; $E_i < 500$ lx.....	95
Abbildung 92: Aufbau der Langzeitproben.....	96
Abbildung 93: Vakuumverpackung im Ofen - mit Schlauch zur Vakuumpumpe und Kabel des Thermoelements zur Temperaturmessung	97
Abbildung 94: Temperaturprofil während der Herstellung der Probe	97
Abbildung 95: Als Reflexionen erkennbare Beschädigungen der Polarisationsfolie. Abgebildet ist Probe 4 nach dem Laminieren.....	98
Abbildung 96: Isolierglasaufbau mit Probenhalteblech	98
Abbildung 97: Die Langzeitproben befinden sich in dem Gestell links außen (Foto: B. Gültekin / ILEK)	101
Abbildung 98: Spektrometrische Vermessung der Polarisatorlamine vor der Freilandausbringung. Probenaufbau: Polarisator, Glassubstrat, Polarisator, 2 x TPU-Folie, Glassubstrat. Glassubstrate aus Weißglas. Messung vom 25.08.2015.....	101
Abbildung 99: Spektrometrische Vermessung der Polarisatorlamine nach 264 Tagen Freilandausbringung. Probenaufbau: Polarisator, Glassubstrat, Polarisator, 2 x TPU-Folie, Glassubstrat. Glassubstrate aus Weißglas. Messung vom 08.06.2016	102



9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Polarisatorfolien 19

Tabelle 2: Eigenschaften der Monopixel-Zelle..... 21

Tabelle 3: Eigenschaften der Module des Typs GV66..... 22

Tabelle 4: Berechnete licht- (vis) und strahlungstechnische (sol) Kennwerte der Transmission (T), der Reflexion (R) sowie der Absorption (A) nach DIN EN 410 28

Tabelle 5: Flächenbezogener Füllfaktor für die Zelle GV66 32

Tabelle 6: Messwerte für die Transmission, Reflexion und Absorption der Shutter-Zelle und daraus berechnete Werte für das Modul unter Beachtung des Füllfaktors 33

Tabelle 7: Messgeräte zur Messung der Schaltgeschwindigkeit der Shutter-Zelle 53

Tabelle 8: Verwendete Bauteile für den Transimpedanzverstärker 53

Tabelle 9: Messeinstellungen zur Bestimmung der Schaltcharakteristik der Shutter-Zelle 56

Tabelle 10: Zusammenfassung der Messung „Abdunkeln (Seite mit Antireflexionsfolie / 10 V)“ 59

Tabelle 11: Zusammenfassung der Messung „Aufhellen (Seite mit Antireflexionsfolie / 10 V)“ 60

Tabelle 12: Einschaltzeiten zum Abdunkeln der Shutter-Zelle 60

Tabelle 13: Ausschaltzeiten zum Aufhellen der Shutter-Zelle..... 60

Tabelle 14: Schaltzeiten bei Extremtemperaturen mit einer Steuerspannung von 10 V 61

Tabelle 15: Schaltzeiten bei Extremtemperaturen mit einer Steuerspannung von 5 V 61

Tabelle 16: Messeinstellungen zur Bestimmung der Schaltcharakteristik der TN-Module..... 62

Tabelle 17: Zusammenfassung der Messung zum Schaltverhalten eines Pixels einer GV66-Zelle im Teststrahlen 63

Tabelle 18: Zusammenfassung der Messung zum Schaltverhalten eines Pixels einer GV66-Zelle im Teststrahlen 64

Tabelle 19: Abdunkeln eines Pixels auf dem Modul GV66..... 64

Tabelle 20: Aufhellen eines Pixels auf der TN-Zelle 65

Tabelle 21: Leistungsmessung des Aufbaus (I) 66

Tabelle 22: Leistungsmessung des Aufbaus (II) 66

Tabelle 23: Leistungsmessung des Aufbaus (III) 67

Tabelle 24: Differenzen zwischen Leistungsbedarf für Bild 1 und Bedarf bei Bildern mit unterschiedlich abgedunkelten Pixeln – Aufbau (I) 67

Tabelle 25: Differenzen zwischen Leistungsbedarf für Bild 1 und Bedarf bei Bildern mit unterschiedlich abgedunkelten Pixeln – Aufbau (II) 67

Tabelle 26: Differenzen zwischen Leistungsbedarf für Bild 1 und Bedarf bei Bildern mit unterschiedlich abgedunkelten Pixeln – Aufbau (III) 67

Tabelle 27: Maximaltemperaturwerte sowie Mittelwerte der Oberflächentemperatur an den Zellen und im Raum 76

Tabelle 28: Prüfergebnisse der Klebeversuche..... 81

Tabelle 29: Klebesysteme für die Klebung an der beschichteten Glasscheibe 82

Tabelle 30: Prüfablauf der Versuche an Klebeverbindungen mit beschichtetem Glas 83

Tabelle 31: Prüfergebnisse der Klebeversuche..... 84

Tabelle 32: Übersicht der Messtage der Beleuchtungsstärkemessungen im Testraum 87

Tabelle 33: Einfluss des Verschattungsflecks auf die Gesamthelligkeit im Raum. Für die Helligkeitsreduktions-Klassen sind die Auftretenshäufigkeiten angegeben. Klassen entsprechen der prozentualen Reduktion der Gesamthelligkeit. 89

Tabelle 34: Bezeichnung und Kurzbeschreibung der Proben 100



9.3 Abkürzungsverzeichnis

A_a	Ansteuerbarer Teil eines Bildpunktes
A_p	Gesamtfläche eines Bildpunktes
A_n	optische Anisotropie
H, h	Höhe
B, b	Breite
ITO	Indium-Zinn-Oxid
PI	Polyimid
NB	Zelle im nichtangesteuerten Zustand lichtundurchlässig (engl. „normally black“)
NW	Zelle im nichtangesteuerten Zustand lichtdurchlässig (engl. „normally white“)
U_{th}	Grenzspannung (engl. „threshold“)



9.4 Literaturverzeichnis

- [1] W. Haase und W. Sobek, „Schaltbare Verglasungen auf der Basis von Flüssigkristallen“, in *Statusseminar Forschung für Energieoptimiertes Bauen (EnOB)*, 30.06.-02.07.2009, Würzburg, 2009, S. 19–26.
- [2] W. Haase, „Adaptive Strahlungstransmission von Verglasungen mit Flüssigkristallen“, Dissertation, Universität Stuttgart, Zentrallabor des Konstruktiven Ingenieurbaus, 2004.
- [3] W. Haase, M. Husser, E. Kurz und L. Rau, „Abschlussbericht Schaltbare Verglasungen“, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Forschungsbericht, 2014.
- [4] M. Husser, W. Haase, W. Sobek, E. Kurz, L. Rau und N. Frühauf, „Structured sun protection glazing“, in *Glass, Facade, Energy - Engineered Transparency, International Conference at glass-tec, October 21-22, 2014, Düsseldorf*, 2014, S. 515–522.
- [5] M. Husser, W. Haase und W. Sobek, „New possibilities of sun and glare protection with a structured switchable glazing“, in *Challenging Glass 5, Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, June 16-17, 2016, Ghent*, 2016.
- [6] W. Haase, M. Husser und W. Sobek, „Potentiale strukturierter, schaltbarer Verglasungen“, in *Glasbau 2016*, B. Weller, Hrsg., Berlin: Ernst, 2016, S. 293–306.
- [7] F. Kaltenbach, „Performative Transluzenz“, *Detail*, Bd. 56, Nr. 11, S. 1062–1068, 2016.
- [8] Active Glass Technologies plc, „Smart windows market & industry background“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.activeglass.eu/smart-technologies/smart-windows-market-industry-background/>. [Zugegriffen am 22.10.2014].
- [9] M. Wiekert, „Hochleistungs-Flachglas in den USA wieder stärker“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/maerkte,did=949874.html>. [Zugegriffen am 04.09.2014].
- [10] BCC Research, „Global markets and technologies for smart glass“, 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bccresearch.com/market-research/advanced-materials/smart-glass-technology-global-markets-avm065b.html>. [Zugegriffen am 22.10.2014].
- [11] *DIN EN 410:2011-04 Glas im Bauwesen - Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen*. 2011.
- [12] C. H. Gooch und H. A. Tarry, „The optical properties of twisted nematic liquid crystal structures with twist angles $\leq 90^\circ$ “, *Journal of Physics, D - Applied Physics*, Bd. 8, Nr. 13, S. 1575–1584, 1975.
- [13] D. Braun, „Current voltage converter“, *Deutsche Wikipedia, Lizenz CC BY 2.5*, 2007. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Current_Voltage_Converter.svg. [Zugegriffen am 12.08.2015].
- [14] OSRAM Opto Semiconductors GmbH, „Silizium-PIN-Fotodiode mit sehr kurzer Schaltzeit, FH 203 P, SFH 203 PFA [Datenblatt]“. 2003.
- [15] Kingbright, „T-1 (3 mm) Solid state lamp, L-934ID (V5) [Datenblatt]“. 2005.
- [16] C. Fuchs, „Eigenschaftsprofile, Anforderungen und Ansteuerungskonzepte für adaptive Verglasungen auf Flüssigkristallbasis“, Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, 2015.
- [17] *DIN 5034-2:1985-02 Tageslicht in Innenräumen, Teil 2: Grundlagen*. 1985.
- [18] licht.de, Fördergemeinschaft Gutes Licht und Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V., Hrsg., *Leitfaden zur DIN EN 12464-1 Beleuchtung von Arbeitsstätten, Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen*, 2. Aufl., Frankfurt a. M., 2012.
- [19] Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, „Strahlungs-Messkopf FLA 623 x [Datenblatt]“. 2016.



- [20] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, *Technische Regeln für Arbeitsstätten - Beleuchtung (ASR A3.4) vom 29.04.2011, zuletzt geändert durch Bekanntmachung vom 10.04.2014 (GMBI S. 287)*. 2014.
- [21] M. Wittlich, *Blendung - Theoretischer Hintergrund*. Sankt Augustin: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, 2010.
- [22] J. Wienold, „Daylight glare in offices“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2009.
- [23] A. Fehringer, „Vergleichende Analyse unterschiedlicher Regelungsstrategien schaltbarer Verglasungen unter besonderer Berücksichtigung der Einflussparameter Strahlung und Temperatur“, Bachelorarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, 2015.