

Elke Haase, Ralph Krause, Sybille Krzywinski
Bernd Landgraf, Ralf Rogge, Hannes Rosenbaum
Frank Simon, Philipp Zimmermann

**Entwicklung eines strahlungs-
adaptiven Markisengewebes
mit erhöhter Durchsichtigkeit
bei gleichzeitig erhöhten Blend-
und Wärmeschutzeigenschaften
für Senkrechtmarkisen an
Nichtwohngebäuden**

F 3094

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

2018

ISBN 978-3-7388-0249-8

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Endbericht

für das BBSR - Forschungsvorhaben

Forschungsprogramm:	Zukunft Bau
Forschungsprojekt:	Entwicklung eines strahlungsadaptiven Markisengewebes mit erhöhter Durchsichtigkeit bei gleichzeitig erhöhten Blend- und Wärmeschutzeigenschaften für Senkrechtmarkisen an Nichtwohngebäuden
Aktenzeichen:	10.08.18.7-16.09
Forschungsgeber:	Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR) Referat II 3
Forschungsnehmer:	Steinbeis-Hochschule-Berlin GmbH Steinbeis-Transfer-Institut Bau- und Immobilienwirtschaft Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V. Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH
Forschungsteam:	Dipl.-Ing. Elke Haase Dr.-Ing. Ralph Krause Prof. Dr.-Ing. habil. Sybille Krzywinski Dipl.-Ing. Bernd Landgraf (Projektleiter) Dipl.-Ing. Ralf Rogge Dipl.-Ing. Hannes Rosenbaum Dr. rer. nat. Frank Simon Philipp Zimmermann M.Sc.
aufgestellt am:	11.06.2018

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation	4
2	Aufgaben- und Zielstellung	4
3	Zeitplan	6
4	Methodisches Vorgehen	8
5	Ergebnisse	10
5.1	Anforderungsspezifikation, Materialauswahl und -beschaffung sowie Charakterisierung	10
5.1.1	Charakterisierung Fäden und Gewebe	10
5.1.2	Erarbeitung von Kennwerten und Messmethoden	18
5.2	Applikation der Polymere	26
5.2.1	Applikation von ausgewählten Polyaminen bzw. Polycarbonsäuren auf den Substraten und Herstellung stabiler Adsorbate	26
5.2.2	Charakterisierung der hergestellten Schichten	26
5.3	Oberflächenmodifizierung und Partikel-Kopplung	28
5.3.1	Oberflächenmodifizierung von phototropen Gläsern	28
5.3.2	Kopplung der phototropen Partikel an die oberflächenmodifizierten PET-Substrate	29
5.4	Simulationen und Vorbereitung Versuchsstand	34
5.4.1	Dynamische Simulation der energetischen Effekte	34
5.4.2	Tageslichtsimulationen	41
5.4.3	Konzeption und Aufbau eines Markisen-Versuchsstandes	47
5.5	Experimentelle Untersuchungen zu lichttechnischen und energetischen Eigenschaften strahlungsadaptiver textiler Materialien	53
5.5.1	Nullmessungen, Basismaterialien und erstes Funktionsmuster (Messkampagne 1 und 2)	53
5.5.2	Messungen zum Einfluss der UV-Strahlung auf strahlungsadaptives Verhalten des ersten Versuchsmusters (Messkampagne 3)	58
5.5.3	Messungen zum Einfluss der Farbstoffmenge (Messkampagne 4)	63
5.5.4	Messtechnische Analyse des strahlungsadaptiven Eigenschaftsprofils beschichteter Markisenstoffe unter Variation von Basismaterial, Farbstoffmenge, und Strahlungsintensität (Messkampagne 5)	67
5.6	Textiltechnologische experimentelle Untersuchungen	80
5.6.1	Gebrauchsdauereigenschaften	80
5.6.2	Konfektionierung – Auswahl Fügeverfahren	93
6	Zusammenfassung und Ausblick	98
6.1	Bewertung der Zielerreichung	98
6.2	Verwertung der Ergebnisse und weiterführende Entwicklungen	102
7	Quellen- und Literaturverzeichnis	104
8	Tabellenverzeichnis	107
9	Abbildungsverzeichnis	109
10	Anhang	111
10.1	Fotodokumentation zur Strahlungsadaption untersuchter Gewebevarianten	111

10.1.1 Gewebevariante Ettlin weiß	111
10.1.2 Gewebevariante Ettlin β 25	114
10.1.3 Gewebevariante Ettlin β 35	117
10.1.4 Gewebevariante Ettlin β 55	120
10.1.5 Gewebevariante Ettlin β 60	122
10.2 Fotodokumentation zur Strahlungsadaption untersuchter Folien	125
10.2.1 Strahlungsabhängige Transparenz	125
10.2.2 Strahlungsabhängige Farbänderung	126
10.2.3 Abklingverhalten	127

1 Ausgangssituation

Bei der Planung nachhaltiger Gebäude spielen Fassadenöffnungen eine große Rolle, da sie den Energiebedarf, die Energiekosten, den thermischen und visuellen Komfort sowie den Wärmeschutz maßgeblich beeinflussen. Die Einflussgrößen auf die jeweiligen Qualitäten stehen teilweise im Zielkonflikt. Dieser Konflikt besteht u.a. zwischen der Tageslichtnutzung und dem Wärmeeintrag/Wärmeverlust durch die Fassadenöffnungen in Form von Verglasungen und Sonnenschutzsystemen. Diese sollen den Raum einerseits vor zu hohen solaren Wärmeeinträgen im Sommer und den Nutzer vor Direktstrahlung schützen. Andererseits soll verfügbares Sonnenlicht maximal genutzt und Kunstlicht reduziert werden. Darüber hinaus soll der Nutzer auch bei aktiviertem Sonnenschutz eine Sichtverbindung nach außen haben.

Die Anforderung an die Sonnenschutzfunktion ist im Winter anders als im Sommer. Im Winter besteht das Schutzziel in der Reduzierung der Gebäudeauskühlung durch die Wärmestrahlung des Innenraumes nach außen und die Erhöhung der solaren Gewinne ohne Verringerung der Blendschutzfunktion. Im Sommer ist das Schutzziel die Reduzierung der Aufheizung des Innenraumes und die Reduzierung der Leuchtdichte auf der Innenseite des Sonnenschutzes.

Neben der Erfüllung visueller und thermischer Anforderungen müssen Sonnenschutzsysteme windstabil, UV-beständig und schmutzabweisend sein. Diese drei Grundanforderungen erfüllen Senkrechtmarkisen bereits sehr gut.

Der Nachteil von Markisen besteht in einem geringen Lichttransmissionsgrad bei gleichzeitig sehr guter Sonnen- und Blendschutzfunktion. Aus diesem Defizit ergibt sich der Forschungsbedarf zur Entwicklung eines strahlungsadaptiven Markisengewebes vornehmlich für den Einsatz in Senkrechtmarkisen sowohl im Neubau als auch im Bestand.

2 Aufgaben- und Zielstellung

Es soll ein Markisen-Gewebe einschließlich Beschichtung für kommerziell verfügbare textile Sonnenschutzsysteme mit senkrechter Anwendung außerhalb von Verglasungen (Senkrechtmarkisen) entwickelt werden, die ihre Transmissions- und Absorptionseigenschaften in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität der Sonne verändern. Dabei wird die Transmission des sichtbaren Strahlungsanteils (Wellenlängen von 380 bis 780 nm) durch kontinuierlich zunehmende Absorption so gedämpft, dass ein vorgegebener Maximalwert (z. B. eine Leuchtdichte von $L_v = 2.000 \text{ cd/m}^2$) nicht signifikant überschritten wird. Die Dämpfung ist reversibel, so dass beim Unterschreiten eines vorgegebenen Sollwertes, der beispielsweise gleich dem Maximalwert sein kann, sich die Transmission des Sonnenschutzes wieder erhöht. Die Steuerung des veränderlichen Absorptionskoeffizienten erfolgt dabei über die Intensität des UV-Anteils des einstrahlenden Sonnenlichts. Die Strahlungsintensität der Sonne ist sowohl von der Jahreszeit als auch vom vertikalen Sonnenstand abhängig, so dass mit einem adaptiven Absorptionskoeffizienten sowohl auf die jahreszeitlichen als auch die täglichen Veränderungen der Sonnenstrahlung reagiert werden kann.

Für Nichtwohngebäude kommen vorwiegend Jalousien und Markisen als bewegliche Sonnen- und Blendschutzsysteme zur Anwendung. Markisen werden häufig in Schulen und Kitas eingesetzt, da die Anforderung an die Beleuchtungsstärke (mit Ausnahme von Fachkabinetten) nur 300 Lux beträgt und damit ein geringerer Lichttransmissionsgrad als bei Büroarbeitsplätzen und Fachkabinetten (500 Lux) notwendig ist. Außerdem müssen Markisen, die ein Mindestmaß an Lichttransmission aufweisen, nicht verstellt werden. Das erhöht die Nutzerakzeptanz.

Für Büros, Labore, und Unterrichtsräume besteht zusätzlich eine erhöhte Anforderung an die Farbwiedergabe. Nach DIN EN 12464 ist ein Farbwiedergabeindex von mindestens 80 erforderlich. Diese Anforderung erfüllen nur sehr helle und graue Markisen. Diese haben allerdings ungünstige Transmissions- und Absorptionseigenschaften. Auch dieser Zielkonflikt soll gelöst werden.

Für die Bewertung der Lichteigenschaften von Markisen sind der Lichttransmissionsgrad τ (das in den Raum transmittierende sichtbare Licht im Verhältnis zur Gesamtstrahlung auf die Gebäudeöffnung) und der Transparenzgrad (Durchsichtigkeit von innen nach außen) die bestimmenden Größen.

Für die Bewertung der energetischen Eigenschaften von Markisen ist der Abminderungsfaktor F_c die bestimmende Größe. Der Gesamtenergiedurchlassgrad g_{tot} (Anteil der in den Raum durch die Fassadenöffnungen eingetragenen Strahlungsenergie der Sonne) ergibt sich aus dem Energiedurchlassgrad g der Verglasung multipliziert mit dem Abminderungsfaktor F_c des Sonnenschutzes (Markise). Eine Verglasung ohne Sonnenschutzvorrichtung hat einen Abminderungsfaktor von 1. Marktübliche Markisen haben einen Abminderungsfaktor von 0,2 bis 0,5.

Für die Anwendung bedeutet das folgende Zielstellungen.

Blendschutz

Sowohl im Winter als auch im Sommer sollte der Blendschutz relativ konstant sein. Es wird eine Begrenzung der Leuchtdichte auf 3.000 cd/m² angestrebt.

Lichttransmission

Unter Berücksichtigung der Blendschutz-Ziele wird ein Transmissionsgrad des sichtbaren Strahlungsanteils (Wellenlängen zwischen 380 und 780 nm) von mindestens 30 % angestrebt.

Transparenz (Durchsicht nach außen)

Es wird ein Transparenzgrad von mindestens 30 % angestrebt.

Farbwiedergabe

Es wird ein Farbwiedergabeindex $R_a \geq 80$ angestrebt.

Wärmeschutz

Für den Winterfall (Nutzung solarer Wärmegewinne) wird ein F_c -Wert von 0,4 angestrebt.

Für den Sommerfall (Vermeidung solarer Wärmeeinträge) wird ein F_c -Wert von 0,2 angestrebt.

Die aktuelle Normung kategorisiert die Stoffeigenschaften wie folgt.

Thermische und visuelle Stoffeigenschaften nach DIN EN 14501

Thermischer Komfort*	Visueller Komfort		
Sommerlicher Wärmeschutz	Blendschutz	Durchsicht nach außen	Sichtschutz bei Nacht
 0 - sehr geringer Wärmeschutz 1 - geringer Wärmeschutz 2 - guter Wärmeschutz 3 - sehr guter Wärmeschutz 4 - sehr hoher Wärmeschutz	 0 - sehr geringer Blendschutz 1 - geringer Blendschutz 2 - guter Blendschutz 3 - sehr guter Blendschutz 4 - sehr hoher Blendschutz	 0 - keine Durchsicht 1 - sehr eingeschränkte Durchsicht 2 - eingeschränkte Durchsicht 3 - gute Durchsicht 4 - sehr gute Durchsicht	 0 - sehr geringer Sichtschutz 1 - geringer Sichtschutz 2 - guter Sichtschutz 3 - sehr guter Sichtschutz 4 - sehr hoher Sichtschutz
* Einsatz im Senkrecht-Bereich: Berechnung g_{tot} nach DIN EN 13 363-1 Zweifachglas mit Wärmeschutz $U = 1,2$ $g = 0,59$ (Referenzglas C nach DIN EN 14501 im Außeneinsatz)			

Die Ziele können gemäß der Klassifikation nach DIN EN 14501 auch wie folgt definiert werden.

Sommerlicher Wärmeschutz:	4
Blendschutz:	3
Durchsicht nach außen:	3
Farbwiedergabeindex	80

Die Forschungsleistungen werden von folgenden vier Instituten mit Unterstützung durch einen Praxispartner erbracht.

Forschungsinstitut	Leistungsschwerpunkt
Steinbeis-Transfer-Institut Bau- und Immobilienwirtschaft (STI) an der Steinbeis-Hochschule-Berlin GmbH	Projektmanagement Tageslichtsimulationen
Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) an der Technischen Universität Dresden	Kennwertermittlung für die Gewebe (als Datenbasis für die energetische Simulation und die Tageslichtsimulation), Gebrauchsdauerbewertung, Verarbeitungsrichtlinien und Prozessparameter Fügetechnik
Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e. V. (IPF)	Oberflächenmodifizierung von textilen Gebilden aus Poly(ethylenterephthalat) (PET) sowie Aufbringen oberflächenmodifizierter Glas- und Kunststoffpartikel mit phototropen Eigenschaften
ILK Dresden Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH (ILK)	Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Wirkung strahlungsadaptiver textiler Flächen auf die Energiebilanz des angekoppelten Raumes und der thermischen und visuellen Behaglichkeit
Praxispartner	Leistungsschwerpunkt
ETTLIN Spinnerei und Weberei Produktions GmbH & Co. KG (ETTLIN)	Bereitstellung von Rohmaterial (Garne und Gewebe, die für Markisen verwendet werden) zur Charakterisierung, Applizierung, Oberflächenmodifizierung und Musterprüfung Bereitstellung von Markisengeweben aus eigener Produktion für vergleichende Untersuchungen im Versuchsstand

3 Zeitplan

Der Arbeitsfortschritt entspricht dem Zeitplan gemäß Projektantrag. Die Zwischenergebnisse entsprechen den Erwartungen des Forschungsteams.

Projektlaufzeit: 24 Monate (15.06.2016 – 14.06.2018)

Arbeitspaket	Zeitraum [Projektmonat]																										
AP 0: Projektmanagement	1.-12.												13.-24.														
AP 1: Anforderungsspezifikation, Materialauswahl und -beschaffung, Charakterisierung																											
AP 1.1: Textilphysikalische Charakterisierung Fäden und Gewebe	1.-2.																										
AP 1.2: Chemische Charakterisierung Fäden und Gewebe	1.																										
AP 1.3: Erarbeitung von Kennwerten und Messmethoden	1.-3.																										

Tabelle 1: Zeitplan für das Forschungsprojekt

4 Methodisches Vorgehen

Im Jahre 1899 bezeichnete Willy Marckwald Substanzen, die sich bei Licht bzw. Dunkelheit reversibel verfärbten, als Phototrope. Neben vielen organischen Verbindungen spielen insbesondere phototrope Gläser in der Optik eine besondere Bedeutung. So dunkeln optische Linsen aus phototropem Glas (z. B. Brillen) unter Einwirkung des Sonnenlichts und hellen im Dunklen wieder auf. Ursache für dieses Phänomen ist die lichtinduzierte Zersetzung von Silberhalogeniden (z. B. AgBr), die im Glas gelöst vorliegen. Das Entstehen von metallischem Silber führt zur Absorption im sichtbaren Bereich des Lichts, also zu einer dunklen Tönung des Glases. Im Dunkeln erfolgt eine relativ schnelle Rückreaktion zum entsprechenden Halogenid, das durch seine geringe Absorption im sichtbaren Bereich des Lichts die hohe Transparenz des Glases wieder herstellt. Ein Übertragen des bekannten Phänomens auf eine Gewebeoberfläche erscheint für den Gebrauchswert einer Markise vorteilhaft, da durch die Ausscheidung von Silberclustern über den gesamten Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts eine erhöhte Absorption auftritt und so Farbverfälschungen unterbunden werden.

Für die Ausrüstung der Markisen ist ein Aufbringen von Mikroglaskugeln mit phototropen Eigenschaften auf die – wie oben beschrieben – modifizierten Gewebeoberflächen vorgesehen. Dazu werden Mikrokugeln mit handelsüblichen oxiranfunktionalisierten Silanen oberflächenmodifiziert, wobei die Reaktionsbedingungen so zu wählen sind, dass eine Reaktion der Silane mit der Glasoberfläche ohne Ringöffnung der Oxirane abläuft. Über die intakten Oxirane kann nachfolgend eine Anbindung an die amin- oder carboxylfunktionalisierten Gewebeoberflächen erfolgen. Die dabei ausgebildeten kovalenten Bindungen garantieren ein Haften der Mikroglaskugeln auf dem Substrat. Alternativ kann auch eine Oberflächenmodifizierung der Mikroglaskugeln mit Aminosilanen erfolgen, die im Falle aminfunktionalisierter Gewebeoberflächen über Dialdehyde, Diepoxide oder Dicarbonsäurederivate gekoppelt werden können (anstelle einer Ausstattung der Gewebeoberflächen mit Carboxylfunktionalitäten könnte bspw. eine Ausrüstung mit deren Methylestern zur Erhöhung der Reaktivität gegenüber den primären Aminogruppen des Silans erfolgen).

Neben der wellenunabhängigen Absorption des Lichts im sichtbaren Bereich erhöht das Aufbringen der Mikroglaskugeln auch die Reflexionseigenschaften der Markise unabhängig vom Einfallswinkel des Sonnenlichts.

Eine Vielzahl von organischen Farbstoffmolekülen zeigt phototrope Eigenschaften. Vorteilhaft erscheint der Einsatz phototroper Farbstoffe durch ihr prinzipiell einfaches Applizieren auf der Faser oder dem Gewebe, das analog dem Färben oder mittels Drucken erfolgen kann. Nachteilig für einen Einsatz von Farbstoffen bei Markisen sind die geringe Oxidationsstabilität vieler photochromer Farbstoffe und die Absorption bestimmter Wellenlängen im sichtbaren Bereich des Lichts, was zur Farbigeit des transmittierten Lichts führt. Wenn eine hohe Farbtreue des transmittierten Lichts erwünscht ist, kann eine Kombination der drei Grundfarben Rot, Grün und Blau – unter der Voraussetzung, dass diese drei Farbstoffe ähnliche Absorptionskoeffizienten haben – zu einer reversiblen Verdunklung der Markisen führen.

Dazu müssen geeignete Farbstoffe ausgewählt und die Möglichkeiten ihrer Applikation untersucht werden. Interessant erscheinen Farbstoffe aus den Stoffklassen der Triarylmethane, der polycyclischen Chinone, der Arylazoverbindungen, Spiropyrane und der 4,4'-Bipyridiniumsalze (Viologene und Caroviologene). Verbesserte Stabilitäten erscheinen durch das Inkorporieren der Farbstoffe in die kommerziell applizierten Acrylmatrixen der Schichten möglich.

Perspektivisch kann auch das Einbringen geeigneter Farbstoffkombinationen in Mikrokapseln erfolgen, die dann kovalent auf amin- oder carboxylfunktionalisierte PAN-Gewebe bspw. durch Tintenstrahldrucker aufgebracht werden können.

Folgende Grafik veranschaulicht das methodische Vorgehen zur Herstellung des strahlungsadaptiven Sonnenschutzes.

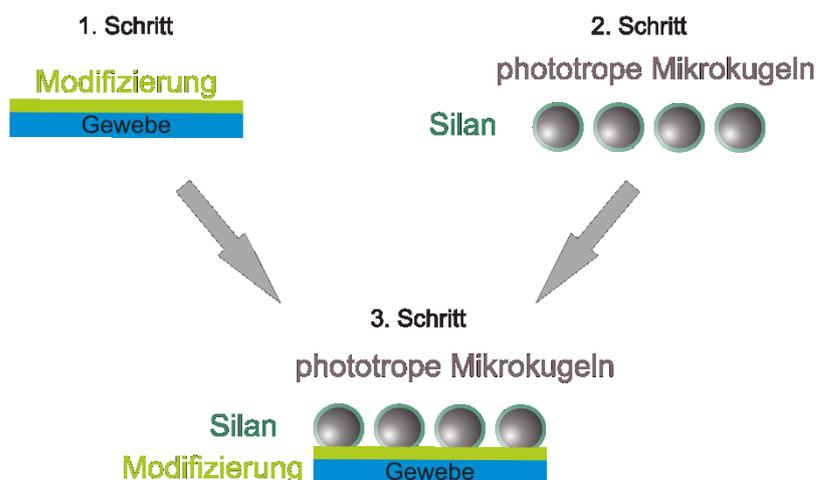


Abbildung 1: Prinzipskizze des methodischen Vorgehens zur Herstellung des strahlungsadaptiven Sonnenschutzes

Um das Markisengewebe für die Ankopplung der phototropen Mikrokugeln vorzubereiten, wird im ersten Schritt eine Modifizierung aufgebracht. Dies wird durch mehrminütiges Tauchen der Gewebe in wässrige Modifikatorlösungen realisiert. Dabei adsorbieren die Modifikatormoleküle aus der Lösung haftfest an die Gewebeoberfläche.

Um eine chemische Anbindung der phototropen Mikrokugeln an die modifizierte Gewebeoberfläche zu ermöglichen, werden die Mikrokugeloberflächen im zweiten Schritt funktionalisiert. Dazu werden die phototropen Mikrokugeln in eine wässrige, leicht saure Lösung eingebracht, welche außerdem Silane enthält. In dieser Lösung erfolgt eine Kopplung der Silane an die Mikrokugeloberflächen. Dieses Vorgehen eignet sich besonders für die oben beschriebenen Mikrogaskugeln, ist aber auch auf andere Kugelarten übertragbar.

Im dritten Schritt erfolgt die Kombination der funktionalisierten, phototropen Mikrokugeln mit dem modifizierten Markisengewebe. Die Mikrokugeln werden mit gängigen Methoden definiert auf die Gewebeoberfläche appliziert. Es kommt zur Ausbildung einer chemischen Bindung zwischen der Gewebemodifizierung und den Silanen an den Kugeloberflächen, was zu einer haftfesten Anbindung der Mikrokugeln führt.

5 Ergebnisse

5.1 Anforderungsspezifikation, Materialauswahl und -beschaffung sowie Charakterisierung

5.1.1 Charakterisierung Fäden und Gewebe

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden

Normative Rahmenbedingungen für Textilien

In Recherchen über die Verwendung von Kennwerten für textile Materialien, die als Markisenmaterial eingesetzt werden, wurden Hinweise des Industrieverbandes Technische Textilien - Rollläden – Sonnenschutz e.V. (ITRS) (Tabelle 2) und von Mitwettbewerbern (Tabelle 3) im Bereich Sonnenschutz erfasst und als Basis für die eigene textilphysikalische Charakterisierung von Sonnenschutzgeweben herangezogen.

Bezeichnung	Textilnorm	Norm für beschichtete Textilien
Flächengewicht	EN 12127	EN ISO 2286-1
Höchstzugkraft- und -dehnung	EN ISO 13934-1	EN ISO 1421
Weiterreißfestigkeit (Schenkel-Methode)	EN ISO 13937-2	EN ISO 13937-2
Weiterreißfestigkeit (Zungen-Methode)	EN ISO 13937-4	EN ISO 13937-4
Wasserdruckbeständigkeit	EN ISO 20811	DIN EN 1734
Wasserabweisung	EN 24920	EN 24920
Lichtechtheit	EN ISO 105-B02	EN ISO 105-B02
Wetterechtheit	EN ISO 105-B04	EN ISO 105-B04
Farbechtheit (mit Graumaßstab)	EN ISO 105-A02	EN ISO 105-A02

Tabelle 2: Textilnormen zur Beurteilung von konfektionierten Markisentüchern lt. ITRS

Von den europäischen Mitwettbewerbern werden Materialeigenschaften länderspezifisch teils unterschiedlich benannt und zur Charakterisierung der textilen Flächengebilde angegeben, jedoch verweisen fast alle Anbieter auf Materialkennwerte und ggf. Prüfnormen für folgende Einzelmerkmale:

- Flächengewicht
- Höchstzugkraft bzw. Reißkraft, Reißfestigkeit oder Reißdehnung
- Öffnungsfaktor
- Brandverhalten bzw. Brandklasse
- Dicke
- Fäulnisbeständigkeit (Zertifizierungen)
- Oeko-Tex Standard 100
- Weiterreißfestigkeit
- UV-Schutzfaktor (USF-Faktor) (ohne Normangabe).

Angaben zu Normen von europäischen Mitwettbewerbern zur Ermittlung von Materialkennwerten sind aus Tabelle 3 zu entnehmen.

ROMA KG, Deutschland (Hersteller Sonnenschutzsysteme)		Sattler SUN-TEX GmbH, (Teil der Sattler AG) Österreich (Hersteller und Ausrüster von Geweben)		Dickson-Constant GmbH - SAS Frankreich (Hersteller und Ausrüster von Geweben)		N.V. RENSON Sunprotection-Screen S.A, Belgien (Hersteller von Sonnenschutz- und Lüftungssystemen)	
Parameterbezeichnung	Norm	Parameterbezeichnung	Norm	Parameterbezeichnung	Norm	Parameterbezeichnung	Norm
Flächengewicht [g/m ²]	NF EN 12 127/ NF EN ISO 2286-2/-3	Flächengewicht [g/m ²]	DIN EN ISO 12 127	Flächengewicht [g/m ²]	ISO 3801	Flächengewicht [g/m ²]	ISO 2286-2
Materialdicke [mm]	ISO 5084	Materialdicke [mm]	-	Materialdicke [mm]	ISO 2286-3	Materialdicke [mm]	ISO 2286-3
Öffnungsfaktor [%]	NBN EN 480/ EN 14500	-	-	Öffnungsfaktor [%]	EN 14500	-	-
Reißkraft (Kett/Schuss)	NF EN ISO 1421	Höchstzugkraft [daN/5 cm]	DIN EN ISO 13 934-1	Reißfestigkeit [daN]	ISO 13934-1	Zugfestigkeit [daN/5 cm]	EN ISO 1421/ EN ISO 13934-1
		Höchstzugkraftdehnung [%]	DIN EN ISO 13 934-1	Reißdehnung [%]	ISO 13934-1	-	-
		Weiterreißkraft [daN]	DIN EN ISO 13 937-2	Weiterreißfestigkeit [daN]	DIN 53 363	Reißfestigkeit [daN]	DIN 53 363/ EN 1875-3
Brandverhalten	DIN 4102-1	Brandverhalten	DIN 4102	Brandklasse	DIN 4102	Brandklasse	NFP 92 503
Wasserdruckbeständigkeit	-	Wassersäule	EN 20 811	-	-	-	-
		Farbechtheit/ Lichtechtheit	DIN EN ISO 105-B02	UV-Beständigkeit	ISO 105 B02	-	-
				Wetterbeständigkeit	ISO 105 B04	-	-
Fäulnisbeständigkeit	IMO4-zertifiziert (CE-Kennz. 0062)	Wasserabweisung (Sprühverfahren)	EN 24 920	-	-	-	-
-	-	Ölabweisung	AATC 118	-	-	-	-
UV-Schutzfaktor	-						
Oekotex	Standard 100						
Garnmaterial: Glasfaser; hochfest Polyester; hochfest Polyester, PVC-fixiert; Polyester-Acrylmischung		Garnmaterial: Polyester; Acryl		Garnmaterial: Polyester/ PVC bzw. Polyester hochfest/ Spezialbeschichtung; Polyacryl, Polyacryl/Polyester		Garnmaterial: Polyacryl; Glas; Polyester	
Konstruktion: Gewebe und Spezialgewebe		Konstruktion: Spezialkonstruktion		Konstruktion: Biaxialgelege		Konstruktion: keine Angaben	

Tabelle 3: Charakterisierung der Textilien für Sonnenschutzanwendungen verschiedener Anbieter

Als Gewebe werden allgemein textile Flächengebilde bezeichnet, die aus mindestens zwei Fadensystemen (Kett- und Schussfadensystem) bestehen, die in der Draufsicht auf die Gewebeoberfläche unter einem Winkel von genau oder annähernd 90° verlaufen und bindungsgerecht miteinander verkreuzt sind. Die Fäden, welche parallel zur Länge des Gewebes verlaufen werden Kettfäden (KF), die welche parallel zur Breite des Gewebes verlaufen werden Schussfäden (SF) genannt. Die Verbindung der KF und SF zu einem Gewebe erfolgt vorwiegend durch Reibschluss an ihren Kreuzungsstellen, an denen die KF bei klassischen Bindungsarten (Leinwand-, Köper-, Atlasbindungen) teils über, teils unter den SF liegen. Damit ein Gewebe ausreichend schiebefest ist, müssen die KF und SF meistens relativ dicht verwebt werden. Diese Gewebe weisen bis auf wenige Ausnahmen auch ein geschlossenes Warenbild auf.

Sind offene oder gitterartige und gleichzeitig schiebefeste Gewebe gefordert, können diese klassisch in Dreher-Bindung hergestellt werden. Sie werden u. a. für Gardinen oder für die Verstärkung von Teppichrücken eingesetzt. Das klassische Herstellungsverfahren mit Dreherlitzten besitzt hinsichtlich Produktivität, Flexibilität und Verschleiß beträchtliche Nachteile. Neuere Herstellungsverfahren für Dreher-Gewebe (EasyLenoTechnology) sind demgegenüber vorteilhafter.

Die ETTLIN Spinnerei und Weberei Produktions GmbH & Co.KG (ETTLIN) fertigt Dreher-Gewebe mittels der EasyLenoTechnology von DORNIER. Dabei können offene und/oder geschlossene Strukturen mit völlig unterschiedlichen Öffnungsgraden und mit verschiedenen Garnen gestaltet werden. Im Zusammenhang mit der EasyLenoTechnology wurde der Begriff "Gedrebe" für diese Art der Dreher-Gewebe eingeführt. Im Weiteren Text wird jedoch der gebräuchlichere Begriff „Dreher-Gewebe“ verwendet.

Ein Dreher-Gewebe besteht im Allgemeinen aus mindestens zwei Kettfadensystemen und einem Schussfadensystem. Man unterscheidet bei dieser Gewebearart bindungstechnisch zwischen Voll- und Halbdreher-Gewebe. In der folgenden Abbildung 2 entspricht der strukturelle Aufbau des Gewebes dem eines Halbdreher-Gewebes – wie vom Unternehmen ETTLIN für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes bezogen – bestehend aus:

- 1 – Stehfadensystem (KF)
- 2 – Bindefadensystem (KF)
- 3 – Schussfadensystem.

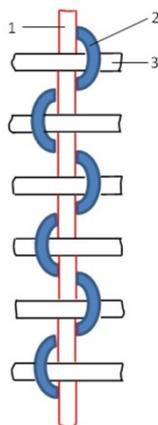


Abbildung 2: Halbdreher-Gewebe

Vom Praxispartner ETTLIN wurden zu Beginn des Forschungsvorhabens folgende zwei, nach der DORNIER EasyLeno® Technology hergestellte, Versuchsmuster bereitgestellt (Tabelle 4):

- unmodifiziertes PET-Gewebe schwarz,
- unmodifiziertes PET-Gewebe weiß.

	unmodifiziertes PET-Gewebe schwarz	unmodifiziertes PET-Gewebe weiß
--	------------------------------------	---------------------------------



Tabelle 4: Darstellung der verwendeten Dreher-Gewebe

Die Kettfadensysteme (Steh- und Binfaden) sind bei beiden Dreher-Geweben identisch. Sie bestehen beide aus PET-Monofil-Garnen unterschiedlicher Stärke. Die Unterschiede zwischen den Geweben sind im Schussfadensystem zu finden.

Im unmodifizierten PET-Gewebe schwarz wurden für die Kettfadensysteme und im Schussfadensystem ein PET-Monofil-Garn verwendet. Im unmodifizierten PET-Gewebe weiß kam im Schussfadensystem ein Polyesterstapelfasergarn zum Einsatz. (Tabelle 4). Die Feinheiten bzw. Durchmesser der jeweils verwendeten Garne sind aus Tabelle 5 ersichtlich. Die ca.-Werte in Tabelle 5 ergeben sich aus Prüfungen an aus dem Gewebe herausgelösten Garnabschnitten (verwebtes Garn). Sie weichen von den Angaben in der Übersichtstabelle (Tabelle 8) ab, da dort die später ermittelten Garnparameter der unverarbeiteten Garne hinterlegt sind.

Bezeichnung	unmodifiziertes PET-Gewebe schwarz		unmodifiziertes PET-Gewebe weiß	
	Durchmesser [mm] (Herstellerangaben)	Feinheit [tex] (Prüfwert)	Durchmesser [mm] (Herstellerangaben)	Feinheit [tex] (Prüfwert)
KF – Binfaden	0,064	ca. 4,68	0,064	ca. 4,68
KF – Stehfaden	0,126	ca. 17,8	0,126	ca. 17,8
Schussfaden	0,138	17,86	-	(Nm 34 (H)) bzw. 29,4 (u)

Tabelle 5: Garn-Kennwerte

H – Herstellerangabe

u – umgerechnet (tex = 1000/Nm; lt Tabelle aus DIN 60910, Nm 34 = 295 dtex für Kammgarn, alle anderen Garne 300 dtex)

Die textilphysikalische Charakterisierung wurde ergänzend an zwei weiteren Geweben mit offenen Flächenstrukturen erfasst, geprüft und die Kennwerte denen der beiden Dreher-Gewebe von ETTLIN gegenübergestellt (Tabelle 6):

- aerosky M 45 (aeronautec GmbH, Entwicklungsprodukt)
- Gaze (für Insektenschutzgitter).

	Prüfungen im ITM in Anlehnung an Prüfnorm	aerosky M 45	Gaze	unmodifiziertes PET-Gewebe schwarz	unmodifiziertes PET-Gewebe weiß
Varianten		0-0	0-1	1	2
Material – Kette (K)		PES	GF	PET-Monofil	PET-Monofil
Material – Schuss (S)		PES	GF	PET-Monofil	Polyesterstapelfasern
Bindung		Leinwand	Leinwand	Halbdreher (2K/1S)	Halbdreher (2K/1S)
Beschichtung		Polyurethan	?	-	-
Kettfadendichte [Fd/cm]	DIN EN 1049-2	27,0	6,3	8,0	7,9
Schussfadendichte [Fd/cm]	DIN EN 1049-2	28,0	7,0	55,4	41,6
Flächenmasse [g/m ²]	DIN EN 12127	137,5	123,5	128,0	152,9
Dicke [mm]	DIN EN ISO 5084	0,21	0,37	0,33	0,36
Höchstzugkraft - Kette [N/5 cm]	DIN EN ISO 13934-1	760	-	400	393
Höchstzugkraftdehnung - Kette [%]	DIN EN ISO 13934-1	27,8	-	18,2	15,4
Höchstzugkraft - Schuss [N/5 cm]	DIN EN ISO 13934-1	918	-	2.720	1.500
Höchstzugkraftdehnung - Schuss [%]	DIN EN ISO 13934-1	24,8	-	24,2	15,8
Luftdurchlässigkeit - Schauseite [mm/s]	DIN EN ISO 9237	13,3 (p _{diff} = 100 Pa)	18.600,7 (p _{diff} = 100 Pa)	4.014,5 (p _{diff} = 100 Pa)	364,0 (p _{diff} = 100 Pa) ⁸

Tabelle 6: Textil-physikalische Charakterisierung von verschiedenartigen Geweben

PES – Polyesterfaser, GF – Glasfaser, PET – Polyethylenterephthalat

Alle vier Gewebe unterscheiden sich hinsichtlich Materialeinsatz und Bindung deutlich voneinander. Stapelfasergarne bestehen aus endlich langen Fasern, aus denen durch Verdrehen mehrerer Fasern im Spinnprozess ein Garn mit beliebiger Länge gebildet wird. Demgegenüber wird eine endlos lange Faser als Filament bezeichnet. Bei den in Tabelle 6 als „Monofil“ (auch Monofilament oder Draht) genannten Materialien handelt es sich also um jeweils nur ein einzelnes (mono) Filament. Für Monofilamente ist es üblich, Angaben zur Stärke des Monofilaments als Durchmesser anzugeben. Garnfeinheiten bzw. -stärken der Materialien aerosky M 45 und Gaze wurden nicht ermittelt. Beide Gewebe sind mit einer Beschichtung ausgerüstet und würden selbst bei dem Versuch, die Garne aus dem Materialverbund herauszulösen, aufgrund von Verformungen durch den Verarbeitungsprozess, nicht die gewünschten Aussagen über das Ausgangsmaterial erbringen. Das Gewebe „Gaze“ ist ein handelsübliches Material und für die Anwendung als Insektenschutzgitter vorgesehen, bei aerosky M 45 handelt es sich um ein Material, das für Außenanwendungen entwickelt wurde.

Anbieter von Markisenstoffen führen u. a. das Merkmal „Öffnungsfaktor“ zur Charakterisierung für Materialien (siehe Tabelle 3) mit dem Verweis auf DIN EN 14500 (Abschlüsse – Thermischer und visueller Komfort – Prüf- und Berechnungsverfahren) auf. In dieser Norm sind „Prüf- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Reflexions- und Transmissionskenngrößen, die anzuwenden sind, um Leistungsklassen von innen und außen liegenden Abschlüssen hinsichtlich des thermischen und visuellen Komforts nach den Festlegungen in EN 14501 (DIN EN 14501 – Abschlüsse – Thermischer und visueller Komfort – Leistungsanforderungen und Klassifizierung) zu bestimmen“, aufgeführt. Die Anwendung von DIN EN 14501 erstreckt sich auf „sämtliche Arten von Abschlüssen, Markisen und Jalousien, die in EN 12216 definiert sind“ und als „Sonnenschutzeinrichtung“ bezeichnet werden. Der Begriff „Öffnungskoeffizient“ wird in den genannten Normen als das „Verhältnis zwischen der Fläche der Öffnungen (A_{offen}) und der Gesamtfläche des Gewebes (A_{total})“ bezeichnet. Die Berechnung des Öffnungskoeffizienten kann nach DIN EN 14500, Anhang B erfolgen. Für normalen Lichteinfall (n) kann dieser Öffnungskoeffizient (C_0) in Näherung berechnet werden als: Tabelle 6

$$C_0 = \tau_{v, n-n} ,$$

wobei $\tau_{v, n-n}$ den normalen Lichttransmissionsgrad bezeichnet. Es wird in der Norm weiterhin darauf hingewiesen, dass, „für identische Gewebe, die sich nur in ihrer Farbe unterscheiden“, der „Öffnungskoeffizient als unabhängig von der Farbe angesehen“ werden kann. Er sollte für die dunkelste Farbe ermittelt werden.

Erste Untersuchungen zur Ermittlung eines Öffnungskoeffizienten (C_0) an den Geweben wurden in Anlehnung an DIN EN 14500, Anhang B vorgenommen. Dazu wurde der Anteil der offenen Flächen in den Geweben anhand von mikroskopischen Abbildungen der einzelnen Materialien in Näherung erfasst und der Öffnungskoeffizient (C_0) berechnet. Die computergestützte Auswertung der Mikroskopie-Bilder erfolgte mittels „ImageJ“.

Die Bestimmung des Öffnungskoeffizienten (C_0) in Anlehnung an DIN 14500 erfolgte nach

$$C_0 = A_{offen} / A_{total} * 100\%$$

Tabelle 7 veranschaulicht die unterschiedlichen Größen der Öffnungen in den untersuchten Geweben.

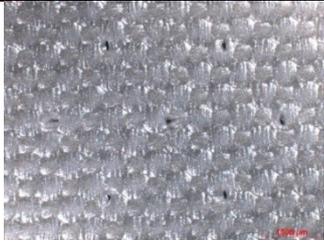
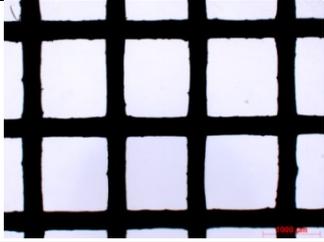
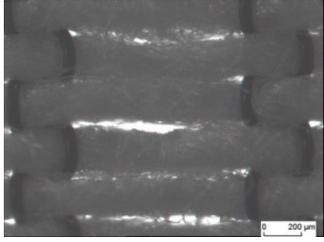
Material	Mikroskopie-Bilder	Öffnungs- koeffizient [%] (in Anle- hung an DIN 1450)	Normaler Licht- transmis- sionsgrad $\tau_{v, n-n}$ bei Annahme $C_0 = \tau_{v, n-n}$	Luftdurch- lässigkeit [mm/s] (in Anle- hung an DIN EN ISO 9237)	Fäden je Längeneinheit [Fd/cm]	
					Kette (K)	Schus- s (S)
aerosky M 45		0,33	0,0033	14,8	27,0	28,0
Gaze		62	0,62	18600,7	6,0	7,0
unmodifi- ziertes PET- Gewebe schwarz		21	0,21	4022,0	8,0	55,4
unmodifi- ziertes PET- Gewebe weiß		3	0,03	364,8	7,9	41,6

Tabelle 7: Größe der Öffnungen in den Geweben

Bei den weiterführenden Untersuchungen könnte eine lichttechnische Charakterisierung der textilen Materialien komfortabler mittels Transmissionsermittlung direkt am Gewebe vorgenommen werden.

Fortführung der Arbeiten

Mit der Fortführung der Arbeiten wurden 4 weitere Drehergewebe (Bezeichnung 3 – 6 in Tabelle 8) mit unterschiedlichen Schussgarnen bzw. Schussfadendichten in die Untersuchungen einbezogen. Als Kettfäden (Binde- und Steherfäden) wurde bei allen für die Untersuchungen im Rahmen des Projektes angefertigten Flächengebilden das gleiche Garnmaterial verwendet. Die charakteristischen Eigenschaften der Flächengebilde im unmodifizierten Zustand sind aus Tabelle 8 zu entnehmen.

	Prüfungen im ITM in Anlehnung an Prüfnorm	PET-Gewebe schwarz unmodifiziert	PET-Gewebe weiß unmodifiziert	ETTLIN LUX® 1252 B55, unmodifiziert	ETTLIN LUX® 1252 B60, unmodifiziert	P34 - B25, weiß unmodifiziert	P34 - B35 weiß unmodifiziert
Variante		1	2	3	4	5	6
Material – Kette (K)		PET-Monofil (schwarz)	PET-Monofil (schwarz)	PET-Monofil (schwarz)	PET-Monofil (schwarz)	PET-Monofil (schwarz)	PET-Monofil (schwarz)
Material – Schuss (S)		PET-Monofil (schwarz)	Polyesterstapelfasern (weiß)	PET-Monofil (transparent)	PET-Monofil (transparent)	Polyesterstapelfasern (weiß)	Polyesterstapelfasern (weiß)
Feinheit [tex]							
Bindefaden		4,77 (ca. 4,68)	4,77 (ca. 4,68)	4,77 (ca. 4,43)	4,77 (ca. 4,44)	4,77	4,77
Steherfaden		17,54 (ca. 17,8)	17,54 (ca. 17,8)	17,54 (ca. 17,16)	17,54 (ca. 17,26)	17,54	17,54
Schussfaden		20,58 (ca. 17,86)	30,34 ((Nm 34 (H)) bzw. 29,4 (u))	10,67 (ca. 7,01)	10,67 (ca. 7,13)	30,34	30,34
Bindung		Halbdreher (2K/1S)	Halbdreher (2K/1S)	Halbdreher (2K/1S)	Halbdreher (2K/1S)	Halbdreher (2K/1S)	Halbdreher (2K/1S)
Beschichtung		-	-	-	-	-	-
Kettfadendichte [Fd/cm]	DIN EN 1049-2	8,0	7,9	8,2	8,2	8,2	8,2
Schussfadendichte [Fd/cm]	DIN EN 1049-2	55,4	41,6	57,2	62,3	26,0	36,0
Flächenmasse [g/m²]	DIN EN 12127	128,0	152,9	66,46	71,40	101	133
Dicke [mm]	DIN EN ISO 5084	0,33	0,36	0,23	0,23	0,39	0,39
Höchstzugkraft - Kette [N/5 cm]	DIN EN ISO 13934-1	400	393	394	385	404	393
Höchstzugkraftdehnung - Kette [%]	DIN EN ISO 13934-1	18,2	15,4	15,2	16,6	17,8	17,8
Höchstzugkraft - Schuss [N/5 cm]	DIN EN ISO 13934-1	2.720	1.500	613	671	896	1290
Höchstzugkraftdehnung - Schuss [%]	DIN EN ISO 13934-1	24,2	15,8	29,6	30,6	15,0	15,6
Luftdurchlässigkeit - Schauseite [mm/s],	DIN EN ISO 9237	1.531,0 (p _{diff} = 50 Pa)	99,7 (p _{diff} = 50 Pa)	4.730,6 (p _{diff} = 50 Pa)	4.056,8 (p _{diff} = 50 Pa)	1.735 (p _{diff} = 50 Pa)	377 (p _{diff} = 50 Pa)

Tabelle 8: Materialparameter der hergestellten Gewebe

H – Herstellerangabe [Nm]

u – umgerechnet [tex] (tex = 1000/Nm; lt Tabelle aus DIN 60910, Nm 34 = 295 dtex für Kammgarn, alle anderen Garne 300 dtex)

Gegenüber Tabelle 6 wurde in Tabelle 8 für die Prüfungen der Luftdurchlässigkeit der Differenzdruck p_{diff} von 100 Pa auf 50 Pa reduziert, um für alle Materialien vergleichbare Ergebnisse angeben zu können.

5.1.2 Erarbeitung von Kennwerten und Messmethoden

Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH

Normative Rahmenbedingungen

Im Hinblick auf die Sicherstellung des thermischen und visuellen Komforts in einem Raum beschreiben aktuelle Normen eine Reihe von Kennwerten und Anforderungen. Auszugsweise nachfolgend genannte Normen stehen direkt oder indirekt in sehr engem Zusammenhang zur Verglasung eines Gebäudes, dem Verschattungssystem und dem Beleuchtungskonzept:

DIN EN 14500	Thermischer und visueller Komfort – Prüf- und Berechnungsverfahren
DIN EN 14501	Thermischer und visueller Komfort – Leistungsanforderungen und Klassifizierung
DIN EN 410	Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen
DIN EN 13363	Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen
DIN 5034	Tageslicht in Innenräumen
DIN 5035	Beleuchtung mit künstlichem Licht
DIN EN 12464-1	Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsstätten in Innenräumen
VDI 6011	Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung
DIN 6169-2	Farbwiedergabe – Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik
BRG 131	Natürliche und künstliche Beleuchtung von Arbeitsstätten
DIN V 18599-4, -10	Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Trinkwasser und Beleuchtung; Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung; Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten
DIN EN ISO 7730	Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der Thermische Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit
DIN EN ISO 13791	Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren
DIN EN ISO 13792	Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung sommerlicher Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Vereinfachtes Berechnungsverfahren

Kriterien des visuellen Komforts im Einflussgebiet der Kennwerte von Verglasung, Verschattung und Beleuchtung

Der visuelle Komfort in einem Raum ergibt sich nach den vorgenannten Richtlinien aus der Gesamtwirkung folgender quantitativ bewertbarer Einzelwirkungen.

- Tageslichtverfügbarkeit
- Sichtverbindung nach außen
- Blendfreiheit Tageslicht
- Blendfreiheit Kunstlicht
- Lichtverteilung
- Farbwiedergabe

Diese Bewertungskriterien beziehen sich auf die Wirkung des sichtbaren Lichts im Raum und werden maßgeblich von den Eigenschaften der Verglasung, des Verschattungs- und des Beleuchtungssystems beeinflusst.

Relevanz für den im Projekt zu entwickelnden strahlungsadaptiven Sonnenschutz haben die jeweils in den Normen und Richtlinien beschriebenen Kennwerte für Verglasung und Verschattung. Diese sind:

- Lichtdurchlässigkeit bzw. Lichttransmission τ_v
- Reflexionsverhalten bzw. Reflexionsgrad ρ_v
- Farbwiedergabe-Index
- Verschattungsgrad
- Transparenz

Die Kennwerte (insbesondere Transmissions- und Reflexionsgrad) lassen sich sowohl getrennt für diffuse und winkelabhängige direkte sichtbare Strahlung als auch in Abhängigkeit von der Wellenlänge der Strahlung (des Lichts) ermitteln.

Kriterien des thermischen Komforts im Einflussgebiet der Kennwerte von Verglasung, Verschattung und Beleuchtung

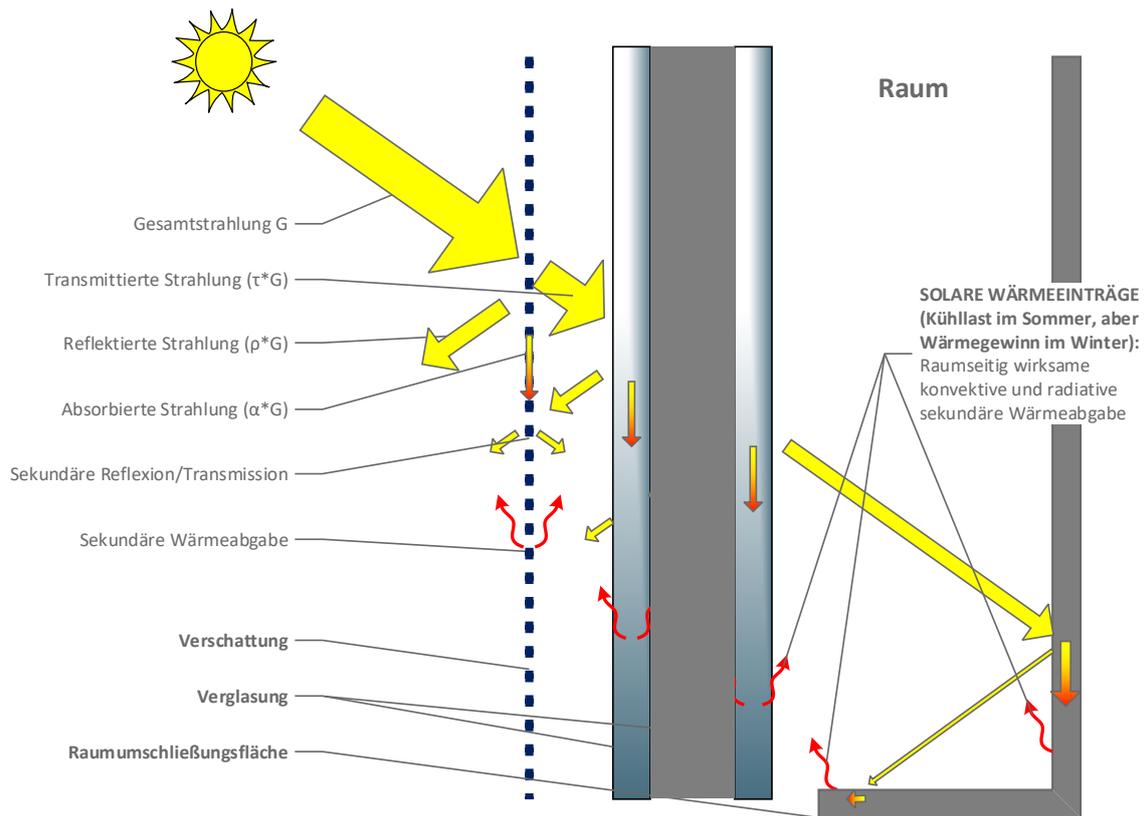
Der thermische Komfort in einem Raum ergibt sich nach den vorgenannten Richtlinien aus folgenden physikalischen Größen.

- Operative Temperatur (abhängig von Lufttemperatur und mittlerer Strahlungstemperatur der Umgebungsoberflächen)
- Zugluftrisiko in Abhängigkeit von Luftgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Turbulenzgrad
- Strahlungstemperatursymmetrie und Fußbodentemperatur
- Relative Luftfeuchte
- Vertikaler Temperaturgradient

Der Einfluss auf den thermischen Komfort in einem Raum umfasst zahlreiche Aspekte, die mit dem Wärme- und Feuchtehaushalt des Menschen in Zusammenhang stehen. Zu nennen sind Einflussgrößen für den Strahlungsaustausch des menschlichen Körpers mit den ihn umgebenden (transparenten, transluzenten oder opaken) Bauteiloberflächen und Einflussgrößen im Zusammenhang mit konvektiven Wärme- und Stofftransportprozessen des Menschen mit seiner Umgebung. Relevanz für den im Projekt zu entwickelnden strahlungsadaptiven Sonnen- und Blendschutz als Teil eines Systems aus Verglasung und Verschattung haben die jeweils in den Normen und Richtlinien beschriebenen Kennwerte:

- Wärmedurchgangskoeffizient bzw. U-Wert (Verglasung)
- Solarer Transmissionsgrad τ_e (winkelabhängig, getrennt für Verschattung und Verglasung)
- Solarer Reflexionsgrad ρ_e (winkelabhängig, getrennt für Verschattung und Verglasung)
- Solarer Absorptionsgrad α_e (winkelabhängig, getrennt für Verschattung und Verglasung
...und daraus resultierend...
- Energiedurchlassgrad g (Verglasung)
= Quotient aus solarem Wärmegewinn und (senkrechter) Einstrahlung ohne Verschattung
- Solarfaktor g_{tot} (gemeinsamer Wert für Verschattung und Verglasung)
= Quotient aus solarem Wärmegewinn und (senkrechter) Einstrahlung mit Verschattung
- Abminderungsfaktor F_c (gemeinsamer Wert für Verschattung und Verglasung)
= Quotient aus g_{tot} und g

Die Kennwerte berücksichtigen jeweils das gesamte Spektrum der solaren Einstrahlung im sichtbaren und unsichtbaren Bereich. Wesentlich für den thermischen Komfort ist die Tatsache, dass absorbierte kurzwellige Strahlung in den jeweiligen absorbierenden Bauteilen in langwellige Strahlung umgewandelt wird. Die Folge ist eine Temperaturerhöhung mit daraus resultierender konvektiver und radiativer Wärmeabgabe an die Umgebung. Je nach Lage des Bauteils wird die Wärme im oder außerhalb des Raumes wirksam.



Das Prinzip der Transmission, Absorption und Reflexion der Strahlung an transparenten Bauteilen gilt gleichermaßen für kurzwellige Solarstrahlung und langwellige (Wärme-)Strahlung aus der Umgebung.

Abbildung 3: Prinzipskizze der Strahlungsbilanz am Beispiel eines Raumes mit außen verschatteter Doppelverglasung

Diskrepanz der Verschattungs- und Verglasungseigenschaften vor dem Hintergrund des rationellen Energieeinsatzes

Solare Wärmegewinne spielen im Zusammenhang mit dem Energieeinsatz zur Raumtemperierung (Heizen/Kühlen) eine wesentliche Rolle. Während sie im Winter gewissermaßen die Raumheizung unterstützen, steigt im Sommer der Kühlenergiebedarf, um diese solare Wärmelast zu kompensieren. Eine Überhitzung des Raumes gilt es mithilfe der Verschattung zu verhindern (Sommerlicher Wärmeschutz). In welcher Größenordnung einfallende Strahlung dann noch im Raum in Wärme umgesetzt und wirksam wird, hängt maßgeblich vom Abminderungsfaktor F_c des Verglasungs-/Verschattungssystem ab.

Gemäß dem Antrag soll der strahlungsadaptive Blendschutz einen veränderbaren F_c -Wert sicherstellen können – und zwar in Abhängigkeit des Winkels der einfallenden Strahlung. Bei niedrigem Sonnenstand im Winter sollen große F_c -Werte für hohe solare Wärmegewinne sorgen. Im Sommer bewirken kleine F_c -Werte kleine solare Wärmelasten. Der im Projekt angestrebte Arbeitsbereich des F_c -wertes soll zwischen 0,2 und 0,4 liegen.

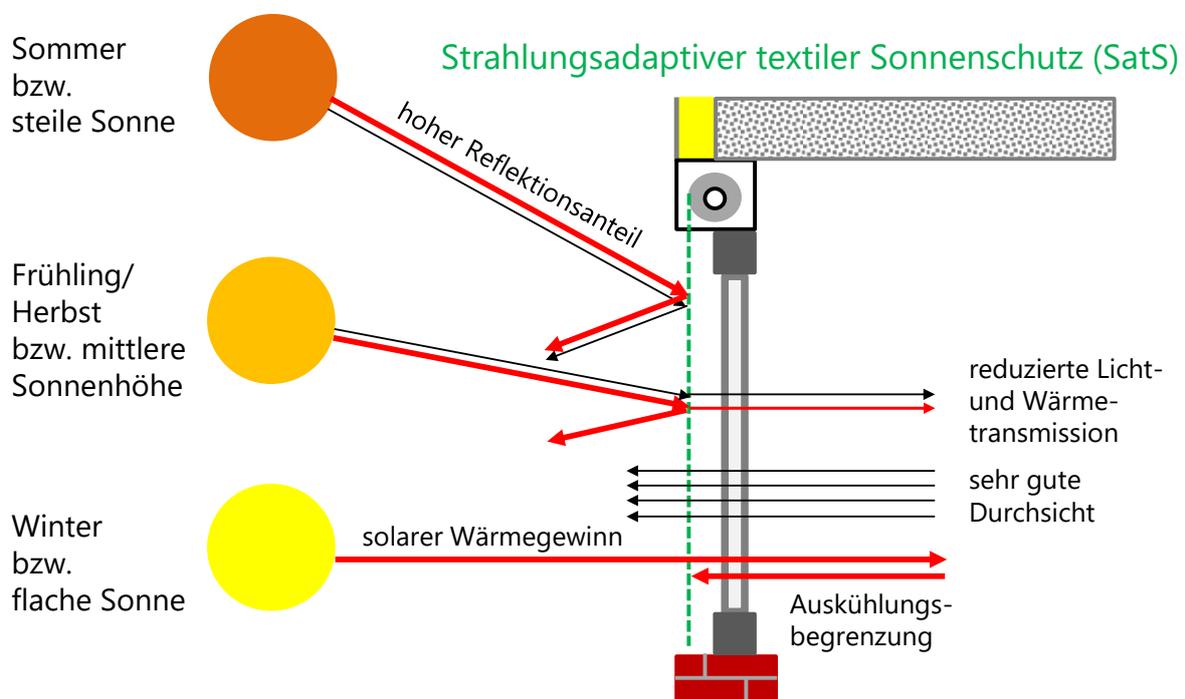


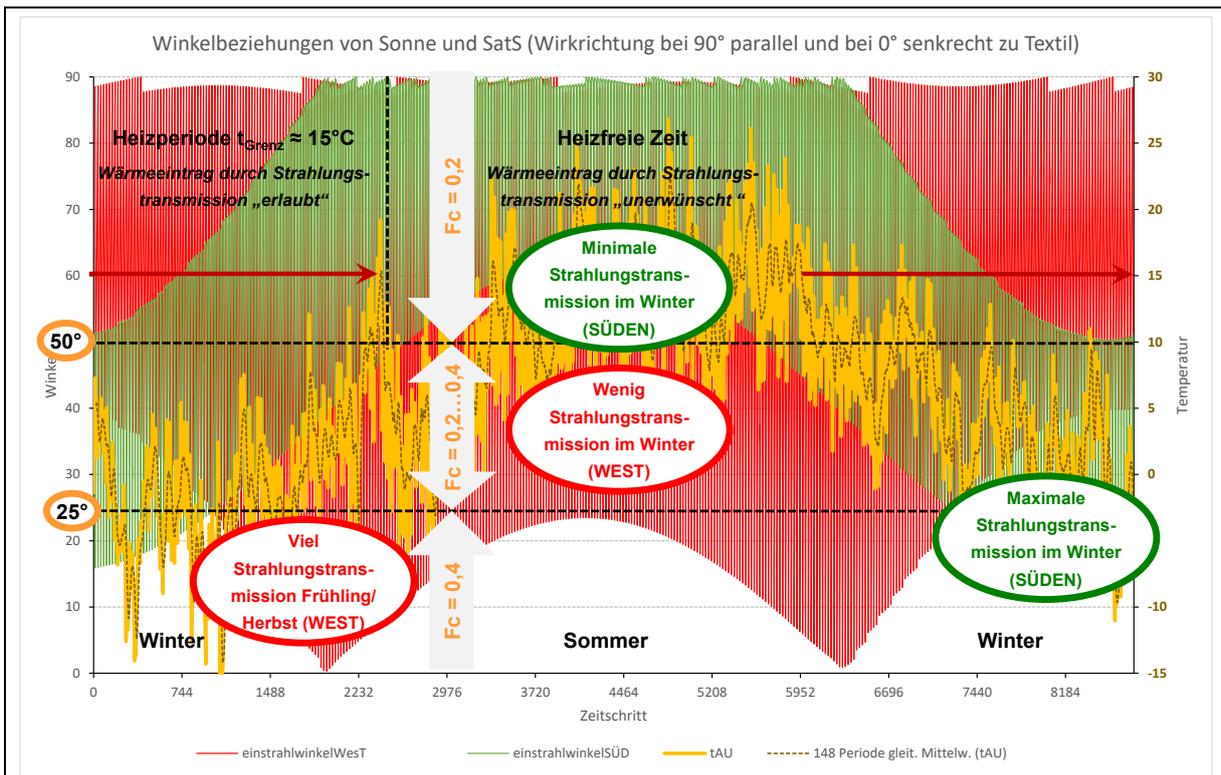
Abbildung 4: Prinzipskizze der winkelabhängigen Strahlungstransmission und -reflexion.

Unabhängig von den solaren Wärmegewinnen aus der Solarstrahlung wird u.a. auch durch den Einsatz von Kunstlicht Wärme im Raum umgesetzt. Im Sinne einer energieeffizienten Raumtemperierung ist daher anzustreben, so wenig wie möglich mit Kunstlicht zu beleuchten und nur soviel wie nötig Tageslicht in den Raum einzutragen. Gleichzeitig ist jedoch die solare Einstrahlung (einschließlich des sichtbaren Anteils) auf das notwendige Maß zu begrenzen, um den solaren Wärmeeintrag in Grenzen zu halten (Sommerlicher Wärmeschutz).

Konventionelle Lösungsansätze verändern den Tageslichteintrag durch eine anteilige Verschattung der Verglasung bei konstantem Transmissionsgrad des verschattenden Materials. Ein Blendschutz bei tiefstehender Sonne ist somit nicht gegeben. Im Gegensatz dazu soll der strahlungsadaptive Sonnenschutz einen veränderbaren Transmissionsgrad τ_v sicherstellen können. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen Helligkeit und Globalstrahlung soll diese Veränderung strahlungsabhängig erfolgen. Der im Projekt angestrebte Arbeitsbereich für τ_v soll zwischen 0,04 (starke solare Einstrahlung) und 0,3 (geringe solare Einstrahlung) liegen.

Ableitung der Kennwerte von Verglasung und Verschattung für die energetische Simulation

Wetter und Strahlungsdaten (z. B. Standort Dresden)
Totalstrahlung I <ul style="list-style-type: none">• auf nach Himmelsrichtung ausgerichtete senkrechte Fläche des Verglasungs- bzw. Verschattungssystems• im Simulationsprogramm aus Globalstrahlung und Ausrichtung der Verschattungseinrichtung berechnete Größe
Beleuchtungsstärken $E_{\text{außen}}$ und im Raum ohne Verschattung <ul style="list-style-type: none">• Beleuchtungsstärke außen auf horizontale Fläche → vereinfacht berechnet aus Globalstrahlung auf Horizontale H mit $E_{\text{außen}} = 125 \cdot H$ [lux]• Beleuchtungsstärke ohne Verschattung im Raum bei als gleichmäßig und konstant angenommenem mittleren Tageslichtkoeffizienten des Raumes → vereinfacht berechnet mit $E_{\text{Raum, ohne Verschattung}} = 0,02 \cdot E_{\text{außen}}$ [lux]
Winkelabhängigkeiten für Sonne, Verschattung und Ausrichtung des Fensters
Höhenwinkel (Winkel des Sonnenstandes – Standort- und Jahreszeitabhängig) <ul style="list-style-type: none">• Täglich zwischen 0° und 17° (Winter) bzw. zwischen 0° und 60° (Sommer)• Von Himmelsrichtung unabhängige Größe → in dieser Form keine Abbildung der tatsächlichen Lagebeziehung zwischen Sonne und Verglasung/Verschattung• Als Stellgröße zur Beeinflussung des F_c-Wertes der Verschattung ungeeignet, da winterliche Transmission auch im Sommer morgens und abends wirksam wäre
Einfallswinkel (Verhältnis Sonnenstand zu Flächennormale der Verschattung) <ul style="list-style-type: none">• 0° entspricht Flächen-Normale• Saisonale Winkelbereiche sind abhängig von der Ausrichtung der Verglasung und Verschattung:<ul style="list-style-type: none">○ Südausrichtung: $17^\circ \dots 52^\circ$ (Winter) bzw. $60^\circ \dots 90^\circ$ (Sommer) → winterliche Transmission und sommerliche Reflexion wäre klar trennbar○ Westausrichtung: $40^\circ \dots 90^\circ$ (Winter) bzw. $0^\circ \dots 90^\circ$ (Frühling/Herbst), $20^\circ \dots 90^\circ$ (Sommer) → winterliche Transmission und sommerliche Reflexion wäre nicht klar trennbar• Keine Unterscheidung von tendenziell eher seitlicher oder eher vertikaler Einstrahlung

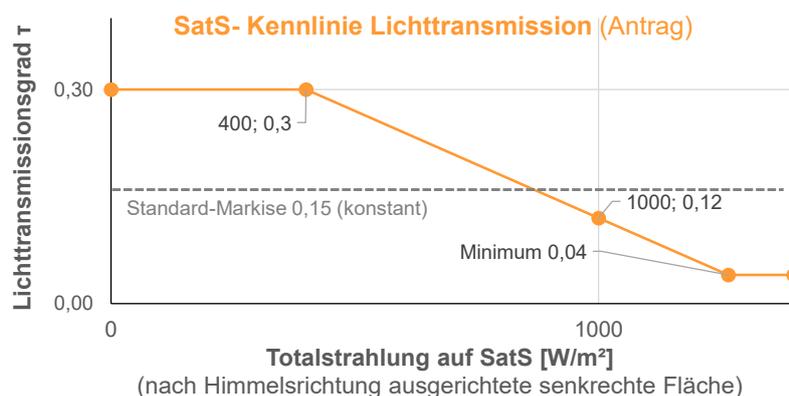


- Ermittlung eines angestrebten Winkelbereiches für die zweckmäßige Beeinflussung des Abminderungsfaktors F_c im Jahresgang unter Berücksichtigung der Heizperiode:
 - Heizperiode bei Außentemperatur (gelb) $< 15^\circ\text{C}$
 - Ziel: im Heizfall großer F_c -Wert für hohe solare Wärmegewinne; außerhalb der Heizperiode kleine F_c -Werte für geringe solare Wärmelasten
 - Bei Südausrichtung (Standort Dresden) saisonal sehr unterschiedliche Einfallswinkel:
 - ➔ Maximum des Winters liegt mit rund 50° (21.12.) unterhalb des Minimums des Sommers von rund 60° (21.06.)
 - Bei Westausrichtung verhalten sich Außentemperatur und Einfallswinkel teilweise entgegengesetzt
 - ➔ Keine klare saisonale Unterscheidung der Einfallswinkel möglich
- Vorauswahl des angestrebten Regelbereiches für den F_c -Wert in Abhängigkeit vom Einfallswinkel (Kompromiss aus Süd- und Westausrichtung): $25^\circ \dots 50^\circ$ Einfallswinkel

Eigenschaften des Verschattungsmaterials (unabhängig vom Status der Verschattung)

Lichttransmission t_v

- Im Fall des strahlungsadaptiven Blendschutzes abhängig von Totalstrahlung auf Verschattungsmaterial
- Ziel- und Vergleichswerte gemäß Projektantrag:



Abminderungsfaktor F_c (Materialkennwert in Verbindung mit der Verglasung)

- Im Fall des strahlungsadaptiven Sonnenschutzes abhängig von Einfallswinkel auf

<p>Verschattungsmaterial → Winkelbereich gemäß o.g. Vorauswahl des angestrebten Regelbereiches</p> <ul style="list-style-type: none"> Ziel- und Vergleichswerte gemäß Projektantrag:
<p>Ansteuerung der Verschattung und der Beleuchtung basierend auf Funktionsvorgaben</p>
<p>Status der Verschattung X als Stellgröße der Verschattungsregelung (ODER-Verknüpfung)</p> <ul style="list-style-type: none"> Funktion 1: Blendschutz <ul style="list-style-type: none"> Aktivierung ausschließlich bei Belegung (Nutzerprofil) UND Aktivierung bei Höhenwinkel 0...30° UND direkter Strahlung auf Verschattungssystem <ul style="list-style-type: none"> Funktion 2: sommerlicher Wärmeschutz <ul style="list-style-type: none"> Aktivierung bei Totalstrahlung auf Verschattungssystem > 300 W/m² nutzungsunabhängig
<p>Beleuchtungsstärke im Raum unter Berücksichtigung der Verschattungsregelung</p> <ul style="list-style-type: none"> resultierend aus Verschattungsregelung und Verschattungskennwerten vereinfacht berechnet mit $E_{\text{Raum}} = E_{\text{Raum,ohne Verschattung}} \cdot X_{\text{Verschattung}} \cdot T_V$ [lux]
<p>Status Kunstlicht</p> <ul style="list-style-type: none"> Kunstlichtbedarf ausschließlich bei Belegung UND wenn aus Verschattungsregelung resultierende Beleuchtungsstärke im Raum unterhalb des Anforderungsprofils liegt (z.B. nach DIN V 18599 – 10: für Klassenraum 300 lux; Büroraum 500 lux)
<p>Fensterdaten</p>
<p>U-Wert Wärmedurchgangskoeffizient (maßgeblich für konvektiven Wärmetransport)</p>
<p>g-Wert Energiedurchlassgrad der Verglasung ohne Verschattung</p> <ul style="list-style-type: none"> in der Regel Herstellerangabe Quotient aus solarem Wärmegewinn und senkrechter Einstrahlung auf die verglaste Fläche eines Kalorimeter-Prüfstandes

Tabelle 9: Kennwertermittlung für Verglasung und Verschattung mit SatS oder Standardmarkise

Allgemeine Messmethoden für Kennwerte von Verglasungs- und Verschattungssystemen

Die Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Kennwerte von Verglasungs- und Verschattungssystemen werden in den Normen DIN EN 14500 und DIN EN 410 umfangreich beschrieben. Der Fokus liegt dabei auf der Bestimmung absoluter Kennwerte.

Im Sinne der angestrebten Vermarktung überwiegt jedoch eher das Interesse für die energetisch-/wirtschaftlichen Effekte des strahlungsadaptiven Sonnenschutzes gegenüber konventionellen Verschattungssystemen. Entsprechende Effekte können vereinfacht mithilfe vergleichender messtechnischer Analysen bestimmt werden. Mess- und Berechnungsverfahren für die Bestimmung der Strahlungsbilanz unter Verwendung eines Sonnensimulators beschreibt DIN EN 12975-2.

Kennwert	Mess- bzw. Berechnungsmethode
Beleuchtungsstärke E_v	Belichtungsmesser / Luxmeter
Lichttransmission τ_v	Messung der Veränderung der Beleuchtungsstärke über die Verglasung mit und ohne Verschattung (hier ohne Differenzierung für unterschiedliche Wellenlängenbereiche der Lichtquelle)
Globalstrahlung G	Messtechnisch erfasst mit Pyranometer
Langwellige Strahlungsbilanz E_{pyr} und Sensortemperatur t_{pyr}	Messtechnisch erfasst mit Pyrgeometer
Thermische Bestrahlungsstärke E_L	Aus E_{pyr} und t_{pyr} berechnete Größe
Netto-Bestrahlungsstärke G''	Aus G , E_L und Umgebungstemperatur berechnete Größe
Solare Wärmegewinne (Energiebilanz) im Raum	Aus Temperaturerhöhung des Luftvolumenstroms, bestimmbar mithilfe des kalorimetrischen Prüfaufbaus
Fensterfläche	Verglasungsbreite * Verglasungshöhe
Energiedurchlassgrad g (Verglasung)	Aus solarem Wärmegewinn und senkrechter Einstrahlung (hier Nettobestrahlungsstärke G'') ohne Verschattung (kalorimetrische Messung) berechnete Größe
Solarfaktor g_{tot} (Verschattung inkl. Verglasung)	Aus solarem Wärmegewinn und senkrechter Einstrahlung (hier Nettobestrahlungsstärke G'') mit Verschattung (kalorimetrische Messung) berechnete Größe
Abminderungsfaktor F_c	Aus Quotient von g_{tot} und g berechnete Größe (gemeinsamer Wert für Verschattung und Verglasung)

Tabelle 10: Methoden zur Ermittlung der Kennwerte von Verglasung, Verschattung und solarer Strahlung

Detailuntersuchungen, wie beispielsweise zur Wellenlängenabhängigkeit des Lichttransmissionsgrades spielen bei vergleichenden messtechnischen Untersuchungen zu energetischen Effekten eine untergeordnete Rolle. Gleiches gilt für die Bestimmung von Reflexionsgraden für außenliegende Verschattungssysteme.

5.2 Applikation der Polymere

5.2.1 Applikation von ausgewählten Polyaminen bzw. Polycarbonsäuren auf den Substraten und Herstellung stabiler Adsorbate

Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.

Zu Projektbeginn war vorgesehen, Fasern und Gewebe aus PAN (Polyacrylnitril) als Trägermaterial zu verwenden, da PAN UV-beständig ist und somit keine Veredlung des fertigen Gewebes für die Ausrüstung mit UV-Schutz notwendig ist. Da i.d.R. eine Veredlung für die Ausrüstung der Wetterbeständigkeit vorgenommen wird, können auch andere Fasern oder Gewebe als Trägermaterial zum Einsatz kommen.

Der Praxispartner, die Firma Ettlin Spinnerei und Weberei Produktions GmbH & Co. KG, verarbeitet vorwiegend Fasern aus Poly(ethylen-terephthalat) (PET). Daher wurden die ersten Untersuchungen an PET-Geweben durchgeführt. Die im Forschungsantrag dargelegte Strategie zur Modifizierung der Faseroberflächen basiert auf dem nichtreaktiven Anbinden von Oberflächenmodifikatoren. Damit hat die Variation des Substratmaterials keinen limitierenden Einfluss auf die Nutzung des vorgeschlagenen Syntheseweges.

An den nicht weiter vorbehandelten PET-Gewebeproben (PET schwarz und PET weiß) des Praxispartners wurden unterschiedliche Polyamine, wie bspw. Poly(ethylenimin) (PEI), Poly(allylamin) (PAAm) und Copolymere des Poly(vinylformamid-co-vinylamin)s (PVAm) – hier ein PVAm bei dem ca. 95 % der Formamidgruppen hydrolysiert vorlagen – aus ihren wässrigen Lösungen adsorbiert. Da die Triebkräfte für die Polyelektrolytadsorption nicht allein aus dem Ausbilden elektrostatischer Wechselwirkungen zwischen Gewebeoberfläche und Polyamin (enthalpischer Term der freien Adsorptionenthalpie) resultieren, sondern auch eine Erhöhung der Entropie infolge der Polyelektrolytadsorption erreicht wird (entropischer Term der freien Adsorptionenthalpie), hafteten die Polyamine gut auf den industriell gefertigten Geweben. So führte eine Heißwasserextraktion über 300 min nicht zum vollständigen Abwaschen der applizierten Polyamine.

In Modelluntersuchungen an PET-Platten konnte gezeigt werden, dass Plasmen – hier wurde beispielhaft Luft als Prozessgas verwendet – zur Erhöhung der Oberflächenpolarität und somit zur Verbesserung der Benetzbarkeit durch polare Flüssigkeiten, wie bspw. Wasser führten. Dieser Vorbehandlungsschritt würde die Adsorption von Polyelektrolyten aus ihren wässrigen Lösungen an den PET-Substraten erleichtern, erscheint aber aufgrund der hinreichend guten Adsorption an den unmodifizierten PET-Geweben nicht zwingend notwendig.

Die Adsorption der Polyamine, die zur Ausbildung stabiler Schichten auf den Substraten führte, machte Versuche zur Adsorption von Polycarbonsäuren unnötig. Infolge der erfolgreichen Beschichtung standen auf den PET-Gewebeoberflächen eine hinreichend hohe Zahl reaktiver Aminogruppen zur Verfügung, an die silanmodifizierte Glaskugeln anzubinden waren. Mit einer erfolgreichen Beschichtung der Gewebe durch Polycarbonsäuren würden an der Oberfläche Carbonsäuregruppen für Folgereaktionen bereitstehen, die im Vergleich zu primären Aminogruppen (diese finden sich im Oberflächenbereich insbesondere nach der Adsorption von PVAm oder PAAm) nicht nur weniger reaktiv sind, sondern auch infolge möglicher Dissoziation (Bildung von Carboxylaten) bzw. Salzbildung blockiert sein können (protonierte Aminogruppen sind i.R. auch nicht zu Reaktionen befähigt, ihr Anteil ist aber beim Arbeiten im Basischen unbedeutend).

5.2.2 Charakterisierung der hergestellten Schichten

Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.

Die PET-Gewebe wurden vor und nach der Adsorption der Polyamine mittels Röntgen-Photoelektronenspektroskopie (XPS) untersucht. Abbildung 5 zeigt exemplarisch die XPS-Spektren, die von einer unmodifizierten Gewebeprobe [*PET schwarz*] und von PET-Geweben aufgenommen wurden, die mit PEI bzw. PVAm beschichten waren. Durch das Beschichten der Gewebe mit den Polyaminen wird

Stickstoff in die Oberflächenregion der Probe eingebaut, der anhand der N 1s Peaks bei ca. 400 eV identifiziert wurde. Die Form der C 1s Spektren änderte sich durch das Applizieren der Polyamine ebenfalls signifikant. Das C 1s Spektrum der unmodifizierten Gewebeprobe zeigte drei Komponentenpeaks, deren Auftreten den Kohlenstoffatomen der Phenylringe (Komponentenpeak *Ph* bei 284,8 eV), den Carbonylkohlenstoffatomen der Estergruppen (Komponentenpeak *E* bei 288,7 eV) und den alkoholseitigen Kohlenstoffatomen der Estergruppen (Komponentenpeak *C* bei 286,3 eV) zugeordnet werden konnten. Nach der Adsorption der Polyamine erschien der Komponentenpeak *C* infolge des Auftretens aminischer C–N Bindungen, die bei ca. 285,8 eV detektiert wurden, nicht mehr deutlich vom Komponentenpeak *Ph* separiert. Hinzu kommt eine Verbreiterung der intensivsten Bande (*Ph*) durch gesättigte Kohlenwasserstoffe (285,0 eV), die Bestandteil und/oder Begleiter der adsorbierten Polyamine waren. Die Bedeckung des PET-Substrats durch die Moleküle der Polyamine führte zur Dämpfung der Intensitäten der substrattypischen Komponentenpeaks *E* und *C*. Der relative Stickstoffanteil ($[N]:[C]$) variierte in Abhängigkeit der applizierten Polyamine zwischen $0,06 < [N]:[C] < 0,09$.

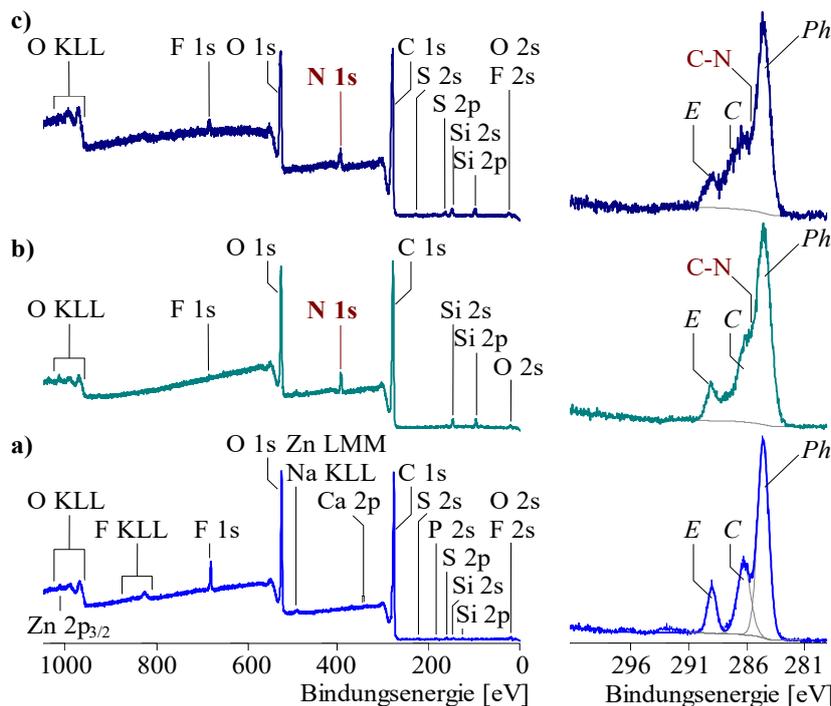


Abbildung 5: XPS-Übersichtsspektren (links) und energieaufgelöste C 1s Spektren (rechts)

- a) unmodifizierte PET-Gewebeprobe [*PET schwarz*]
- b) PET-Gewebeprobe nach der Adsorption von PEI [*PET schwarz*]
- c) PET-Gewebeprobe nach der Adsorption von PVAm [*PET schwarz*]

Die mittels Tensiometrie durchgeführten Versuche zur Charakterisierung des Benetzungsverhaltens waren wenig sensitiv gegenüber den Oberflächenmodifizierungen durch Polyamine. Während der tensiometrischen Messungen findet ein Benetzen der Probenoberfläche statt, das messtechnisch verfolgt wird. Daher ist aus den gewonnenen Daten nur die Bestimmung der Fortschreitrandwinkel möglich, die Rückzugsrandwinkel, die das Entnetzen der Oberfläche widerspiegeln, sind nicht bestimmbar. Es ist bekannt, dass die Fortschreitrandwinkel hydrophober Substratoberflächen durch das partielle Belegen mit hydrophilen *Coatings* im Gegensatz zu den Rückzugsrandwinkeln häufig keine signifikante Änderung erfahren.

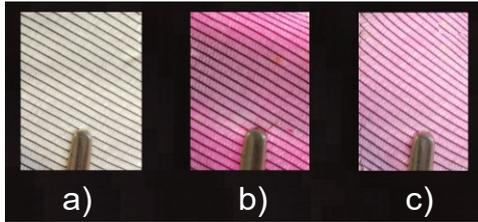


Abbildung 6: Anfarben von PET-Gewebeprobe [PET weiß] mit Eosin Y

- (a) Unmodifizierte Gewebeprobe
 - (b) Gewebeprobe nach der Adsorption von PEI bzw. PVAm
 - (c) Adsorption der Polyamine erfolgte aus ihren 0,1 Ma-%igen wässrigen Lösungen.
- Die Proben wurden nach dem Färben (5 min) 60 min mit Wasser gewaschen.

Zum Einschätzen einer erfolgreichen Applikation der Polyamine wurde ein Färbeverfahren entwickelt, das im industriellen Einsatz zur Qualitätssicherung Anwendung finden kann. Dazu werden polyaminbeschichtete Proben mit Eosin Y (Tetrabromfluorescein) angefärbt. Wie Abbildung 6 zeigt, wird der Farbstoff nur gebunden (Rotfärbung), wenn eine Beschichtung der Gewebe mit Polyaminen erfolgte. Bei der unmodifizierten Gewebeprobe wurde der Farbstoff vollständig ausgewaschen.

5.3 Oberflächenmodifizierung und Partikel-Kopplung

5.3.1 Oberflächenmodifizierung von phototropen Gläsern

Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.

Die Applikation von Polyaminen auf den Gewebeoberflächen wurde als Voraussetzung für die Applikation von Mikroglaskugeln angesehen. Um ein Haften der Mikroglaskugeln zu erreichen, sollten an deren Oberfläche Epoxysilane kondensiert werden. Die Aminogruppen auf der Gewebeoberfläche sind prinzipiell in der Lage, die intakten Oxirangruppen der Epoxysilane zu öffnen und kovalent anzubinden.

Für Modellversuche wurden die handelsüblichen Epoxysilane (3-Glycidylpropyl)trimethoxysilan (Glymo) und (3-Glycidylpropyl)triethoxysilan (Glyeo) sowohl an der Oberfläche von Mikroglaskugeln (\varnothing 90-150 μm)^[1] der Firma *Mühlmeier GmbH & Co. KG*, Bärnau als auch an Siliciumdioxid-Nanopartikeln (\varnothing 10-20 nm)², Sigma-Aldrich Chemie GmbH., München kondensiert. Der spektroskopische Nachweis einer erfolgreichen Kondensation der o.g. Silane unter Erhalt der Oxirangruppen erwies sich als außerordentlich schwierig. Da oberflächenspektroskopische Methoden in der industriellen Fertigung nur schwer integrierbar sind, wurden auch für den Nachweis intakter Oxirangruppen auf der Glasoberfläche spezifische Färbeverfahren entwickelt. So führt eine Umsetzung von Oxirangruppen mit Ammoniak zu Aminogruppen, die – wie oben beschrieben – mit dem Farbstoff Eosin Y angefärbt werden können. Eine zweite Möglichkeit zum direkten Nachweis von Oxirangruppen ist der Preussmantest^[3], bei dem ein nucleophiler Angriff des Pyridinstickstoffs von 4-(4-Nitrobenzyl)pyridin (NBP) auf die Methylengruppe des Oxirans erfolgt. Die sich bildende zwitterionische Struktur und ihre mesomeriestabilisierte Form sind tiefblau. Ein Nachweis der Kondensation von Glymo und Glyeo unter Erhalt der Oxiranfunktionalitäten konnte nur am Aerosil erbracht werden.

Alternativ wurden die o.g. Glaskugeln mittels (3-Aminopropyl)trimethoxysilan (γ -APS) modifiziert. Ziel war es, die aminfunktionalisierten Glaskugeln über bifunktionelle Reaktanten, wie bspw. Dialdehyde,

¹ Produktinformation unter http://www.muehlmeier.de/fileadmin/user_upload/DE/mahltechnik/produktinformation/muehlmeier_de_strahlp.pdf.

² Produktinformationen unter <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/637238?lang=de®ion=DE>

³ Preussmann, R.; Schneider, H.; Epple, F.: *Identification of alkylating agents. II. Identification of different classes of alkylating agents by a modification of the color reaction with 4-(4-nitrobenzyl)-pyridine (NBP)*. *Arzneimittelforschung* 19 [7] (1969) 1059-1073.

Dieperoxide, Dicarbonsäureanhydride oder Diisocyanate an die aminfunktionalisierten Gewebe zu binden. Aber auch hier erwies sich die Kondensation der Silane an der Glasoberfläche – wahrscheinlich aufgrund der Glaszusammensetzung – als wenig zuverlässig.

Eine Adsorption von Polyaminen an den Glaskugeln führte zwar zur gewünschten Ausrüstung der Mikroglaskugeln mit Aminogruppen (Nachweis durch Anfärben mit Eosin Y und durch XPS). Auch wenn die Polyamine nach ersten Waschversuchen auf den Oberflächen der Mikroglaskugeln verblieben, besteht infolge ihrer rein adsorptiven Anbindung die Gefahr, dass die Mikroglaskugeln in nachfolgenden Modifizierungsschritten oder beim Gebrauch der Gewebe abgewaschen werden.

An phototropen Glaskugeln wurden aufgrund ihrer Nichtbeschaffbarkeit keine Versuche zur Oberflächenmodifizierung mit funktionellen Silanen durchgeführt.

5.3.2 Kopplung der phototropen Partikel an die oberflächenmodifizierten PET-Substrate

Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.

Die Reaktion zwischen Oxirangruppen und Aminen über einen nucleophilen Angriff des freien Elektronenpaares des aminischen Stickstoffs auf die Methylengruppe des Oxirans ist bekannt. In der Folge der initiierten Ringöffnung kommt es zur Alkylierung der Aminogruppe und damit zur kovalenten Kopplung der epoxyfunktionalisierten Mikroglaskugeln an die aminfunktionalisierten PET-Gewebe. Für pyrogene Kieselsäuren, an denen eine Funktionalisierung mit Glymo bzw. Glyeo erfolgreich war, konnte ein stabiles und permanentes Anbindung der Aerosilpartikel an aminfunktionalisierte PET-Gewebe gezeigt werden. Aerosilpartikel sind allerdings stets Agglomerate von nanoskaligen Primärpartikeln. Infolge der Vielzahl von Grenzflächen in einem Agglomerat erscheinen Aerosilpartikel weiß und sind – anders als die transparenten Mikroglaskugeln – opak und erscheinen damit für den Einsatz auf Markisengeweben wenig geeignet.

Auch eine kovalente Anbindung aminfunktionalisierter Aerosilpartikel an aminfunktionalisierte PET-Gewebe konnte mittels Glyoxal (Ethandial) als *Cross-linker* erreicht werden. Um eine Verwendung von sehr gesundheitsschädlichen *Cross-linkern* zu vermeiden, wurden PET-Gewebeproben mit Poly(glycidylmethacrylat) (PGMA) und dessen Poly(methylmethacrylat)-Copolymere (PMMA-co-PGMA), die aus der radikalischen Copolymerisation von Glycidylmethacrylat und Methylmethacrylat zugänglich sind, beschichtet. Die Oxirangruppen der PGMA-Sequenzen sind – wie oben beschrieben – gegenüber den Aminogruppen der γ -APS-modifizierten Aerosilpartikel hoch reaktiv, sodass eine effiziente Anbindung der Partikel mittels Rakeltechnik (gleichmäßiges Auftragen der Mikroglaskugeln erfolgen konnte (Abbildung 7).

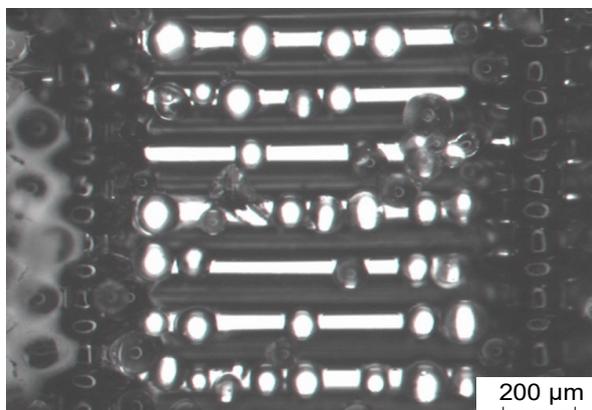


Abbildung 7: Mit PMMA-co-PGMA fixierte Mikroglaskugeln (Fa. Mühlmeier) auf einer PET-Gewebeprobe [PET schwarz].

Prinzipiell war es auch möglich, Mikrogaskugeln ohne vorherige Oberflächenmodifizierung an PET-Gewebeprobe zu applizieren, die mit Polyaminen und nachfolgend mit PMMA-co-PGMA beschichtet wurden. Brønstedsaure Si–OH Gruppen auf der Glasoberfläche und Wärme waren dabei in der Lage, Oxiranringe zu öffnen und so ein intrinsisches Vernetzen des PGMA zu initiieren. Die Mikrogaskugeln werden dabei in das vernetzte Polymer eingebettet und haften auf diese Weise. Die mechanische Stabilität solcher mikrogaskugelbeschichteter Gewebe wurde durch Scheuertests (vgl. Abschnitt Gebrauchsdauereigenschaften) untersucht.

Das Konzept zur Anbindung nichtfunktionalisierter Mikrogaskugeln auf PMMA-co-PGMA-modifizierte PET-Gewebe erscheint problemlos übertragbar auf Mikrogaskugeln aus phototropen Gläsern. Ein Anbinden von Kugeln aus transparenten und phototrop ausgerüsteten Polymeren, wie bspw. Mikrogaskugeln aus PMMA, das – im Vergleich mit der Applikation von Mikrogaskugeln – eine signifikante Reduzierung des Flächengewichts bewirken würde, erschien zunächst mit dem beschriebenen Konzept zur Anbindung der silicatischen Partikel nicht vereinbar. Es war davon auszugehen, dass Mikrogaskugeln aus PMMA keine gegenüber Oxiran- oder primären Aminogruppen reaktiven Oberflächengruppen aufweisen. Die in einer großen Vielzahl vorhandenen Carbonsäureestergruppen sind für Kopplungsreaktionen unter milden Reaktionsbedingungen ungeeignet. Dennoch wurde unter der Prämisse einer möglichen Gewichtseinsparung für die Finalprodukte (Markisenstoffe) und schließlich auch unter dem Aspekt der Nichtbeschaffbarkeit phototroper Mikrogaskugeln die Darstellung von PMMA-Mikrogaskugeln mit phototroper Ausstattung vorangetrieben.

Herstellung von phototropen Mikrogaskugeln aus PMMA

Die Herstellung von PMMA-Mikrogaskugeln erfolgte durch die Polymerisation von Methylmethacrylat in wässrigen Suspensionen mit Poly(vinylalkohol) (PVA) oder Natriumdodecylsulfat (SLS) als Stabilisatoren. Dazu wurde in wässrige Lösungen von PVA oder SLS Methylmethacrylat gegeben und unter intensivem Rühren in der wässrigen Phase verteilt. Da Methylmethacrylat in Wasser nur eine sehr geringe Löslichkeit besitzt, entstehen Suspensionen, also eine Verteilung der tropfenförmigen organischen Phase (Methylmethacrylat) in Wasser. Die Moleküle der hier oberflächenaktiv wirkenden Substanzen PVA bzw. SLS reichern sich in den sich beim Rühren ausbildenden Grenzschichten Methylmethacrylat/Wasser an und stabilisieren die Suspension. Ziel war es, eine möglichst unimodale und definierte Verteilung der organischen Phase im wässrigen Suspensionsmittel zu erreichen. Die an dieser Stelle der Synthese eingestellten Durchmesser der Methylmethacrylattröpfchen bestimmen letztlich die Größe und die Größenverteilung der PMMA-Mikrogaskugeln. Natürlich wurde die Suspensionspolymerisation von Acrylaten und Methacrylaten vielfältig untersucht. Aber durch den komplexen Einfluss einer Vielzahl von Prozessparametern, wie bspw. Drehzahl des Rührers, Volumina der wässrigen und organischen Phasen, Menge der als Schutzkolloide wirkenden Suspensionsstabilisatoren, hier SLS bzw. PVA, auf die Tropfenbildung und -größe waren zahlreiche Versuche zum Finden geeigneter Parameterkombinationen notwendig. Tatsächlich wurde über die Wahl der Syntheseparameter PMMA-Mikrogaskugeln mit Durchmessern zwischen 100 nm und > 100 nm herstellen (Abbildung 8).

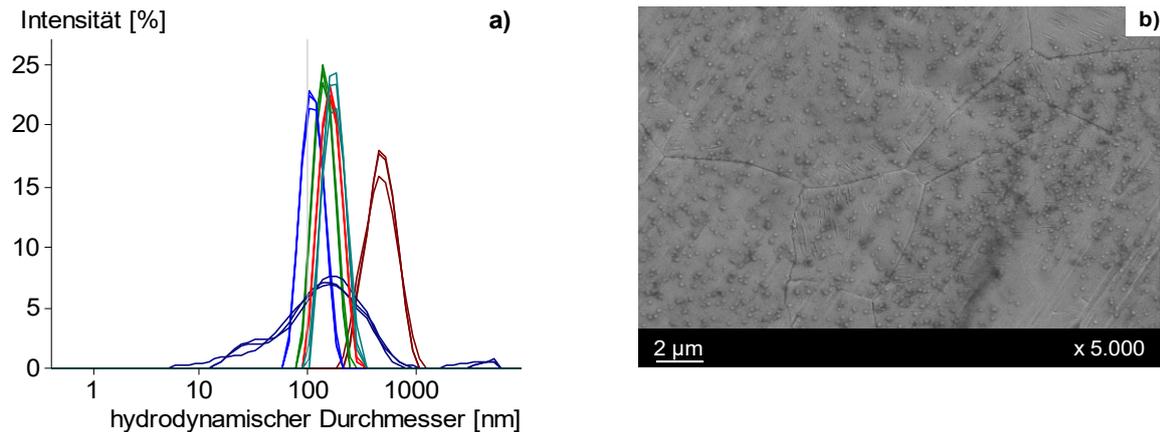


Abbildung 8: Partikelgrößen und Partikelgrößenverteilung von PMMA-Mikrokugeln, die durch Suspensionspolymerisation aus Methylmethacrylat hergestellt wurden. Die Messung der Partikelgrößen erfolgte durch dynamische Lichtstreuung. Bei den Kurven gleicher Farbe handelt es sich um Wiederholungsversuche, die die Reproduzierbarkeit der Syntheseveruche belegen.

Abbildung 9: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der PMMA-Mikrokugeln auf einem Stahlsubstrat. Die Homogenität in der Partikelform und -größe (Partikeldurchmesser beträgt ca. 110 nm) ist gut zu erkennen.

Für das Forschungsvorhaben erschienen insbesondere PMMA-Mikrokugeln mit Partikeldurchmessern von ca. 110 nm geeignet. Bei solchen Mikropartikeln ist – wie bereits für die Oberflächenausüstung der PET-Gewebe mit Mikroglasskugeln gezeigt wurde – eine gut haftende Anbindung an die Fasern des PET-Gewebes und eine dichte Belegung der Faseroberflächen zu erwarten. Im suspendierten Methylmethacrylat lag Dibenzoylperoxid (DBPO) in gelöster Form vor, das über 70 °C thermolytisch zerfällt und unter Abspaltung von Kohlendioxid stabile Radikale bildet. Durch Übertragung eines Radikals auf die Doppelbindung eines Methylmethacrylatmoleküls kommt es zum Aufbrechen der Doppelbindung und damit zur Initiierung des Wachstums der PMMA-Kette. PMMA-Mikrokugeln mit Partikeldurchmessern von 110 nm und einer engen Partikelgrößenverteilung (vgl. grau markierte Verteilungskurve in Abbildung 8) wurden durch eine DBPO-initiierte radikalische Polymerisation in einer wässrigen Suspension von Methylmethacrylat und 1 % SLS als Stabilisator über eine Reaktionszeit von 120 min bei 72 °C erhalten. Stickstoff als Schutzgas minimierte ungewünschte Übertragungsreaktionen von Radikalen auf in der Suspension gelösten Sauerstoff bzw. auf Sauerstoffmoleküle in der umgebenden Atmosphäre. Phototrope PMMA-Mikrokugeln waren durch Zugabe ausgewählter phototroper Farbstoffe, wie bspw.

- 1',3'-Dihydro-1',3',3'-trimethyl-6-nitrospiro[2*H*-1-benzopyran-2,2'-(2*H*)-indol] (I),
- 1',3'-Dihydro-8-methoxy-1',3',3'-trimethyl-6-nitrospiro[2*H*-1-benzopyran-2,2'-(2*H*)-indole] (II),
- 1,3-Dihydro-1,3,3-trimethylspiro[2*H*-indole-2,3'-[3*H*]naphth[2,1-*b*][1,4]oxazin] (III).

zu den wässrigen Methylmethacrylatsuspensionen zugänglich. Da die Farbstoffe (Abbildung 9) nur in der organischen Phase, also im Methylmethacrylat löslich sind, führte die Polymerisation zum Einbau der Farbstoffe in das Innere der Mikrokugeln und somit zu einem permanenten Schutz gegen ihre oxidative oder hydrolytische Zersetzung. Ein Einbringen der Farbstoffe über Extrusion erschien wegen ihrer thermischen Labilität nicht sinnvoll. Die Konzentration der eingebrachten Farbstoffe (0 bis $7 \cdot 10^{-3}$ g_{Farbstoff}/g_{Monomer}) korrelierte mit der durch UV-Bestrahlung erreichbaren Farbtiefen der PMMA-Mikrokugeln. Die phototrope Wirkung der ausgewählten Farbstoffe basiert auf einer molekularen Konformationsänderung, also einer Änderung der räumlichen Lage der Atome im Molekül unter Einwirkung elektromagnetischer Strahlung, hier Licht. Im Grundzustand liegen die Moleküle so verdreht vor, dass die p-Elektronen (in den π -Orbitalen der Doppelbindungen) nicht über weite Teile des Moleküls delokalisieren können. Das Einwirken von Licht führt zu einer molekularen Neuorientierung (Konformationsänderung) in der Art, dass ausgedehnte π -Elektronensysteme entstehen, d.h. dass sich alle p-Elektronen über weite Bereiche des Moleküls verteilen können. Mit der Delokalisierung der p-Elektronen kommt es durch die Linearkombinationen ihrer Wellenfunktionen zur Bildung zusätzlicher

besetzter π - und nichtbesetzter π^* -Orbitale. Das Einwirken von Licht kann nun p-Elektronen aus ihrem Grundzustand (π -Orbital) in einen angeregten Zustand (π^* -Orbital) befördern. Die dafür notwendige diskrete Energie wird dem eingestrahlten Licht entnommen (Absorption). Sind die Energieabstände zwischen den π - und π^* -Orbitalen eng, wird Licht (quasi)kontinuierlich absorbiert. Die phototrop aus-gerüsteten PMMA-Mikrokugeln erscheinen dunkel (Absorption fast aller Wellenlängen des sichtbaren Lichts).

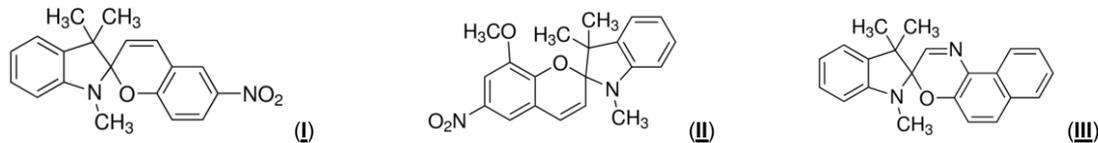


Abbildung 10: Chemische Struktur der ausgewählten phototroper Farbstoffe (I), (II) und (III).

Applikation der phototropen Mikrokugeln aus PMMA

Elektrokinetische Messungen, die als Partikel-Elektrophoreseexperimente in wässrigen KCl-Lösungen durchgeführt wurden, und XPS-Untersuchungen zeigten, dass die PMMA-Partikeloberflächen keine Gruppen aufwiesen, die zu ihrer reaktiven Anbindung an die originären oder polyaminbeschichteten PET-Gewebe geeignet waren. Andererseits war aus den Versuchen zur Anbindung der Mikroglasskugeln bekannt, dass sich durch das Öffnen der Oxirangruppen der Glycidymethacrylatsequenzen polymere Netzwerke auf den Gewebeoberflächen ausbildeten. Dabei kann die Öffnung der Oxirangruppen durch Lewis-Säuren oder -Basen aber auch durch Wärmeeinwirkung erfolgen. Daher wurden PET-Gewebe in der oben beschriebenen Art und Weise mit einem Polyamin (hier PVAm) und PGMA bzw. PMMA-co-PGMA beschichtet. Anschließend wurde eine Suspension, die PMMA-Mikrokugeln enthielt aufgetragen. Durch die Wärme, die zum Verdampfen des Suspensionsmittels (Trocknung) notwendig war, erfolgte die Initiierung der Vernetzung zwischen PVAm und den Glycidymethacrylatsequenzen bzw. die intrinsische Vernetzung der Glycidymethacrylatsequenzen und damit der Aufbau eines polymeren Netzwerks, in dem die phototropen PMMA-Mikrokugeln eingebettet und durch Formschluss haftend vorlagen (Abbildung 11).

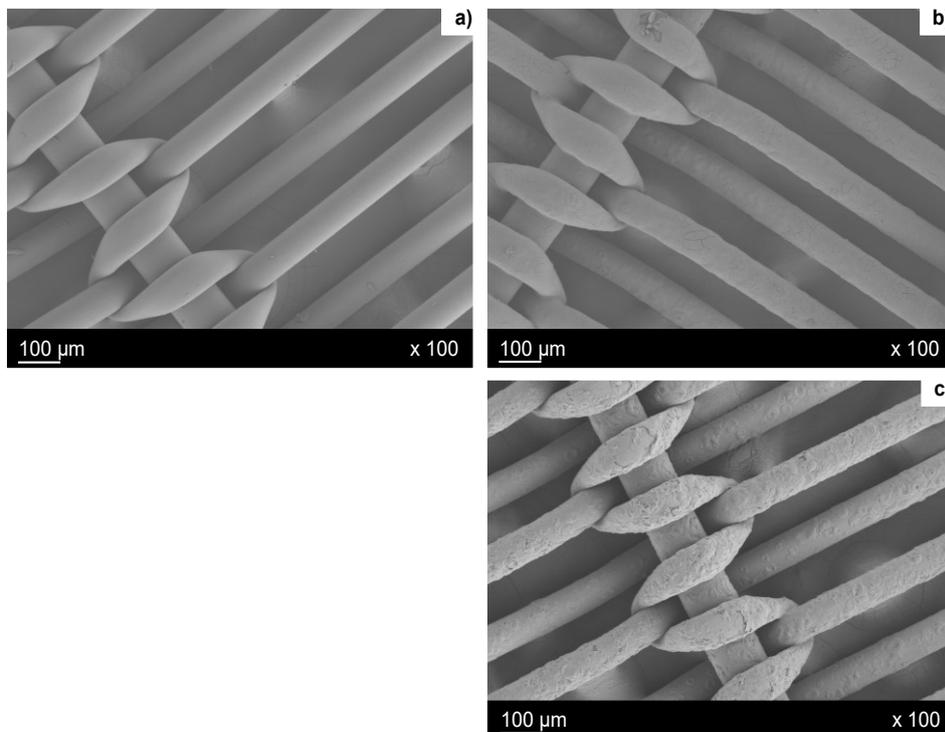


Abbildung 11: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von einem unmodifizierten PET-Gewebe (a) und von PET-Geweben (b und c), die mit phototropen PMMA-Mikrokugeln beschichtet wurden.

Die phototropen PMMA-Mikropartikel konnten nach dem Auftragen der haftvermittelnden Polyamin/PMMA-co-PGMA-Schichten durch Rakeln auf die PET-Gewebe aufgebracht werden. Abbildung 12 zeigt die korpuskulare Oberflächenmorphologie eines mit PMMA-Mikropartikeln beschichteten PET-Gewebes.

Scheuertests zeigten aber, dass das Haften der phototropen PMMA-Mikropartikel für einen Gebrauch der Markisen ungenügend war. Die PMMA-Mikropartikel waren offensichtlich so groß, dass es durch die von außen einwirkenden Kräfte zum Abscheren und Ausbrechen der kugelförmigen PMMA-Mikropartikel aus dem PGMA-Netzwerk kam. Alternativ zu den PMMA-Mikropartikeln wurden phototrope PMMA-Nanokugeln synthetisiert, die durch Aufsprühen (Spray coating) auf bspw. großflächige Gewebekleberbahnen oder durch ein lateral definiertes Drucken mit einem Tintenstrahldrucker aufgebracht werden konnten. Während das händische Spray coating zu einer eher ungleichmäßigen Beschichtung führte, wurden beim Tintenstrahldruck homogene Schichten mit einer hohen lateralen Reproduzierbarkeit erhalten. Für die industrielle Anwendung eignen sich beide Verfahren, da mit einem maschinellen Aufsprühen eine ebenso gleichmäßige Beschichtung wie beim Drucken erreicht werden kann.

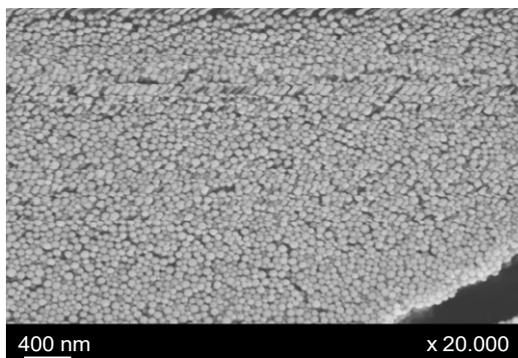


Abbildung 12: Rasterelektronenmikroskop. Aufnahme eines mit phototropen PMMA-Mikrokugeln beschichteten PET-Gewebes

Abbildung 11 zeigt, dass die phototrop ausgerüsteten PMMA-Mikropartikel nur an den Fasern des Gewebes jedoch nicht in den Zwischenräumen der Fäden haften. Dies mag als nachteilig für einen hohen Absorptionsgrad von Licht angesehen werden. Es war jedoch auch möglich, die Zwischenräume des Gewebes mit PMMA-co-PGMA zu verschließen und die geschlossenen Zwischenräume mit phototropen PMMA-Mikropartikeln zu belegen.

Die Möglichkeit, die Poren der PET-Gewebe mit dünnen transparenten Filmen aus Methacryl(co)-polymeren, wie bspw. PMMA oder PMMA-co-PGMA zu verschließen und die dabei verwendeten Polymere mit phototropen Eigenschaften auszustatten, öffnet eine neue Option, die Effizienz für eine durch einwirkendes Licht gesteuerte Verdunklung von Markisen zu erhöhen. Dabei erfolgt die gewünschte Absorption des Lichtes nicht nur durch die mit Mikrokugeln belegten Fasern des PET-Gewebes, sondern vollflächig. Das textile Gebilde stabilisiert dabei die applizierten Filme mechanisch.

5.4 Simulationen und Vorbereitung Versuchsstand

5.4.1 Dynamische Simulation der energetischen Effekte

Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH

Ziele der energetischen Simulation

Die energetischen Simulationen dienen der theoretischen Analyse der Auswirkung des strahlungsadaptiven textilen Blendschutzes und zweier Vergleichsvarianten auf die Energiebilanz eines Raumes und die Sicherstellung des thermischen und visuellen Komforts.

Dazu wurde in TRNSYS ein umfangreiches Simulationsmodell erarbeitet, das Gebäude-, Nutzungs- und Anforderungsdaten ebenso berücksichtigen kann, wie den Standort, die Ausrichtung der zu verschattenden Verglasung, das Steuer- und Regelungskonzept für Verschattung und Beleuchtung sowie potentielle und reale Materialkenndaten des Verschattungsmaterials. Vergleichbare Ausgabegrößen sind u.a.:

- Kunstlichtbedarf (Jahresgang und Jahressumme)
- Jahresgang des Raumluftzustandes einschließlich vereinfacht modellierter visueller Parameter, mit und ohne Raumtemperierung
- Jahresgang der Strahlungsdaten außen und im Raum
- Jahresgang momentaner Heiz- und Kühllasten sowie Jahresenergiebedarfe (Heizen, Kühlen)
- Jahresgang der Istwerte der Materialkenngrößen des strahlungsadaptiven Sonnenschutzes in Abhängigkeit von Einfallswinkel und Totalstrahlung
- Jahresgang der Regelparameter für Verschattung und Kunstlicht in Abhängigkeit von Sonnenhöhenwinkel, Uhrzeit und Beleuchtungsstärke

Um diese Vergleichbarkeit zu ermöglichen werden Gebäudedaten, Raumdaten, Nutzungs- und Anforderungsprofile, u.a. je Verschattungsvariante einheitlich modelliert.

Einheitliche Randbedingungen für die Energetische Simulation

Zentraler Baustein des Simulationsmodells ist das Gebäudemodell, bestehend aus folgenden Typräumen, jeweils modelliert für den Standort Dresden und ausgestattet mit internen Lasten:

- Büroraum mit Südausrichtung in einem sanierten Altbau
- Büroraum mit Südausrichtung in einem Neubau
- Büroraum mit Westausrichtung in einem sanierten Altbau
- Büroraum mit Westausrichtung in einem Neubau
- Klassenraum mit Südausrichtung in einem sanierten Altbau
- Klassenraum mit Südausrichtung in einem Neubau
- Klassenraum mit Westausrichtung in einem sanierten Altbau
- Klassenraum mit Westausrichtung in einem Neubau

Der Modellierung liegen Last- und Anforderungsprofile nach DIN V 18599 und DIN EN 15251, sowie Wetterdaten für ein typisches meteorologisches Jahr (TMY) am Standort Dresden zugrunde. Die bauphysikalischen Eigenschaften der Gebäudehülle tragen der üblichen Bauweise Rechnung.

	Einzelbüro	Klassenzimmer
Fläche, mittlere Belegung	14 m ² ; 1 Person	90 m ² , 30 Personen
Nutzungs-/ Belegungszeit	Mo - Fr 7 bis 18 Uhr	Mo - Fr 8 bis 15 Uhr
Betriebszeit Anlagen	werktags 5 bis 18 Uhr	werktags 6 bis 15 Uhr
Hygienischer Luftwechsel	25,2m ³ /h pro Person zuzüglich 2,25 m ³ /hm ² (bei Belegung)	
Beleuchtung und Arbeitshilfen	15 W/m ² + 150 W	15 W/m ² + 360 W
Sonstige Vorgaben	Gleichzeitigkeit der Einzellasten berücksichtigt Nachbarräume jeweils identisch	
Temperatursollwert	<ul style="list-style-type: none"> • Innerhalb der RLT- Betriebszeit: $t_{\text{Raum}} = 20 \dots 26 \text{ } ^\circ\text{C}$ • Außerhalb der RLT-Betriebszeit: frei schwingend, aber $t_{\text{Raum}} = 15 \dots 30 \text{ } ^\circ\text{C}$ 	
Beleuchtungsstärke-Sollwert Arbeitsplatz/ Raum	500 lux	300 lux

Tabelle 11: Einheitliche Anforderungs- und Lastprofile für die energetische Simulation

	Gebäudehülle Neubau	Gebäudehülle sanierter Altbau
Außenwand	U-Wert = 0,200 W/m²K Kalkzementputz, Stahlbeton, Mineralwolle (WLG 040), Aluminiumblech (Windschutz), ruhende Luftschicht, Glas (Verblendung)	U-Wert = 0,620 W/m²K Kalkzementputz, Vollziegel Mauerwerk, Wärmedämmputz (WLG 050)
Geschossdecke	U-Wert = 0,625 W/m²K Gipskarton (Abhangdecke), ruhende Luftschicht, Stahlbeton, EPS (WLG 040), Zementestrich	
Innenwand	U-Wert = 0,777 W/m²K Gasbetonsteine, beidseitig Kalkzementputz	U-Wert = 1,385 W/m²K Vollziegel-Mauerwerk, beidseitig Kalkzementputz
Fenster (an einer Außenwand)	Sonnenschutzverglasung (g = 0,298) 15% Rahmenanteil U-Wert = 1,3 W/m ² K, 25% der Außenwand	Wärmeschutzverglasung (g = 0,589) 15% Rahmenanteil U-Wert = 1,4 W/m ² K, 25% der Außenwand
Infiltration	0,2-facher Luftwechsel	0,4-facher Luftwechsel

Tabelle 12: Einheitliche Gebäudehülle für die energetische Simulation

Modellierte Verschattungsvarianten für den Vergleich

Für die Simulationsrechnungen wird das Gebäudemodell für drei Verschattungsszenarien modifiziert. Einschaltbedingungen und aktive Steuerung für die Funktionen „Blendschutz“ und „sommerlicher Wärmeschutz“ sind dabei jeweils identisch. Der Unterschied beschränkt sich auf die Materialeigenschaften des Verschattungsmaterials:

- OHNE VERSCHATTUNG
→ Lichttransmission konstant = 1,0; Abminderungsfaktor = 1,0
- VERSCHATTUNG MIT STANDARD-MARKISE
→ Lichttransmission konstant = 0,15; Abminderungsfaktor konstant = 0,30
- VERSCHATTUNG MIT DEM STRAHLUNGSADAPTIVEN TEXTILEN SONNENSCHUTZ (SatS)
→ zunächst angestrebte und im Antrag formulierte Zielparameter:
Lichttransmission = 0,04...0,30; Abminderungsfaktor = 0,20...0,40

Eine detaillierte Beschreibung der im Modell hinterlegten Kennwerte der Verschattungs- und Verglasungssysteme sowie der Einschaltbedingungen wurden bereits in Tabelle 9 beschrieben. Die Verschattung ist in allen simulierten Fällen außenliegend angebracht, um eine Rückkopplung des von der Verschattung reflektierten Strahlungsanteils auf den Raum auszuschließen.

Simulationsmodell in TRNSYS

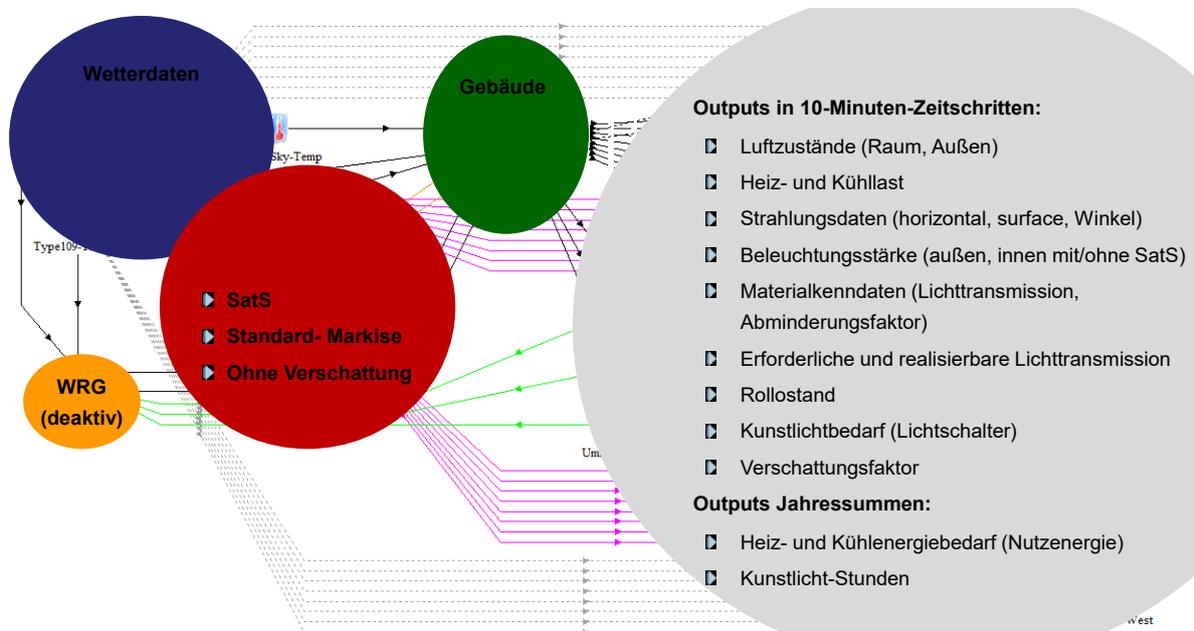


Abbildung 13: Modell-Gerüst für die energetischen Simulationen im TRNSYS-Studio

Obige Abbildung zeigt das Gerüst des TRNSYS-Modells für die energetischen Simulationen. Die Ausgabegrößen wurden bereits unter „Ziele der energetischen Simulation“ beschrieben.

Simulationsergebnis 1 – Darstellung der Funktionsweise und Ansteuerung des strahlungsadaptiven Sonnenschutzes

Die nachfolgende Abbildung zeigt beispielhaft den im Fall einer aktivierten Verschattung wirkenden Abminderungsfaktor F_c für Verglasung und Verschattungsmaterial abhängig vom Einfallswinkel.

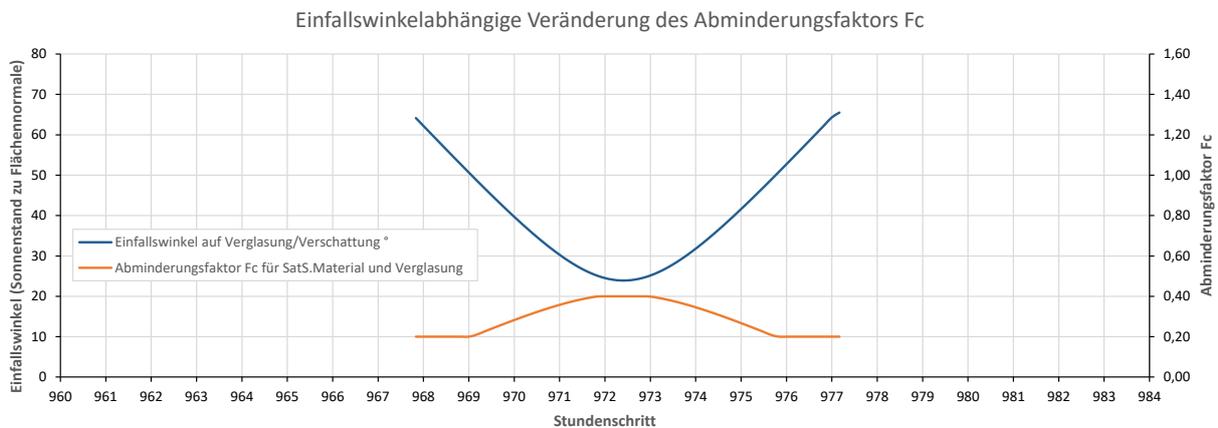


Abbildung 14: Winkelabhängiger Abminderungsfaktor eines nach Süden ausgerichteten Verschattungssystems im Winter

Im Winterfall und bei nach Süden ausgerichteter Verschattung wird der größte Teil des definierten materialbedingten Regelbereichs (Einfallswinkel zwischen 25 und 50°) wie folgt genutzt.

- ca. 7:45 Uhr: Sonnenaufgang in ost-süd-östlicher Richtung (Einfallswinkel $> 60^\circ$ und $< 90^\circ$)
→ F_c ist konstant = 0,20

- Einfallswinkel am Mittag auf Minimum (Einfallswinkel > 25° und < 50°)
→ F_c ist veränderlich

Der F_c -Wert für Verschattung und Verglasung ist jedoch nur im Fall der aktivierten Verschattung wirksam. Bei deaktivierter Verschattung ist $F_c = 1$.

Die Simulationsergebnisse geben zudem einen detaillierten Einblick in die Wirkungsweise des strahlungsadaptiven Sonnenschutzes unter visuellen Gesichtspunkten. Nachfolgende Trends für zwei Sommertage verdeutlichen den Zusammenhang zwischen:

- Höhenwinkel-, zeit- und strahlungsabhängiger Aktivierung der Verschattung zum Zwecke des Blendschutzes oder des sommerlichen Wärmeschutzes
- Strahlungsabhängigem (Strahlung auf Verglasung/Verschattung) Lichttransmissionsgrad des Verschattungsmaterials und
- resultierender Lichttransmissionsgrad des gesamten Verglasungs- und Verschattungssystems und Auswirkung auf Beleuchtungsstärke im Raum und Kunstlichtbedarf.

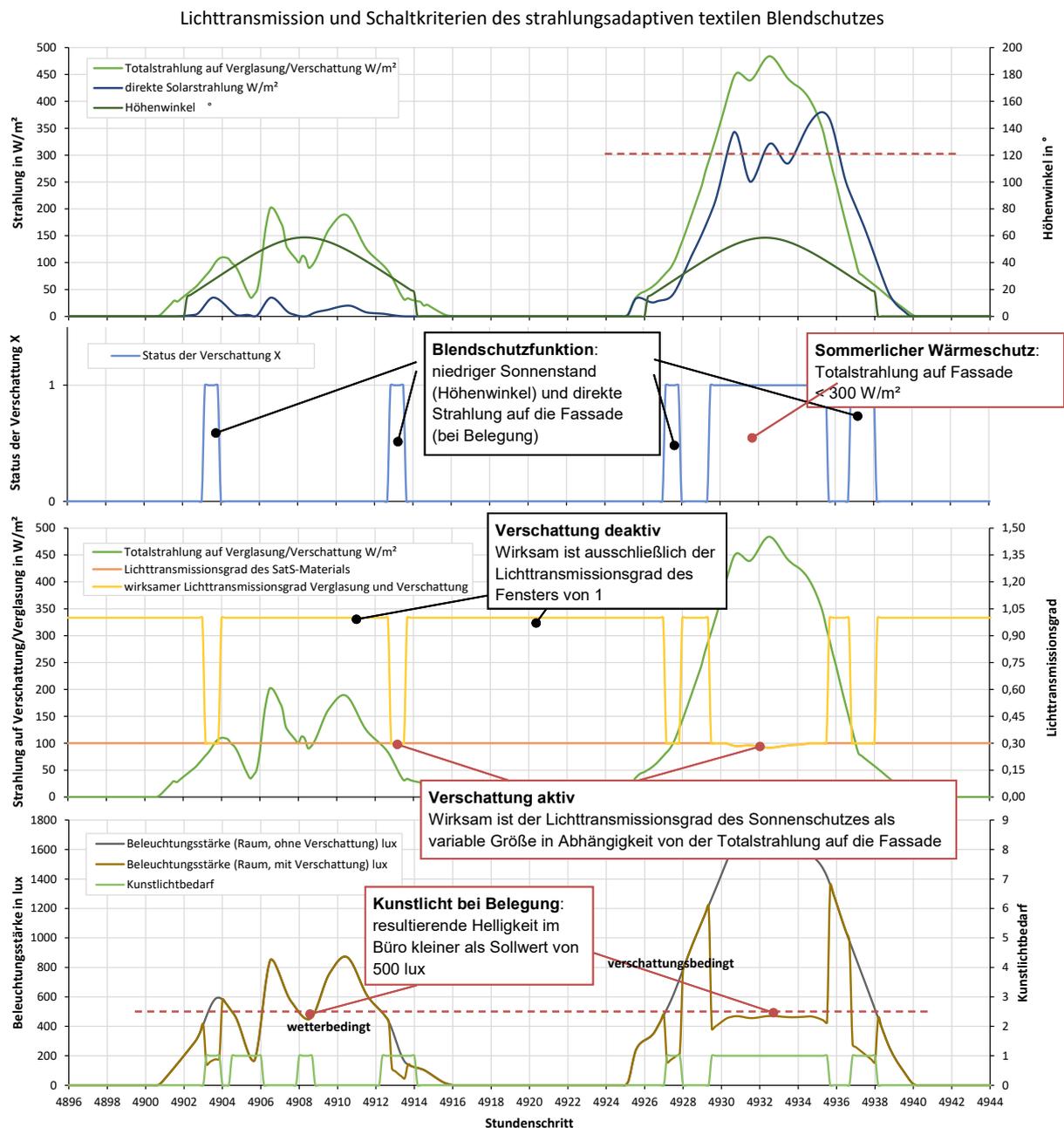


Abbildung 15: Wirkungsweise des SatS am Beispiel eines Büroraums (Süden, zwei Sommertage, Belegung 7-18 Uhr)

Simulationsergebnis 2 – Kunstlichtbedarf und genutzte Bandbreite der angesetzten Wertebereiche der variablen Materialkennndaten des strahlungsadaptiven textilen Sonnenschutzes

Unterschiedliche Lichttransmissionsgrade verschiedener Verschattungsmaterialien beeinflussen (bei sonst gleichen Randbedingungen) den Kunstlichtbedarf. Aber auch bei einheitlichem Verschattungsmaterial ist der Kunstlichtbedarf eines Raumes maßgeblich abhängig von der Ausrichtung der Fassade und den nutzungsabhängigen visuellen Anforderungen an einen Raum. Nachfolgende Auflistung fasst die Simulationsergebnisse hinsichtlich des Kunstlichtbedarfs zusammen.

Im Ergebnis wird deutlich, dass der Kunstlichtbedarf in den Fällen ganzjährig ohne Verschattung am geringsten ist. Die Funktionen Blendschutz und sommerlicher Wärmeschutz werden bei der Ansteuerung der Verschattung höher bewertet, als die Sicherstellung einer minimalen Helligkeit im Raum ohne den Einsatz von Kunstlicht. Mit aktivierter Verschattung reicht jedoch die verbleibende Helligkeit des Raumes nicht immer aus, um den visuellen Anforderungen zu genügen. Kunstlicht wird trotz aktivierter Verschattung eingeschaltet. Die Unterschiede der Kunstlichtbedarfe zwischen Standardmarkise und strahlungsadaptiven textilen Blendschutz resultieren aus den jeweiligen Lichttransmissionsgraden des Verschattungsmaterials. Die Standardmarkise reduziert mit $\tau = \text{konstant} = 0,15$ die Beleuchtungsstärke im Raum bei geringerer Einstrahlung stärker, als das SatS-Material. Gemäß der in Tabelle 9 beschriebenen Materialkennwerte und den hier hinterlegten Simulationsrandbedingungen gilt dieses Verhältnis für eine Einstrahlung auf die Fassade bis etwa 800 W/m^2 . Ohne Kunstlicht wäre es gemittelt über das Jahr mit einer Standardmarkise über längere Zeiträume dunkler, als mit dem SatS.

Die Größenordnung für die Abweichungen zwischen den Ergebnissen von Standardmarkise und SatS, hängt wie erwähnt von den Nutzungsanforderungen (Soll-Beleuchtungsstärke) und Fassadenausrichtung (Zeitraum und Dauer der Bestrahlung) ab. Der im Vergleich zur Standardmarkise mit dem SatS jährlich eingesparte Kunstlichtbedarf beträgt zwischen 20 Stunden (Büro mit Westausrichtung) und 330 Stunden (Klassenraum mit Südausrichtung).

	Büro (500 Lux)			Klassenraum (300 Lux)		
	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS
SÜD-Ausrichtung						
Aktiv-Stunden (Wärme- und Blendschutz)	0	1935	1935	0	1503	1503
Kunstlichtstunden	1570	2373	2323	459	1292	964
Lichttransmission τ Material verfügbar (realisierbar)		Kennwert 0,15 Jahresmittel 0,15	Min 0,15 (0,04) Max 0,30 (0,30) Jahresmittel 0,2962		Kennwert 0,15 Jahresmittel 0,15	Min 0,15 (0,04) Max 0,30 (0,30) Jahresmittel 0,2962
Beleuchtungsstärke Jahresmittel (Raum ohne Kunstlicht)	288	134	157	288	150	170
Verschattungsgrad $[X(1-Fc)]$ Jahresmittel	0	0,1546	0,1656	0	0,1201	0,1263
WEST-Ausrichtung						
Aktiv-Stunden (Wärme- und Blendschutz)	0	1038	1038	0	832	832
Kunstlichtstunden	1570	1963	1944	459	759	644
Lichttransmission τ Material verfügbar (realisierbar)		Kennwert 0,15 Jahresmittel 0,15	Min 0,04 (0,04) Max 0,30 (0,30) Jahresmittel 0,2981		Kennwert 0,15 Jahresmittel 0,15	Min 0,04 (0,04) Max 0,30 (0,30) Jahresmittel 0,2981
Beleuchtungsstärke Jahresmittel (Raum ohne Kunstlicht)	288	215	226	288	220	230
Verschattungsgrad $[X(1-Fc)]$ Jahresmittel	0	0,0829	0,0857	0	0,0665	0,0705

Tabelle 13: Visuell relevante Simulationsergebnisse im Vergleich (Kunstlichtbedarfe, variable Materialkennndaten)

Das Ergebnis zeigt auch, dass der mit den angesetzten variablen Materialkennndaten angestrebte Regelbereich des SatS ($0,04 < \tau_v < 0,30$) nur bei westlicher (auch östlicher) Ausrichtung ausgeschöpft wird. Die Einstrahlung auf eine senkrechte Südfassade fällt im Maximum niedriger aus als die maximale Einstrahlung auf eine Ost- oder Westfassade. Die strahlungsabhängige Lichttransmission des SatS-Materials bewegt sich bei Südausrichtung ausschließlich zwischen 0,15 und 0,30.

Simulationsergebnis 3 – Raumtemperaturen, thermische Lasten und Energiebedarfe

Unabhängig davon, ob der SatS zum Zweck des Blend- oder Sonnenschutzes (sommerlicher Wärmeschutz) aktiviert wird, verringert sich bei aktivierter Verschattung die solare Einstrahlung in den Raum, so dass die inneren Lasten sinken. Die Folge sind reduzierte Kühllasten im Sommer und höhere Heizlasten im Winter. Der Jahresgang der Raumtemperatur ohne Verschattung liegt ganzjährig oberhalb des Jahrestemperaturverlaufs desselben Raumes, wenn dieser bedarfsgerecht verschattet wird (jeweils gleiche Randbedingungen für Gebäudehülle, Raumnutzung und Ausrichtung vorausgesetzt). Wie die Simulationsergebnisse bestätigen, reduzieren sich Kühllasten und Jahreskühlenergie für bedarfsgerecht verschattete Räume im besten Fall auf Null. Allerdings erhöhen sich im Gegenzug die maximale Heizlast und der Jahresheizenergiebedarf.

Dieser Sachverhalt gilt (den Simulationsergebnissen folgend) auch für den Vergleich der Verschattungsmaterialien. Mit der in der Simulation hinterlegten linearen Materialkennlinie für F_c des SatS nach Tabelle 9 (Einfallswinkel 25° bis 50° und F_c 0,4 bis 0,2) ist der über das Jahr gemittelte F_c -Wert von SatS und Verglasung kleiner als der F_c -Wert der Standard-Markise. Die solaren Wärmeeinträge in den Raum fallen im Falle des SatS ganzjährig niedriger aus als mit Standardmarkise.

Die Auswirkungen sind bekannt wie folgt.

- niedrigere mittlere Raumtemperatur im Jahresgang
- niedrigere sommerliche Momentan-Kühllasten
- niedrigere Jahres-Kühlenergiebedarfe
- höhere Momentan-Heizlasten im Winter
- höhere Jahres-Heizenergiebedarfe sind bekannt

Büro (500 Lux)						
Raumluftparameter	sanierter Altbau			Neubau		
	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS
min. Raumtemperatur [°C]	15,00	15,00	15,00	15,17	15,10	15,08
max. Raumtemperatur [°C]	26,78	25,16	25,13	26,00	25,20	25,15
frei schwingende Temperatur Jahresmittel	20,11	19,47	19,45	20,14	19,82	19,80
Heizlast/Heizenergie	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS
max. momentane Heizlast [W]	1791	1797	1798	1517	1523	1524
Vergleich gegenüber ohne Verschattung	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Jahres- Summe [kWh] (Nutzenergiebedarf)	1275	1393	1399	931	975	979
Vergleich in Prozent	100%	109%	110%	100%	105%	105%
Kühllast/Kühlenergie	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS
max. momentane Kühllast [W]	315	0	0	59	0	0
Vergleich gegenüber ohne Verschattung	100%	0%	0%	100%	0%	0%
Jahres- Summe [kWh] (Nutzenergiebedarf)	2	0	0	0,03	0	0
Vergleich in Prozent	100%	0%	0%	100%	0%	0%

Büro (500 Lux)						
Raumluftparameter	sanierter Altbau			Neubau		
	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS
min. Raumtemperatur [°C]	15,00	15,00	15,00	15,50	15,24	15,26
max. Raumtemperatur [°C]	27,67	25,63	24,99	26,00	26,00	25,61
frei schwingende Temperatur Jahresmittel	20,35	19,55	19,41	20,29	19,96	19,84
Heizlast/Heizenergie	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS
max. momentane Heizlast [W]	1719	1769	1764	1445	1491	1487
Vergleich gegenüber ohne Verschattung	100%	103%	103%	100%	103%	103%
Jahres- Summe [kWh] (Nutzenergiebedarf)	1015	1274	1290	793	890	899
Vergleich in Prozent	100%	126%	127%	100%	112%	113%
Kühllast/Kühlenergie	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS	ohne Verschattung	Standard-Markise	SATS
max. momentane Kühllast [W]	349	0	0	87	5	0
Vergleich gegenüber ohne Verschattung	100%	0%	0%	100%	6%	0%
Jahres- Summe [kWh] (Nutzenergiebedarf)	5	0	0	0,2	0,01	0
Vergleich in Prozent	100%	0%	0%	100%	5%	0%

Tabelle 14: Thermisch relevante Simulationsergebnisse am Beispiel eines Büroraums

Einordnung der Simulationsergebnisse und der Möglichkeiten des entstandenen Parametermodells

Mit dem entstandenen Parametermodell ist es möglich, zeitlich aufgelöst und sehr detailliert die Wirkungsweise und Funktionalität strahlungsadaptiver (und anderer) Verschattungssysteme zu analysieren. Für jeden der Eingangsparameter können bei Bedarf weitere Variantenrechnungen durchgeführt werden, um entweder die Simulationsergebnisse zu präzisieren, oder um Optimierungsoptionen zu prüfen. Zweckmäßig sind u.a. folgende Variantenrechnungen:

- veränderter Wetterdatensatz mit ausgeprägtem Sommerwetter
→ zur Präzisierung und Bezifferung des Einflusses auf Kühllastverlauf und Jahres-Kühlenergiebedarfe
- Schrittweise Veränderung der Materialkenndaten für die Standardmarkise
→ zur Präzisierung der Vergleichsgrundlage und genaueren Bezifferung der energetischen und wirtschaftlich möglichen Effekte bzw. Einsparpotentiale bei Verwendung des strahlungsadaptiven textilen Blendschutz-Materials
- Simulation mit realen Materialkenndaten des textilen Ausgangsmaterials *ohne* strahlungsadaptive Eigenschaften
→ Präzision der Vergleichsgrundlage sowie der potentiell möglicher Effekte
- Simulation mit optimierten (auch theoretischen) Materialkenndaten des SatS
→ Prüfung möglicher energetischer und wirtschaftlicher Effekte
- Simulation mit realen Materialkenndaten des fertig entwickelten strahlungsadaptiven Blendschutz-Materials
→ Präzision der energetischen Effekte basierend auf Messergebnissen
→ Vergleichsgrundlage für Ergebnisse aus experimentellen/messtechnischen Analysen
→ Generierung vermarktungsrelevanter Ergebnisse
- Anpassung sonstiger Randbedingungen (Gebäudedaten, Nutzungsanforderungen, Ansteuerung, Standort, ...)
→ zur Bestätigung und Bezifferung möglicher positiver, ggf. aber auch begrenzter energetischer und wirtschaftlicher Effekte eines Verschattungssystems aus SatS-Material

5.4.2 Tageslichtsimulationen

Steinbeis-Transfer-Institut Bau- und Immobilienwirtschaft

Die Tageslichtverfügbarkeit in einem Raum ist von der Größe und der Position von transparenten Öffnungen sowie der Art des Sonnenschutzes abhängig. Eine in der Gebäudeplanung verwendete Anforderungsgröße an die Tageslichtverfügbarkeit, die eine Fassade ermöglicht, ist der Tageslichtquotient (TLQ). Dieser berechnet sich wie folgt:

$$\text{TLQ} = \text{Beleuchtungsstärke innen} / \text{Beleuchtungsstärke außen} [\%].$$

Da sich die Beleuchtungsstärke außerhalb eines Gebäudes kontinuierlich ändert und von der Sonnenstrahlung sowie der Bewölkung abhängt, erfolgt die Berechnung des TLQ für definierte Außenbedingungen. Diese werden durch sogenannte Himmelsmodelle abgebildet. Für die Gebäudeplanung wird das Himmelsmodell nach CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*: die Internationale Beleuchtungskommission) verwendet. Dabei kann zwischen bedecktem oder klarem Himmel gewählt werden. Für die Berechnung des TLQ ist die kontinuierlich verfügbare Lichtstrahlung, also die diffuse Strahlung relevant, so dass ein bedeckter Himmel gewählt wird. Dabei beträgt die Beleuchtungsstärke _{außen} ca. 12.000 Lux. Für einen ausschließlich mit Tageslicht zu versorgenden Büroraum mit einer geforderten Beleuchtungsstärke _{innen} von 500 Lux würde sich ein durchschnittlicher TLQ von 2,4 % ergeben.

Der Tageslichtquotient berücksichtigt nur die diffuse Strahlung und ist damit unabhängig von der Himmelsrichtung der Fassade. Der TLQ dient zur Planung der Größe und Position von transparenten Fassadenöffnungen ausgehend von einer Mindestbeleuchtungsstärke auf der Nutzebene (z. B. Schreibtisch) des Innenraums. In der Regel werden die Schreibtische quer zur Fassade direkt am Fenster angeordnet. Zur Ermittlung der Bandbreite üblicher Tageslichtquotienten wurde ein Musterbüro (Zweipersonenbüro) mit folgenden Parametern in Varianten simuliert. Dazu wurde die Software ReluxPro - 2016.1.1.0 verwendet.

Raumbreite:	4,40 m
Raumtiefe:	4,40 m
Raumhöhe:	3,00 m
Grundfläche:	19,36 m ²
Brüstungshöhen:	0,00 m / 0,80 m
Sturzhöhen:	2,50 m / 3,00 m
Fensterbreiten:	2,00 m / 4,00 m

Abbildung 16 zeigt die Variante 4 (siehe Tabelle 15) mit dem geringsten Fensterflächenanteil und die Variante 5 mit dem größten Fensterflächenanteil.

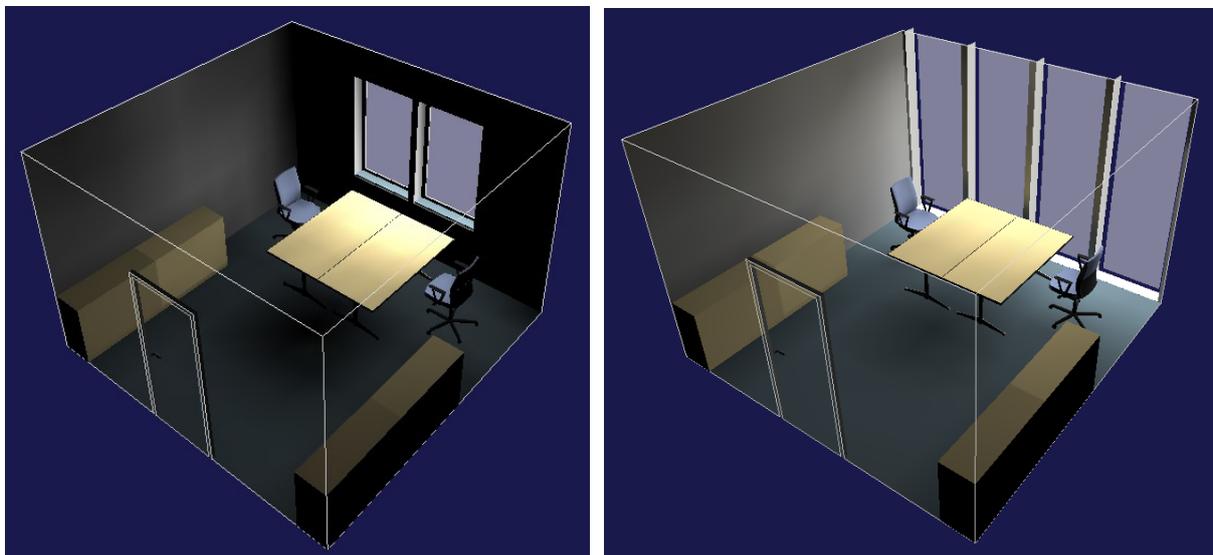


Abbildung 16: Raummodell für die Tageslichtsimulation im Musterbüro, Variante 4 (links) und Variante 5 (rechts)

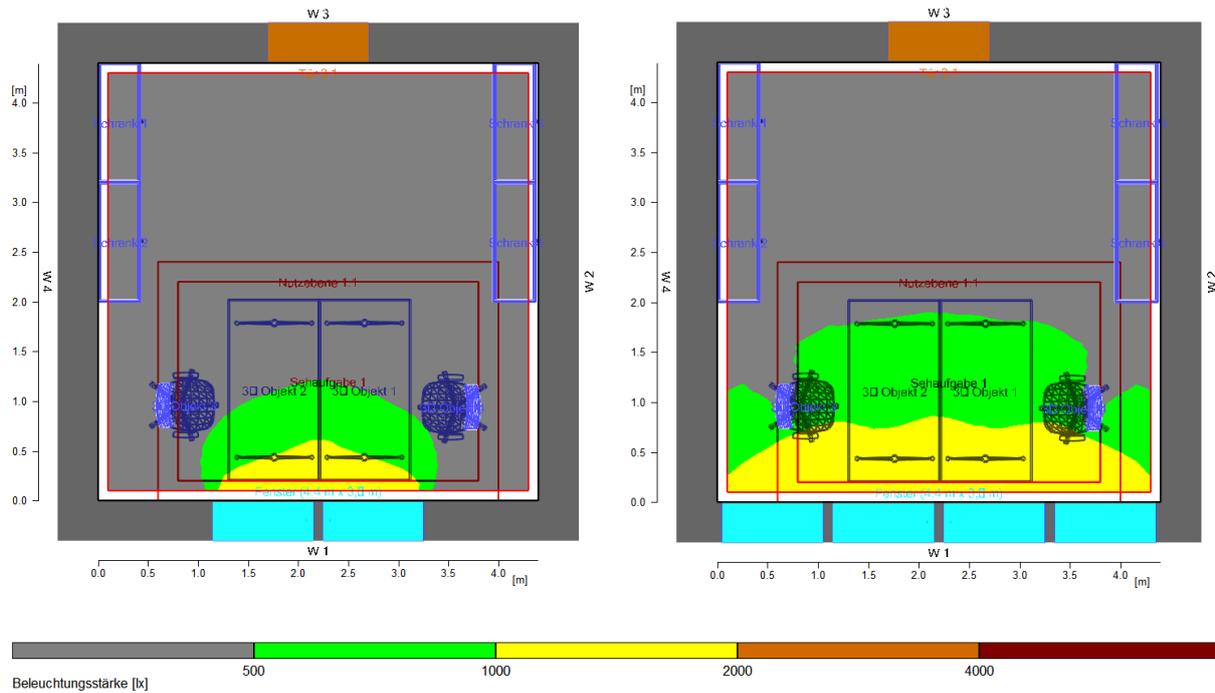


Abbildung 17: Falschfarbendarstellung der Beleuchtungsstärke im Musterbüro, Variante 4 (links) und Variante 5 (rechts)

Die Abbildung 17 zeigt die Tageslichtversorgung der Arbeitsebene. In Variante 4 sind durchschnittlich weniger als 50 % der Arbeitsfläche mit Tageslicht versorgt. In Variante 5 ist die Arbeitsebene durchschnittlich vollversorgt. Die beiden Varianten markieren die Bandbreite typischer Fensterflächenanteile in Fassaden. Die Tabelle 15 enthält die Berechnungsergebnisse weiterer Varianten innerhalb der Bandbreite üblicher Fensterflächenanteile von 26 % (Lochfassade) bis 91 % (Vollverglasung mit Pfosten-Riegel-Fassade).

Die Tageslichtquotienten und die Beleuchtungsstärke wurden nach den Versorgungsbereichen „Sehbereich“ und „Nutzebene“ differenziert. Die Nutzebene umfasst die Grundfläche des Raumes. Der Sehbereich umfasst in der Regel die direkte Arbeitsfläche. In den Varianten wurde ein Bereich von 3 m Tiefe und 2 m Breite verwendet. Im Bereich der Nutzebene liegt der durchschnittliche Tageslichtquotient bei 2,2 bis 5,8 und die durchschnittliche Beleuchtungsstärke bei 208 lx bis 474 lx.

	Brüstungshöhe [m]	Sturzhöhe [m]	Fensterbreite [m]	Fensterflächenanteil [%]	Gewändertiefe außen [m]	Höhe Nutzebene [m]	Fläche Sehbereich [m ²]	Tageslichtquotient (TLQ)		Beleuchtungsstärke (BS)	
								Ø TLQ des Sehbereichs [%]	Ø TLQ der Nutzebene [%]	Ø BS Sehbereichs [lx]	Ø BS der Nutzebene [lx]
Variante 1	0,00	3,00	2,00	45%	0,15	0,80	6,00	6,10	3,10	575	289
Variante 2	0,80	3,00	2,00	33%	0,15	0,80	6,00	6,10	3,10	501	251
Variante 3	0,00	2,50	2,00	38%	0,15	0,80	6,00	4,80	2,30	450	219
Variante 4	0,80	2,50	2,00	26%	0,15	0,80	6,00	4,60	2,20	435	208
Variante 5	0,00	3,00	4,00	91%	0,15	0,80	6,00	9,70	5,80	789	474
Variante 6	0,80	3,00	4,00	67%	0,15	0,80	6,00	9,60	5,70	778	464
Variante 7	0,00	2,50	4,00	76%	0,15	0,80	6,00	7,30	4,30	686	405
Variante 8	0,80	2,50	4,00	52%	0,15	0,80	6,00	7,10	4,10	665	388
Variante 9	0,00	3,00	2,00	45%	0,00	0,80	6,00	6,00	3,00	496	248
Variante 10	0,80	3,00	2,00	33%	0,00	0,80	6,00	5,80	2,80	543	267
Variante 11	0,00	2,50	2,00	38%	0,00	0,80	6,00	4,60	2,20	380	183
Variante 12	0,80	2,50	2,00	26%	0,00	0,80	6,00	4,60	2,20	374	179
Variante 13	0,00	3,00	4,00	91%	0,00	0,80	6,00	9,30	5,50	762	453
Variante 14	0,80	3,00	4,00	67%	0,00	0,80	6,00	8,80	5,20	822	484
Variante 15	0,00	2,50	4,00	76%	0,00	0,80	6,00	7,00	4,10	652	381
Variante 16	0,80	2,50	4,00	52%	0,00	0,80	6,00	6,90	4,00	644	373

Tabelle 15: Ergebnisse der Tageslichtsimulation für 8 Fassadenvarianten eines Musterbüros

Für Klassenräume, die eine mehrreihige Tischanordnung in der Raumtiefe haben, ist die Tageslichtverfügbarkeit bei gleichem Fensterflächenanteil und trotz geringerer Beleuchtungsstärke-Anforderung von 300 lx (statt 500 lx für Büros und Fachkabinette) geringer.

Der durchschnittliche Tageslichtquotient – bezogen auf einen definierten Versorgungsbereich im Raum – beschreibt die Tageslichtverfügbarkeit, die eine Fassade ermöglicht. In Abhängigkeit von der Fassadenausrichtung, Wittersituation, Jahres- und Tageszeit verändert sich die Tageslichtversorgung ständig. Durch die Aktivierung eines Sonnenschutzes wird die Tageslichtversorgung zusätzlich verringert.

Mit Hilfe des für einen Raum ermittelten Tageslichtquotienten kann der Grad der jährlichen Tageslichtversorgung eines Raumes ermittelt werden. Bei einer einreihigen Tischanordnung (kleine Büros) längs der Fassade liegt die durchschnittliche Tageslichtversorgung pro Jahr ohne Berücksichtigung eines Sonnenschutzes bei ca. 65 bis 80 %. Unter Berücksichtigung eines Sonnenschutzes mit einem Verschattungsgrad von 40 % ($F_c = 0,4$) ergibt sich je nach Fensterflächenanteil an der Fassade eine durchschnittliche Tageslichtversorgung pro Jahr von 55 bis 75 %. Bei einer mehrreihigen Tischanordnung wie z. B. in Großraumbüros oder Unterrichtsräumen, kann die jahresdurchschnittliche Tageslichtversorgung auf der Nutzebene auch weniger als 50 % betragen.

Der jährliche Tageslichtversorgungsgrad ist ein Maß für den nutzbaren Tageslichtanteil und damit auch ein Maß für die Berechnung des temporär fehlenden Kunstlichtanteils zur Sicherstellung der Soll-Beleuchtungsstärke.

Für einen Musterklassenraum mit Brüstung gemäß Abbildung 18 ergibt sich eine durchschnittliche Beleuchtungsstärke-Verteilung auf der Nutzebene gemäß Abbildung 19.

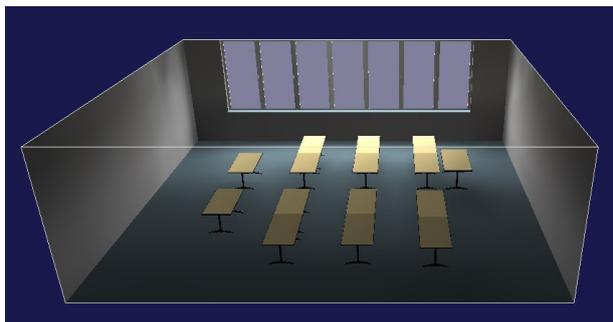


Abbildung 18: Musterklassenraum mit Brüstung

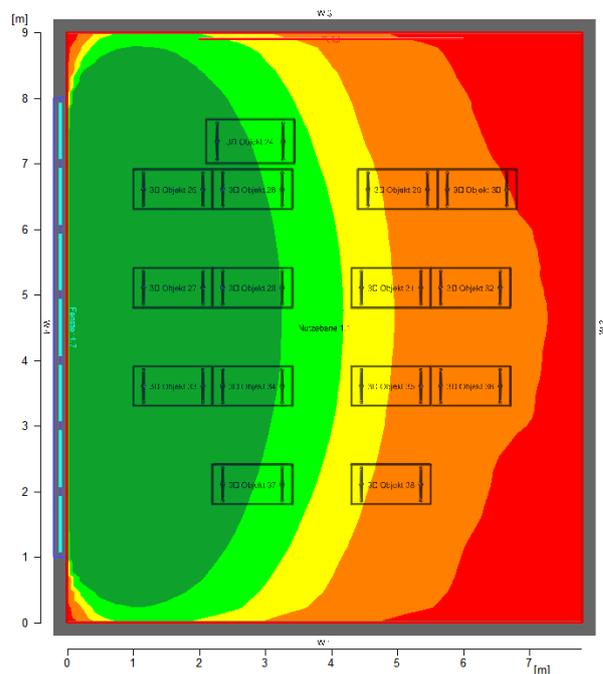


Abbildung 19: Tageslichtverfügbarkeit im Musterklassenraum

Am Beispiel des Musterklassenraumes wurde der jährliche Tageslichtversorgungsgrad in Abhängigkeit von der Fensterhöhe und der Verglasung gemäß Tabelle 16 ermittelt. Der Lichttransmissionsgrad der Verglasung beeinflusst den Nutzungsgrad des verfügbaren Tageslichtes, wenn kein Sonnenschutz vorhanden ist. Bei Vorhandensein eines Sonnenschutzes bestimmt sich der Tageslichtversorgungsgrad über den Lichttransmissionsgrad des Sonnenschutzes und der Verglasung.

Raumtyp, Orientierung	Em [lx]	Fensterhöhe	TLQ [%]	Verglasung	τ_{65}	Rahmenanteil	τ_{eff}	Tageslichtversorgung
Klassenraum, Nord	300	2,1	9,6%	Wärmeschutzverglasung	0,70	30%	43%	94%
Klassenraum, Ost/West								84%
Klassenraum, Süd								78%
Fachkabinett, Nord	500				83%			
Fachkabinett, Ost/West					76%			
Fachkabinett, Süd					73%			
Klassenraum, Nord	300	24%	81%	0,45	76%			
Klassenraum, Ost/West							73%	
Klassenraum, Süd							66%	
Fachkabinett, Nord	500	64%						
Fachkabinett, Ost/West		64%						
Fachkabinett, Süd		64%						
Klassenraum, Nord	300	1,8	8,3%	Wärmeschutzverglasung	0,70	37%	89%	
Klassenraum, Ost/West							81%	
Klassenraum, Süd							76%	
Fachkabinett, Nord	500				76%			
Fachkabinett, Ost/West					71%			
Fachkabinett, Süd					69%			
Klassenraum, Nord	300	24%	76%	0,45	72%			
Klassenraum, Ost/West						70%		
Klassenraum, Süd						61%		
Fachkabinett, Nord	500	61%						
Fachkabinett, Ost/West		61%						
Fachkabinett, Süd		61%						
Klassenraum, Nord	300	16%	65%	Sonnen-schutzverglasung	0,30	64%	65%	
Klassenraum, Ost/West							64%	
Klassenraum, Süd							64%	
Fachkabinett, Nord	500				52%			
Fachkabinett, Ost/West					53%			
Fachkabinett, Süd					52%			

E_m Wartungswert der Beleuchtung (Soll-Beleuchtungsstärke)

TLQ Tageslichtquotient (Mittelwert)

τ_{65} Lichttransmissionsgrad der Verglasung

τ_{eff} Lichttransmissionsgrad effektiv (Rahmen, Verglasung, Verschmutzung, Einfallswinkel)

Tabelle 16: Tageslichtversorgungsgrad eines Musterklassenraumes für verschiedene Fenster-Varianten

Durch einen Sonnenschutz reduziert sich der jährliche Zeitanteil der Tageslichtversorgung und der Zeitanteil der Kunstlichtversorgung erhöht sich. Moderne Beleuchtungssysteme ermöglichen durch ein stufenloses Dimmen die Zuschaltung des Kunstlichts zur Sicherstellung der Soll-Beleuchtungsstärke nur in dem Maß, welches durch den Sonnenschutz reduziert wird. Durch das Dimmen kann der Energieverbrauch für das Kunstlicht bei bewölktem Himmel oder bei aktiviertem Sonnenschutz reduziert werden.

Einen weiteren Einfluss auf den Energieverbrauch hat die Auslegung des Beleuchtungssystems. Nach DIN V 18599 sollte die gesamte Raumfläche mit Kunstlicht versorgt werden, damit eine flexible Anordnung der Arbeitsbereiche möglich ist. Unterteilt man die Raumfläche in einen „Sehbereich“ mit einer Beleuchtungsstärke von 500 lx (z. B. halbe Raumtiefe eines Büros) und einen „Umgebungsbereich“ mit einer Beleuchtungsstärke von 300 lx, reduziert sich der Energieverbrauch erheblich. Damit reduziert sich aber auch der Energieverbrauch durch Kunstlicht, der durch einen strahlungsadaptiven Sonnenschutz eingespart werden kann.

Die folgende Tabelle stellt die Energiekosten für Kunstlicht des Musterbüros ohne Verschattung in Abhängigkeit von der Fenstergröße und -position sowie der Dimmbarkeit der Beleuchtung dar.

Diese Kosten bilden den besten Fall ab, da keine Verschattung ($F_c = 1$) vorliegt.

	Brüstungs- höhe [m]	Sturz- höhe [m]	Fenster- breite [m]	Fenster- flächenanteil [%]	Gewände- tiefe außen [m]	Höhe Nutzebene [m]	Ø TLQ der Nutzebene [%]	Dimmung	
								ohne	mit
								F _c = 1	
								Energie- kosten/a [€]	Energie- kosten/a [€]
Variante 1	0,00	3,00	2,00	45%	0,15	0,80	3,10	43 €/a	21 €/a
Variante 2	0,80	3,00	2,00	33%	0,15	0,80	3,10	43 €/a	21 €/a
Variante 3	0,00	2,50	2,00	38%	0,15	0,80	2,50	62 €/a	26 €/a
Variante 4	0,80	2,50	2,00	26%	0,15	0,80	2,40	66 €/a	28 €/a
Variante 5	0,00	3,00	4,00	91%	0,15	0,80	5,60	22 €/a	10 €/a
Variante 6	0,80	3,00	4,00	67%	0,15	0,80	5,50	23 €/a	11 €/a
Variante 7	0,00	2,50	4,00	76%	0,15	0,80	4,30	32 €/a	14 €/a
Variante 8	0,80	2,50	4,00	52%	0,15	0,80	4,10	33 €/a	15 €/a
Variante 9	0,00	3,00	2,00	45%	0,00	0,80	3,00	44 €/a	22 €/a
Variante 10	0,80	3,00	2,00	33%	0,00	0,80	2,80	48 €/a	23 €/a
Variante 11	0,00	2,50	2,00	38%	0,00	0,80	2,20	66 €/a	30 €/a
Variante 12	0,80	2,50	2,00	26%	0,00	0,80	2,20	66 €/a	30 €/a
Variante 13	0,00	3,00	4,00	91%	0,00	0,80	5,50	24 €/a	11 €/a
Variante 14	0,80	3,00	4,00	67%	0,00	0,80	5,20	26 €/a	11 €/a
Variante 15	0,00	2,50	4,00	76%	0,00	0,80	4,10	33 €/a	15 €/a
Variante 16	0,80	2,50	4,00	52%	0,00	0,80	4,00	34 €/a	16 €/a

Tabelle 17: Ergebnisse der Tageslichtsimulation für 16 Fassadenvarianten des Musterbüros

Aus Tabelle 17 wird sichtbar, dass Räume ohne Brüstung (Räume mit ungerader Raum-Nr.) annähernd den gleichen TLQ haben wie Räume mit einer Brüstungshöhe, wenn diese nicht höher ist als die Nutzebene. Weiterhin wird sichtbar, dass der Raum mit der geringsten Tageslichtversorgung (Variante 4) und ohne Dimmung Energiekosten von ca. 66 €/a verursacht. Dem gegenüber verursacht der Raum mit der größten Tageslichtversorgung (Variante 5) und mit Dimmung nur 10 €/a. Diese Berechnungen erfolgten ohne Sonnenschutz und ergeben den Sockelbetrag von ca. 10 €/a, der für Kunstlicht mindestens ausgegeben werden muss. Erfolgt die Auslegung der Beleuchtungsanlage nur auf den Sehbereich, würden jährliche Stromkosten in Höhe von 5 € pro Büroraum anfallen.

Für die Ermittlung der Energieeinsparungsmöglichkeiten durch den SatS reicht diese Betrachtung nicht aus. Durch einen Sonnenschutz erhöhen sich die Einsparpotenziale. Entscheidend ist aber der Vergleich zwischen einem Sonnenschutz mit einem festen F_c-Wert und einem strahlungsabhängigen, also dynamischen F_c-Wert. Dazu wurde die Software IDA ICE 4.7.1 verwendet, da diese auch Fassaden mit Sonnenschutzsystemen abbilden kann.

Für den Vergleich verschiedener Verschattungsgrade von Markisen wurden die lichttechnischen Größen von zwei Markisenstoffen „vuscreen FR (Flexibles Gewebe)“ und „Soltis 92 (starres Gewebe)“ aus dem Sortiment der ROMA KG verwendet, da hierfür die relevanten physikalischen Größen vorlagen.

Entsprechend DIN 4108-2 erfolgte die Berechnung des sommerlichen Wärmeschutzes unter der Annahme, dass der Sonnenschutz in Abhängigkeit von der Himmelsrichtung bei einer Strahlungsleistung auf die Fassade bei 200 W/m² aktiviert wird. Diese Vorgabe aus dem Wärmeschutz wurde als Randbedingung für die Tageslichtsimulation der Varianten 4 und 5 des Musterbüros einschließlich Sonnenschutz verwendet.

vuscreen FR (flexibles Gewebe)			
Name	weiß 318 09		
Oberseite (1) / Unterseite (2)	1	2	
Sommerlicher Wärmeschutz extern	3	3	
Sommerlicher Wärmeschutz intern	2	2	
Blendschutz	0	0	
Sichtschutz bei Nacht	0	0	
Sichtkontakt nach außen	2	2	
Transmission %	26,6	26,6	
Reflexion %	61,6	61,6	
Absorption %	11,8	11,8	
F _c	0,30	0,30	
g _{tot}	0,18	0,18	
UV-Schutzfaktor (USF-Faktor)	95	95	
τ _{v, n-h} in %	28,0	28,0	
τ _{v, n-n} in %	11,1	11,1	

Abbildung 20: Markise mit F_c-Wert von 0,30 inkl. Verglasung

Soltis 92 (starres Gewebe)			
Name	bronze 92-2043		
Oberseite (1) / Unterseite (2)	1	2	
Sommerlicher Wärmeschutz extern	4	4	
Sommerlicher Wärmeschutz intern	0	0	
Blendschutz	3	3	
Sichtschutz bei Nacht	2	2	
Sichtkontakt nach außen	2	2	
Transmission %	2	2	
Reflexion %	12	12	
Absorption %	86	86	
F _c	0,15	0,15	
g _{tot}	0,09	0,09	
UV-Schutzfaktor (USF-Faktor)	96	96	
τ _{v, n-h} in %	3,8	3,8	
τ _{v, n-n} in %	4,0	4,0	

Abbildung 21: Markise mit F_c-Wert von 0,15 (inkl. Verglasung)

Quelle: ROMA Gewebe-Berater – Ratgeber für den optimalen Einsatz von Textilscreens. August 2016.

	Brüstungs- höhe [m]	Sturz- höhe [m]	Fenster- breite [m]	Fenster- flächenanteil [%]	F _c	Energiebedarf Kunstlicht [kWh/a]	Energiekosten Kunstlicht [€/a]	Energiekosten- Differenz [€/a]
Variante 4	0,80	2,50	2,00	26%	1,00	198,30	39,66	12,92
					0,30	211,50	42,30	
					0,15	276,10	55,22	
Variante 5	0,00	3,00	4,00	91%	1,00	99,10	19,82	2,14
					0,30	99,30	19,86	
					0,15	110,00	22,00	

Nettostrompreis: 0,20 €/kWh

Tabelle 18: Energiekostendifferenz in Abhängigkeit vom F_c-Wert für die Fassadenvarianten 4 und 5 des Musterbüros

Die Variante 4 mit einer Lochfassade benötigt ca. 4 m² Markisenstoff. Unter der Annahme einer linearen Verteilung des F_c-Wertes zwischen den Schaltbereichen 0,30 (mittlere Transmission) und 0,15 (geringe Transmission) und einem Nettostrompreis von 0,20 €/kWh ergibt sich ein theoretisches Energieeinsparungspotenzial von 6 €/a und damit von 1,5 €/m²·a.

Unter der Annahme einer Lebensdauer von 20 Jahren, ergibt sich zusätzlich zu den Komfortvorteilen der strahlungsadaptiven Markise eine Energieeinsparung für Kunstlicht in Höhe von ca. 30 €/m². Dieser Wert kann vorerst als wirtschaftliche Kostengrenze für das Herstellen des strahlungsadaptiven Effektes angesehen werden.

5.4.3 Konzeption und Aufbau eines Markisen-Versuchsstandes

Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH

Ziele der experimentellen Analysen

Die messtechnischen Untersuchungen am konzipierten Versuchsaufbau dienen zunächst der Ermittlung verschattungsrelevanter Materialeigenschaften und –kennwerte möglicher textiler Ausgangsmaterialien für den strahlungsadaptiven textilen Sonnenschutz (SatS). Angestrebt wird die Ermittlung der „Nullwerte“ ohne strahlungsadaptive Eigenschaften sowie ein Abgleich der im Projektantrag anvisierten Kennwerte für das SatS-Material. Messtechnisch ermittelte Kennwerte bilden als Eingangsgrößen für dynamische Berechnungen die Grundlage für praxisnahe Simulationsergebnisse.

Die Versuchsanordnung muss folgende Analysen am textilen Verschattungsmaterial ermöglichen

- Messung der Durchlässigkeit für Solarstrahlung, der Wärme und des sichtbaren Lichtes und des Absorptions- und Reflexionsverhalten textiler Sonnenschutzflächen
- Analyse von Lichtdurchlässigkeit, Blendschutz, Verschattungsgrad und Transparenz unter Berücksichtigung des Einstrahlwinkels
- Experimentelle Untersuchungen zu Energiedurchlassgrad, Absorptions- und Reflexionsverhalten sowie zur energetischen Wirkung auf den Raum unter Berücksichtigung des Einstrahlwinkels

Mess- und Versuchsstandskonzeption

Die zu analysierenden Kennwerte und Parameter betreffen das sichtbare Licht, die Globalstrahlung (kurzwellige Strahlung, Wärme und Licht), die Energiebilanz eines Raumes und die thermische Behaglichkeit. Die Messaufgaben erfolgen in einem eigens dafür eingerichteten Prüfraum im Raumströmungslabor des ILK Dresden. Dieser verfügt über eine Glasfassade, isolierte bedarfsweise temperierbare Raumumschließungsflächen sowie über Klimaanlage zur Luftkonditionierung des Raumes. Die Raumeigenschaften ermöglichen kalorimetrische Messungen. Die solare Einstrahlung wird mittels Sonnensimulator simuliert.

Das Messkonzept sieht eine Null-Messung vor, welche der Ermittlung der Raumkenndaten sowie der Kenndaten der Verglasung (z. B. g-Wert) ohne Verschattung. Die Nullmessung umfasst auch die Bestimmung der im weiteren Verlauf der Messungen beizubehaltenden Randbedingungen, insbesondere der durch den Sonnensimulator generierten Strahlungsdaten.

Im weiteren Verlauf wird die Glasfassade des Prüfraumes jeweils unter Beibehaltung der Installationsmethode mit ausgewählten Textilien verschattet und Vergleichsmessungen werden durchgeführt. Aus den Ergebnissen lassen sich dann die relevanten Kenndaten Lichttransmissionsgrad der jeweiligen Verschattung und Abminderungsfaktor von Verglasung und jeweiliger Verschattung ableiten.

Folgende Größen werden messtechnisch erfasst.

- Lichtdurchlässigkeit bzw. Lichttransmission τ_V als Materialkenngröße der Verschattung
 - diffuse und direkte Anteile der transmittierten Strahlung (beschrieben in prEN 14500) werden nicht unterschieden
 - Vergleichsmessung mittels Luxmeter zur Beleuchtungsstärke E_V an definierter Stelle in definiertem Raum sowie unmittelbar vor und hinter der Verglasung mit und ohne verschattende Markisenstoffe
- Verschattungsgrad: $1 - \tau$
- Transparenz: ausschließlich Bilddokumentation der Durchsichtigkeit von innen nach außen
- Farbwiedergabe: ausschließlich Bilddokumentation des Prüfraumes
- Energiedurchlassgrad: Quotient aus solarem Wärmegewinn und (senkrechter) Einstrahlung, ermittelt durch:
 - Rastermessungen zur solaren Einstrahlung (Solarstrahlung G , Netto-Bestrahlungsstärke G'' und thermische Bestrahlungsstärke E_L) unmittelbar vor der Verglasung ohne Verschattung

- Vergleichs-Rastermessungen zur solaren Einstrahlung G bzw. G'' und E_L unmittelbar hinter der Verglasung – je nach Verschattungsvariante zur Bestimmung des Energiedurchlassgrades g der Verglasung bzw. von Verglasung inkl. Verschattung (g_{tot})
- Berechnung jeweiliger Abminderungsfaktoren F_c für Verglasung und jeweilige Verschattungsvariante (angelehnt an EN 13163) sowie der Verschattungsgrade für Gesamtstrahlung ($1 - F_c$) als Eingangsgröße in TRNSYS-Simulationsrechnung
- Absorptionsverhalten α_e und Reflexionsverhalten $\rho_e = 1 - F_c$ werden vereinfacht ausschließlich mittels Foto- und Thermografie-Aufnahmen beobachtet
- Erfassung der Energiebilanz des Luftvolumenstroms und damit des Raumes (kalorimetrische Messung) zur Bestimmung der solaren Wärmegewinne und etwaiger innerer Lasten durch die Messtechnik
- Messungen zur thermischen Behaglichkeit nach ISO 7730 an dem im Prüfraum nachempfundenen Arbeitsplatz
- Vertikaler Temperaturgradient im Raum

Versuchsaufbau für Messungen an Funktionsmustern im Maßstab 1:1 (Großmuster)

Nachfolgende Abbildungen dokumentieren die bauliche Umsetzung des Versuchsaufbaus für messtechnische Analysen an Funktionsmustern im Maßstab 1:1 (Großmuster).



Abbildung 22: Raumströmungslabor (links) und Sonnensimulator (rechts) im Versuchsfeld des ILK Dresden

Für Messaufgaben an Großmustern wurde im Raumströmungslabor ein 8 m^2 ($2 \text{ m} \times 4 \text{ m}$) großer und mit einem Lüftungssystem klimatisierter Büroraum mit Glasfassade nachempfunden. Die gleichmäßige Zuluftzufuhr mit Untertemperatur erfolgt halbumlaufend über ein 8 cm hohes Lüftungsgitter. Der nichtgenutzte Teil des Raumströmungslabors dient als Druckkammer. Im Deckenbereich befindet sich die Abluftöffnung in Form eines Drallluftauslasses.

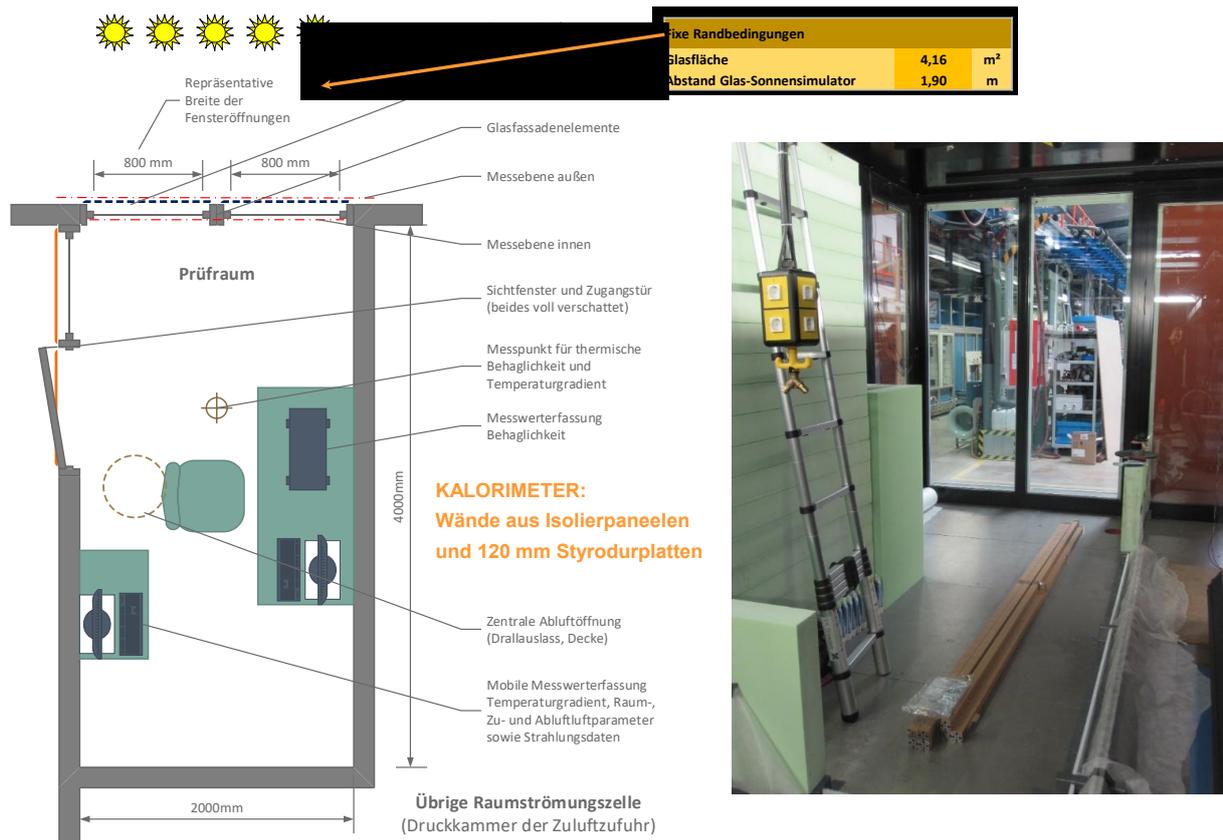


Abbildung 23: Konzept und bauliche Umsetzung des Prüfraums in Form eines Büros

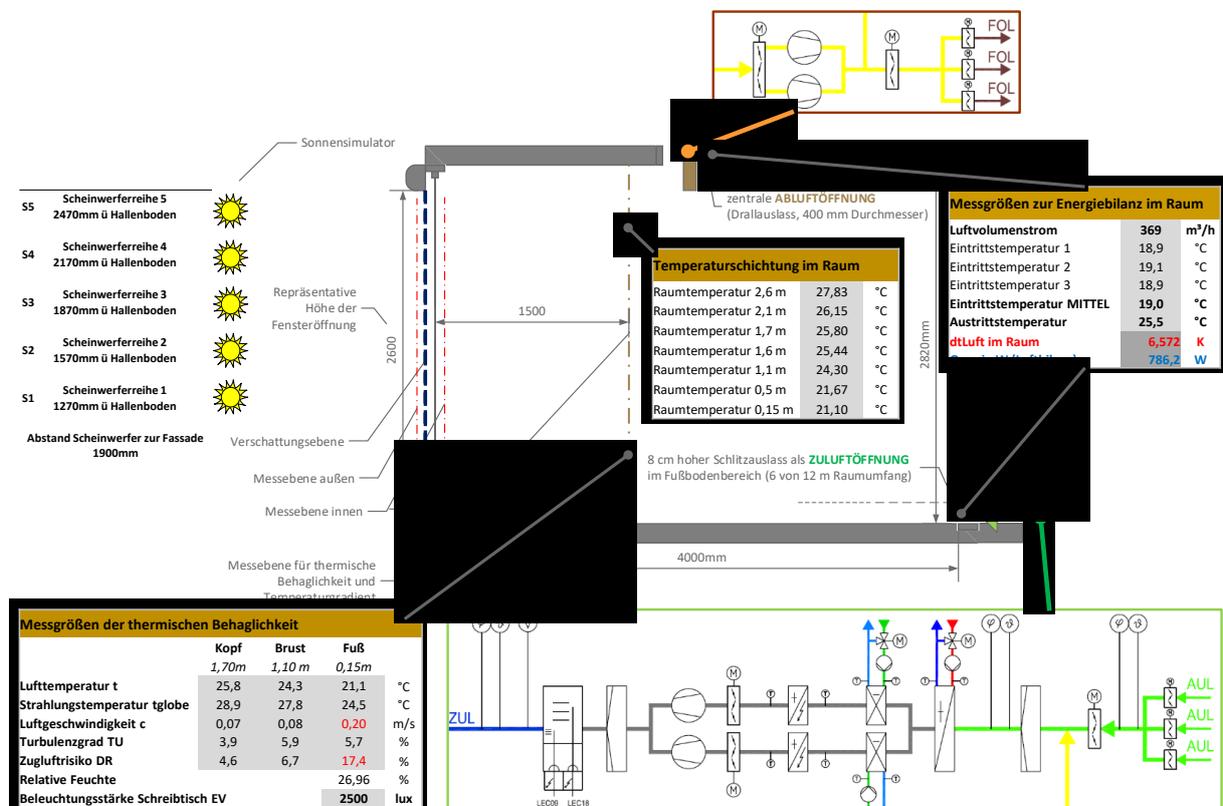


Abbildung 24: Darstellung (Schema) des versorgungstechnischen Equipments des Prüfraumes sowie des Messkonzepts

Der Prüfraum selbst wurde mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet. Dazu gehören 8 Temperatursensoren für Zuluft, Abluft und Temperaturgradienten, das Behaglichkeitsmesssystem sowie vor und hinter der Glasfassade angebrachte Sensoren zur Abrasterung der strahlungsrelevanten Messgrößen.

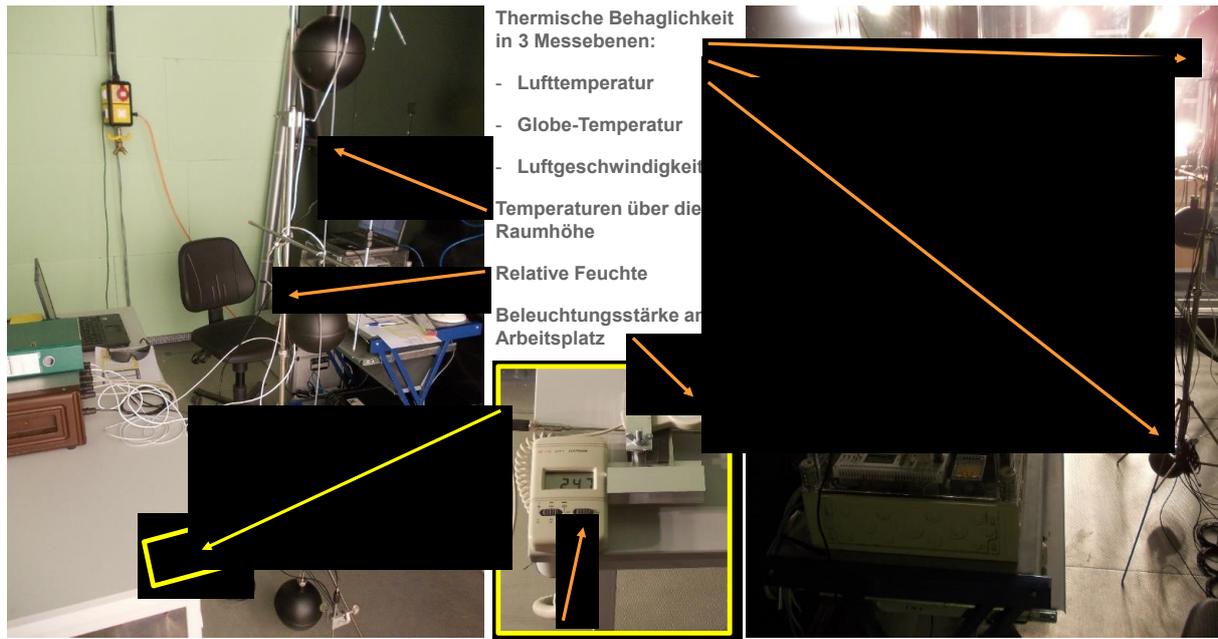


Abbildung 25: Messtechnische Ausstattung des Prüfraumes

Versuchsaufbau für Messungen an kleinformatischen Testmustern (A4)

Um auch an kleinformatischen Prüfmustern die Auswirkungen verschiedener Beschichtungskonfigurationen gemäß dem beschriebenen Mess- und Versuchsstandskonzept analysieren zu können, wurde ein zweiter, wesentlich kleinerer Prüfaufbau errichtet.

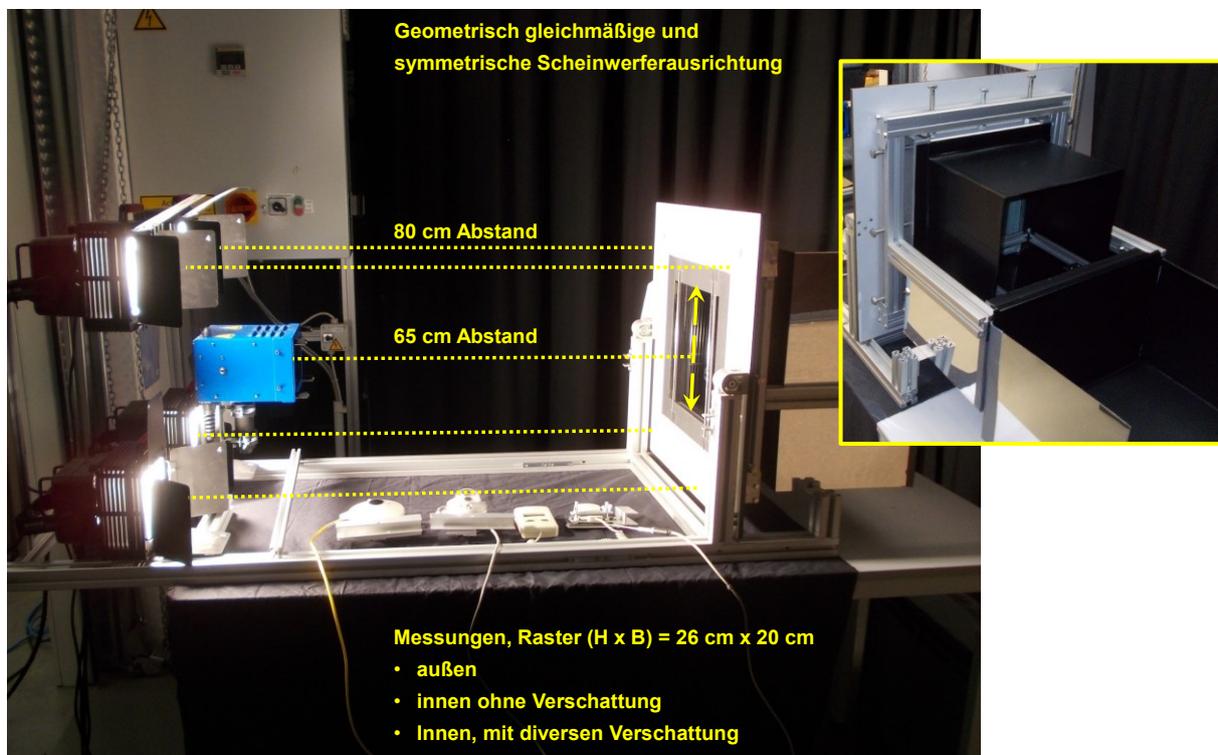


Abbildung 26: Versuchsaufbau für kleinformatische Prüfmuster in DIN A4 - Größe

Der kleine kubische Prüfraum (Kantenlänge 32 cm) ist doppelwandig mit jeweils reflexionsarmen Oberflächen ausgestattet. Zwei 12 mm starke und 3 mm voneinander beabstandete Floatglasscheiben bilden das Fenster in der „Fassade“. Licht- und Energiedurchlasseigenschaften werden ebenso bestimmt, wie im Versuchsstand für Großmuster. Behaglichkeitsparameter, sowie die

Energiebilanz über die freie konvektive Prüfraumbelüftung werden nicht erfasst. Stattdessen kann durch das Einsetzen verschiedener Lochbleche im Strahlungsweg zwischen Sonnensimulator und Fassade eine etwaige Strahlungsabhängigkeit der Licht- bzw. Energiedurchlasseigenschaften analysiert werden.

Erfassung strahlungsrelevanter Messgrößen über die Verglasung mit und ohne Verschattung

In beiden Versuchsaufbauten erfolgt die messtechnische Erfassung strahlungsrelevanter Größen angelehnt an die DIN EN 12975-2. Im Messverfahren vergleichbar mit der Globalstrahlung der Sonne ist bei Einsatz eines Sonnensimulators die thermische Nettobestrahlungsstärke G'' – berechnet aus der mit dem Pyranometer erfassten kurzwelligigen Solarstrahlung G , der Umgebungstemperatur und den Messgrößen des Pyrgeometers.

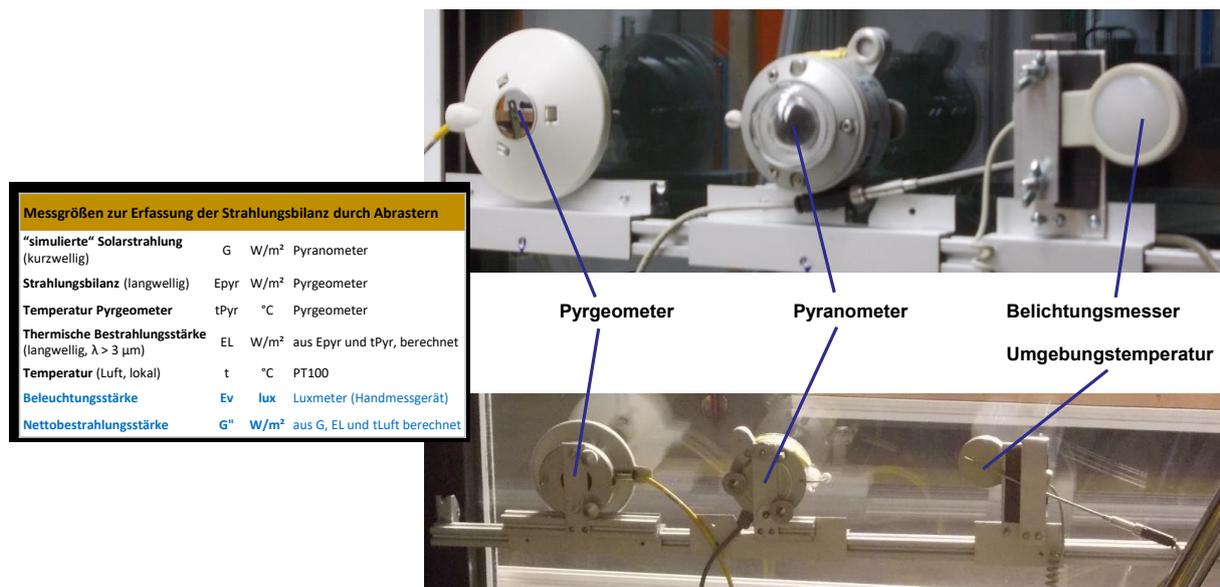


Abbildung 27: Sensorik zur Erfassung

strahlungsrelevanter Parameter

Die Nettobestrahlungsstärke ergibt sich wie folgt:

$$G'' = G + (\epsilon/\alpha)(E_L - \sigma T_a^4)$$

Darin sind:

E _L	Thermische Bestrahlungsstärke
ε/α	0,85
σ	5,670367 • 10 ⁻⁸ Stefan-Boltzmann-Konstante
T _a	Umgebungslufttemperatur

Die thermische Bestrahlungsstärke ergibt sich wie folgt:

$$E_L = E_{Pyr} + \sigma T_{Sensor}^4$$

mit:

E _{Pyr}	langwellige Strahlungsbilanz Pyrgeometer
T _{Sensor}	Sensortemperatur des Pyrgeometers

Im Fall des Versuchsstandes für Großmuster werden die Messgrößen G , E_{Pyr} , T_{Pyr} , T_a sowie die Beleuchtungsstärke E_v vor und hinter der Verglasung in Einzelmesswerten je über ein Raster aus 80 Einzelflächen (á 20 cm x 26 cm) erfasst. Unter Berücksichtigung der Lagebeziehung zwischen den Flächen des Rasters und den geometrisch ausgerichteten Scheinwerferreihen des Sonnensimulators ermöglicht die gewählte Messstrategie auch eine winkelabhängige Bewertung der Messergebnisse.

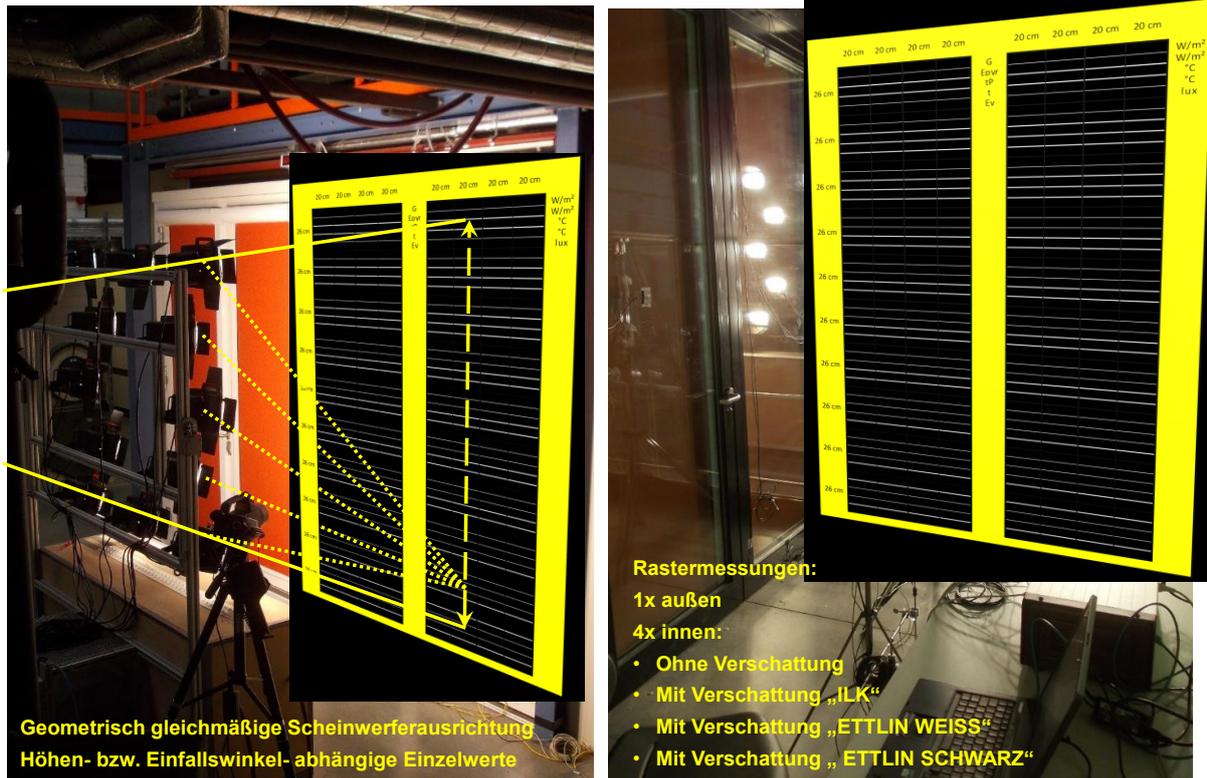


Abbildung 28: Darstellung der Rastermessung strahlungsrelevanter Messgrößen vor und hinter der Verglasung

Die Abmessung des Fensters im Versuchsaufbau für kleinformatige Testmuster ist mit der eines Rasterfeldes identisch (20 x 26 cm). Vor und hinter der Verglasung werden die Messgrößen G , E_{Pyr} , T_{Pyr} , T_a als Einzelmesswerte zeitlich nacheinander erfasst. Der Einfallswinkel beträgt für alle kleinformatigen Prüfmuster 0° .

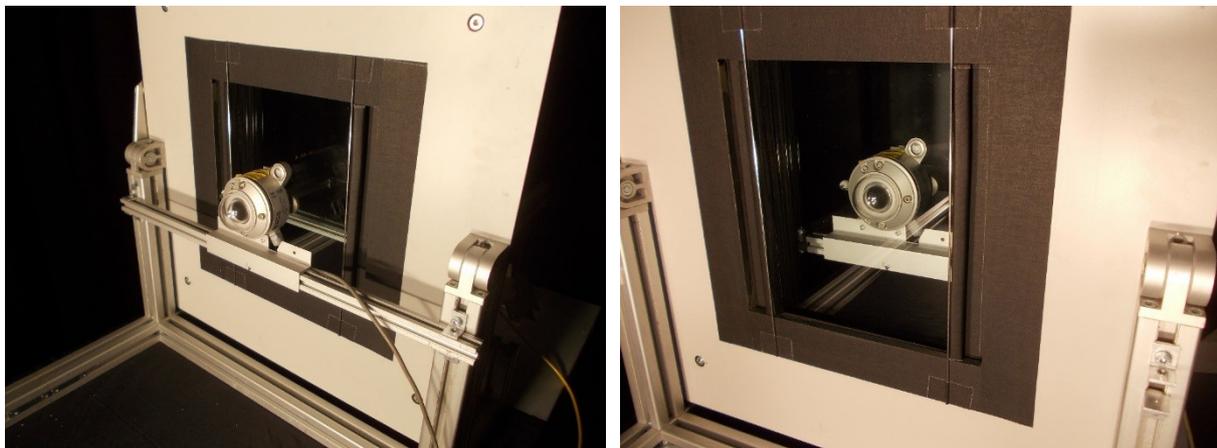


Abbildung 29: Anordnung der Sensorik vor und hinter der Verglasung im Fall des Versuchsaufbaus für DIN- A4- Testmuster

5.5 Experimentelle Untersuchungen zu lichttechnischen und energetischen Eigenschaften strahlungsadaptiver textiler Materialien

Institut für Luft- und Kältetechnik Dresden gGmbH

Die messtechnischen Untersuchungen zu lichttechnischen und energetischen Eigenschaften der Prüfmuster und Funktionsmuster erfolgen zeitlich parallel. Selbiges gilt für die Auswertung der jeweiligen Messungen.

Vor Beginn der eigentlichen Messungen erfolgte zunächst eine Erprobung des Versuchsaufbaus unter den Gesichtspunkten:

- Funktionsnachweis für Sensorik und Messequipment
- Funktionsprüfung der klimatechnischen Versorgung des Prüfraumes und Erarbeitung geeigneter Randbedingungen für Zuluftvolumenstrom und Zulufttemperatur
- Anordnung und geometrische Ausrichtung des Sonnensimulators
- Feinjustierung der Scheinwerfer des Sonnensimulators für eine aus geometrischer Sicht gleichmäßige Strahlungsverteilung

5.5.1 Nullmessungen, Basismaterialien und erstes Funktionsmuster (Messkampagne 1 und 2)

Die Nullmessungen im Rahmen der Messkampagne 1 am Versuchsaufbau für Großmuster dienen:

- der Ermittlung der Kennwerte der Verglasung des Prüfraums ohne Verschattung (u. a. g-Wert)
- der Validierung des Messkonzeptes
- der Darstellung des Effektes und der Zweckmäßigkeit eines Verschattungssystems

Die Basismessungen am Versuchsaufbau für Großmuster dienen:

- der Kennwertbestimmung an Vergleichs- und Ausgangsmaterialien
 - Messkampagne 1: „ILK-Verschattung“; „Ettlin schwarz“ und „Ettlin weiß“
 - Messkampagne 2: „β60 unbeschichtet“
- der Darstellung der Abhängigkeit vom Ausgangsmaterialien aber auch vom Einfallswinkel
- Einordnung angestrebter Entwicklungsziele
- Auswahl eines Basismaterials für das erste Funktionsmuster

Die Messkampagne 2 endet mit der Kennwertbestimmung am ersten Funktionsmuster „β55 farbvariabel beschichtet“ sowie der Gegenüberstellung mit den Ergebnissen aus den Basismessungen. Besonderer Fokus liegt auf der Darstellung der strahlungsadaptiven Eigenschaften des beschichteten Materials.

OHNE Verschattung	„ILK-Verdunklung“	„Ettlin weiß“	„Ettlin schwarz“																																																																																																																																																																																																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">Messgrößen der thermischen Behaglichkeit</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Kopf</th> <th>Brust</th> <th>Fuß</th> <th>Mittel</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1,70 m</th> <th>1,10 m</th> <th>0,15 m</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>tLuft</td> <td>25,8</td> <td>24,3</td> <td>21,1</td> <td>°C 23,71</td> </tr> <tr> <td>tGlobe</td> <td>28,9</td> <td>27,8</td> <td>24,5</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>vLuft</td> <td>0,07</td> <td>0,08</td> <td>0,20</td> <td>m/s 0,048</td> </tr> <tr> <td>TU</td> <td>3,9</td> <td>5,9</td> <td>5,7</td> <td>% 5,1</td> </tr> <tr> <td>DR</td> <td>4,6</td> <td>6,7</td> <td>17,4</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>phi</td> <td></td> <td></td> <td>26,96</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>lux auf Schreibtisch</td> <td></td> <td>EV</td> <td>2500</td> <td>lux</td> </tr> </tbody> </table>	Messgrößen der thermischen Behaglichkeit						Kopf	Brust	Fuß	Mittel		1,70 m	1,10 m	0,15 m		tLuft	25,8	24,3	21,1	°C 23,71	tGlobe	28,9	27,8	24,5	°C	vLuft	0,07	0,08	0,20	m/s 0,048	TU	3,9	5,9	5,7	% 5,1	DR	4,6	6,7	17,4	%	phi			26,96	%	lux auf Schreibtisch		EV	2500	lux	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">Messgrößen der thermischen Behaglichkeit</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Kopf</th> <th>Brust</th> <th>Fuß</th> <th>Mittel</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1,70 m</th> <th>1,10 m</th> <th>0,15 m</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>tLuft</td> <td>20,9</td> <td>20,2</td> <td>18,6</td> <td>°C 19,89</td> </tr> <tr> <td>tGlobe</td> <td>21,3</td> <td>20,9</td> <td>19,6</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>vLuft</td> <td>0,04</td> <td>0,06</td> <td>0,17</td> <td>m/s 0,035</td> </tr> <tr> <td>TU</td> <td>14,1</td> <td>10,6</td> <td>5,0</td> <td>% 6,8</td> </tr> <tr> <td>DR</td> <td>2,1</td> <td>6,3</td> <td>18,0</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>phi</td> <td></td> <td></td> <td>26,76</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>lux auf Schreibtisch</td> <td></td> <td>EV</td> <td>3</td> <td>lux</td> </tr> </tbody> </table>	Messgrößen der thermischen Behaglichkeit						Kopf	Brust	Fuß	Mittel		1,70 m	1,10 m	0,15 m		tLuft	20,9	20,2	18,6	°C 19,89	tGlobe	21,3	20,9	19,6	°C	vLuft	0,04	0,06	0,17	m/s 0,035	TU	14,1	10,6	5,0	% 6,8	DR	2,1	6,3	18,0	%	phi			26,76	%	lux auf Schreibtisch		EV	3	lux	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">Messgrößen der thermischen Behaglichkeit</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Kopf</th> <th>Brust</th> <th>Fuß</th> <th>Mittel</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1,70 m</th> <th>1,10 m</th> <th>0,15 m</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>tLuft</td> <td>22,2</td> <td>21,3</td> <td>19,1</td> <td>°C 20,84</td> </tr> <tr> <td>tGlobe</td> <td>23,4</td> <td>22,9</td> <td>20,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>vLuft</td> <td>0,05</td> <td>0,06</td> <td>0,18</td> <td>m/s 0,038</td> </tr> <tr> <td>TU</td> <td>10,8</td> <td>7,0</td> <td>4,9</td> <td>% 6,9</td> </tr> <tr> <td>DR</td> <td>3,2</td> <td>6,0</td> <td>18,0</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>phi</td> <td></td> <td></td> <td>31,48</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>lux auf Schreibtisch</td> <td></td> <td>EV</td> <td>570</td> <td>lux</td> </tr> </tbody> </table>	Messgrößen der thermischen Behaglichkeit						Kopf	Brust	Fuß	Mittel		1,70 m	1,10 m	0,15 m		tLuft	22,2	21,3	19,1	°C 20,84	tGlobe	23,4	22,9	20,8	°C	vLuft	0,05	0,06	0,18	m/s 0,038	TU	10,8	7,0	4,9	% 6,9	DR	3,2	6,0	18,0	%	phi			31,48	%	lux auf Schreibtisch		EV	570	lux	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="5">Messgrößen der thermischen Behaglichkeit</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Kopf</th> <th>Brust</th> <th>Fuß</th> <th>Mittel</th> </tr> <tr> <th></th> <th>1,70 m</th> <th>1,10 m</th> <th>0,15 m</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>tLuft</td> <td>22,8</td> <td>21,8</td> <td>19,9</td> <td>°C 21,47</td> </tr> <tr> <td>tGlobe</td> <td>23,8</td> <td>23,3</td> <td>21,3</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>vLuft</td> <td>0,05</td> <td>0,06</td> <td>0,18</td> <td>m/s 0,037</td> </tr> <tr> <td>TU</td> <td>7,6</td> <td>7,2</td> <td>5,1</td> <td>% 6,6</td> </tr> <tr> <td>DR</td> <td>2,6</td> <td>6,2</td> <td>16,9</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>phi</td> <td></td> <td></td> <td>24,41</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>lux auf Schreibtisch</td> <td></td> <td>EV</td> <td>450</td> <td>lux</td> </tr> </tbody> </table>	Messgrößen der thermischen Behaglichkeit						Kopf	Brust	Fuß	Mittel		1,70 m	1,10 m	0,15 m		tLuft	22,8	21,8	19,9	°C 21,47	tGlobe	23,8	23,3	21,3	°C	vLuft	0,05	0,06	0,18	m/s 0,037	TU	7,6	7,2	5,1	% 6,6	DR	2,6	6,2	16,9	%	phi			24,41	%	lux auf Schreibtisch		EV	450	lux
Messgrößen der thermischen Behaglichkeit																																																																																																																																																																																																											
	Kopf	Brust	Fuß	Mittel																																																																																																																																																																																																							
	1,70 m	1,10 m	0,15 m																																																																																																																																																																																																								
tLuft	25,8	24,3	21,1	°C 23,71																																																																																																																																																																																																							
tGlobe	28,9	27,8	24,5	°C																																																																																																																																																																																																							
vLuft	0,07	0,08	0,20	m/s 0,048																																																																																																																																																																																																							
TU	3,9	5,9	5,7	% 5,1																																																																																																																																																																																																							
DR	4,6	6,7	17,4	%																																																																																																																																																																																																							
phi			26,96	%																																																																																																																																																																																																							
lux auf Schreibtisch		EV	2500	lux																																																																																																																																																																																																							
Messgrößen der thermischen Behaglichkeit																																																																																																																																																																																																											
	Kopf	Brust	Fuß	Mittel																																																																																																																																																																																																							
	1,70 m	1,10 m	0,15 m																																																																																																																																																																																																								
tLuft	20,9	20,2	18,6	°C 19,89																																																																																																																																																																																																							
tGlobe	21,3	20,9	19,6	°C																																																																																																																																																																																																							
vLuft	0,04	0,06	0,17	m/s 0,035																																																																																																																																																																																																							
TU	14,1	10,6	5,0	% 6,8																																																																																																																																																																																																							
DR	2,1	6,3	18,0	%																																																																																																																																																																																																							
phi			26,76	%																																																																																																																																																																																																							
lux auf Schreibtisch		EV	3	lux																																																																																																																																																																																																							
Messgrößen der thermischen Behaglichkeit																																																																																																																																																																																																											
	Kopf	Brust	Fuß	Mittel																																																																																																																																																																																																							
	1,70 m	1,10 m	0,15 m																																																																																																																																																																																																								
tLuft	22,2	21,3	19,1	°C 20,84																																																																																																																																																																																																							
tGlobe	23,4	22,9	20,8	°C																																																																																																																																																																																																							
vLuft	0,05	0,06	0,18	m/s 0,038																																																																																																																																																																																																							
TU	10,8	7,0	4,9	% 6,9																																																																																																																																																																																																							
DR	3,2	6,0	18,0	%																																																																																																																																																																																																							
phi			31,48	%																																																																																																																																																																																																							
lux auf Schreibtisch		EV	570	lux																																																																																																																																																																																																							
Messgrößen der thermischen Behaglichkeit																																																																																																																																																																																																											
	Kopf	Brust	Fuß	Mittel																																																																																																																																																																																																							
	1,70 m	1,10 m	0,15 m																																																																																																																																																																																																								
tLuft	22,8	21,8	19,9	°C 21,47																																																																																																																																																																																																							
tGlobe	23,8	23,3	21,3	°C																																																																																																																																																																																																							
vLuft	0,05	0,06	0,18	m/s 0,037																																																																																																																																																																																																							
TU	7,6	7,2	5,1	% 6,6																																																																																																																																																																																																							
DR	2,6	6,2	16,9	%																																																																																																																																																																																																							
phi			24,41	%																																																																																																																																																																																																							
lux auf Schreibtisch		EV	450	lux																																																																																																																																																																																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Messgrößen im Bilanzraum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Luftvolumenstrom</td> <td>369</td> <td>m³/h</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 1</td> <td>18,9</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 2</td> <td>19,1</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 3</td> <td>18,9</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur MITTEL</td> <td>19,0</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Austrittstemperatur 4</td> <td>25,5</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>dtLuft im Raum</td> <td>6,57</td> <td>K</td> </tr> <tr> <td>Qges in W (Luftbilanz)</td> <td>786,2</td> <td>W</td> </tr> </tbody> </table>	Messgrößen im Bilanzraum			Luftvolumenstrom	369	m³/h	Eintrittstemperatur 1	18,9	°C	Eintrittstemperatur 2	19,1	°C	Eintrittstemperatur 3	18,9	°C	Eintrittstemperatur MITTEL	19,0	°C	Austrittstemperatur 4	25,5	°C	dtLuft im Raum	6,57	K	Qges in W (Luftbilanz)	786,2	W	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Messgrößen im Bilanzraum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Luftvolumenstrom</td> <td>360</td> <td>m³/h</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 1</td> <td>17,9</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 2</td> <td>17,6</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 3</td> <td>17,6</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur MITTEL</td> <td>17,7</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Austrittstemperatur 4</td> <td>20,7</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>dtLuft im Raum</td> <td>2,97</td> <td>K</td> </tr> <tr> <td>Qges in W (Luftbilanz)</td> <td>353,2</td> <td>W</td> </tr> </tbody> </table>	Messgrößen im Bilanzraum			Luftvolumenstrom	360	m³/h	Eintrittstemperatur 1	17,9	°C	Eintrittstemperatur 2	17,6	°C	Eintrittstemperatur 3	17,6	°C	Eintrittstemperatur MITTEL	17,7	°C	Austrittstemperatur 4	20,7	°C	dtLuft im Raum	2,97	K	Qges in W (Luftbilanz)	353,2	W	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Messgrößen im Bilanzraum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Luftvolumenstrom</td> <td>365</td> <td>m³/h</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 1</td> <td>17,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 2</td> <td>18,0</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 3</td> <td>17,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur MITTEL</td> <td>17,9</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Austrittstemperatur 4</td> <td>22,0</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>dtLuft im Raum</td> <td>4,145</td> <td>K</td> </tr> <tr> <td>Qges in W (Luftbilanz)</td> <td>499,4</td> <td>W</td> </tr> </tbody> </table>	Messgrößen im Bilanzraum			Luftvolumenstrom	365	m³/h	Eintrittstemperatur 1	17,8	°C	Eintrittstemperatur 2	18,0	°C	Eintrittstemperatur 3	17,8	°C	Eintrittstemperatur MITTEL	17,9	°C	Austrittstemperatur 4	22,0	°C	dtLuft im Raum	4,145	K	Qges in W (Luftbilanz)	499,4	W	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Messgrößen im Bilanzraum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Luftvolumenstrom</td> <td>362</td> <td>m³/h</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 1</td> <td>18,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 2</td> <td>19,1</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur 3</td> <td>18,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Eintrittstemperatur MITTEL</td> <td>18,9</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Austrittstemperatur 4</td> <td>22,6</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>dtLuft im Raum</td> <td>3,689</td> <td>K</td> </tr> <tr> <td>Qges in W (Luftbilanz)</td> <td>444,4</td> <td>W</td> </tr> </tbody> </table>	Messgrößen im Bilanzraum			Luftvolumenstrom	362	m³/h	Eintrittstemperatur 1	18,8	°C	Eintrittstemperatur 2	19,1	°C	Eintrittstemperatur 3	18,8	°C	Eintrittstemperatur MITTEL	18,9	°C	Austrittstemperatur 4	22,6	°C	dtLuft im Raum	3,689	K	Qges in W (Luftbilanz)	444,4	W																																																																																												
Messgrößen im Bilanzraum																																																																																																																																																																																																											
Luftvolumenstrom	369	m³/h																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 1	18,9	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 2	19,1	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 3	18,9	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur MITTEL	19,0	°C																																																																																																																																																																																																									
Austrittstemperatur 4	25,5	°C																																																																																																																																																																																																									
dtLuft im Raum	6,57	K																																																																																																																																																																																																									
Qges in W (Luftbilanz)	786,2	W																																																																																																																																																																																																									
Messgrößen im Bilanzraum																																																																																																																																																																																																											
Luftvolumenstrom	360	m³/h																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 1	17,9	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 2	17,6	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 3	17,6	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur MITTEL	17,7	°C																																																																																																																																																																																																									
Austrittstemperatur 4	20,7	°C																																																																																																																																																																																																									
dtLuft im Raum	2,97	K																																																																																																																																																																																																									
Qges in W (Luftbilanz)	353,2	W																																																																																																																																																																																																									
Messgrößen im Bilanzraum																																																																																																																																																																																																											
Luftvolumenstrom	365	m³/h																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 1	17,8	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 2	18,0	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 3	17,8	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur MITTEL	17,9	°C																																																																																																																																																																																																									
Austrittstemperatur 4	22,0	°C																																																																																																																																																																																																									
dtLuft im Raum	4,145	K																																																																																																																																																																																																									
Qges in W (Luftbilanz)	499,4	W																																																																																																																																																																																																									
Messgrößen im Bilanzraum																																																																																																																																																																																																											
Luftvolumenstrom	362	m³/h																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 1	18,8	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 2	19,1	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur 3	18,8	°C																																																																																																																																																																																																									
Eintrittstemperatur MITTEL	18,9	°C																																																																																																																																																																																																									
Austrittstemperatur 4	22,6	°C																																																																																																																																																																																																									
dtLuft im Raum	3,689	K																																																																																																																																																																																																									
Qges in W (Luftbilanz)	444,4	W																																																																																																																																																																																																									
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Temperaturschichtung im Raum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Raumtemperatur 2,6 m</td> <td>27,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 2,1 m</td> <td>26,1</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,7 m</td> <td>25,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,6 m</td> <td>25,4</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,1 m</td> <td>24,3</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 0,5 m</td> <td>21,7</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 0,15 m</td> <td>21,1</td> <td>°C</td> </tr> </tbody> </table>	Temperaturschichtung im Raum			Raumtemperatur 2,6 m	27,8	°C	Raumtemperatur 2,1 m	26,1	°C	Raumtemperatur 1,7 m	25,8	°C	Raumtemperatur 1,6 m	25,4	°C	Raumtemperatur 1,1 m	24,3	°C	Raumtemperatur 0,5 m	21,7	°C	Raumtemperatur 0,15 m	21,1	°C	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Temperaturschichtung im Raum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Raumtemperatur 2,6 m</td> <td>21,0</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 2,1 m</td> <td>21,0</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,7 m</td> <td>20,9</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,6 m</td> <td>20,5</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,1 m</td> <td>20,2</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 0,5 m</td> <td>18,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 0,15 m</td> <td>18,6</td> <td>°C</td> </tr> </tbody> </table>	Temperaturschichtung im Raum			Raumtemperatur 2,6 m	21,0	°C	Raumtemperatur 2,1 m	21,0	°C	Raumtemperatur 1,7 m	20,9	°C	Raumtemperatur 1,6 m	20,5	°C	Raumtemperatur 1,1 m	20,2	°C	Raumtemperatur 0,5 m	18,8	°C	Raumtemperatur 0,15 m	18,6	°C	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Temperaturschichtung im Raum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Raumtemperatur 2,6 m</td> <td>22,9</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 2,1 m</td> <td>22,3</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,7 m</td> <td>22,2</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,6 m</td> <td>21,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,1 m</td> <td>21,3</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 0,5 m</td> <td>19,4</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 0,15 m</td> <td>19,1</td> <td>°C</td> </tr> </tbody> </table>	Temperaturschichtung im Raum			Raumtemperatur 2,6 m	22,9	°C	Raumtemperatur 2,1 m	22,3	°C	Raumtemperatur 1,7 m	22,2	°C	Raumtemperatur 1,6 m	21,8	°C	Raumtemperatur 1,1 m	21,3	°C	Raumtemperatur 0,5 m	19,4	°C	Raumtemperatur 0,15 m	19,1	°C	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Temperaturschichtung im Raum</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Raumtemperatur 2,6 m</td> <td>23,5</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 2,1 m</td> <td>22,9</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,7 m</td> <td>22,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,6 m</td> <td>22,4</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 1,1 m</td> <td>21,8</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 0,5 m</td> <td>20,3</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Raumtemperatur 0,15 m</td> <td>19,9</td> <td>°C</td> </tr> </tbody> </table>	Temperaturschichtung im Raum			Raumtemperatur 2,6 m	23,5	°C	Raumtemperatur 2,1 m	22,9	°C	Raumtemperatur 1,7 m	22,8	°C	Raumtemperatur 1,6 m	22,4	°C	Raumtemperatur 1,1 m	21,8	°C	Raumtemperatur 0,5 m	20,3	°C	Raumtemperatur 0,15 m	19,9	°C																																																																																																								
Temperaturschichtung im Raum																																																																																																																																																																																																											
Raumtemperatur 2,6 m	27,8	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 2,1 m	26,1	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,7 m	25,8	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,6 m	25,4	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,1 m	24,3	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 0,5 m	21,7	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 0,15 m	21,1	°C																																																																																																																																																																																																									
Temperaturschichtung im Raum																																																																																																																																																																																																											
Raumtemperatur 2,6 m	21,0	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 2,1 m	21,0	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,7 m	20,9	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,6 m	20,5	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,1 m	20,2	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 0,5 m	18,8	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 0,15 m	18,6	°C																																																																																																																																																																																																									
Temperaturschichtung im Raum																																																																																																																																																																																																											
Raumtemperatur 2,6 m	22,9	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 2,1 m	22,3	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,7 m	22,2	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,6 m	21,8	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,1 m	21,3	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 0,5 m	19,4	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 0,15 m	19,1	°C																																																																																																																																																																																																									
Temperaturschichtung im Raum																																																																																																																																																																																																											
Raumtemperatur 2,6 m	23,5	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 2,1 m	22,9	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,7 m	22,8	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,6 m	22,4	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 1,1 m	21,8	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 0,5 m	20,3	°C																																																																																																																																																																																																									
Raumtemperatur 0,15 m	19,9	°C																																																																																																																																																																																																									

Tabelle 19: Prüfmuster der Messkampagne 1 während der Messungen

OHNE Verschattung	„ILK-Verdunklung“	„Ettlin weiß“	„Ettlin schwarz“
Lichttechnische Eigenschaften (Reflexion, Transparenz, Durchsichtigkeit)			
<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Transmission direkter und diffuser Strahlung • Helligkeit ausreichend – kein Kunstlichtbedarf • Risiko der Blendung 	<ul style="list-style-type: none"> • Weder direkte noch diffuse Lichttransmission – Kunstlicht zwingend • Verdunklung ist nicht als Verschattung mit Tageslichtnutzung geeignet • Keine Durchsichtigkeit nach außen 	<ul style="list-style-type: none"> • Lichttransmission τ im Zielbereich • Helligkeit (570 lux) ausreichend – kein Kunstlicht • Direkte Strahlung großteils in diffuse Strahlung umgewandelt (Sichtbar an Konturen der Scheinwerfer des Sonnensimulators) • keine Durchsichtigkeit nach außen 	<ul style="list-style-type: none"> • geringere Lichttransmission als Ettlin weiß • Helligkeit (450 lux) ausreichend – kein Kunstlicht • Vertikale Streuung der direkte Strahlung durch Reflexion an Schussfäden (Sichtbar an Lichtstreifen auf Verschattung) • Gute Durchsichtigkeit nach außen
Energetische Eigenschaften (thermische Behaglichkeit, Energiedurchlass)			
<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Strahlungstemperaturen bis $> 28^{\circ}\text{C}$ • $> 4\text{K}$ Temperaturgradient in Aufenthaltszone • Hohes Zugluftrisiko im Fußbereich • thermische Behaglichkeit nicht gegeben • signifikante solare Lasten 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Temperaturgradienten • keine solaren Lasten – nur innere Lasten • thermische Behaglichkeitskriterien können eingehalten werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Temperaturgradienten • Abminderungsfaktor für Energiedurchlass (F_c-Wert) im Zielbereich • thermische Behaglichkeitskriterien können eingehalten werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Temperaturgradienten • höherer Abminderungsfaktor (F_c) als Ettlin weiß • thermische Behaglichkeitskriterien können eingehalten werden

Tabelle 20: Ergebnisse der Messkampagne 1: Außen- und Innenansicht zur Bewertung des Reflexionsverhaltens und der Durchsichtigkeit/Transparenz, sowie behaglichkeitsrelevante Parameter

In jeder der durchgeführten Messungen stimmt die Summe aus inneren Lasten (Messtechnik) und äußeren Lasten (im Raum einfallende Strahlung) mit der über den Luftstrom abgeführten Wärmemenge überein. Das Messkonzept ist damit validiert.

Die Ergebnisse der ersten Messkampagne zeigen sehr deutlich die aus energetischer Sicht gegebene Zweckmäßigkeit aber auch die erreichbaren Effekte eines Verschattungssystems.

Mit dem Messaufbau für die Großmuster der SatS-Ausgangsmaterialien kann zudem die Abhängigkeit der Lichttransmission τ und des Abminderungsfaktors F_c vom Höhenwinkel α erfasst werden.

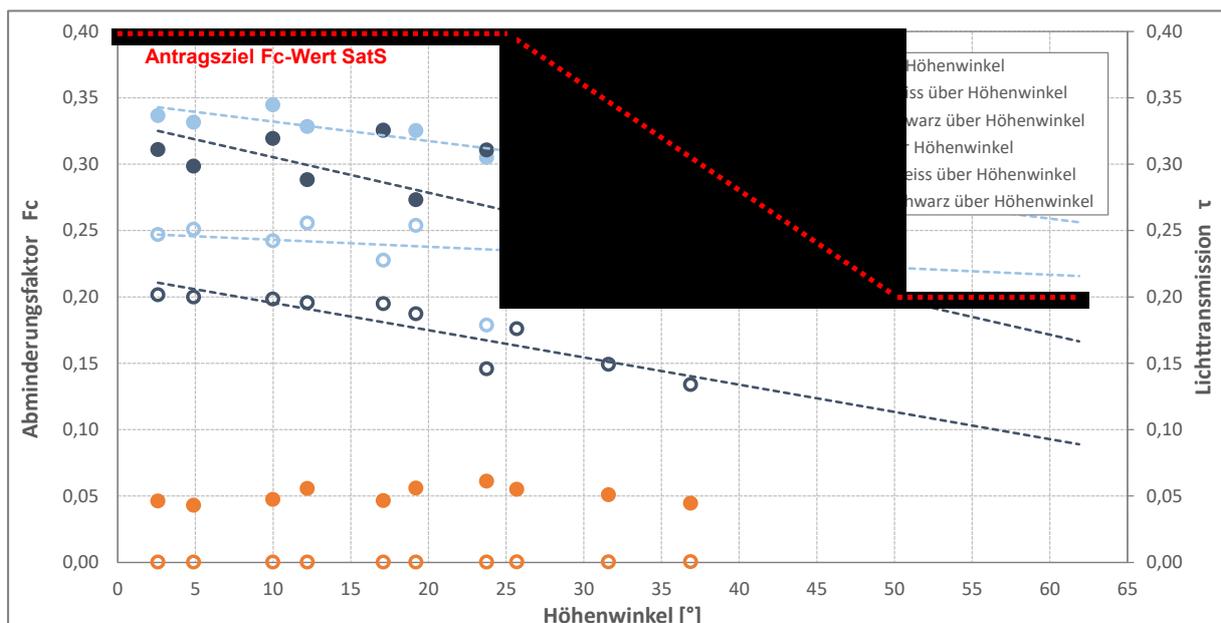


Abbildung 30: Höhenwinkelabhängigkeit von Lichttransmission und Abminderungsfaktor potentieller Ausgangsmaterialien

Mit den Lichttransmissions- und Verschattungseigenschaften können beide Muster-Gewebe (Ettlin weiß, Ettlin schwarz) als potentielle Ausgangsmaterialien für den strahlungsadaptiven Sonnenschutz bestätigt werden.

Unter Berücksichtigung der textiltechnologischen Eigenschaften im Zusammenhang mit der Beschichtung wurde ein weiteres Ausgangsmaterial („Ettlin $\beta 60$ “) messtechnisch analysiert. Das erste Funktionsmuster im Maßstab 1:1 basiert auf der Beschichtung des dem Ettlin $\beta 60$ sehr ähnlichen „Ettlin $\beta 55$ “ und wurde ebenfalls messtechnisch untersucht.

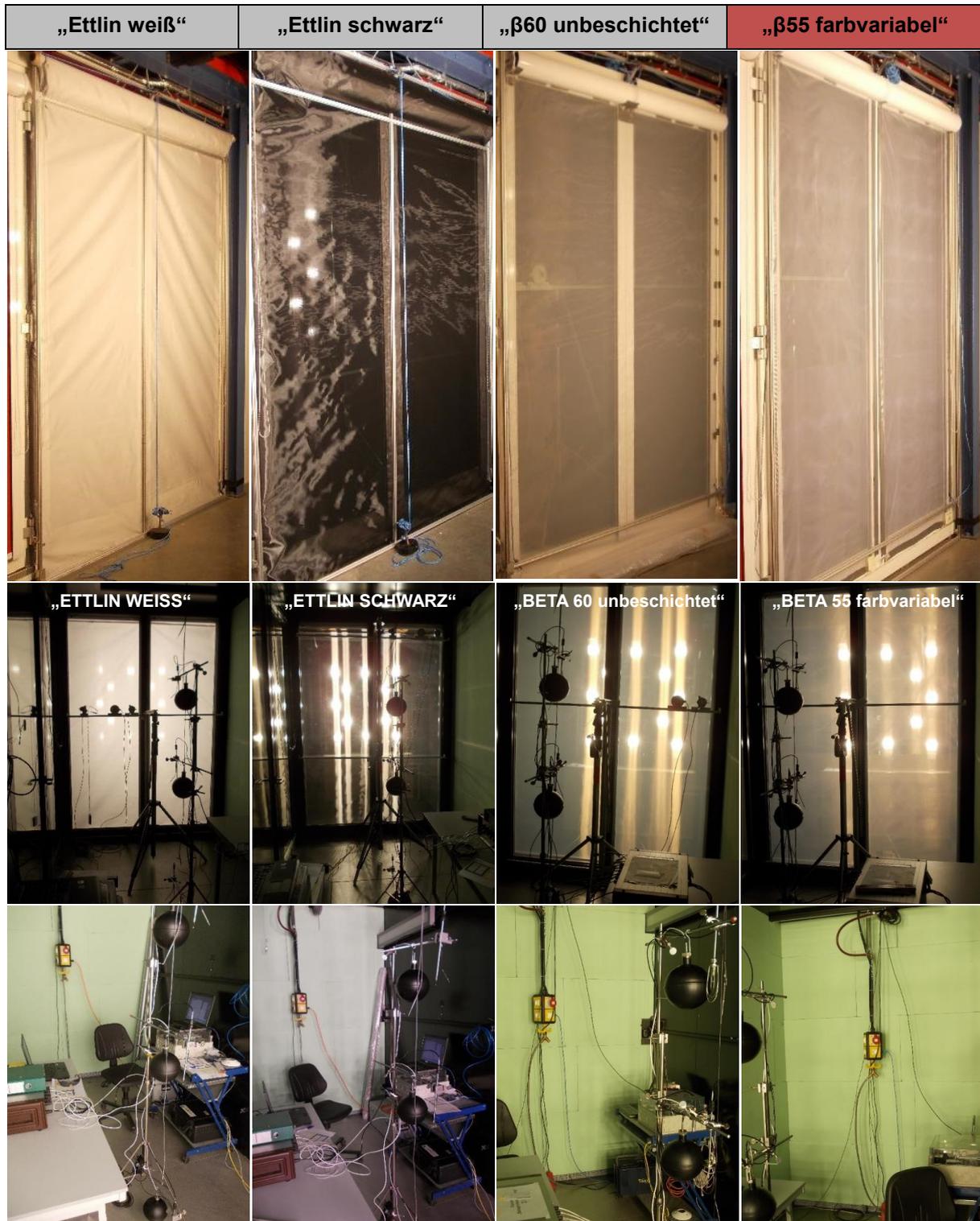


Abbildung 31: Prüfmuster der Messkampagne 2 während der Messungen

Außen- und Innenansicht zur Bewertung des Reflexionsverhaltens und der Durchsichtigkeit/Transparenz nach außen, sowie der Farbwiedergabe im Raum

„Ettlin weiß“					„Ettlin schwarz“					„β60 unbeschichtet“					„β55 farbvariabel“				
Messgrößen der thermischen Behaglichkeit					Messgrößen der thermischen Behaglichkeit					Messgrößen der thermischen Behaglichkeit					Messgrößen der thermischen Behaglichkeit				
	Kopf	Brust	Fuß	Mittel		Kopf	Brust	Fuß	Mittel		Kopf	Brust	Fuß	Mittel		Kopf	Brust	Fuß	Mittel
	1,70 m	1,10 m	0,15 m			1,70 m	1,10 m	0,15 m			1,70 m	1,10 m	0,15 m			1,70 m	1,10 m	0,15 m	
tLuft	22,2	21,3	19,1	20,84	tLuft	22,8	21,8	19,9	21,47	tLuft	25,1	23,9	22,0	23,65	tLuft	23,5	22,6	20,4	22,18
tGlobe	23,4	22,9	20,8		tGlobe	23,8	23,3	21,3		tGlobe	27,5	26,9	24,6		tGlobe	26,3	25,6	23,3	
cluft	0,05	0,06	0,18	0,038	cluft	0,05	0,06	0,18	0,037	cluft	0,07	0,05	0,13	0,039	cluft	0,07	0,05	0,14	0,042
TU	10,8	7,0	4,9	6,9	TU	7,6	7,2	5,1	6,6	TU	3,4	3,2	3,9	3,472	TU	3,6	4,3	3,4	3,783
DR	3,2	6,0	18,0		DR	2,6	6,2	16,9		DR	5,3	3,0	11,4		DR	6,7	4,2	13,5	
phi				31,48	phi				24,41	phi				18,36	phi				23,65
lux auf Schreibtisch				EV 570	lux auf Schreibtisch				EV 450	lux auf Schreibtisch				EV 1250	lux auf Schreibtisch				EV 1310
Messgrößen im Bilanzraum					Messgrößen im Bilanzraum					Messgrößen im Bilanzraum					Messgrößen im Bilanzraum				
				365					362					365					365
Eintrittstemperatur 1				17,8	Eintrittstemperatur 1				18,8	Eintrittstemperatur 1				20,7	Eintrittstemperatur 1				19,0
Eintrittstemperatur 2				18,0	Eintrittstemperatur 2				19,1	Eintrittstemperatur 2				20,5	Eintrittstemperatur 2				19,0
Eintrittstemperatur 3				17,8	Eintrittstemperatur 3				18,8	Eintrittstemperatur 3				21,4	Eintrittstemperatur 3				20,0
Eintrittstemperatur MITTEL				17,9	Eintrittstemperatur MITTEL				18,9	Eintrittstemperatur MITTEL				20,8	Eintrittstemperatur MITTEL				19,4
Austrittstemperatur 4				22,0	Austrittstemperatur 4				22,6	Austrittstemperatur 4				25,8	Austrittstemperatur 4				24,3
dtLuft im Raum				4,145	dtLuft im Raum				3,689	dtLuft im Raum				4,869	dtLuft im Raum				4,863
Qges in W (Luftbilanz)				499,4	Qges in W (Luftbilanz)				444,4	Qges in W (Luftbilanz)				574,1	Qges in W (Luftbilanz)				575,9
Temperaturschichtung im Raum					Temperaturschichtung im Raum					Temperaturschichtung im Raum					Temperaturschichtung im Raum				
Raumtemperatur 2,6 m				22,9	Raumtemperatur 2,6 m				23,5	Raumtemperatur 2,6 m				25,78	Raumtemperatur 2,6 m				24,3
Raumtemperatur 2,1 m				22,3	Raumtemperatur 2,1 m				22,9	Raumtemperatur 2,1 m				27,61	Raumtemperatur 2,1 m				26,2
Raumtemperatur 1,7 m				22,2	Raumtemperatur 1,7 m				22,8	Raumtemperatur 1,7 m				25,1	Raumtemperatur 1,7 m				23,5
Raumtemperatur 1,6 m				21,8	Raumtemperatur 1,6 m				22,4	Raumtemperatur 1,6 m				25,7	Raumtemperatur 1,6 m				24,1
Raumtemperatur 1,1 m				21,3	Raumtemperatur 1,1 m				21,8	Raumtemperatur 1,1 m				23,9	Raumtemperatur 1,1 m				22,6
Raumtemperatur 0,5 m				19,4	Raumtemperatur 0,5 m				20,3	Raumtemperatur 0,5 m				22,67	Raumtemperatur 0,5 m				21,4
Raumtemperatur 0,15 m				19,1	Raumtemperatur 0,15 m				19,9	Raumtemperatur 0,15 m				22,0	Raumtemperatur 0,15 m				20,4

Tabelle 21: energetische und behaglichkeitsrelevante Parameter der Messungen aus Messkampagne 2

„Ettlin weiß“		„Ettlin schwarz“		„β60 unbeschichtet“		„β55 farbvariabel“	
Lichttechnische Eigenschaften (Reflexion, Transparenz, Durchsichtigkeit, Farbwiedergabe)							
<ul style="list-style-type: none"> Lichttransmission τ im Zielbereich Helligkeit (570 lux) ausreichend – kein Kunstlicht Direkte Strahlung großteils in diffuse Strahlung umgewandelt (Sichtbar an Konturen der Scheinwerfer des Sonnensimulators) keine Durchsichtigkeit nach außen 	<ul style="list-style-type: none"> geringere Lichttransmission als Ettlin weiß Helligkeit (450 lux) ausreichend – kein Kunstlicht Vertikale Streuung der direkte Strahlung durch Reflexion an Schussfäden (Sichtbar an Lichtstreifen auf Verschattung) Gute Durchsichtigkeit nach außen 	<ul style="list-style-type: none"> Lichttransmission τ im Vergleich zu den Zielwerten zu hoch Helligkeit (1250 lux) mehr als ausreichend – kein Kunstlicht Sowohl Umwandlung direkter Strahlung in diffuse Strahlung als auch vertikale Streuung der direkten Strahlung durch Reflexion an Schussfäden (Sichtbar an Lichtstreifen auf Verschattung) Durchsichtigkeit nach außen ähnlich Ettlin schwarz 	<ul style="list-style-type: none"> Keine Veränderung der Lichttransmission τ gegenüber „B 60 unbeschichtet“ (höher als Zielwerte) Helligkeit (1310 lux) mehr als ausreichend – kein Kunstlicht Im Vergleich zu „B 60 unbeschichtet“ mehr diffuse als durch Reflexion vertikal gestreute direkte Strahlung Durchsichtigkeit nach außen sowie Farbwiedergabe durch Beschichtung nicht verändert 				
Energetische Eigenschaften (thermische Behaglichkeit, Energiedurchlass)							
<ul style="list-style-type: none"> Geringe Temperaturgradienten Abminderungsfaktor für Energiedurchlass (F_c-Wert) im Zielbereich thermische Behaglichkeitskriterien können eingehalten werden 	<ul style="list-style-type: none"> Geringe Temperaturgradienten höherer Abminderungsfaktor (F_c) als Ettlin weiß thermische Behaglichkeitskriterien können eingehalten werden 	<ul style="list-style-type: none"> ΔTGradient mit $\approx 4K$ in Aufenthaltszone grenzwertig Abminderungsfaktor für Energiedurchlass (F_c-Wert) zu hoch 	<ul style="list-style-type: none"> ΔTGradient unverändert mit $\approx 4K$ in Aufenthaltszone grenzwertig Abminderungsfaktor für Energiedurchlass (trotz Beschichtung unverändert und zu hoch) 				

Tabelle 22: Ergebnisse der Messkampagne 2: lichttechnische und energetische Eigenschaften

Die Ergebnisse der zweiten Messkampagne zeigen sehr deutlich die von den Ettlin weiß und Ettlin schwarz abweichenden Eigenschaften des dritten potentiellen Ausgangsmaterials Ettlin B 60: Die textile Struktur des neuen Ausgangsmaterials sorgt für eine wesentlich höhere Licht- und Energiedurchlässigkeit.

Die strahlungsabhängige Farbänderung der Beschichtung auf dem Funktionsmuster „Ettlin B 55 farbvariabel beschichtet“ ist optisch nur aus unmittelbarer Nähe zu erkennen – fototechnisch jedoch nicht erfassbar. Anders als erwartet wirkt sich die farbvariable Beschichtung im Funktionsmuster kaum messbar auf die lichttechnischen und energetischen Eigenschaften aus.

Das gilt für die Höhenwinkelabhängigkeit des Abminderungsfaktors F_c ebenso, wie für die Strahlungs-

abhängigkeit des Lichttransmissionsgrades τ .

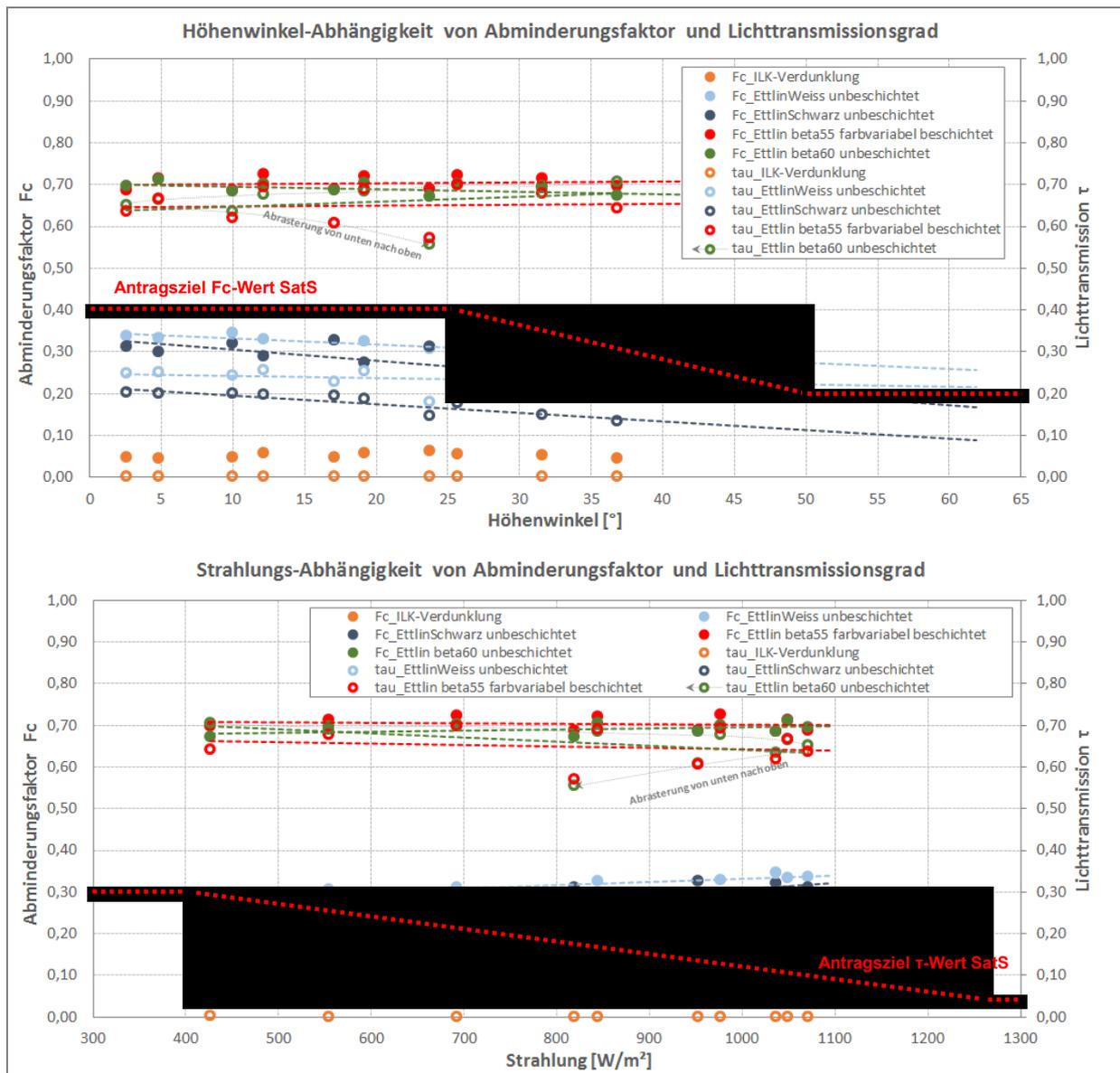


Abbildung 32: Energiedurchlassgrad (o.) und Lichttransmission (u.) der Funktionsmuster

Als mögliche Ursache für die sowohl optisch als auch thermisch kaum erfassbaren Unterschiede zwischen beschichtetem und unbeschichtetem Material werden die im Versuchsstandskonzept bisher als nebensächlich betrachteten Voraussetzungen für eine Farbänderung des Farbstoffes – nämlich die Strahlungsintensität des UV-Lichts – gesehen. Im Labor wurde bei Bestrahlung mit UV-Licht eine wesentlich höhere Farbänderung am Mustermaterial (Ettlin β 55 farbvariabel) registriert.

5.5.2 Messungen zum Einfluss der UV-Strahlung auf strahlungsadaptives Verhalten des ersten Versuchsmusters (Messkampagne 3)

Für die Anwendung des Farbstoffes in einem strahlungsadaptiven Sonnenschutz muss dessen Farbänderung durch den UV-Anteil des Sonnenlichts (etwa 6 %) erfolgen.

Da physikalisch bedingt der UV-Anteil im Lichtspektrum des Sonnensimulators (glühender Wolframdraht) bei max. 1% liegt, wird das Versuchsstandskonzept modifiziert und umgerüstet. Dazu wird eine UV-Lampe (UV- Fluter 250) integriert und so ausgerichtet, dass auf der bestrahlten Oberfläche exakt ein UV-Lichtanteil von 6 % erreicht wird.

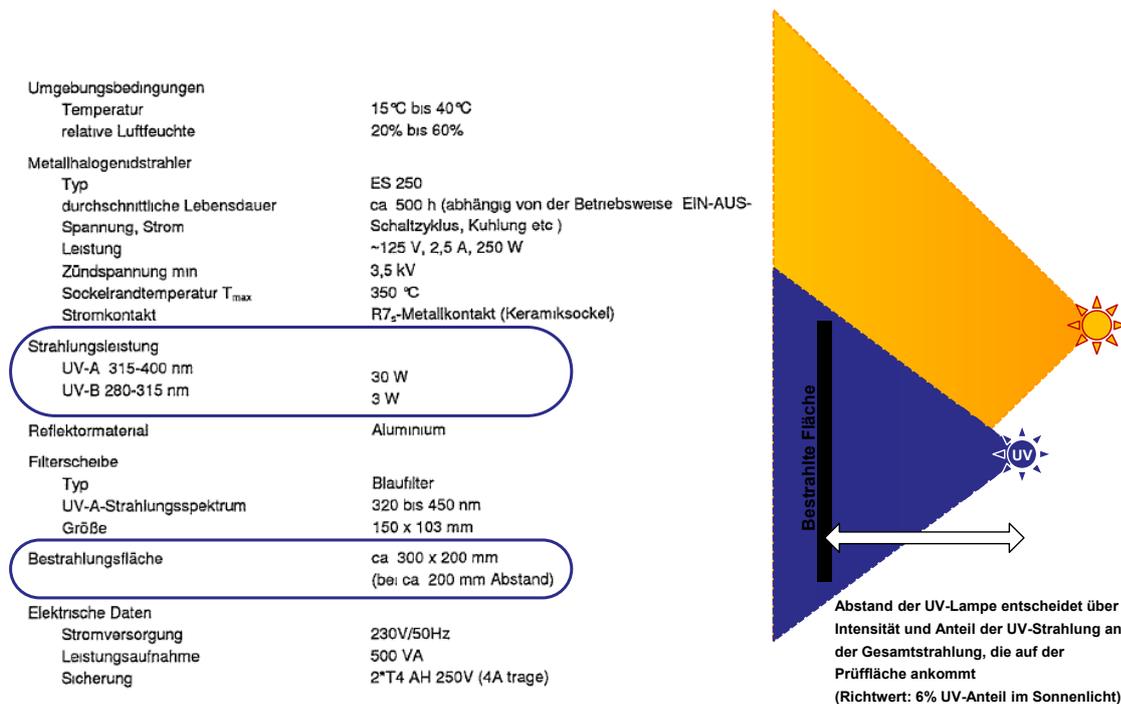


Abbildung 33: technische Daten des UV-Fluters;
Schema der Überlagerung der Strahlung aus Sonnensimulator und UV-Lampe

Inhalt der Messkampagne 3 ist, den möglichen Einfluss des UV-Anteils auf die lichttechnischen und energetischen Eigenschaften des strahlungsadaptiven Funktionsmusters ($\beta 55$ farbvariabel) messtechnisch zu erfassen.

Die Messungen der Messkampagne 3 erfolgen am Versuchsaufbau für Großmuster und beginnen mit einer erneuten Nullmessung über die Fassade ohne Verschattung zur Kennwertermittlung der Verglasung unter Berücksichtigung der ergänzten UV-Lichtquelle.

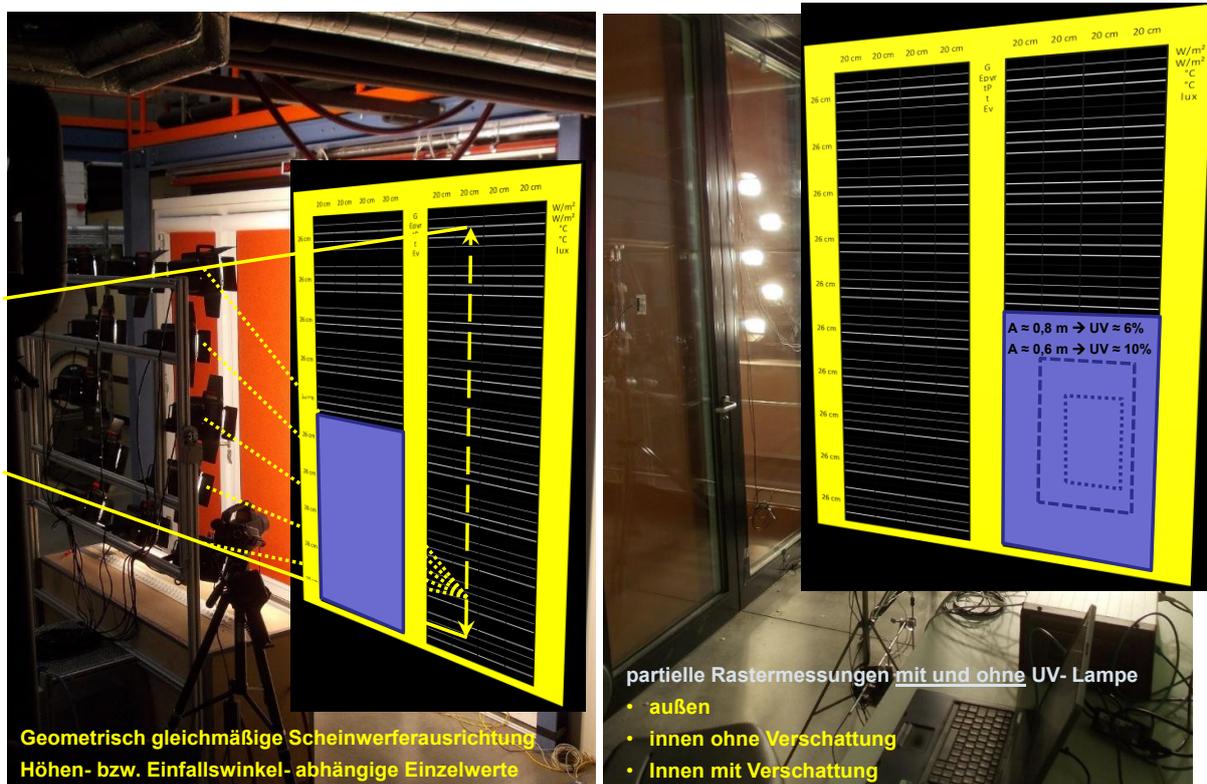


Abbildung 34: Darstellung des mit erhöhtem UV-Lichtanteil bestrahlten Anteils der Fassade bzw. des Funktionsmusters

Die messtechnische Rasterung beschränkt sich jeweils auf den von der UV-Lampe bestrahlten Flächenanteil des Funktionsmusters. Erfasst und bewertet werden in Analogie zu den Messkampagnen 1 und 2 die Durchlässigkeit für Solarstrahlung, Wärme und sichtbares Licht.

Kennwerte der Verglasung ohne Verschattung:

Das Ergebnis der Nullmessung zeigt, dass sich die veränderte Strahlungszusammensetzung auf den Energiedurchlassgrad g der Verglasung auswirkt. Während die Strahlungszusammensetzung im Fall des Sonnensimulators ohne UV-Lampe einen maximalen UV-Anteil von 1% ermöglicht, und der ermittelte g -Wert 0,150 beträgt, verschiebt sich durch den Einsatz der UV-Lampe der UV-Anteil in der Strahlung. Für den UV-Anteil gemäß dem Sonnenlichtspektrum von 6 % wurde ein g -Wert der Verglasung von 0,159 gemessen. Dieser Wert ist die Basis für die Bestimmung des Abminderungsfaktors F_c durch die Verschattung und unter Berücksichtigung des an das Sonnenlichtspektrum angepassten UV-Anteils.

Messungen zum Einfluss des UV-Lichtanteils zur Farbänderung des Funktionsmusters $\beta 55$ farbvariabel

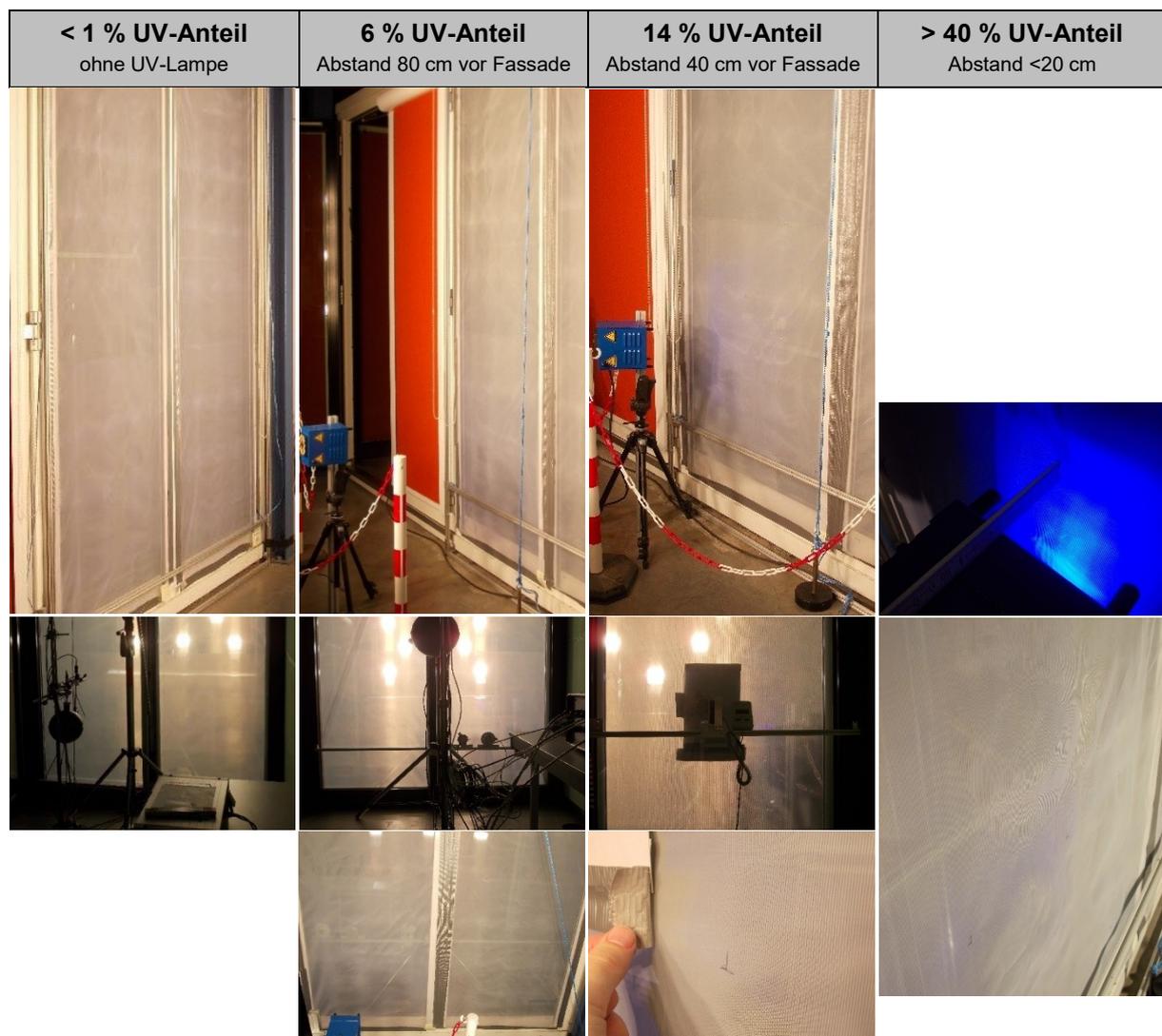


Abbildung 35: Versuchsanordnung im Rahmen der Messkampagne 3

Messkampagne 3: Bewertung der Farbänderung des beschichteten Markisenstoffes und der Durchsichtigkeit von innen nach außen.

< 1 % UV-Anteil ohne UV-Lampe	6 % UV-Anteil Abstand 80 cm vor Fassade	14 % UV-Anteil Abstand 40 cm vor Fassade	> 40 % UV-Anteil Abstand <20 cm
Lichttechnische und energetische Eigenschaften			
<ul style="list-style-type: none"> • Minimale Farbänderung der Beschichtung durch Nahbeobachtung mit bloßem Auge erkennbar – jedoch weder fotografisch noch messtechnisch erfassbar • Beleuchtungsstärke hinter der Verschattung bleibt im Vergleich zum Basisstoff ohne Beschichtung nahezu unverändert • τ und F_c fast unverändert • Optisches Erscheinungsbild (von außen) und Durchsichtigkeit bleiben unverändert 	<ul style="list-style-type: none"> • Nach wie vor nur minimale Farbänderung der Beschichtung durch Nahbeobachtung mit bloßem Auge erkennbar – jedoch weder fotografisch noch messtechnisch erfassbar • τ und F_c gegenüber UV-Anteil < 1% nahezu unverändert • Optisches Erscheinungsbild (von außen) und Durchsichtigkeit bleiben unverändert 	<ul style="list-style-type: none"> • Nach wie vor nur minimale Farbänderung der Beschichtung durch Nahbeobachtung mit bloßem Auge erkennbar – jedoch weder fotografisch noch messtechnisch erfassbar (auch Vorher-Nachher-Aufnahmen von zwischenzeitlich abgeklebten Bereichen erhöhen die fotografische Sichtbarkeit der Farbänderung nicht) • Optisches Erscheinungsbild (von außen) und Durchsichtigkeit bleiben unverändert 	<ul style="list-style-type: none"> • Farbänderung der Beschichtung sichtbar und fotografisch erfassbar • Auswirkung der Farbänderung auf Beleuchtungsstärke hinter der Verschattung messtechnisch dennoch nicht nachweisbar

Tabelle 23: Ergebnisse der Messkampagne 3: Einfluss des UV-Anteils auf lichttechnische und energetische Eigenschaften

Eine sichtbare Farbänderung, die sich auch fotografisch mit größerem Abstand (1 m) festhalten lässt, erfordert einen UV-Lichtanteil von über 40 %. Eine signifikante Beeinflussung des Lichttransmissionsgrades gemäß der Antragsziele konnte messtechnisch nicht nachgewiesen werden.

Kennwerte des Funktionsmusters Ettlín $\beta 55$ farbvariabel bei 6 % UV-Lichtanteil

Trotz der Modifikation des Sonnensimulators und der damit verbundenen Anpassung des UV-Lichtanteils an das Sonnenlichtspektrum, wirkt sich die farbvariable Beschichtung im Funktionsmuster kaum messbar auf die lichttechnischen und energetischen Eigenschaften aus. Die durch Einstrahlung resultierende Farbänderung des Farbstoffes ist zu gering, um den Abminderungsfaktor F_c oder den Lichttransmissionsgrad τ maßgeblich zu beeinflussen.

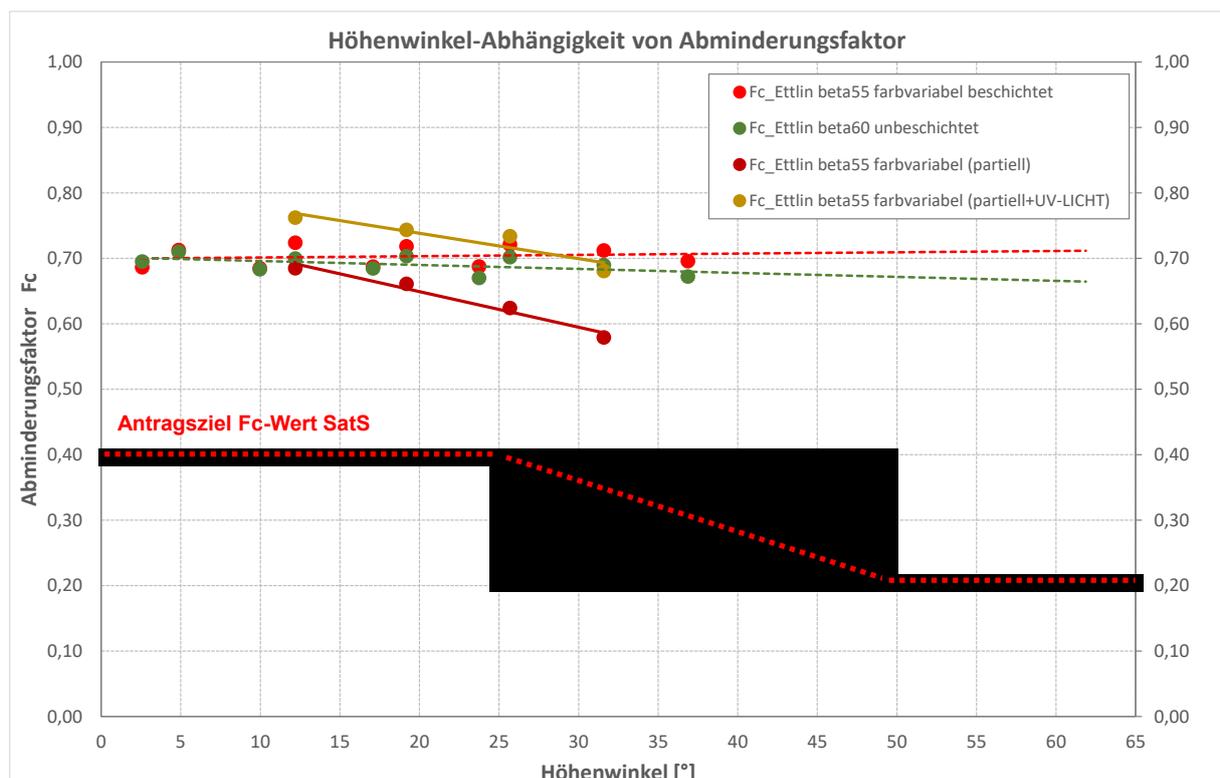


Abbildung 36: F_c -Wert des Funktionsmusters $\beta 55$ farbvariabel sowie des Ausgangsmaterials $\beta 60$ bei 6 % UV-Lichtanteil

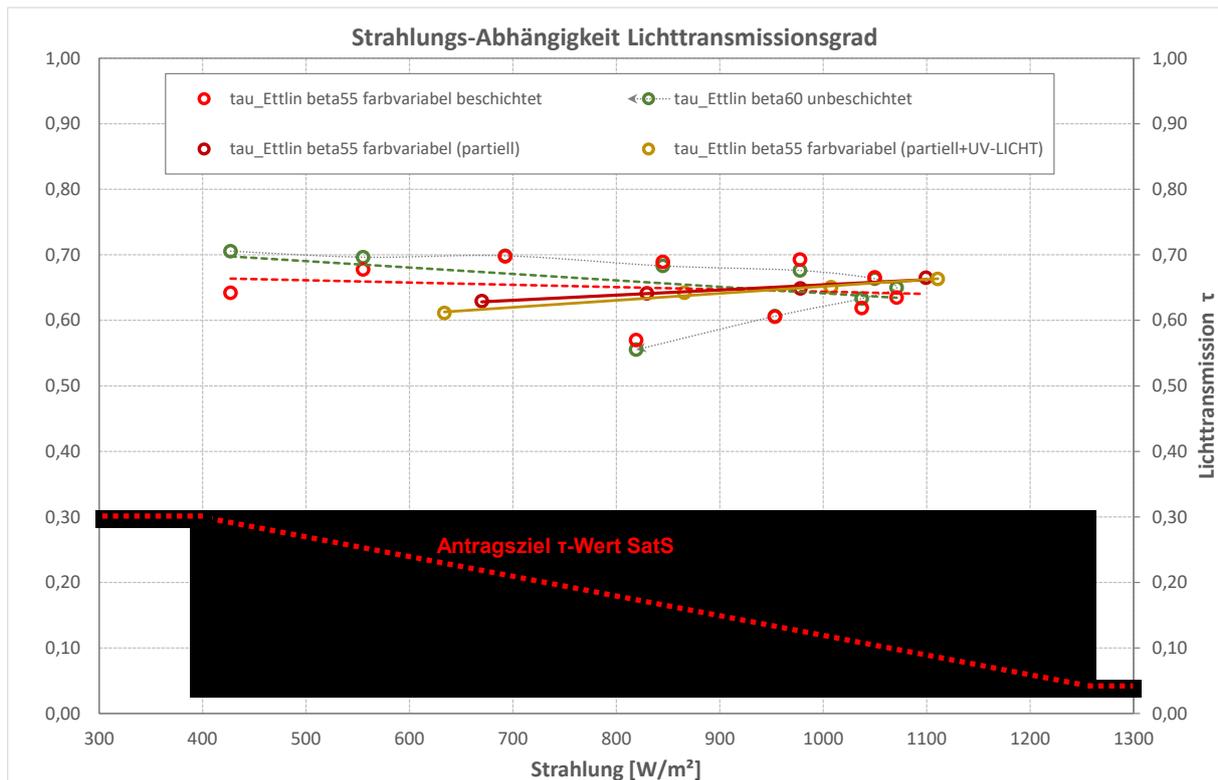


Abbildung 37: Lichttransmission des Funktionsmusters $\beta 55$ farbvariabel sowie des Ausgangsmaterials $\beta 60$ bei einem UV-Lichtanteil von 6 % gemäß Sonnenlichtspektrum

Für das farbvariabel beschichtete Funktionsmuster Ettlin $\beta 55$ kann festgestellt werden, dass der Einfluss der ohnehin sehr geringen Farbänderung auf die Transmissionswerte (unabhängig von der üblichen UV-Strahlung) sehr gering ist.

Mögliche Modifizierungen mit dem Ziel einer stärkeren Farbänderung sind:

- Erhöhung der Farbstoffkonzentration in der Beschichtung
- Erhöhung der Beschichtungsstärke, ggf. in Verbindung mit anderen geeigneten Trägerstoffen

5.5.3 Messungen zum Einfluss der Farbstoffmenge (Messkampagne 4)

Aufbauend auf den Ergebnissen der Messkampagnen 1 bis 3 untersucht die Messkampagne 4 die Farbänderung und dessen Auswirkung auf Lichttransmissionseigenschaften und Energiedurchlassgrad von Prüfmustern in Abhängigkeit von Farbstoffkonzentration und Beschichtungsstärke. Berücksichtigt werden zudem die Ausgangsmaterialien selbst und relevante Zwischenstadien des Beschichtungsprozesses. Als Ausgangsmaterialien dienen die Markisenstoffe Ettlin weiß und Ettlin β60. Nachfolgende Tabelle beschreibt die Untersuchungsmatrix der Messkampagne 4.

Parameter	Ettlin weiß	Ettlin β60	Ettlin β55
<i>Lichtdurchlässigkeit bzw. Lichttransmission T_V:</i> → Vergleichsmessung d. Beleuchtungsstärke E_V vor und hinter der Verglasung mit und ohne verschattende Markisenstoffe <i>Transparenz und Farbänderung:</i> → Bilddokumentation <i>Energiedurchlassgrad/ Abminderungsfaktor F_c:</i> → Berechnung aus Messwerten der Vergleichsmessungen zur solaren Einstrahlung G bzw. G'' und EL unmittelbar vor und hinter der Verglasung	Unbehandelt (Referenz)		
	Vorbehandelt mit Polyamin PEI 0,1 %		
	Beschichtet, jedoch ohne Farbstoff		
	Beschichtet mit Farbstoffkonzentration [5ml]		Vergleichsmessung mit Ettlin β55 farbvariabel beschichtet
	Beschichtet mit hoher Farbstoffkonzentration [10 ml] und hoher Beschichtungsstärke		

Tabelle 24: Untersuchungsmatrix der Messkampagne 4

Die Messkampagne 4 erfolgte mit dem Versuchsaufbau für kleine (DIN A4) Funktionsmuster. Der Einfallswinkel ist mit 0° ebenso festgelegt, wie die Strahlungsintensität von rund 1.000 W/m^2 bei einem UV-Lichtanteil von 6 %. Auch diese Messkampagne beginnt mit einer Nullmessung ohne Verschattung zur Bestimmung der Eigenschaften der Verglasung.

Farbänderung und Transparenz

Die Ergebnisse aus Messkampagne 4 sind vielversprechend. Die Veränderung des Ausgangsmaterials (Gewebeart) sowie der Farbstoffmenge führen bei entsprechender Bestrahlung mit dem Sonnensimulator zu signifikanten, deutlich sichtbaren Farbänderungen. Am Beispiel des Musters Ettlin β60 wird deutlich, dass sich Farbänderung und Durchsichtigkeit nicht ausschließen müssen. Trotz des intensiven Farbumschlags sind die Messgeräte (Blickrichtung von außen nach innen) bzw. die Konturen des Sonnensimulators (Blick nach außen) in Abbildung 37 deutlich zu erkennen.

Sichtbar am Ergebnis für Ettlin weiß ist, dass für die Transparenz bzw. Durchsichtigkeit das Ausgangsmaterial selbst maßgeblich ist.

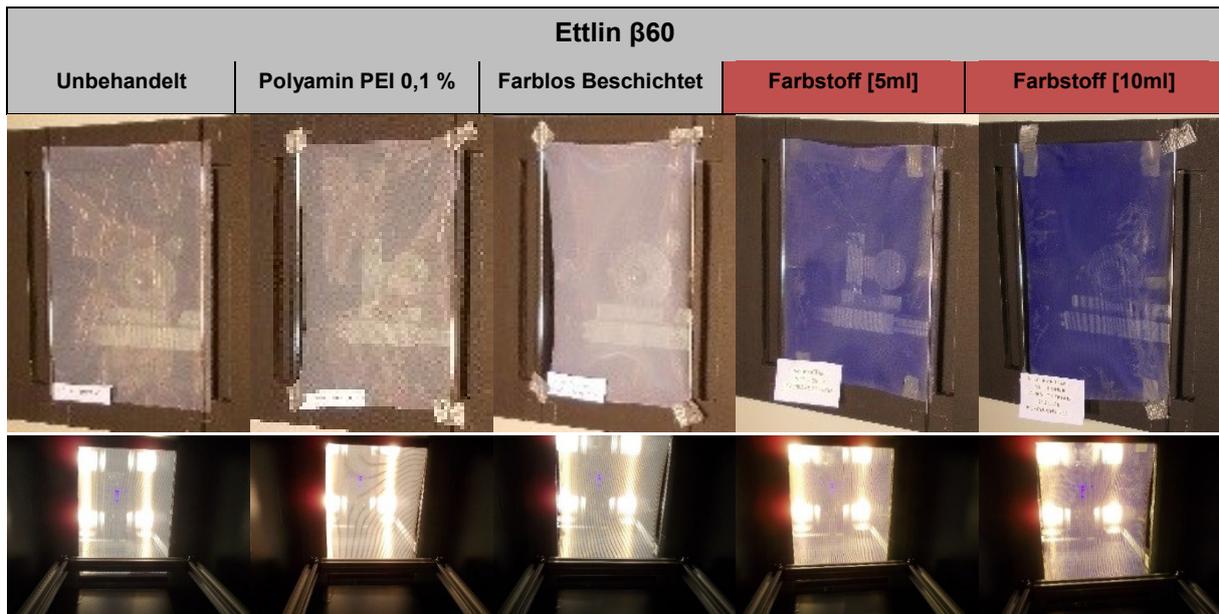


Abbildung 38: Farbänderung in Abhängigkeit von der Farbstoffmenge: Ausgangsmaterial Ettlin β60

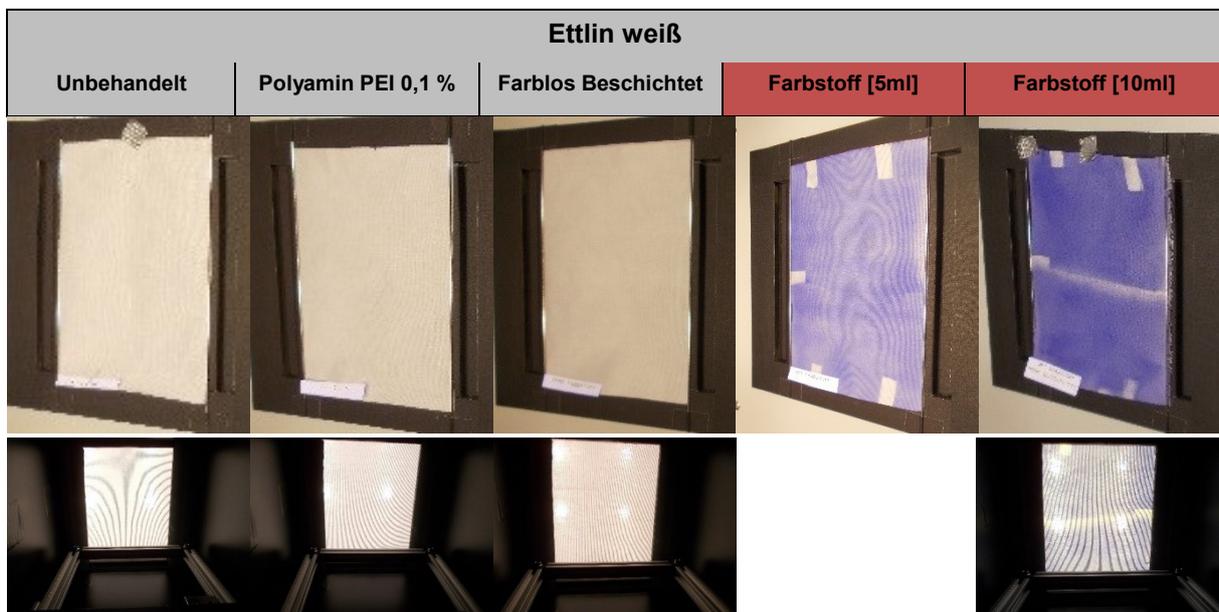


Abbildung 39: Farbänderung in Abhängigkeit von der Farbstoffmenge: Ausgangsmaterial Ettlin weiß

Die Aufnahmen aus der Vergleichsmessung mit dem bereits in Messkampagne 3 getesteten „Ettlin β55 farbvariabel“ zeigen erneut keine sichtbaren Farbreaktionen. Farbstoffmenge und Stärke der Beschichtung sind im Fall „β55 farbvariabel“ geringer als in den farbvariabel beschichteten Prüfmustern der Messkampagne 4.

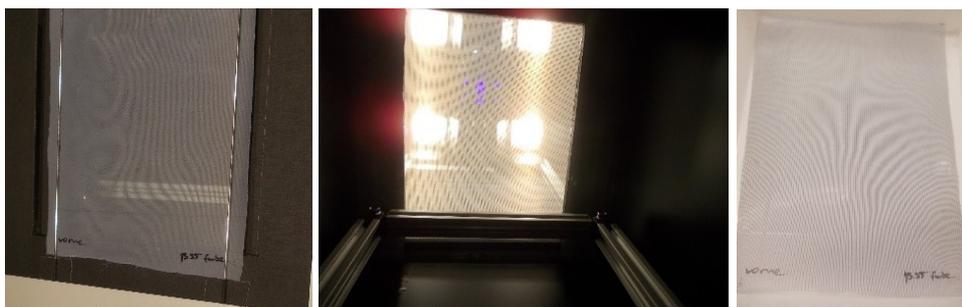


Abbildung 40: Farbänderung und Transparenz: Vergleichsmessung mit Ettlin β55 farbvariabel beschichtet

Transmissionsgrad und Abminderungsfaktor

KLEINMUSTER	Messwerte			Ergebnis Fenster unverschattet		Ergebnisse				
	Außen vor Fassade	Innen OHNE Verschattung	Innen MIT Verschattung	g	Fc	g _{tot} = g * Fc Glas + Verschattung	Fc	τ Verschattung		
Referenz, Probe 0	ettlin weiss	1020	415	101	0,41	1,00	0,10	0,24	0,25	
		96	2,85	44,8	0,03	1,00				
		20	21,6	22						
	unbehandelt (REFERENZ)	515	431	475	0,84	1,00				
		20	22,2	23,3						
		28400	17300	4340	0,61	1,00				
Probe 1	ettlin weiss	1020	415	106	0,41	1,00	0,10	0,26	0,24	
	Polyamin PEI 0,1%	96	2,85	41,8	0,03	1,00				
	Solarstrahlung (kurzwellig)			G	W/m ²		Pyranometer			
	Strahlungsbilanz langwellig			E _{pyr}	W/m ²		Pyrgeometer			
	Temperatur Pyrgeometer			t _{pyr}	°C		Pyrgeometer			
	Thermische Bestrahlungsstärke			EL	W/m ²		aus E _{pyr} und t _{pyr} berechnet			
	Temperatur (Luft, lokal)			t	°C		PT100			
	Beleuchtungsstärke			E _v	lux		Luxmeter (Handmessgerät)			
	Nettobestrahlungsstärke (berechnet)			G''	W/m ²		aus G, EL			
	Probe 2	keine Farbänderung	20	22,2	23,3	0,61	1,00			
		28400	17300	4200	0,38	1,00	0,11	0,30		
		1102	414	125			0,09	0,23		
		1102	414	125						
		1102	414	125						
		1102	414	125						
Probe 3	ettlin weiss	1020	415	93,5	0,41	1,00			0,15	
	Farbstoff	96	2,85	32,2	0,03	1,00				
		20	21,6	22,5						
		515	431	465	0,84	1,00				
	Farbänderung deutlich	20	22,2	21,7						
		28400	17300	2540	0,61	1,00				
Probe 4	ettlin weiss	1020	415	86	0,41	1,00	0,08	0,21	0,12	
	hohe Farbstoffkonzentration + Schichtdicke	96	2,85	24,94	0,03	1,00				
		20	21,6	22,79						
		515	431	460	0,84	1,00				
	Farbänderung sehr deutlich	20	22,2	21,14						
		28400	17300	2050	0,61	1,00				
Referenz, Probe 5	beta60	1020	415	290	0,41	1,00	0,28	0,70	0,62	
		96	2,85	71,1	0,03	1,00				
		20	21,6	22,55						
	unbehandelt (REFERENZ)	515	431	505	0,84	1,00				
		20	22,2	22,72						
		28400	17300	10640	0,61	1,00				
Probe 6	beta60	1020	415	283	0,41	1,00	0,28	0,68	0,61	
	Polyamin PEI 0,1%	96	2,85	68,8	0,03	1,00				
		20	21,6	22,45						
		515	431	502	0,84	1,00				
	keine Farbänderung	20	22,2	24,95						
		28400	17300	10620	0,61	1,00				
Probe 7	beta60	1020	415	277	0,41	1,00	0,27	0,67	0,58	
	ohne Farbstoff	96	2,85	65,4	0,03	1,00				
		20	21,6	22,33						
		515	431	498	0,84	1,00				
	keine Farbänderung	20	22,2	21,7						
		28400	17300	10070	0,61	1,00				
Probe 8	beta60	1020	415	250	0,41	1,00	0,25	0,60	0,45	
	Farbstoff	96	2,85	62,7	0,03	1,00				
		20	21,6	22,1						
		515	431	494	0,84	1,00				
	Farbänderung deutlich	20	22,2	24,4						
		28400	17300	7860	0,61	1,00				
Probe 9	beta60	1020	415	241	0,41	1,00	0,24	0,58	0,41	
	hohe Farbstoffkonzentration + Schichtdicke	96	2,85	58,28	0,03	1,00				
		20	21,6	21,88						
		515	431	488	0,84	1,00				
	Farbänderung sehr deutlich, fleckige Angriffspunkte (Partikelabrieb)	20	22,2	21,7						
		28400	17300	7140	0,61	1,00				
Probe 10	beta55 farbvariabel	1020	415	278	0,41	1,00	0,27	0,67	0,60	
	AUS GROSSMUSTER	96	2,85	78,5	0,03	1,00				
		20	21,6	22,24						
		515	431	510	0,84	1,00				
	kaum bis keine Farbänderung	20	22,2	22,7						
		28400	17300	10460	0,61	1,00				

Tabelle 25: Messprotokoll Messkampagne 4: Transmissionsgrade und Abminderungsfaktoren

Die vorherige Abbildung zeigt das Messprotokoll der Messkampagne 4 zur Bestimmung der Transmissionsgrade τ und Abminderungsfaktoren F_c in Abhängigkeit von Farbstoffmenge und Beschichtungsstärke einschließlich Nullmessung sowie Messung der Ausgangsmaterialien „Ettlin weiß“ und „Ettlin $\beta 60$ “.

Aus den Ergebnisdiagrammen (nachfolgende Abbildungen) geht klar eine Beeinflussung des Transmissionsgrades und des Abminderungsfaktors von der Farbstoffmenge und der Beschichtungsstärke hervor:

Allein durch den Farbstoff in der Beschichtung sinkt im Fall „Ettlin $\beta 60$ “ die Lichttransmission τ von 0,58 auf 0,41 und der Abminderungsfaktor F_c von 0,81 auf 0,70. Im Fall „Ettlin weiß“ sinkt τ von 0,24 auf 0,12 und der Abminderungsfaktor F_c von 0,30 auf 0,28.

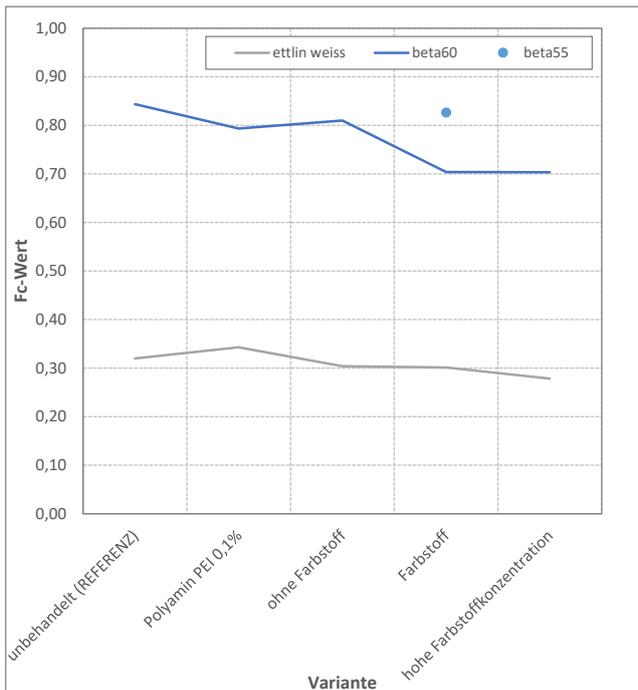


Abbildung 41: Ergebnisse der Messkampagne 4: Abhängigkeit des Abminderungsfaktors von der Farbstoffmenge

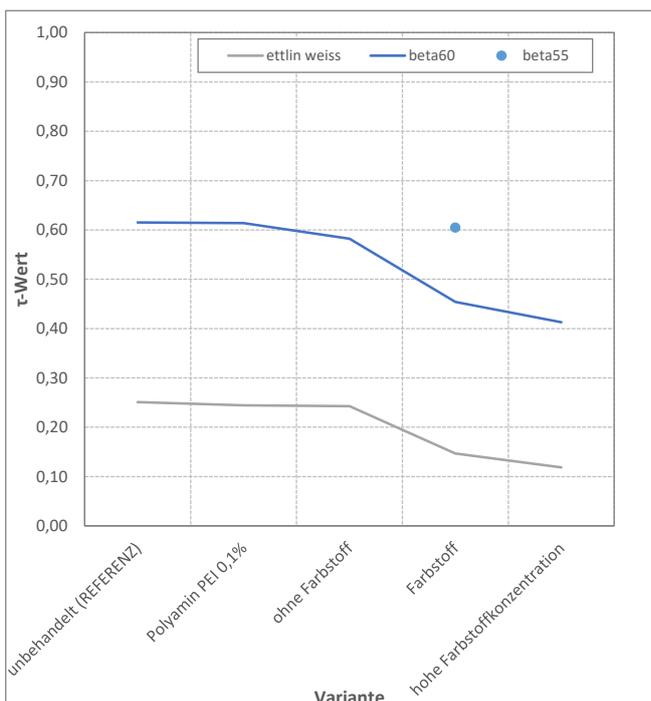


Abbildung 42: Ergebnisse der Messkampagne 4 – Abhängigkeit der Lichttransmission von der Farbstoffmenge

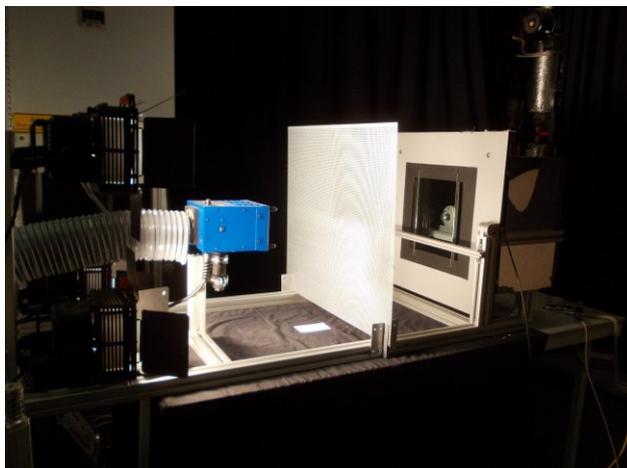
Anders als die Messkampagne 3 bestätigen die Ergebnisse der Messkampagne 4 die Wirksamkeit strahlungsadaptiv beschichteter Markisenstoffe. Sowohl die Transmissions-eigenschaften als auch der Energiedurchlassgrad eines Systems aus Verglasung und Verschattung lassen sich in Abhängigkeit von Farbstoffmenge und Beschichtungsstärke signifikant beeinflussen. Das Ausgangsmaterial selbst bringt insbesondere im Hinblick auf Durchsichtigkeit und Transparenz ebenso wichtige Eigenschaften mit.

5.5.4 Messtechnische Analyse des strahlungsadaptiven Eigenschaftsprofils beschichteter Markisenstoffe unter Variation von Basismaterial, Farbstoffmenge, und Strahlungsintensität (Messkampagne 5)

Da die Messrandbedingungen in Messkampagne 4 von einer konstanten Strahlungsintensität von etwa 1.000 W/m^2 ausgeht, sind die genauen Schalteigenschaften des Farbstoffes in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität noch unbekannt. Gleiches gilt für die Einfärbegeschwindigkeit und das Abklingverhalten nach Beendigung der Einstrahlung. Entsprechende Analysen sind Gegenstand der komplexen Messreihen in Messkampagne 5. Dabei werden auch weitere Ausgangsmaterialien einbezogen.

Versuchsstandsmodifikation

Zur Realisierung verschiedener Strahlungsintensitäten wird der Versuchsaufbau für kleine (DIN A4) Testmuster modifiziert. Zwischen Sonnensimulator und Fassade wird ein Einschub für Lochbleche installiert. In Abhängigkeit vom Lochmuster lassen die Lochbleche nur einen festgelegten Anteil der vom Sonnensimulators freigesetzten Strahlung des bis zur Fassade und der strahlungsadaptiven Verschattung hindurch. Die Abstände zwischen Sonnensimulator, Lochblech und Fassade sind so gewählt, dass keine Schlagschatten auf der Verschattung entstehen.



kein Lochblech	Quadratlochblech	Rundlochblech (groß)	Rundlochblech (klein)	Sonnensimulator aus, kein Lochblech
1020...1080 W/m^2	660...690 W/m^2	445...465 W/m^2	370...390 W/m^2	0...10 W/m^2

Abbildung 43: Versuchsstandsmodifikation für Messkampagne 5 und zugehörige Strahlungsintensitäten an der Fassade

Untersuchungsmatrix

Die messtechnischen Analysen bauen auf Messkampagne 4 auf. Die Untersuchungsmatrix, die für jedes Ausgangsmaterial jeweils 5 Beschichtungsvarianten vorsieht, wurde entsprechend um zwei weitere Ausgangsmaterialien (Ettlin $\beta 25$ und Ettlin $\beta 35$) erweitert. Hinzu kommt die Wiederholung der Messreihen für die o.g. insgesamt 5 verschiedenen Strahlungsintensitäten.

Der Entfärbungsvorgang (Abklingverhalten nach Abschalten der Strahlungsquelle) erfolgt jeweils im Anschluss an die Bestrahlung mit 1.000 W/m^2 .

Parameter bei $0 \dots 10 \text{ W/m}^2$		Ettlin weiß	Ettlin $\beta 25$	Ettlin $\beta 35$	Ettlin $\beta 60$	Ettlin $\beta 55$	
L →	Parameter bei ca. 370 W/m^2	Ettlin Weiss	Ettlin $\beta 25$	Ettlin $\beta 35$	Ettlin $\beta 60$	Ettlin $\beta 55$	
L →	Parameter bei ca. 450 W/m^2	Ettlin Weiss	Ettlin $\beta 25$	Ettlin $\beta 35$	Ettlin $\beta 60$	Ettlin $\beta 55$	
EL →	Parameter bei ca. 660 W/m^2	Ettlin Weiss	Ettlin $\beta 25$	Ettlin $\beta 35$	Ettlin $\beta 60$	Ettlin $\beta 55$	
L →	Parameter bei ca. 1000 W/m^2	Ettlin Weiss	Ettlin $\beta 25$	Ettlin $\beta 35$	Ettlin $\beta 60$	Ettlin $\beta 55$	
EL →	<p><i>Lichtdurchlässigkeit bzw. Lichttransmission T_V:</i></p> <p>→ Vergleichsmessung d. Beleuchtungsstärke E_V vor und hinter der Verglasung mit und ohne verschattende Markisenstoffe</p> <p><i>Energiedurchlassgrad/ Abminderungsfaktor F_c:</i></p> <p>→ Berechnung aus Messwerten der Vergleichsmessungen zur solaren Einstrahlung G bzw. G'' und EL unmittelbar vor und hinter der Verglasung</p> <p><i>Transparenz und Farbänderung:</i></p> <p>→ Bilddokumentation</p> <p><i>Abklingverhalten (nur nach 1000 W/m^2)</i></p> <p>→ Bilddokumentation</p>	Unbehandelt (Referenz)					
EL →		Vorbehandelt mit Polyamin PEI 0,1 %					
EL →		Beschichtet, jedoch ohne Farbstoff					
EL →		Beschichtet mit Farbstoffkonzentration [5ml]					
EL →		Beschichtet mit hoher Farbstoffkonzentration [10 ml] und hoher Beschichtungsstärke					
EL →							

Tabelle 26: Untersuchungsmatrix der Messkampagne 5

Farbänderung und Transparenz

Die Messungen wurden mit den bereits in Messkampagne 4 getesteten Prüfmustern (Ausgangsmaterialien Ettlin $\beta 55$, Ettlin $\beta 60$ und Ettlin weiß) begonnen und mit den Prüfmustern der Ausgangsmaterialien $\beta 25$ und $\beta 35$ fortgeführt. Jede Messreihe startete mit der kleinsten Strahlungsintensität (370 W/m^2 Rundlochblech klein) und endete mit der größten Strahlungsintensität (1.000 W/m^2 ohne Lochblech). Die Messung bei $0 \dots 10 \text{ W/m}^2$ erfolgte außerhalb des Versuchsaufbaus und ohne Sonnensimulator.



Abbildung 44: Farbänderung und Transparenz von Ettlin $\beta 55$ in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

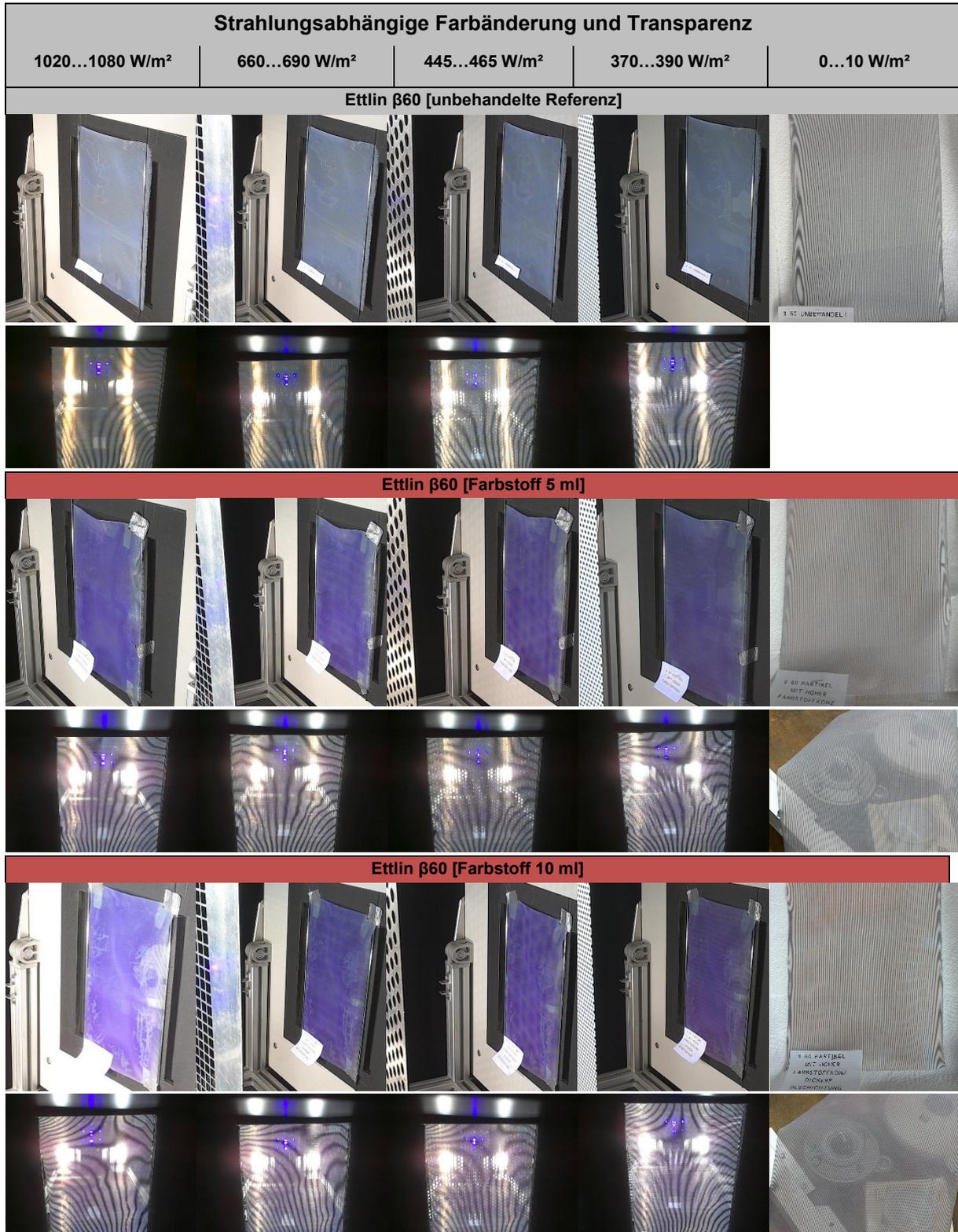


Abbildung 45: Farbänderung und Transparenz Ettlin β60 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

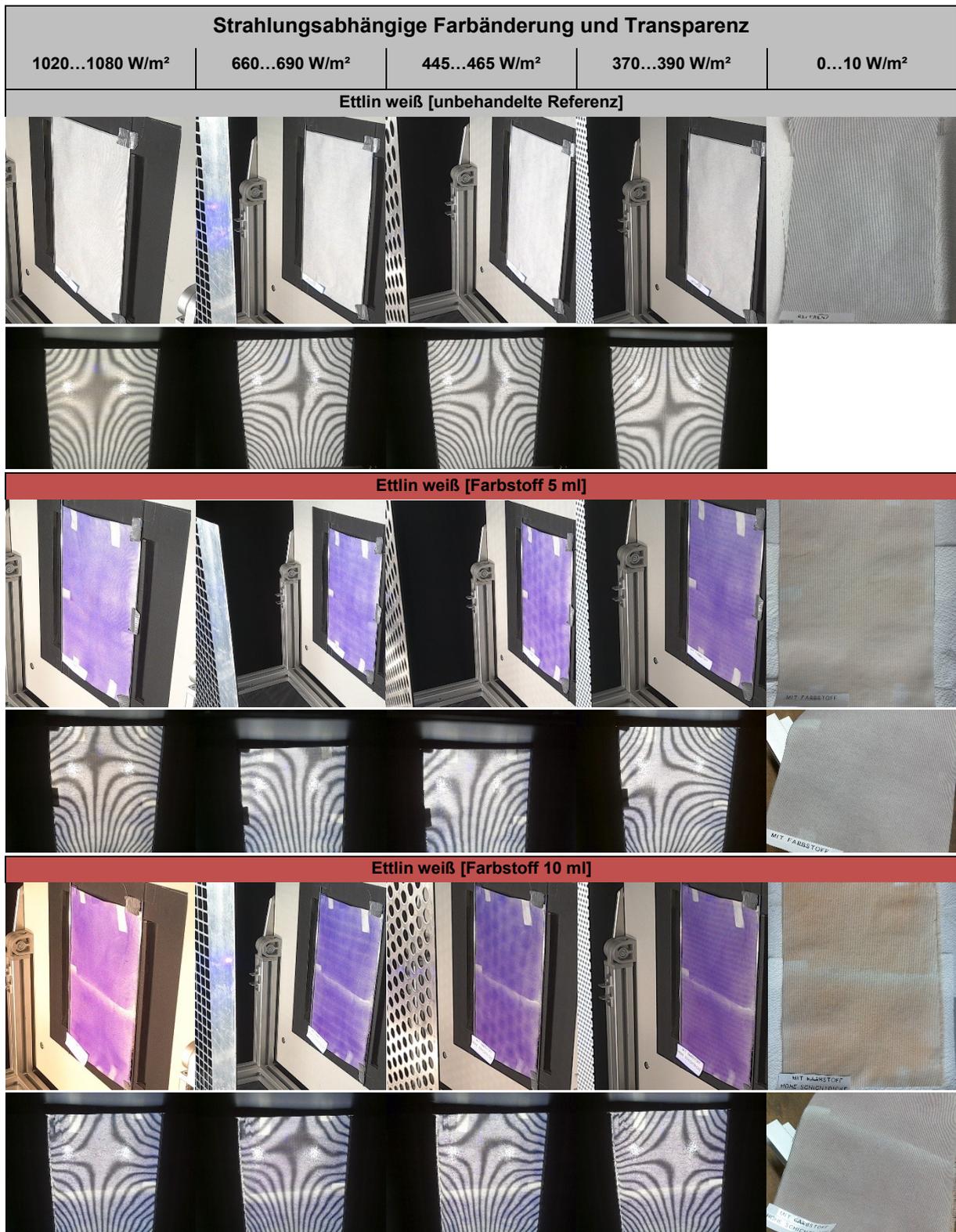


Abbildung 46: Farbänderung und Transparenz Ettlin weiß in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge (Auszug)

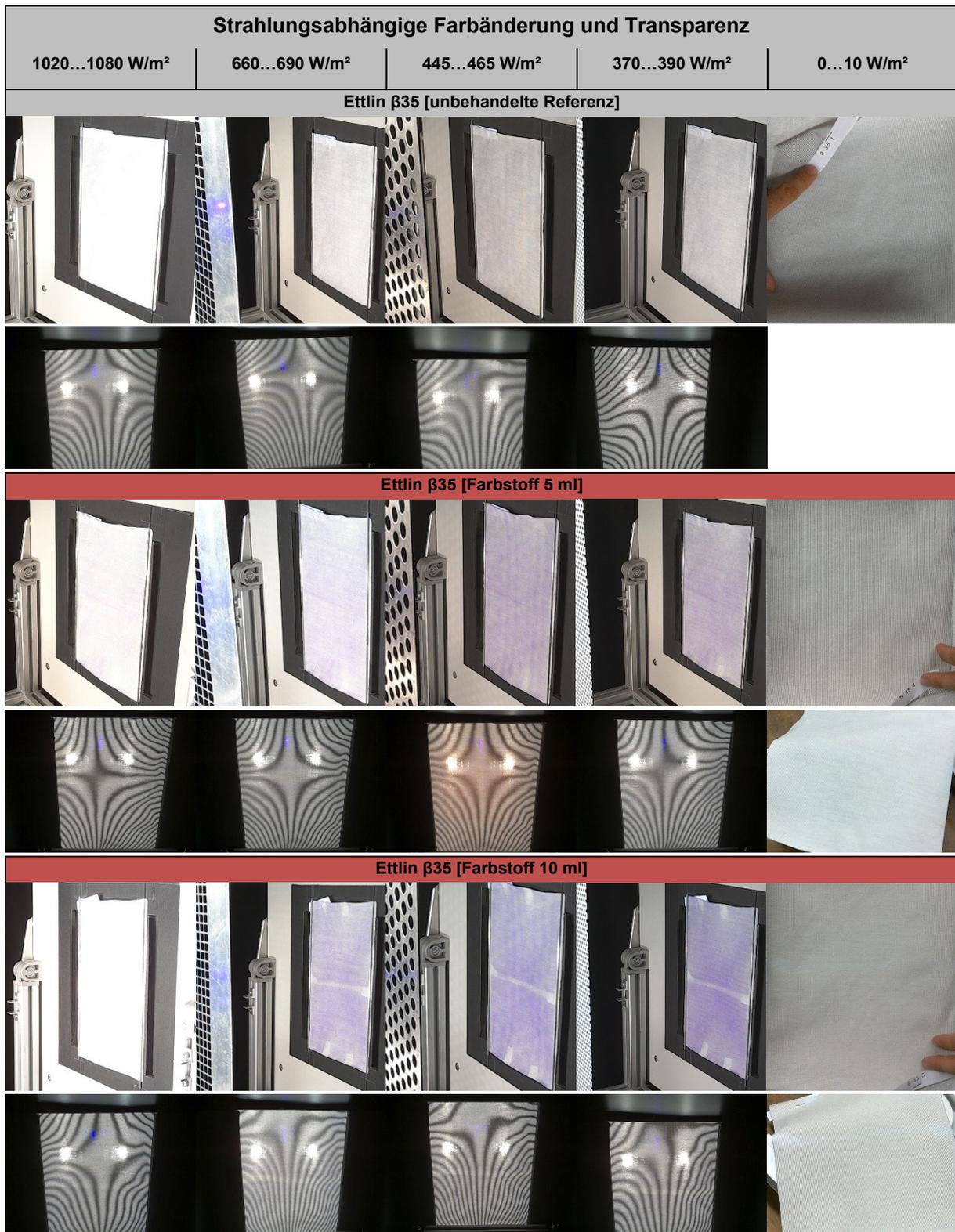


Abbildung 47: Farbänderung und Transparenz Ettlin β35 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge



Abbildung 48: Farbänderung und Transparenz Ettlin β25 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

Wenngleich die unterschiedlichen Prüfmuster material- und beschichtungsbedingt jeweils über ein etwas anderes Lichttransmissionsverhalten verfügen, konnte festgestellt werden, dass die Strahlungsintensität selbst keinen direkten Einfluss auf die Transparenz eines bestimmten Prüflings hat. Lichtstreuung und/oder Reflexionsanteile verhalten sich unabhängig von der Strahlungsintensität. Die bereits in Messkampagne 4 festgestellten Farbänderungen bei einer Einstrahlung von 1.000 W/m² konnte bestätigt werden. Die Farbänderung der Prüfmuster mit farbstoffdotierter Beschichtung auf Ettlin β60 und Ettlin weiß fällt dabei wesentlich deutlicher aus, als auf den Ausgangsmaterialien Ettlin β25 und Ettlin β35.

Dass sich die jeweils deutlichste Farbänderung bereits bei einer Einstrahlung von 370...390 W/m² einstellt, gilt für alle untersuchten Prüfmuster gleichermaßen. Eine Strahlungsabhängigkeit der Farbänderung zwischen 370 und 1.000 W/m² ist fotografisch und visuell nicht feststellbar. Gleiches gilt für die Transparenz und Durchsichtigkeit der jeweiligen Proben in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität. Genaue Erkenntnisse zum strahlungsabhängigen Lichttransmissionsverhalten der Testmuster liefern die messtechnischen Untersuchungen zur Bestimmung von Lichttransmissionsgrad und Abminderungsfaktor.

Wenngleich im Fall der Beschichtungen auf Ettlin β60 und Ettlin weiß die starken Farbänderungen auch bei der Durchsicht von innen nach außen andeutungsweise zu erkennen sind, wirken diese sich nicht negativ auf die Transparenz bzw. die Durchsichtigkeit von innen nach außen aus. Der Einfluss der textilen Struktur des Ausgangsmaterials ist hingegen wesentlich größer.

Transmissionsgrad und Abminderungsfaktor

Gemäß dem Messkonzept wurden parallel zur Beobachtung von Farbänderung und Transparenz Messdaten zur Bestimmung des Transmissionsgrades τ und des Abminderungsfaktors F_c aufgezeichnet.

In Analogie zu Messkampagne 4 kann der Einfluss der Farbstoffmenge, des Ausgangsmaterials und der Verarbeitungsstufe der Beschichtung auf die Lichttransmission und den Abminderungsfaktor dargestellt werden.

Trotz des sichtbaren Einflusses der Farbstoffmenge ist erwartungsgemäß der Einfluss des Ausgangsmaterials nicht unerheblich. Unbeschichtetes und unbehandeltes Material ist durchlässiger für sichtbares Licht und Solarstrahlung als beschichtetes Material mit hohem Farbstoffgehalt. In gleicher Weise sind alle Prüfmuster „Ettlin weiß“ weniger lichtdurchlässig als die Prüfmuster „Ettlin β60“, „Ettlin β35“ und „Ettlin β25“.

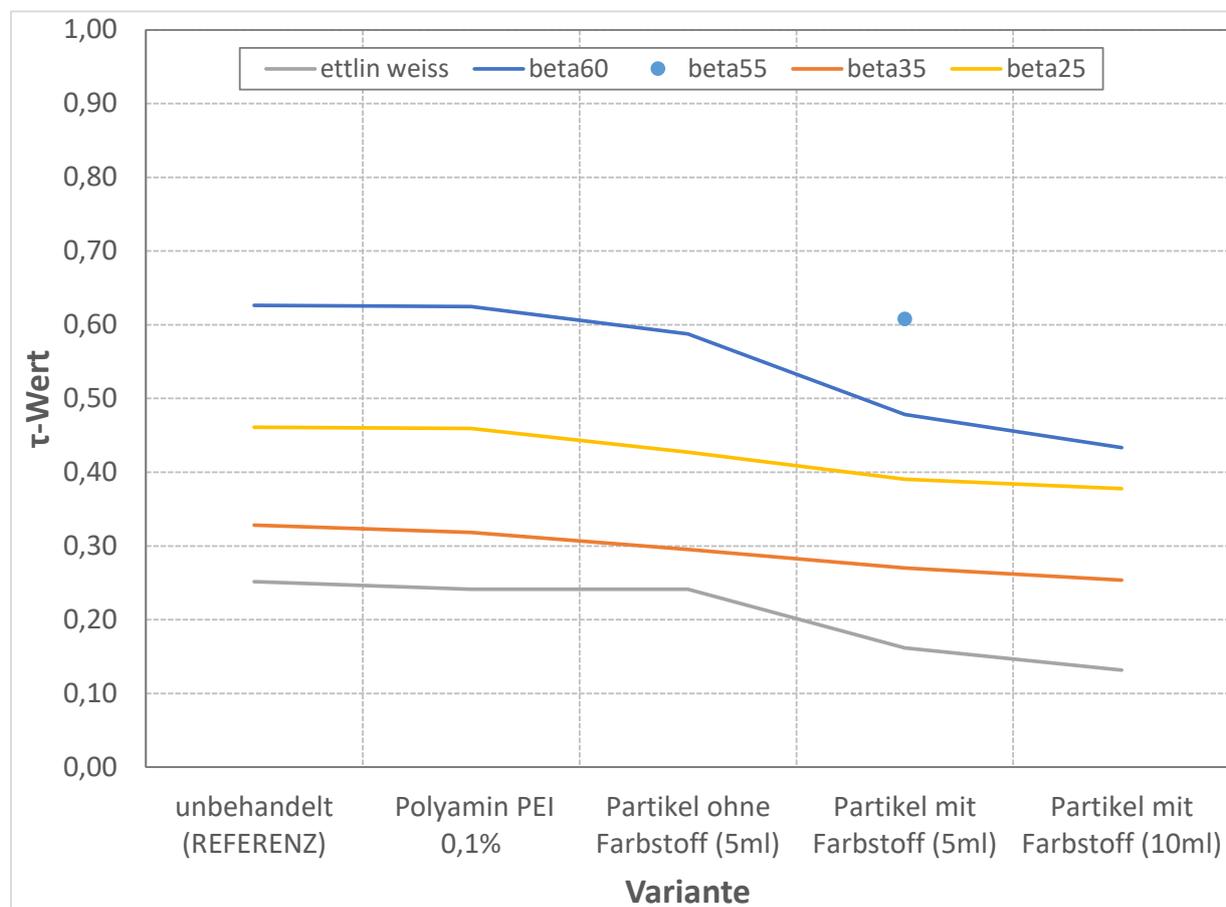


Abbildung 49: Ergebnisse der Messkampagne 5: Abhängigkeit der Lichttransmission von der Farbstoffmenge

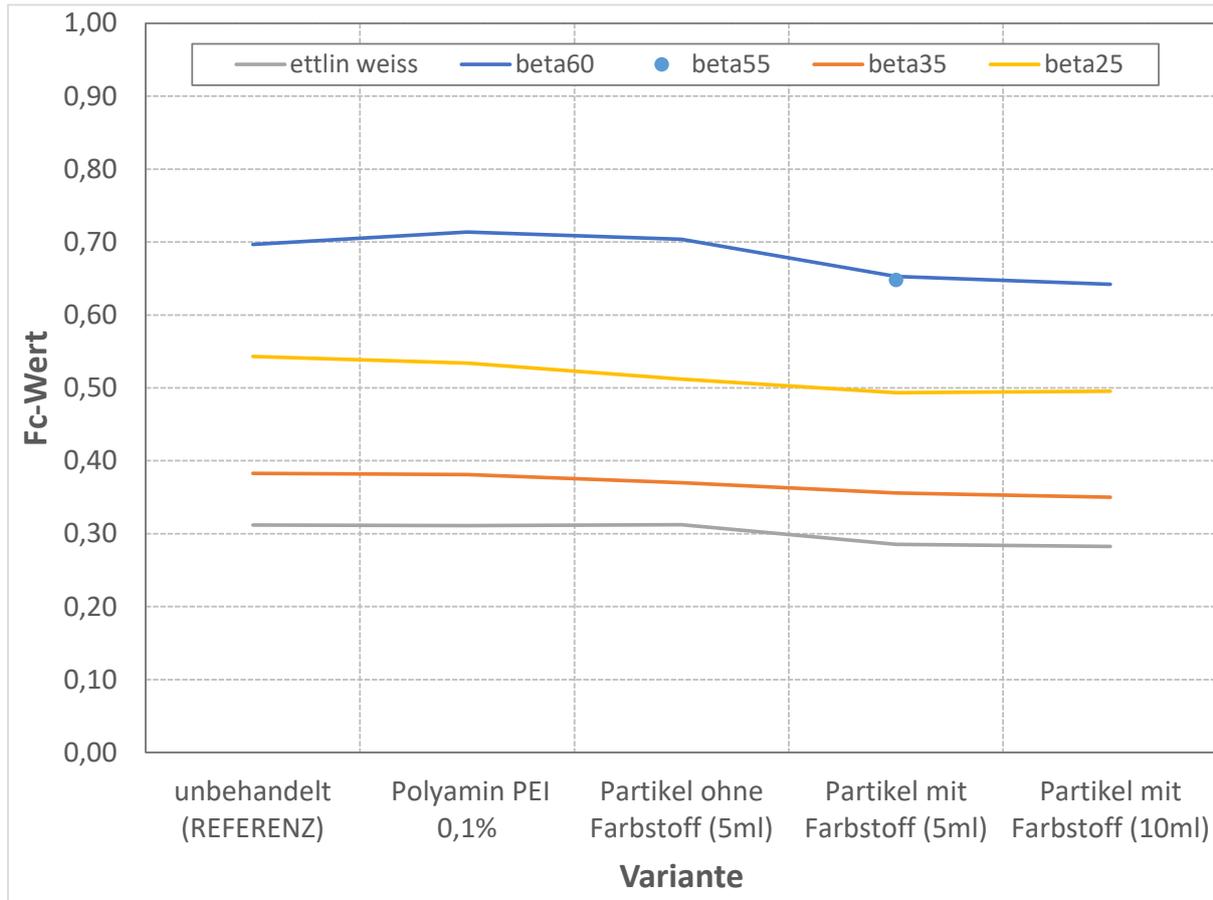


Abbildung 50: Ergebnisse der Messkampagne 5 – Abhängigkeit des Abminderungsfaktors von der Farbstoffmenge

Abhängigkeit der Lichttransmission von der Strahlungsintensität

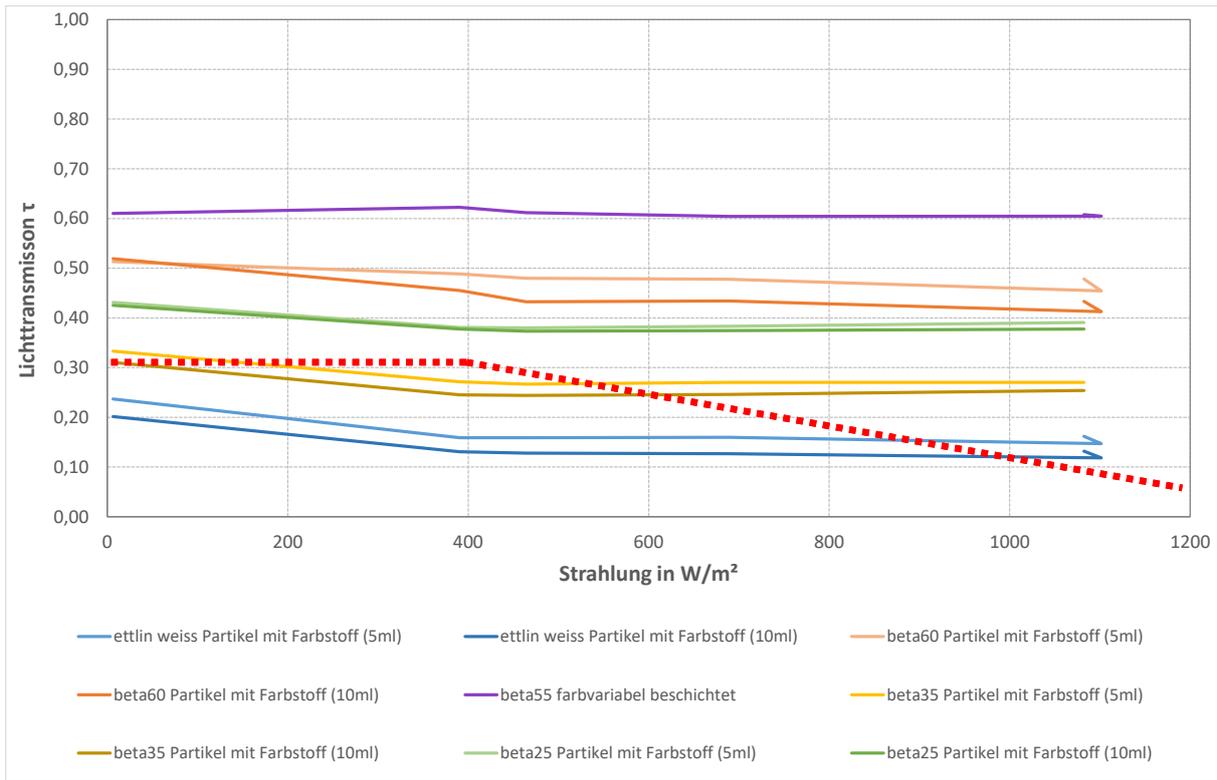


Abbildung 51: Ergebnisse der Messkampagne 5 – Abhängigkeit der Lichttransmission von der Strahlungsintensität

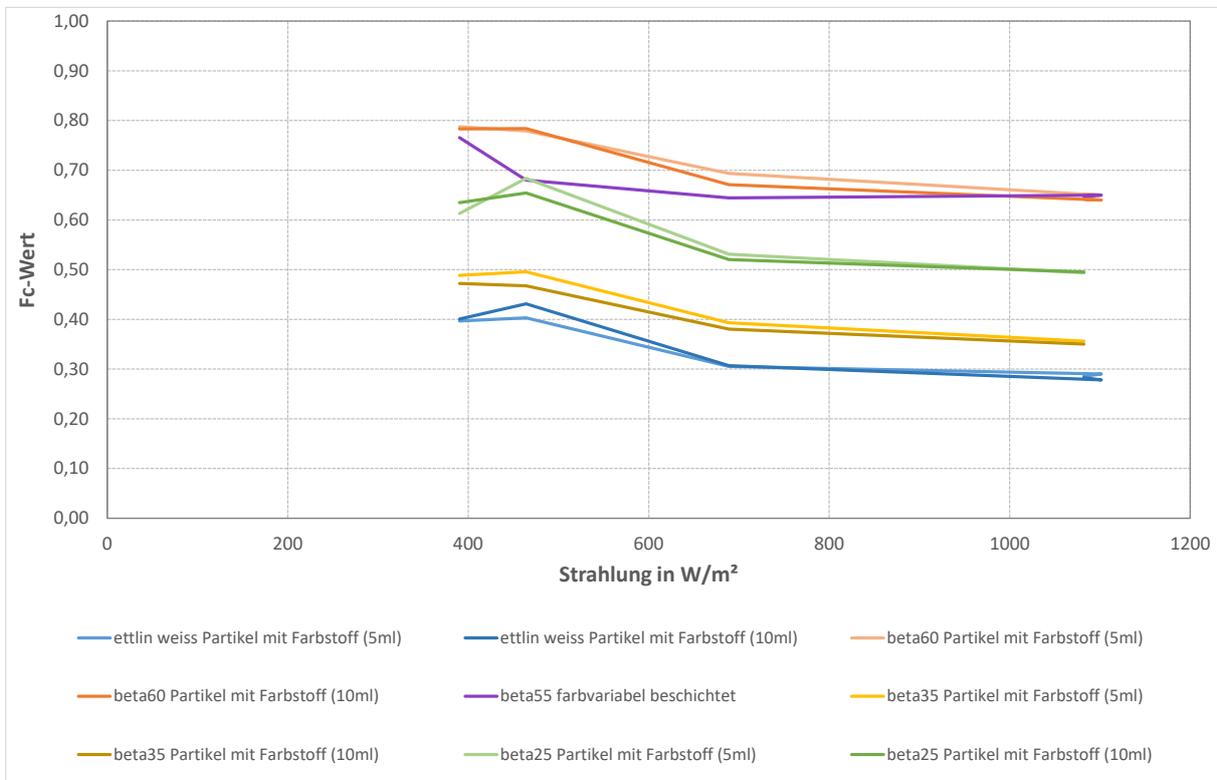


Abbildung 52: Ergebnisse der Messkampagne 5 – Abhängigkeit des Abminderungsfaktors von der Strahlungsintensität

Einschwing- und Abklingverhalten

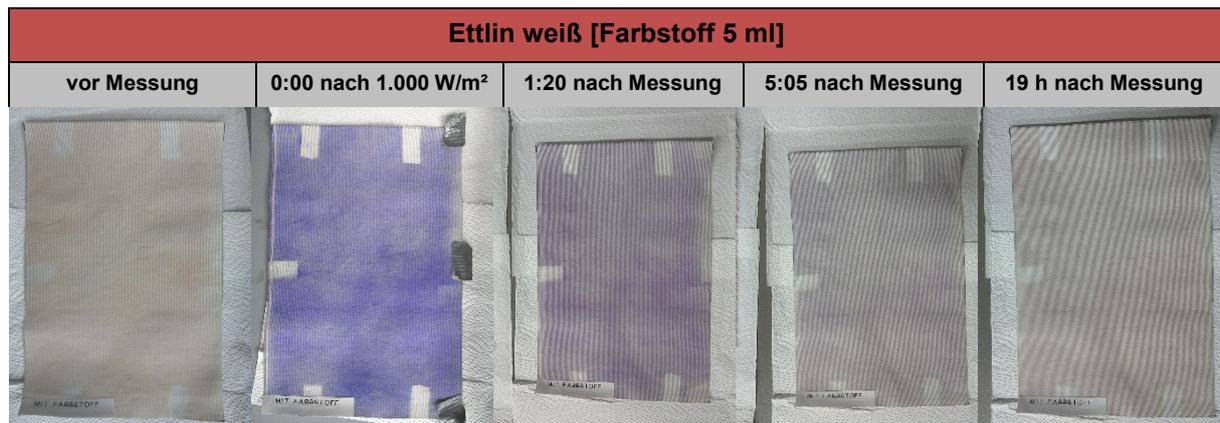


Tabelle 27: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

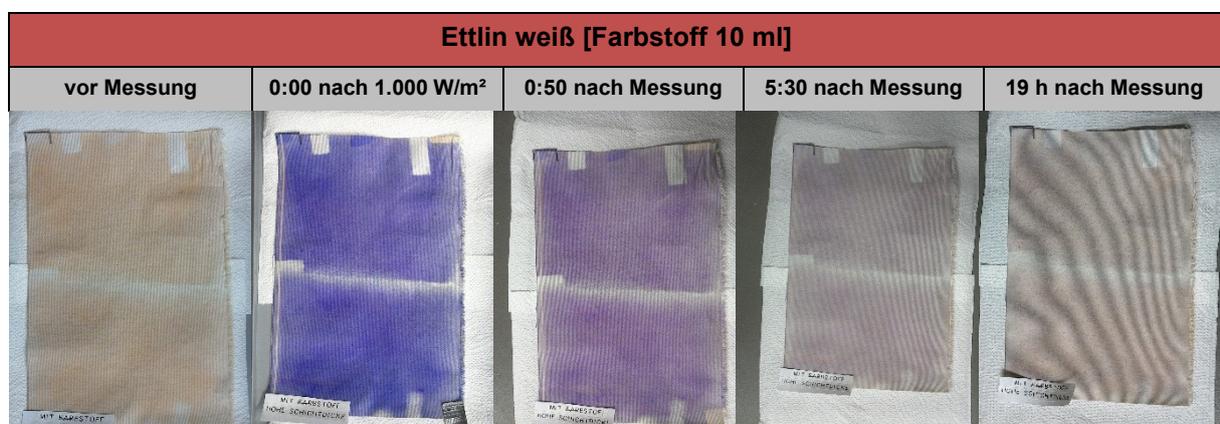


Tabelle 28: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

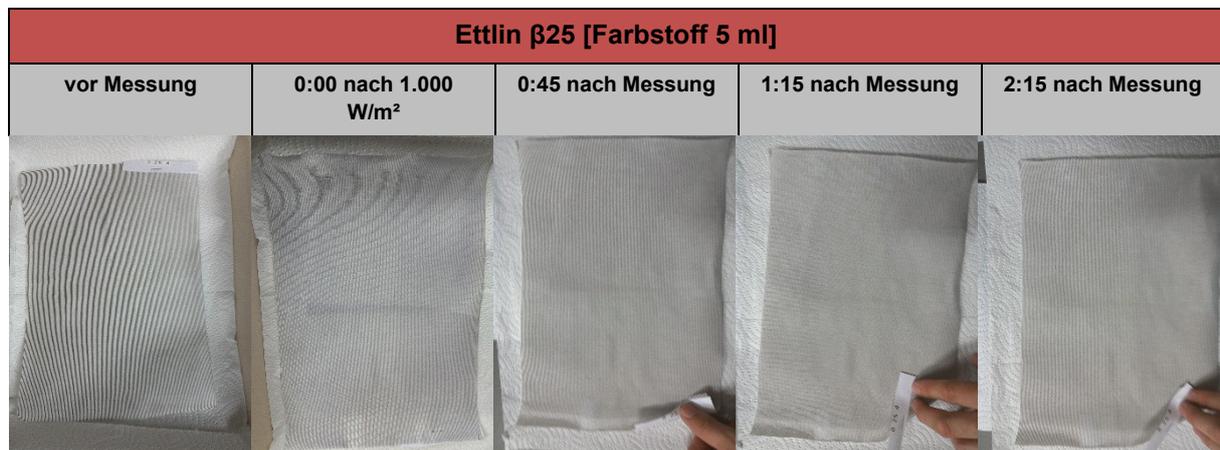


Tabelle 29: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

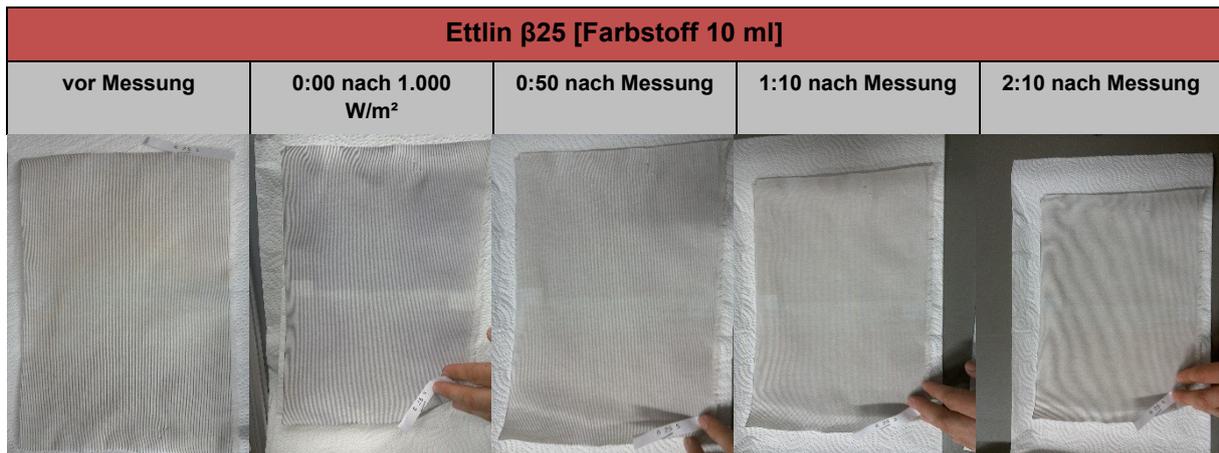


Tabelle 30: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

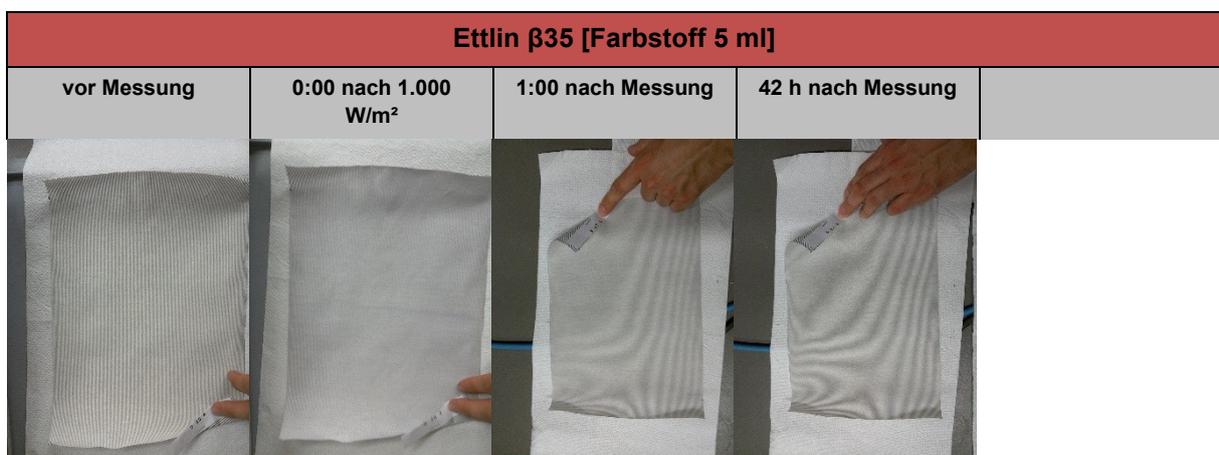


Tabelle 31: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

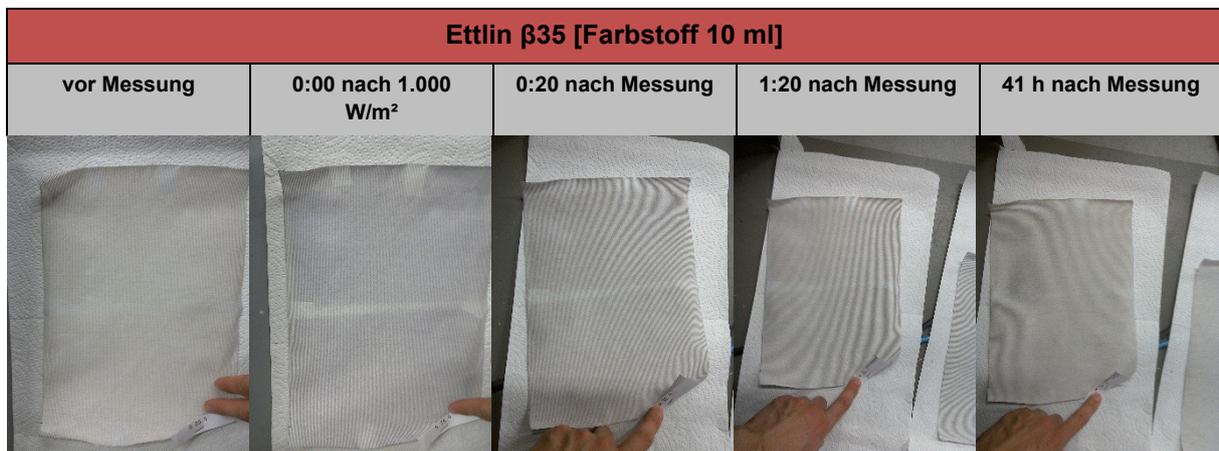


Tabelle 32: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

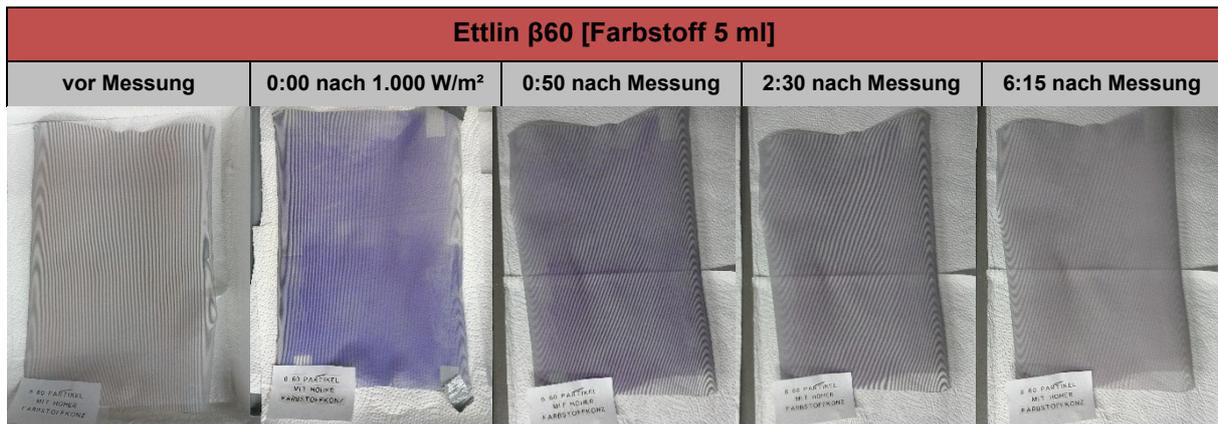


Tabelle 33: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

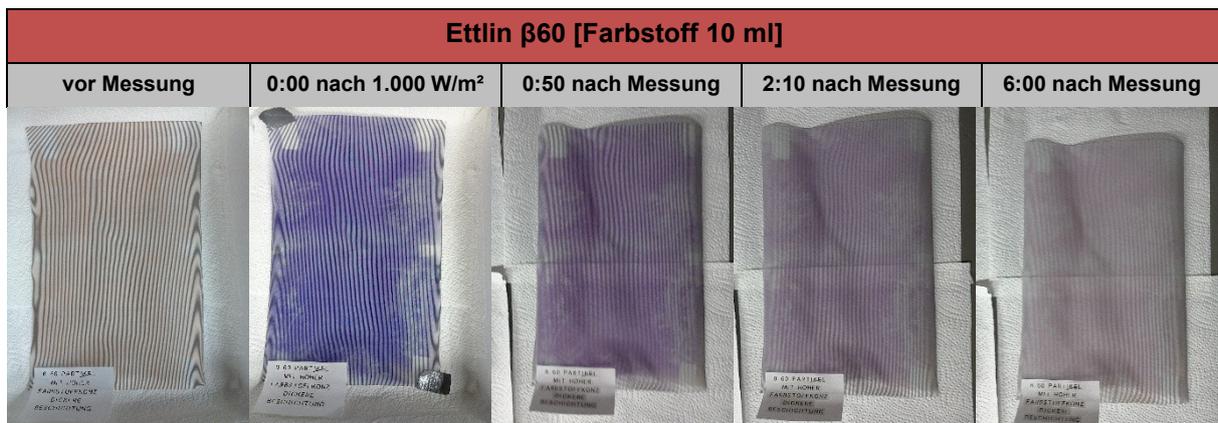


Tabelle 34: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

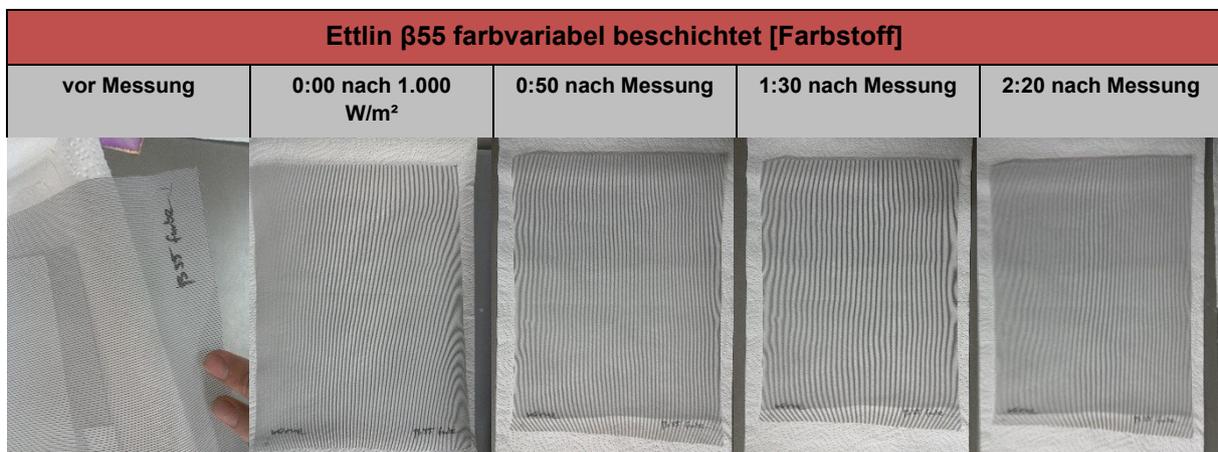


Tabelle 35: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

5.6 Textiltechnologische experimentelle Untersuchungen

5.6.1 Gebrauchsdauereigenschaften

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden

Die textilen Produkte als Bestandteile von Sonnenschutzsystemen haben im Gesamtsystem bestimmte Gebrauchszwecke zu erfüllen. Ob eine Eignung für den Gebrauchszweck vorliegt, kann anhand von Gebrauchseigenschaften abgeleitet werden. Die Gebrauchseigenschaft ist das Merkmal, das neben weiteren Merkmalen, eine vorgesehene Verwendung zulässt. Sie ist gekennzeichnet durch

- die Größe bei Lieferung oder Kauf und
- durch ihr Verhalten während der Gebrauchsdauer.

Die Prüfung der Gebrauchseigenschaften unterscheidet sich von der Prüfung bestimmter Einzelmerkmale dadurch, dass zu mindestens zwei Prüfungen zu verschiedenen Zeitpunkten der Nutzung erfolgen müssen⁴.

Eine Betrachtung einzelner Eigenschaften kann in folgende Arbeitsschritte unterteilt werden:

- Ermittlung der Größe eines Merkmals von gebrauchsnaher Beanspruchung,
- Durchführung einer gebrauchsnahen Beanspruchung,
- Ermittlung der Größe des Merkmals nach einer gebrauchsnahen Beanspruchung,
- Bestimmung der Merkmalsveränderung (vorher – nachher) und
- Beurteilung der Gebrauchseigenschaft anhand der Merkmalsveränderung (ggf. im Vergleich zu einer festgelegten Gebrauchsanforderung).

Wird die Gebrauchseigenschaftsprüfung mit unterschiedlicher Beanspruchungsdauer durchgeführt, können Kennlinien ermittelt werden.

Eine Prüfung der Gebrauchseigenschaften kann auch bei der Betrachtung von Verarbeitungsschritten hin zum Endprodukt einbezogen werden. Halbfabrikate müssen verarbeitbar sein und können durch die Verarbeitungsprozesse, z. B. Veredlungsprozesse, verändert werden.

Beim derzeitigen Stand der Bearbeitung sind die Probengrößen für die durchzuführenden textilphysikalischen Prüfungen zu klein, um normgerecht Prüfungen vornehmen zu können.

Für die Prüfung der Gebrauchsdauereigenschaften von Markisenmaterialien werden die vorliegenden Normen zugrunde gelegt.

Leistungsanforderungen

Folgende aktuelle Normen beschreiben Merkmale, die eine Leistungstauglichkeit für Außenjalousien (Gesamtprodukt) umfassen:

DIN EN 12216	Abschlüsse - Terminologie, Benennungen und Definitionen: November 2002
prEN 12216:2016	Abschlüsse – Terminologie, Benennungen und Definitionen: August 2016
DIN EN 13659	Abschlüsse außen und Außenjalousien – Leistungs- und Sicherheitsanforderungen: Juli 2015 („Teil einer Normenreihe über Abschlüsse an Gebäuden, die in EN 12216 definiert sind“).

Nach DIN EN 12216 ist ein Abschluss definiert als „Produkt, das entweder innen oder außen angebracht ist, um Öffnungen zusätzlich zu schließen und/oder zu schützen (z. B. Fenster, Türen)“.

Für den Begriff Markisen sind in den Normen zwei Definitionen zu finden.

In DIN EN 12216 von 2002 (siehe auch Entwurf DIN EN 12216 von 2016) ist eine Markise ein „Produkt, dessen **Behang** aus einem **flächigen Material** besteht. Sie ist **außen, oberhalb, vor- oder innerhalb einer Öffnung angebracht** und wird in einer **horizontal und/oder geneigten und/oder vertikalen Ebene genutzt**“. Eine Markise kann **einfahrbar oder unbeweglich** sein. Eine einfahrbare Markise kann **roll- oder faltbar** sein. Eine Markise stellt eine Form eines Abschlusses dar, ungeachtet ihrer „Zweckbestimmung, Gestaltung und Materialbeschaffenheit“.

⁴ Reumann, R.-D.: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Berlin Heidelberg New York. Springer Verlag. 2000. ISBN 3-540-66147-6

Verschiedene Typen von Markisen mit ihren jeweiligen Bestandteilen, einschließlich mechanischer, werden aufgeführt. Das als **Behang** eingesetzte Material wird in spezifizierten Darstellungen als „Tuch“ bezeichnet, wie z. B. bei Senkrecht- oder Fassadenmarkise, Markisolette, Fallarmmarkise.

Der oben genannte Norm-Entwurf (prEN 12216:2016) wurde vom „Technischen Komitee CEN/TC 33 „Türen, Tore, Fenster, Abschlüsse, Baubeschläge und Vorhangfassaden“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom AFNOR (Frankreich) gehalten wird“. Der Entwurf befindet sich derzeit noch in der Bearbeitungsphase.

DIN EN 13561 von 2015 definiert die Markise als ein „Produkt, bei dem der **Behang** aus einem **beweglichen Material** besteht und das angebracht wird, um die **Eigenschaften**, wie **thermische und optische Merkmale**, der vorhandenen **verglasten Oberfläche** (z. B. Fenster, Tür), an der es angewendet wird, zu **erzeugen oder zu ändern**“. In einem Abschnitt der Norm werden die Anforderungen an Grundwerkstoffe von Markisen genannt. Als spezifische Anforderungen für Textilien sind Farbbeständigkeit, Festigkeit, Maßhaltigkeit und Widerstand gegen das Durchdringen von Wasser angegeben. Die in der Norm aufgeführten Kriterien sind in Zusammenhang mit den genannten Prüfverfahren zu betrachten und legen Mindestanforderungen fest.

In DIN EN 13561: Markisen – Leistungs- und Sicherheitsanforderungen: August 2015 sind für den „textilen Grundwerkstoff für Markisen“ folgende Anforderungen aufgeführt:

- **Farbbeständigkeit** nach EN ISO 105-B04 (Textilien) bzw. DIN EN 12280-2 (Textilien, beschichtet), künstliche Bewitterung, Graumaßstab (EN 20105-A02);
Ziel: mindestens Stufe 4
- **Zugfestigkeit** nach EN ISO 13934-1 (Textilien) bzw. EN ISO 1421 (Textilien, beschichtet) nach künstlicher Bewitterung;
Ziel: mindestens Klasse 2 (Kettrichtung (KR) > 100 daN, Schussrichtung (SR) > 60 daN) bei 1.000 h künstliche Bewitterung
- **Maßhaltigkeit** durch zwei getrennte Prüfungen
 - nach künstlicher Bewitterung, ohne Last; Ziel: KR [-3%, +1%], SR [-1%, +1%] nach Belastung,
 - ohne künstliche Bewitterung; Ziel: nach DIN EN 13561, Tabelle 11 klassifizieren
- **Widerstand gegen das Durchdringen von Wasser** (Wasserdichtheit) nach DIN EN 20 811;
Ziel: Durchdringung von Wasser darf sich höchstens um 15 % zwischen der Ausgangsprobe und der Probe nach simulierten Regenfällen mindern; „Die Tuchnähte werden nicht berücksichtigt.“

Eigenschaften handelsüblicher Gewebe

Eigenschaften von „Hi-Tech-Geweben“ (Textilscreens) eines Marktführers für Sonnenschutzsysteme sind in Tabelle 36 aufgeführt.

	flexibles Gewebe	Polyestergewebe		
Eigenschaften	Serge 600	Soltis 86	Soltis 88	Soltis 92
flächenbezogenen Masse [g/m ²] (NF EN 12127*)	535	380	360	420
Reißkraft – KR [daN/5cm] ([N/5cm]) (NF EN ISO 1421*)	260 (2600)	230 (2300)	145 (1450)	310 (3100)
Reißkraft – SR [daN/5cm] ([N/5cm]) (NF EN ISO 1421*)	225 (2250)	160 (1600)	145 (1450)	210 (2100)
Öffnungsfaktor [%]	5	14	8	4
Dicke [mm] (ISO 5084)	0,75	0,43	0,45	0,45
Material	PVC-ummanteltes Glasfasergarn	hochfestes Polyestergarn, PVC-fixiert	hochfestes Polyestergarn, PVC-fixiert	hochfestes Polyestergarn, PVC-fixiert

Tabelle 36: Angaben zu Geweben eines Markisenherstellers (Kollektionsanpassung 2018)

* NF... - Bezugsquelle der verwendeten Norm: Association française de normalisation (AFNOR) Tour Europe, F - 92049 Paris La Défense

Die in Tabelle 36 aufgeführten beschichteten Gewebe werden handelsüblich mit höheren Reißkraftwerten in KR als in SR angeboten (KR > SR). Dabei liegen die Differenzen zwischen KR und SR, je nach Material, zwischen 0 und 1.000 N/5 cm.

Eigene Untersuchungen

Die im Rahmen der Projektbearbeitung durchgeführten textilphysikalischen Untersuchungen wurden an den vom Unternehmen ETTLIN AG bereitgestellten Geweben sowie an den im Labormaßstab hergestellten beschichteten Geweben durchgeführt.

Die Mittelwerte der durchgeführten Prüfungen an den zur Verfügung gestellten Geweben (Gewebe-Varianten 1-6) sind aus Tabelle 2 ersichtlich. Es wurden folgende, für den Gebrauch als wesentlich eingeschätzte Parameter, geprüft:

- Flächenmasse,
- Dicke,
- Höchstzugkraft (HZK),
- Höchstzugkraftdehnung (HZKD),
- Luftdurchlässigkeit und
- Weiterreißfestigkeit (z. Z. noch auszuwerten).

Die Prüfung an in Laborversuchen beschichteten Geweben hinsichtlich der Flächenmasse und Dicke sind aus Tabelle 37 ersichtlich. Bei den Werten handelt es sich um Einzelwerte für die jeweilige Gewebe- und Beschichtungs-Varianten. Aufgrund der geringen Mengen an beschichteten Geweben wurden nicht für alle Beschichtungs-Varianten diese beiden Kennwerte erfasst werden.

Beschichtung	Gewebe-Variante 2		Gewebe-Variante 4		Gewebe-Variante 5		Gewebe-Variante 6	
	Flächen- masse [g/m ²]	Dicke [mm]						
unbehandelt	152	0,4	72	0,24	100	0,38	133	0,4
mit Polyamin	154	0,4	72	0,24	100	0,38	133	0,39
Partikel ohne Farbstoff (FS)	158	0,42	79	0,25	105	0,42	139	0,42
mit hoher FS- Konzentration	-	-	83	0,25	106	0,44	140	0,43
mit hoher FS- Konzentration, dicke Beschichtung	168	0,5	83	0,28	-	-	-	-

Tabelle 37: Flächenmassen und Dicken von beschichteten Gewebe-Varianten

Die Werte für Luftdurchlässigkeit, HZK und HZKD sowie Weiterreißfestigkeit können erst ermittelt werden, wenn ausreichende Mengen an beschichteten Materialien zur Verfügung stehen.

Zugfestigkeit

Die HZK und die HZKD aller **unmodifizierten** PET-Gewebe wurden im Zugversuch nach DIN EN ISO 13934-1 bestimmt. Die Mittelwerte der Prüfungen sind in Tabelle 8 hinterlegt. Die Abbildungen Abbildung 53 und Abbildung 54 verdeutlichen das Verhalten der einzelnen unmodifizierten Gewebe bei der Zugbelastung bis zum Bruch des Materials in Kett- bzw. Schussrichtung.

Die mittlere HZK in Schussrichtung (SR) ist bei dem unmodifizierten Gewebe-Variante 1 annähernd siebenmal höher als in Ketttrichtung (KR). Der Wechsel des Materials im Schussfadensystem (von PET-Monofil auf Polyesterstapelfasergarn) bei Beibehaltung der Materialien für das Kettfadensystem (Gewebe-Variante 2) führt dazu, dass bei Gewebe-Variante 2 die HZK in SR um fast die Hälfte (45 %) sinkt. Der Verlust an HZK in KR liegt nur bei 1,75 % und ist demgegenüber als gering zu betrachten.

Auch der Wert der Höchstzugkraftdehnung (HZKD) wird durch die Änderung des Schussfadensmaterials mit ähnlicher Tendenz beeinflusst. Die HZKD in SR verringert sich um 35 %. In KR wurde eine um 15 % geringere HZKD ermittelt.

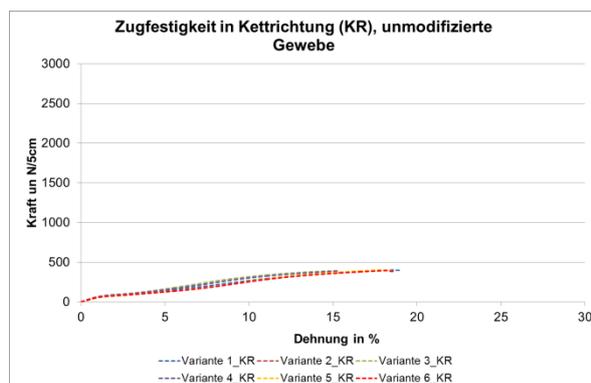


Abbildung 53: Zugverhalten in Kettfadenrichtung

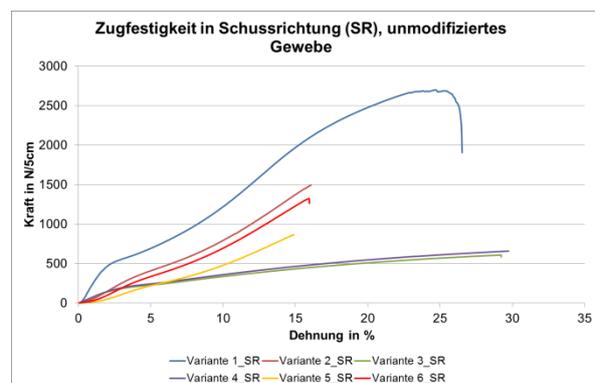


Abbildung 54: Zugverhalten im Schussfadenrichtung

Die beiden untersuchten Gewebe sind so angefertigt, dass die HZK in SR größer ist als in KR ($SR > KR$). Die Differenzen der HZK zwischen SR und KR liegen bei Gewebe-Variante 1 bei 2.320 N/5 cm und bei Gewebe-Variante 2 bei 1.108 N/5 cm. Die Prüfungen an den Proben wurden mit einer Einspannlänge von 200 mm vorgenommen.

Weiterführend wurden 4 Gewebe-Varianten in die Untersuchungen einbezogen, die sich hinsichtlich Schussfadenmaterial, Schussfadendichte und Schussfadenfeinheit unterscheiden. Das Kettfadenmaterial (Binde- wie auch Stehfaden) wurde bei allen Geweben beibehalten. Bei den Gewebe-Varianten 3 und 4 kam als Schussfaden ein transparentes Monofilament mit erhöhter Schussfadendichte zum Einsatz. In den Gewebe-Varianten 5 und 6 wurde das Polyesterstapelfasergarn im Schuss mit verminderter Schussdichte verarbeitet. Durch die Beibehaltung der Kettfadensystems in den Gewebe-Varianten sind in **Kettfadenrichtung** keine gravierenden Änderungen der HZK zu verzeichnen. Für die HZKD in Ketttrichtung ergeben sich nur geringfügig abweichende Prüfergebnissen.

Deutliche Unterschiede zeigen sich für alle einbezogenen Materialvarianten in **Schussrichtung**. Bei den **Materialvarianten 3 und 4**, in denen als Schussfaden ein Monofil verarbeitet wurde, reduziert sich die HZK der Gewebe gegenüber Variante 1 (ebenfalls Monofil im Schuss). Durch die Verwendung eines halb so feinen Schussgarnes (Gewebe-Variante 3 und 4) verringert sich die HZK um 78 % bzw. 76 % trotz höherer Schussfadendichte gegenüber Variante 1. Die HZKD nimmt geringfügig zu.

Der Einsatz des Polyesterstapelfasergarnes (analog Gewebe-Variante 2) trägt bei den Gewebe-Varianten 5 und 6 zu einer Senkung der HZK um 40 % bzw. 14 % bei. Die HZKD bleibt annähernd gleich.

Bewertung von Gebrauchsdauereigenschaften

Die Bewertung der Gebrauchsdauereigenschaften der Gewebe wurde an unmodifizierten Proben (Weiterreißkraft, Knickverhalten) bzw. modifizierten Proben (Scheuerverhalten) durchgeführt. Als modifizierte Gewebe standen Proben im A4-Format zur Verfügung. Aufgrund der Probengröße beschränkten sich die Untersuchungen an diesen Materialien auf Tests zum Scheuerverhalten und zu Versuchen der Schweißbarkeit.

Erste Prüfungen der Weiterreißseigenschaften an den Ausgangsmaterialien wurden nach zwei Methoden durchgeführt (Schenkel- und Zungen-Methode, siehe auch Tabelle 2). Nach diesen beiden Methoden konnten jedoch keine auswertbaren Ergebnisse bei der Prüfung in Ketttrichtung an Gewebe-Variante 1 und 2 ermittelt werden. Es kam in diese Prüfrichtung stets zu Klemm-, Schenkel oder Zungenbrüchen. In Schussrichtung waren diese Methoden problemlos anwendbar.

In der Literatur^[3] wird zur Ermittlung der Weiterreißfestigkeit für Gewebe, beschichtete Gewebe und dort wo anderen Prüf-Methoden keine auswertbaren Ergebnisse liefern die Anwendung der Trapez-Methode vorgeschlagen. Als Ergebnis dieser Methode wird die Trapez-Weiterreißkraft angegeben. Sie ist die höchste Zugkraft, die im Zugversuch eine definiert eingeschnittene Messprobe dem Weiterreißen entgegensetzt [DIN 53859 – Teil 5)]. Die Prüfung nach der Trapez-Methode [DIN 53859 - Teil5] erwies sich für beide Prüfrichtungen als geeignet und wurde in Folge bei allen Materialien angewendet.

Die 3 angewandten Weiterreißmethode unterscheiden sich in der Art der Probenvorbereitung, der Lage der Einschnitte und ihrer Einspannung in der Zugprüfmaschine (Abbildung 55 bis Abbildung 57). Die Ergebnisse der durchgeführten Prüfungen an den Materialien für alle drei Versuchsmethoden sind aus Tabelle 37 ersichtlich.

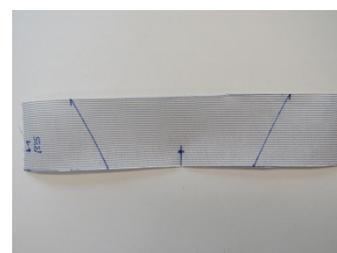
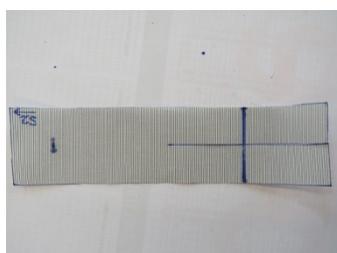
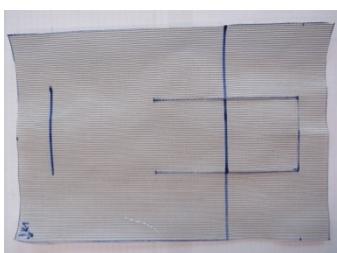


Abbildung 55: Probenvorbereitung
Zungen-Methode

Abbildung 56: Probenvorbereitung
Schenkel-Methode

Abbildung 57: Probenvorbereitung
Trapez-Methode

Abbildung 58 zeigt beispielhaft die Prüfkurven, ermittelt nach der Trapez-Methode.

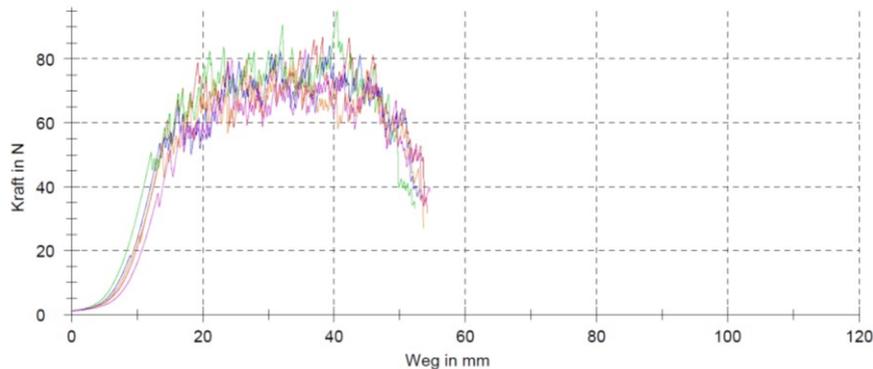


Abbildung 58: Prüfkurve – Variante 5, SR (Trapez-Methode)

Die Ergebnisse aller Prüfungen nach den 3 eingesetzten Prüfmethode sind als Mittelwerte in Tabelle 38 aufgeführt.

In Kettfadenrichtung wurde bei allen Geweben eine geringere Weiterreißkraft bei annähernd gleich große Messwerte ermittelt. In diese Fadenrichtung wurde bei alle 6 Geweben das gleiche Kettfadenmaterial verarbeitet. In Schussfadenrichtung besitzt das Gewebe der Variante 1 von allen untersuchten Geweben die höchste Weiterreißfestigkeit. Bereits im Zugversuch wurde an diesem Gewebe die größte Höchstzugkraft erfasst (Tabelle 8)

Material	Schenkel-Methode (in Anlehnung an DIN EN ISO 13937-2) Schenkel-Weiterreißkraft		Zungen-Methode (in Anlehnung an DIN EN ISO 13937-4) Zungen-Weiterreißkraft		Trapez-Methode (in Anlehnung an DIN 53859 Teil 5) Trapez-Weiterreißkraft
	F _{max} [N]	F _{min} [N]	F _{max} [N]	F _{min} [N]	F _{max} [N]
Variante 1, KR	Klemmbruch	Klemmbruch	Zungenbruch	Zungenbruch	56
Variante 1, SR	56,9	36,7	195,0	152,7	419
Variante 2, KR	Schenkelbruch	Schenkelbruch	Zungenbruch	Zungenbruch	53
Variante 2, SR	46,9	34,4	73,0	60,5	121
Variante 3, KR	-	-	-	-	52
Variante 3, SR	-	-	-	-	76
Variante 4, KR	-	-	-	-	54
Variante 4, SR	-	-	-	-	103
Variante 5, KR	-	-	-	-	65
Variante 5, SR	-	-	-	-	86
Variante 6, KR	-	-	-	-	57
Variante 6, SR	-	-	-	-	105

Tabelle 38: Maximale und minimale Weiterreißkraftwerte (Mittelwerte) bei Schenkel-, Zungenmethode und maximale Weiterreißkraftwerte nach der Trapezmethode

Knittererholungswinkel

Nach nicht beabsichtigter Faltbeanspruchung bei Verarbeitung und im Gebrauch bilden sich in Textilien leicht Knitter ab, die den Gesamteindruck der Materialien beeinträchtigen können. Sowohl die Art des Faserstoffes und die damit verbundenen mechanischen Eigenschaften als auch Garnaufbau und Konstruktion des Flächengebilde haben Einfluss auf Knitterneigung und -erholungsfähigkeit der Flächengebilde, die zusätzlich durch die Bedingungen beim Knittern beeinflusst werden.

Die Einwirkung von Druck bei Faltung bewirkt an der äußeren Faltkante partielle eine Dehnung, im Inneren eine Stauchung, die je nach Knittererholungseigenschaften des textilen Materials teilweise reversibel und teilweise bleibend ist.

Untersuchungen zu den Knittereigenschaften wurden nur an unmodifizierten Geweben vorgenommen, da zum Zeitpunkt der Prüfungen noch keine modifizierten Gewebe in größeren Mengen zur Verfügung standen.

Die Prüfungen wurden in Anlehnung an DIN 53890 (Knitterbankverfahren) durchgeführt, die Ergebnisse sind in Abbildung 58 dargestellt. 20 mm x 50 mm große Proben wurden in Kett- und Schussrichtung zugeschnitten, gefaltet und entsprechend Norm je mit einem Gewicht von 1000 g 30 min lang belastet. Nach Entlastung richtet sich der umgelegte Schenkel auf und es bildet sich zwischen aufliegendem und hochstehendem Schenkel der Knittererholungswinkel α aus, der nach 5 min (α_5) bzw. 30 min (α_{30}) gemessen wird. Der Winkel α_5 kann als „Kurzzeitknittererholungsverhalten“ und α_{30} als „Langzeitknittererholungsverhalten“ interpretiert werden.



Abbildung 59: Gefaltete Proben, Knitterbankverfahren
(Gewebe-Variante 5, Bezeichnungen wie im Diagramm auf x-Achse verwendet)

Abbildung 59 veranschaulicht die Belastungsrichtung wie sie bei Prüfung und der Darstellung im Diagramm verwendet wurde am Beispiel der Gewebe-Variante 5.

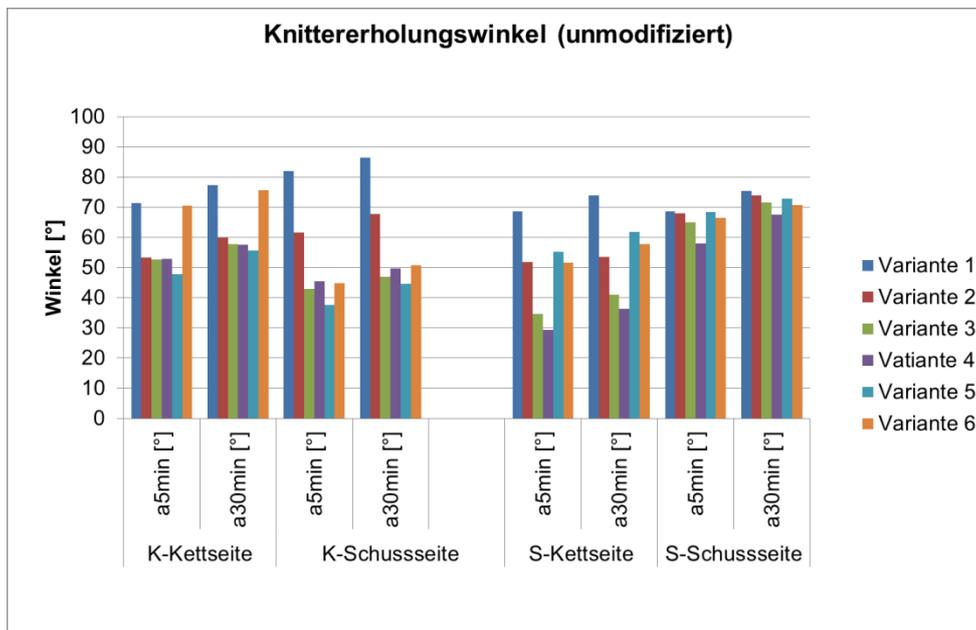


Abbildung 60: Knitterverhalten der unmodifizierten Gewebe

Die Größe des Knittererholungswinkels dient als Maß für die Erholungsfähigkeit des Materials. Je größer der Knittererholungswinkel, desto besser ist die Erholungsfähigkeit des Materials.

Bei den durchgeführten Prüfungen zeigte sich, dass sich nach 30 min Erholungszeit bei allen Materialien (Varianten 1 bis 4) und Ausrichtungen ein größerer Knittererholungswinkel einstellt.

Geringere Unterschiede der Knittererholungswinkel bei höheren Werten zwischen den Geweben (Variante 1 bis 4) ergeben sich, wenn diese in Schussrichtung zugeschnitten wurden und bei der Faltung die innen liegende Gewebeseite die Schusseite (Oberseite) ist, die gestaucht wird. Der Knittererholungswinkel und damit die Erholungsfähigkeit des Materials zeigt bei dieser Anordnung geringe Unterschiede (Abbildung 35). Die Erholungsfähigkeit ist bei dieser Prüfanordnung am größten. Variante 1 besteht sowohl in Kett- als auch in Schussrichtungen aus Monofilen. Gegenüber Variante 3 und 4 sind die Monofile von Variante 1 in Schussrichtung deutlich stärker, was zu einer Verringerung der Knitterneigung führt. Bei Variante 2 sind in Schussrichtung PET-Stapelfasergarne verarbeitet, die trotz größerer Feinheit diesen Effekt nicht in gleichem Maße bewirken.

Untersuchungen an modifizierten Geweben

Aufgrund von nur geringen Labormengen von mit Glaskugeln beauflagten Geweben (modifizierte PET-Gewebe) in der ersten Phase der Projektbearbeitung konnten vorerst nur eingeschränkte Tests zur Haftung der Glaskugeln vorgenommen werden. Die haptische/visuelle Beurteilung der kleinen Gewebeprouben (Maße der Proben: ca. 18 x 27 mm) zeigte, dass eine Anbindung von unterschiedlichen Mengen von Glaskugeln an beide Gewebe möglich ist.

24 Labormuster der modifizierten Gewebeprouben wurden visuell beurteilt. Die mikroskopischen Aufnahmen (Abbildung 61 und Abbildung 62) verdeutlichen beispielhaft die unterschiedlichen Durchmesser der Glaskugeln.

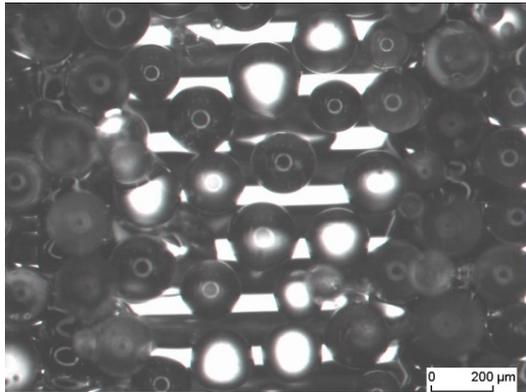


Abbildung 61: Modifiziertes PET-Gewebe schwarz

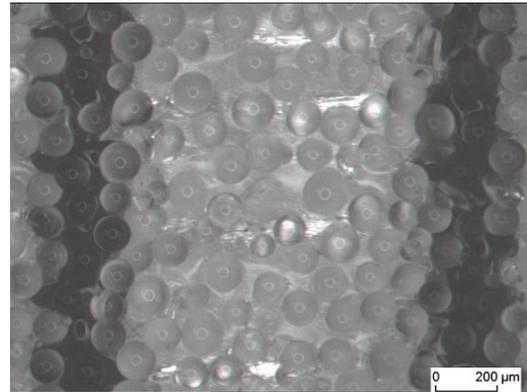


Abbildung 62: Modifiziertes PET-Gewebe weiß

Die aufgetragenen Glaskugeln führen dazu, dass das Biegeverhalten des Gewebes beeinflusst wird. Der versteifende Effekt kann in KR und SR unterschiedlich sein. Bei erhöhtem Klebstoffauftrag kann dieser auf die Rückseite der Gewebe durchdringen und die Öffnungen verschließen (Abbildung 63).

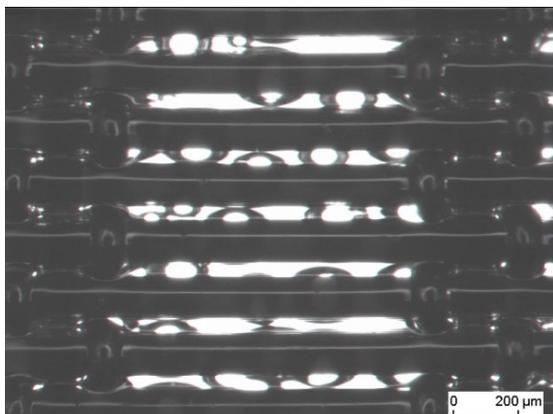


Abbildung 63: Rückseite des PET-Gewebes

Derzeit wird anhand von ausgewählten Versuchsmustern überprüft, inwieweit der Klebstoffauftrag die Luftdurchlässigkeit durch Verschließen der Öffnungen beeinflusst.

Scheuerprüfung

Für die Scheuerbeanspruchung (Martindale-Verfahren) wurden die bereits verbesserten modifizierten Gewebe nach folgenden Parametern geprüft.

Material: PET-Gewebe modifiziert, schwarz: Glaskugeln (Proben 1, 2, 3),
Bemerkungen:
- Glaskugeln sind auf Unterseite (US) des Gewebes aufgebracht
- Scheuern auf modifizierter Gewebeseite (oben im Gerät eingespannt)

Scheuermittel: US PET-Gewebe unmodifiziert, schwarz
in Anlehnung an: DIN EN ISO 12947-1 und DIN EN ISO 12947-2
Scheuerbedingungen: Scheuertouren: 10; Druck: 9 kPa;
Probendurchmesser: 38 mm

Vor und nach der Beanspruchung wurde eine visuelle Bewertung der Proben mittels Mikroskop durchgeführt und das Probenaussehen anhand von Fotos dokumentiert. In den Abbildungen Abbildung 64 bis Abbildung 69 sind die Veränderungen an drei Proben der ersten Tests zur Scheuerbeanspruchung dargestellt. Die Aufnahmen wurden mit dem Lichtmikroskop Axiotech 100 (Zeiss) und einer digital Schwarz-Weiß-Kamera (HITACHI) bei 50facher Vergrößerung angefertigt.

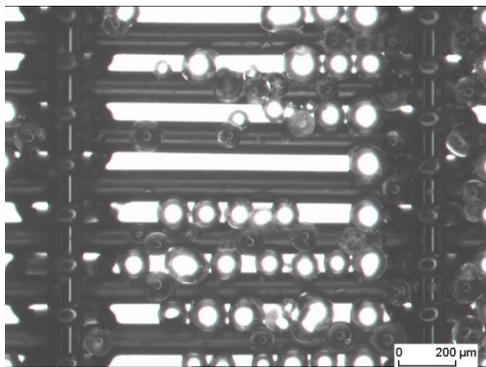


Abbildung 64: Probe 1 vor dem Scheuern

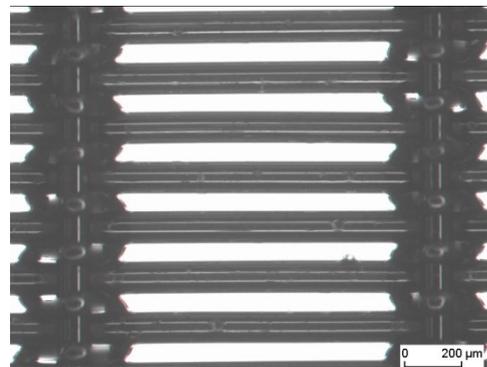


Abbildung 65: Probe 1 nach dem Scheuern

Im Ausgangszustand sind die Glaskugeln auf der Probe 1 sowohl in den Öffnungen, in den Bereichen in denen sich Kett- und Schussfadensystem verbinden, als auch vereinzelt auf den Monofilen der Schussfäden angelagert. Nach der Scheuerbelastung sind jedoch keine Glaskugeln mehr auf der Probe vorhanden. Unter dem Mikroskop sind Rückstände – vermutlich vom Klebstoff - und Abdruckstellen im Klebstoff von den Glaskugeln erkennbar (Abbildung 64, Abbildung 65). Der größte Teil der Glaskugeln befand sich nach der Scheuerbeanspruchung auf dem Scheuermittel. Eine Haftung zum Gewebe war nach der Beanspruchung kaum vorhanden.

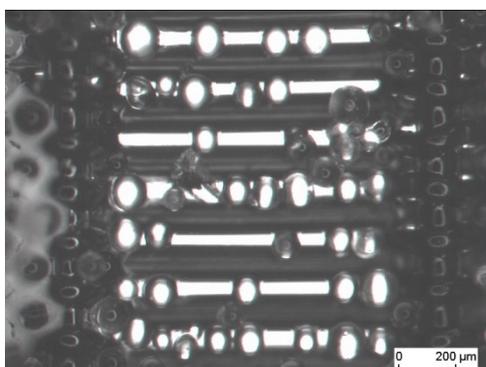


Abbildung 66: Probe 2 vor dem Scheuern

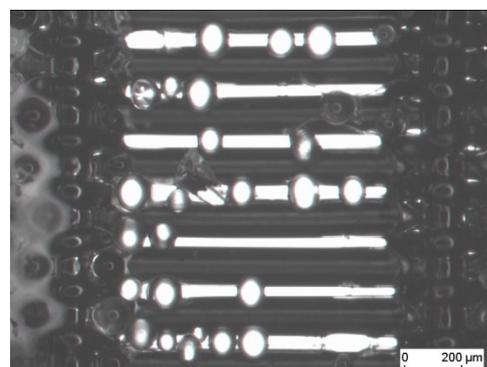


Abbildung 67: Probe 2 nach dem Scheuern

Bei Probe 2 befinden sich die Glaskugeln im unbeanspruchten Zustand der Probe ebenfalls wieder zwischen den Gewebeöffnungen (Abbildung 66). Nach der Scheuerbeanspruchung zeigte sich bei

dieser Probe, dass etwas mehr als die Hälfte der anfangs abgebildeten Glaskugeln noch auf dem Gewebe verblieben waren. Sowohl größere als auch kleinere Glaskugeln hafteten vor allem zwischen den Öffnungen und den Kreuzungspunkten der Fadensysteme (Abbildung 67). Unklar ist jedoch, ob die Öffnungen im Gewebe noch offen oder durch den transparenten Klebstoff ausgefüllt sind. Es wird vermutet, dass die Öffnungen des Gewebes durch einen Klebstofffilm abgedeckt werden.

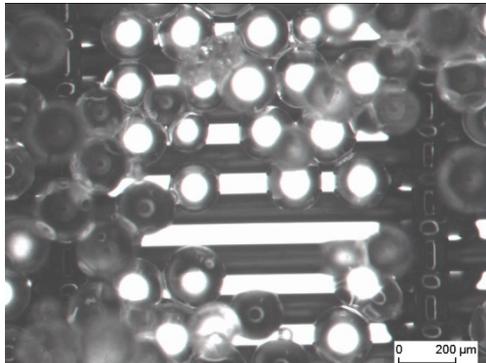


Abbildung 68: Probe 3 vor dem Scheuern

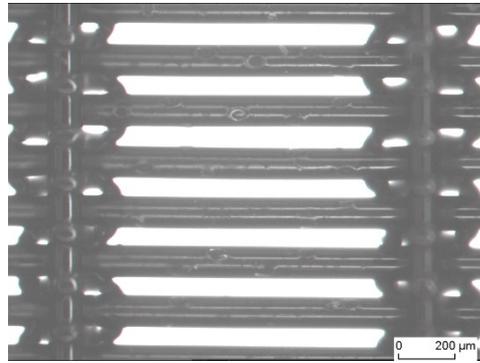


Abbildung 69: Probe 3 nach dem Scheuern

Die Bilder von Probe 3 dokumentieren ähnliches Verhalten des Materials nach Scheuern wie die bei Probe 1.

Nach der Scheuerbelastung sind im belasteten Bereich der Probe keine Glaskugeln mehr vorhanden. Im Ausgangszustand war eine hohe Bedeckung der Gewebefläche mit Glaskugeln erkennbar. Sie lagern vor allem im Bereich der Kreuzung zwischen Kett- und Schussfadensystem übereinander und können so einen guten Angriffspunkt zum Abtragen beim Scheuern liefern (Abbildung 68). Abdrücke von Glaskugeln bzw. Kratern sind in den Klebstoffrückständen auf den Monofilen erkennbar (Abbildung 69). Somit konnte an einer Probe (Probe 2) eine Haftung der Glaskugeln nach der Beanspruchung nachgewiesen werden.

Im weiteren Verlauf der Projektbearbeitung wurde die Beschichtung mit Glaskugeln durch eine Beschichtung mit photochromen Nano-Partikeln ersetzt. An den mit photochromen Partikeln beschichteten Geweben der Gewebe-Varianten 2 und 4 (vgl. Tabelle 8) wurde unter den gleichen Beanspruchungsbedingungen, wie an den mit Glaskugeln beauflagten Geweben (10 Scheuertouren, 9 kPa Druck), Scheuerprüfungen durchgeführt und die angegebenen Massenangaben sind Absolutwerte.

Die Abbildungen Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen anhand der Probengewichte der ungescheuerten Proben die auf die Materialien Variante 2 und 4 aufgetragenen Mengen von Beschichtung. Aufgrund der unterschiedlichen Flächengewichte der unbeschichteten Gewebe (Variante 2 – 152,9 g/m²; Variante 4 – 71,4 g/m²) unterscheiden sich die Probengewichte der Scheuerprüflinge bereits deutlich (Abbildung 71).

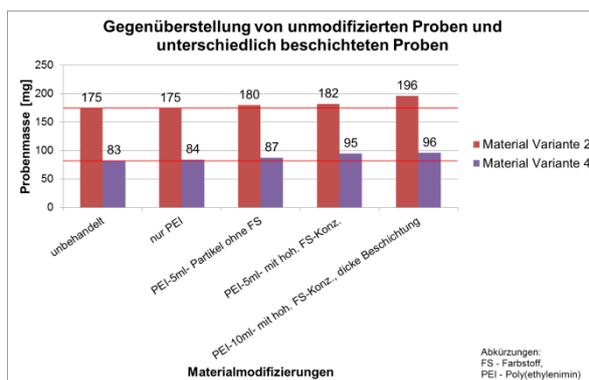


Abbildung 70: Probengewichte der unbehandelten und beschichteten Proben, **ungescheuert**

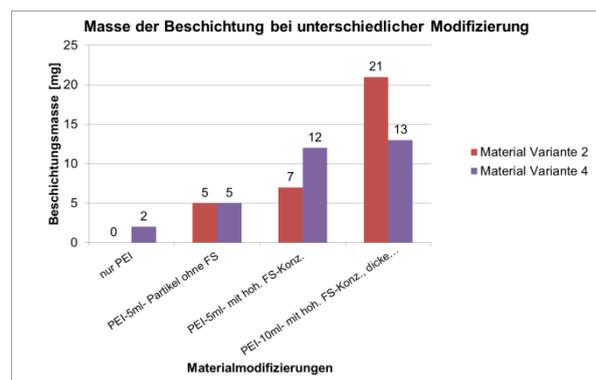


Abbildung 71: Berechnete Masse der Beschichtung je Beschichtungsvariante, **ungescheuert**

Die Menge der aufgetragenen Beschichtung wurde rechnerisch durch die Bildung der Differenz zwischen der jeweiligen beschichteten Probe und der unbeschichteten Probe gebildet. In Abbildung 70 sind diese Ergebnisse für die Gewebe-Varianten 2 und 4 abgebildet. Wird davon ausgegangen, dass je Beschichtungsvariante gleiche Mengen Beschichtungsmaterial appliziert wurden, so zeigt sich, dass auf Gewebe-Variante 2 eine höhere Menge an Beschichtung vorhanden ist. Ursachen dafür kann zum einen im unterschiedlichen Schussfadenmaterial und dessen Eigenschaften (Gewebe-Variante 2 – Fasergarn; Gewebe-Variante 4 – Monofil) und zum anderen der unterschiedlichen Schussfadendichte (Gewebe-Variante 2 – 41,6 Fd/cm; Variante 4 – 62,3 Fd/cm) zu suchen sein. Trotz höherer Schussfadendichte bei Gewebe-Variante 4 (Monofil) wird dort weniger Beschichtungsmaterial angelagert. Das verwendete Fasergarn in Variante 2 bietet demgegenüber vermutlich mehr Faseroberfläche zur Anlagerung und zum Rückhalt der Beschichtung. Unterschiede der Geschlossenheit der beiden nicht beschichteten Gewebe-Varianten bilden sich auch bei deren Prüfwerten der Luftdurchlässigkeit (Gewebe-Variante 2 – 99,7 mm/s; Variante 4 – 4056,8 mm/s) ab. Gewebe-Variante 2 setzt dem Luftstrom mehr Widerstand entgegen, es wird weniger Luft durchgelassen (siehe auch Tabelle 8).

Die Bewertung der Haftung der Beschichtung auf den Gewebeoberflächen nach der Scheuerbeanspruchung erfolgte visuell und anhand der Ermittlung des Masseverlustes (in Anlehnung an DIN EN ISO 12947-3) eines Prüflings durch Wiegen der Probe vor und nach dem Scheuern.



Abbildung 72: Variante 2 nach Scheuern
(PEI-5ml- mit hoh. FS-Konz.)



Abbildung 73: Variante 2 nach Scheuern
(PEI-10ml- mit hoh. FS-Konz., dicke Beschichtung)



Abbildung 74: Variante 4 nach Scheuern
(PEI-5ml- mit hoh. FS-Konz.)



Abbildung 75: Variante 4 nach Scheuern
(PEI-10ml- mit hoh. FS-Konz., dicke Beschichtung)

In den Abbildungen Abbildung 72 bis Abbildung 75 sind die gescheuerten Probe von Gewebe-Variante 2 und 4, beschichtet mit Poly(ethylenimin) (PEI) – 5 ml – mit hoher Farbstoff(FS)-Konzentration

(Abbildungen Abbildung 72 und Abbildung 74) und PEI – 10 ml – mit hoher FS-Konzentration und dicker Beschichtung (Abbildungen Abbildung 73 und Abbildung 75) zur Verdeutlichung der Auswirkung des Scheuerns gegenübergestellt. Der farbige Ring am Außenrand der Probe umschließt die gescheuerte Fläche. Seine Farbigkeit lässt den Zustand der Probe vor der Scheuerbelastung erkennen. Dieser Teil der Probe wurde nicht durch Scheuern belastet. Die Probe war auf in diesem Bereich im Probenhalter eingespannt.

Beide Gewebe-Varianten wurden mit der Rückseite (Gewebeunterseite) des jeweiligen unbehandelten Gewebes (Scheuermittel) gescheuert. Damit sollte die reibende Beanspruchung beim Aufrollen einer Markise nachempfunden werden.

Die Ergebnisse des Masseverlustes durch Scheuern an den unbehandelten und modifizierten Gewebeprobe veranschaulichen Abbildung 76 und Abbildung 77. Bereits bei der unbehandelten Gewebeprobe zeigt sich ein Masseverlust durch das Scheuern unter den angewendeten Bedingungen. Fast immer wird durch die Scheuerbeanspruchung bei Gewebe-Variante 4 mehr Beschichtungsmaterial abgetragen als bei Gewebe-Variante 2, trotz größerer Auftragsmengen bei Gewebe-Variante 2.

Für die Scheuerversuche nach dem Martindale-Verfahren wurde die geringstmögliche Belastung gewählt – Nenndruck $p = 9 \text{ kPa}$ -, was lt. DIN EN ISO 12947-3 einer effektiven Scheuerbelastung von $595 \pm 7 \text{ g}$ für Oberbekleidung und Haushalttextilien entspricht, um die Beschichtung wenig zu beschädigen. Demgegenüber ist für Berufsbekleidung, Polsterbezugsstoffe, Bettwäsche und **textile Flächengebilde für technische Anwendungen** in der Norm ein Nenndruck von 12 kPa ($795 \pm 7 \text{ g}$) vorgesehen, also eine höhere Belastung als angewendet. Auch die Anzahl der Scheuertouren wurde weit unter der in der Norm festgelegten Anzahl vereinbart, da das Ziel nicht die Zerstörung der Probe war. Es sollte überprüft werden, ob die Beschichtung auf den Geweben haften bleibt.

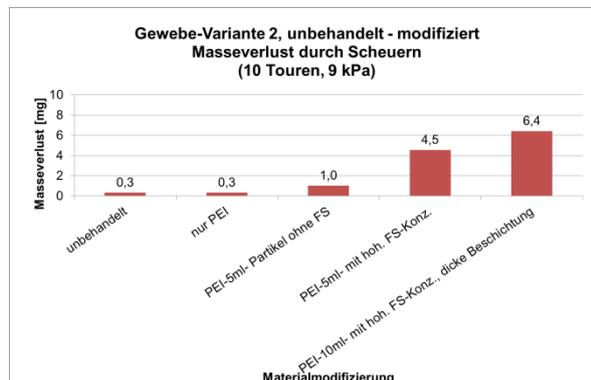


Abbildung 76: Masseverlust an Gewebe-Variante 2

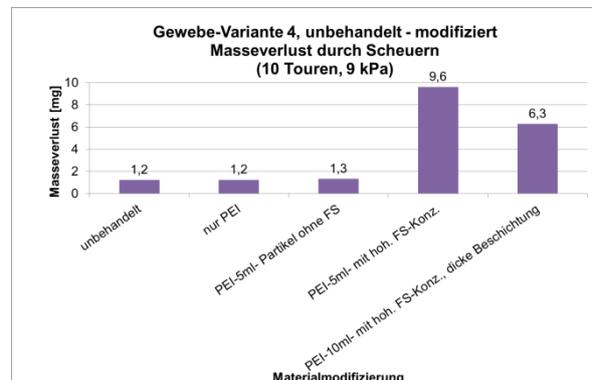


Abbildung 77: Masseverlust an Gewebe-Variante 4

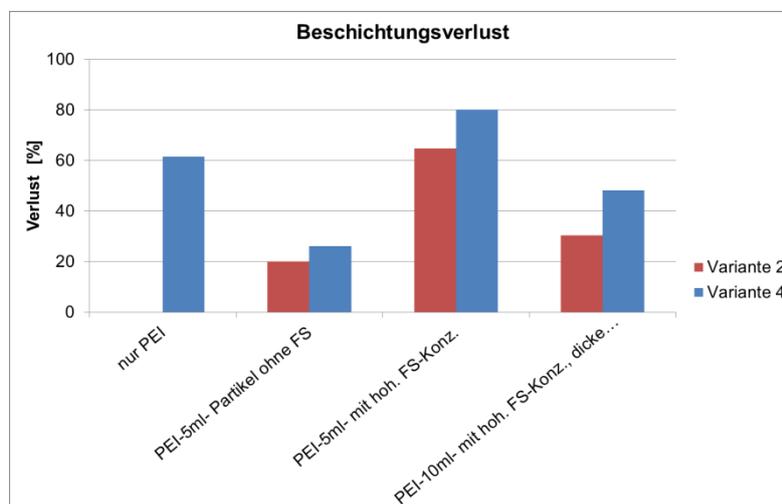


Abbildung 78: Prozentualer Verlust durch Scheuern an unterschiedlich beschichteten Proben

Die Abbildungen Abbildung 76 bis Abbildung 78 veranschaulichen den Masseverlust an Beschichtung durch das Scheuern unter den angewendeten Bedingungen. Erfolgt eine Betrachtung der prozentualen Verluste durch Scheuern (Abbildung 78), so lässt sich schlussfolgern, dass die Beschichtungsmaterialien besser an einem Gewebe mit faserhaltigen Garnanteilen haften, als an einem glatten, nur aus Monofilen bestehenden Gewebe (Gewebe-Variante 2 mit Polyesterstapelfasergarn im Schuss; Gewebe-Variante 4 nur aus Monofilen bestehend).

Die geringe Haftung bzw. eine überdimensioniert hohe Beschichtungsauflage ist auch bei der Handhabung der Proben beider Gewebe-Varianten zu bemerken. Beschichtungspartikel gehen beim Anfassen der Proben leicht auf die Haut der Finger über. Die bisherigen Untersuchungen sollten mit verbesserter Beschichtungstechnologie fortgesetzt und erweitert werden, um eine ausreichend haftende und gleichmäßig Beschichtung zu erzielen.

5.6.2 Konfektionierung – Auswahl Fügeverfahren

Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik der TU Dresden

Die Überführung textilbasierter Materialien in Produkte erfolgt durch konfektionstechnische Fügeprozesse wie Schweißen, Kleben oder das textiltypische Nähen, wobei letzteres oft den vielfältigen Ansprüchen an eine realisierte Fügestelle - keine Unterbrechung der Funktionalität der Flächengebilde oder gar Schwachstellen während der Gebrauchsphase des konfektionierten Produktes - nicht genügt. Deshalb werden zunehmend alternative Fügeverfahren wie Schweißen und Kleben zur Realisierung stoffschlüssiger Verbindungen eingesetzt, um speziellen Anforderungen, u. a. Fluid- und Keimdichtheit, gerecht zu werden.

Im Rahmen der Projektbearbeitung wurde aus diesem Grund neben dem Nähen das Ultraschallschweißverfahren an den aufgeführten Materialien getestet.

Nähen

Das Verbindungsverfahren Nähen wird als textiltypisches Verfahren zum Verbinden und Kantenfixieren von Zuschnittteilen eingesetzt und kommt sowohl zur Endproduktfertigung von Bekleidungstextilien als auch von Technische Textilien zur Anwendung. Nähnähte können durch eine Vielzahl von verschiedenen Nähentypen, die eine Aneinanderreihung von Nähstichtypen in einem oder mehreren Nähgutteil(en) umfassen, hergestellt werden. Aufgabe des Nähens ist es, eine optimale Verbindung für die jeweilig eingesetzten Materialien und eine anforderungsgerechter Nahtfunktion zu gewährleisten. Der Gebrauchswert einer Nahtverbindung wird durch die Eignungs- und Beständigkeitseigenschaften und das Aussehen bestimmt. Zur Beurteilung der Eignung einer Nähnahtverbindung dienen Nahtquerreißfestigkeit und Nahtlängsdehnfähigkeit. Beide Kriterien werden durch eine beträchtliche Anzahl von ineinandergreifenden Parametern beeinflusst (z. B. Nähgarnfestigkeit und -dehnung, Schlingenzugfestigkeit, Stichdichte, Stich- und Nahttyp, Nahtkonstruktion, Gewebeschiebefestigkeit) ^[5].

Aufgrund der Vielschichtigkeit der Einflüsse und des eingeschränkten Zeitrahmens beschränkten sich die Tests auf die wesentlichsten Parameter und die unmodifizierten Gewebe-Varianten. Die Beurteilung der Nahtqualität der verwendeten Nahtkonstruktion wurde visuell durchgeführt.

Beschichtete Gewebe kamen noch nicht zur Anwendung, da bei deren Verarbeitung, auf Grund der noch zu optimierenden Haftung der Farbstoffe, Abrieb durch Transporteur und Nähfuß zu erwarten war. Gelangen Partikel in die komplexe Mechanik der Nähmaschinen, kann das zu Störungen im Stichbildungs- und Transportprozess der Maschinen führen.

Bei den Versuchen wurden folgender Einflussgrößen variiert:

Gewebe-Varianten:	1, 2, 4, 5 (unmodifiziert)
Nähstichtyp:	Doppelstepstich (DSS)
Nähmaschinenteknik:	Brother 2-Nadel-DSS-Nähmaschine (Abbildung 79) Pfaff 1-Nadel-DSS mit Untertransport (UT) (Abbildung 80) Pfaff 1-Nadel-DSS mit Ober (OT)- und Untertransport

Nähnahttyp:	301
Nähgarn:	Saba 80 (HZK 2100 cN) ⁵
Nähnadel:	100 NM (Brother) 80 NM (Pfaff)

Die Ergebnisse der Nähversuche können wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Fügen mittels Nähen war für alle getesteten Gewebe-Varianten 1, 2, 4, 5, möglich.
- Bei der gleichzeitigen Verwendung von OT und UT kam es zu Transporteurspuren auf den aus Monofilen hergestellten Geweben (Abbildung 81). Besonders deutlich zeichnet sich das bei der Verarbeitung in SR ab. Die Versuche wurden in Folge nur mit einer Nähmaschine mit Untertransport fortgeführt.
- Bei der Verarbeitung in KR wurde bei allen Gewebe-Varianten eine Verdrängung der Schussfäden (SF) an der Einstichstelle der Nähnadel beobachtet, schlitzförmige Einstiche sind deutlich erkennbar (Abbildung 82). Das Verändern von Stichlänge und Nadelfeinheit könnte hier Abhilfe schaffen.
- Die Zerstörungen oder Schädigung der Kett(KF)- bzw. Schussfäden (SF) durch das Einstechen der Nähnadel konnte bei keinem der Versuche festgestellt werden.
- Die optisch besten Nähergebnisse wurden bei allen Gewebe-Varianten in SR erzielt (Abbildung 79 und Abbildung 80).



Abbildung 79: Gewebe-Variante 5-SR, Brother, DSS, UT



Abbildung 80: Gewebe-Variante 4-SR, Pfaff, DSS, UT

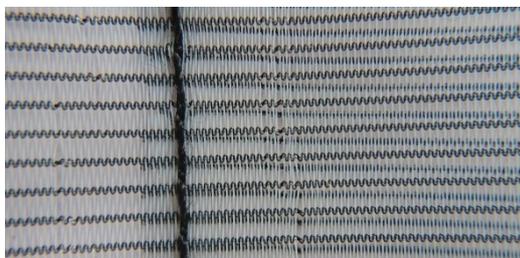


Abbildung 81: Gewebeschädigung durch OT (Gewebe-Variante 4-SR, Pfaff, DSS, OT und UT)



Abbildung 82: Verdrängte SF durch den Einstich der Nadel (Gewebe-Variante 4-KR, Pfaff, DSS, UT)

Schweißen

Aufgrund der Tatsache, dass weltweit ca. zwei Drittel aller Technischen Textilien (bezogen auf die Gesamtmasse) eine thermoplastische Faserstoff- bzw. Beschichtungsbasis aufweisen, stellen die thermischen Fügeverfahren, auch als „Textilschweißen“ bezeichnet, eine besonders günstige Alternative dar. Die Verbindung der zu fügenden Materialien wird unter Ausnutzung der Thermoplastizität durch Wärme und Druck in Takt- oder kontinuierlicher Arbeitsweise erzielt. Je nach Verfahren wird die zur Aufschmelzung nötige Wärmeenergie mittels Heißluft, Ultraschall, Laserstrahlen, elektrischer Hochfrequenzfelder oder beheizter Kontaktflächen zugeführt, wobei verfahrensspezifisch unterschiedliche Wirkprinzipien der Wärmeübertragung unmittelbar in der Fügezone zugrunde liegen.

Im Vergleich zu den anderen thermischen Fügeverfahren ist das Ultraschallschweißen ein universelles und umweltfreundliches Verfahren und für eine Vielzahl von Funktionsstoffen und Textilmembranen, die geringfügig nichtthermoplastische Polymeranteile enthalten dürfen, einsetzbar, da keine Einschränkung hinsichtlich der Eigenschaften der thermoplastischen Fügepartner (z. B.

⁵ Herstellerangabe

Verlustfaktor, Emissionsgrad) besteht und eine kontinuierliche Verarbeitung Technischer Textilien mit hohen Produktionsgeschwindigkeiten möglich ist. Wie bei allen Schweißverfahren sind die Prozessparameter zur Druck- und Spalteinstellung sowie der Energieeintrag beim kontinuierlichen Ultraschallschweißen empirisch auf das zu verarbeitende Material und seine Lagenanzahl abzustimmen. Für die Qualität der (ultraschall-)geschweißten Fügeverbindungen und somit den Gebrauchswert der Endprodukte sind an das Material angepasste thermische und mechanische Verhältnisse unmittelbar in der Wirkpaarung des Fügebereiches von entscheidender Bedeutung. Die im Bereich der Fügezone auf molekularer Ebene ablaufenden Vorgänge Erwärmen, Deformieren, Schmelzen, Fließen, Verbinden, Abkühlen und Erstarren, besitzen wesentlichen Einfluss auf das thermomechanische Bindeverhalten zwischen den gleichartigen oder ungleichartigen polymeren Fügepartnern.

Die Schweißversuche im Rahmen der Bearbeitung des Teilprojektes erfolgten in erster Linie an unmodifizierten Gewebe-Varianten.

Die Versuche wurden mit folgender Maschinenteknik und deren veränderbare Prozessparameter durchgeführt:

Schweißmaschine: Ultraschall-Schweißmaschine Pfaff 8310 (Abbildung 83)
 Breite des Ambossrades: 3 mm
 Prozessparameter: Abstand zwischen Sonoden- und Amboss-Rad,
 Druck im Fügespalt,
 Ultraschall-Intensität,
 Geschwindigkeit

Gewebe-Variante	Verarbeitungsrichtung	Abstand [mm]	Druck [bar]	Ultraschall-Intensität [%]	Geschwindigkeit [dm/min]
1	KR	0,2	3	93	10
	SR	0,25	3	50	10
2	KR	0,25	3	57	10
	SR	0,3	3	67	10
2, beschichtet	KR	0,25	3	57	10
	SR	0,3	3	67	10
4	KR	0,14	3	61	10
	SR	0,14	3	61	10
4, beschichtet	KR	0,14	3	61	10
	SR	0,14	3	61	10
5	KR	0,2	3	93	10
	SR	0,2	3	67	10

Tabelle 39: Ermittelte Prozessparameter beim Fügen mittels Schweißen

Die an unmodifizierten Gewebe-Varianten ermittelten Prozessparameter wurden auch an den jeweils beschichteten Geweben (Gewebe-Variante 2 und 4) getestet und bei Beibehaltung dieser Parameter als schweißbar beurteilt.



Abbildung 83: Ultraschall-Schweißmaschine, Pfaff 8310

Folgende Ergebnisse konnten durch die Schweißversuche ermittelt werden:

- Gewebe-Variante 1 - mit hoher Intensität in KR schweißbar
- Gewebe-Variante 2 - in KR und SR schweißbar, auch beschichtet
- Gewebe-Variante 4 - in KR und SR schweißbar, auch beschichtet
- Gewebe-Variante 5 - in KR und SR schweißbar

Die Abbildungen Abbildung 84 und Abbildung 85 zeigen beispielhaft die Schweißnähte hergestellt an Gewebe-Variante 2 (unmodifiziert) mit dem Polyesterstapelfasergarn in KR und SR. In den Abbildungen Abbildung 86 und Abbildung 87 sind die Schweißergebnisse der Monofil-Gewebe-Variante 4 als unmodifiziertes und beschichtetes Muster in SR geschweißt zu sehen.

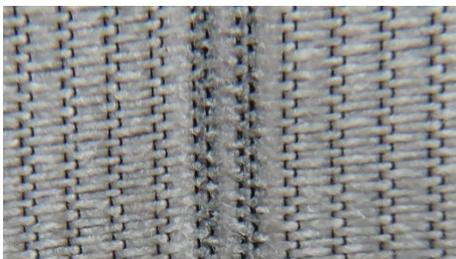


Abbildung 84: Gewebe-Variante 2, KR

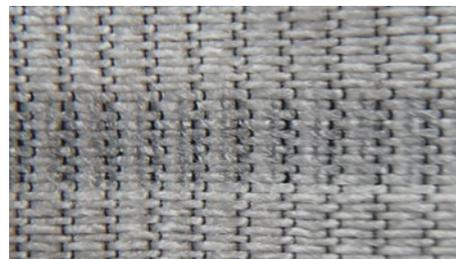


Abbildung 85: Gewebe-Variante 2, SR

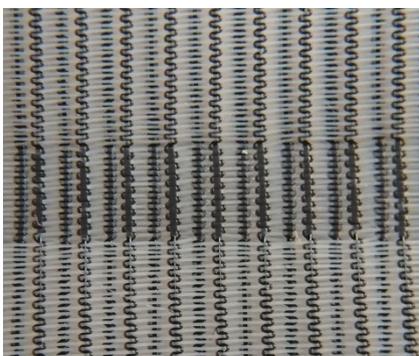


Abbildung 86: Gewebe-Variante 4, SR

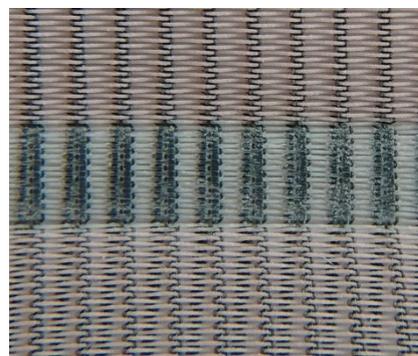


Abbildung 87: Gewebe-Variante 4, beschichtet, SR

Die Prozessparameter (Tabelle 39), die beim Schweißen des unmodifizierten Gewebes ermittelt wurden, konnten auch bei den beschichteten Materialien angewendet werden. Daraus kann geschlossen werden, dass die verwendeten Beschichtungen sich nicht nachteilig auf die Schweißbarkeit der Gewebe-Varianten auswirkt.

Eine wertmäßige Beurteilung der Haltbarkeit der Näh- und der Schweißnähte kann anhand von Nahtfestigkeitsprüfungen quer zum Nahtverlauf (Nahtquerfestigkeit für Nähnähte - DIN EN ISO 13935-1 bzw. mittels Schälversuch für Schweißnähte (DIN EN 12814-4) ermittelt werden und Aufschluss darüber liefern, ob sich eine ausreichende Verbindung erzielen lässt. Sowohl für unmodifizierte wie auch für beschichtete Gewebe-Varianten konnten aufgrund von Zeit- und Materialmangel entsprechende Versuche nicht durchgeführt werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Bewertung der Zielerreichung

Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines strahlungsadaptiven Markisengewebes mit folgenden Eigenschaften für Blendschutz, Lichttransmission, Transparenz, Farbwiedergabe und Wärmeschutz.

Blendschutz

Ziel: Sowohl im Winter als auch im Sommer sollte der Blendschutz relativ konstant sein. Es wird eine Begrenzung der Leuchtdichte auf 3.000 cd/m^2 angestrebt.

Die Leuchtdichtebegrenzung kann einerseits durch das Gewebe selbst und andererseits durch die Verfärbung der Beschichtung erreicht werden. Die Messungen ergaben, dass die Verfärbung nur einen geringen Anteil an der Leuchtdichtebegrenzung hat. Der wesentliche Anteil wird durch den Öffnungsgrad des Gewebes (Flächenanteil der lichtdurchlässigen Gewebeöffnungen) bestimmt. Dieser ergibt sich aus der Dichte der Kettfäden (vertikal) und Schussfäden (horizontal), d. h. der Anzahl Fäden pro cm. Die untersuchten Gewebe hatten alle eine Kettfadendichte von $17,5 \text{ Fd/cm}$. Die Schussfadendichte lag zwischen 26 Fd/cm ($\beta 25$) und 62 Fd/cm ($\beta 60$). Die Kettfäden bestehen aus schwarzem PET-Monofil und die Schussfäden aus schwarzem oder transparenten PET-Monofil sowie aus PET-Stapelfasern (Ettlin weiß, Ettlin $\beta 35$ und Ettlin $\beta 25$). Die Monofile bestehen aus einem Faden und die Stapelfasern aus mehreren verdrehten Fasern. Letztere faser leicht aus, so dass die Gewebeöffnungen etwas verringert werden und gleichzeitig vergrößert sich die Fläche an der die Farbstoffpartikel anhaften können.

Die Berechnung der Leuchtdichte ergab in Abhängigkeit vom Öffnungsgrad Werte zwischen 2.500 cd/m^2 und 6.000 cd/m^2 . Für weiterführende Untersuchungen wird das Gewebe „Ettlin $\beta 35$ “ empfohlen.

Lichttransmission

Ziel: Unter Berücksichtigung der Blendschutz-Ziele wird ein Transmissionsgrad des sichtbaren Strahlungsanteils (Wellenlängen zwischen 380 und 780 nm) von mindestens 30 % angestrebt.

Die Messungen ergaben für den Lichttransmissionsgrad im unbestrahlten Zustand Werte zwischen 20 und 50 %. Im bestrahlten (aktivierten) Zustand veränderte sich der Lichttransmissionsgrad um 15 bis 20 %.

Die Veränderung der Lichttransmission ist zu gering. Ursache dafür ist eine zu geringe Farbstoffmenge. Diese kann einerseits durch den Mengenanteil in der Lösung, die auf das Gewebe gesprüht wird, und andererseits durch den Gewebeanteil pro Markisenfläche beeinflusst werden.

Zur Veranschaulichung sind die Einflussgrößen in der folgenden Tabelle dargestellt.

Parameter	Ettlin schwarz	Ettlin weiß	Ettlin $\beta 60$	Ettlin $\beta 55$	Ettlin $\beta 35$	Ettlin $\beta 25$
Schussfadenfarbe	schwarz	weiss	transparent	transparent	weiss	weiss
Schussfadenfeinheit [tex]	20,6	30,3	10,7	10,7	30,3	30,3
Schussfadendichte [Fd/cm]	55,4	41,6	62,3	57,2	36,0	26,0
Luftdurchlässigkeit [mm/s] bei Differenzdruck 50 Pa	1.531	100	4.057	4.731	377	1.735

Tabelle 40: Gewebemerkmale mit Einfluss auf die Lichttransmission

Den größten Einfluss auf die Lichttransmission hat an erster Stelle die Schussfadenfeinheit (Fadendicke einschließlich Bauscheffekt) und an zweiter Stelle die Schussfadendichte. Einen geringen Anteil hat die Schussfadenfarbe. Die Luftdurchlässigkeit ist in diesem Fall ein besseres Maß für den Lichttransmissionsgrad als der Öffnungsgrad. Für weiterführende Untersuchungen wird das Gewebe „Ettlin $\beta 35$ “ empfohlen.

Transparenz (Durchsicht nach außen)

Ziel: Es wird ein Transparenzgrad von mindestens 30 % angestrebt.

Der qualitative Vergleich der Transparenz der unbeschichteten und beschichteten sowie unbestrahlten und bestrahlten Funktionsmuster „Ettlin $\beta 35$ “ lässt keinen signifikanten Unterschied erkennen.

Der Transparenzgrad ist von beiden Seiten (von innen nach außen sowie von außen nach innen) etwa gleich und entspricht annähernd dem Lichttransmissionsgrad von 25 bis 32 %. Die Beschichtung beeinflusst die Durchsicht nur sehr gering.

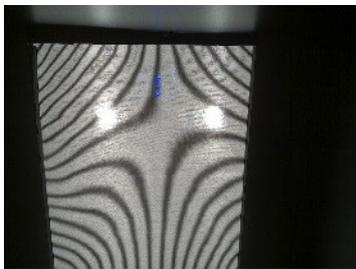


Abbildung 88: Durchsicht „Ettlin $\beta 35$ “ ohne Beschichtung und ohne Bestrahlung

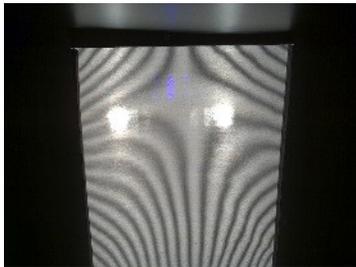


Abbildung 89: Durchsicht „Ettlin $\beta 35$ “ ohne Beschichtung und mit Bestrahlung von 1.000 W/m²

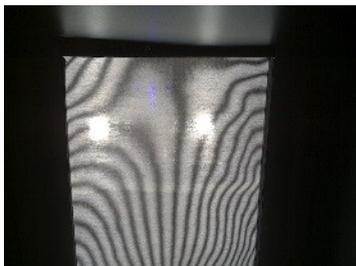


Abbildung 90: Durchsicht „Ettlin $\beta 35$ “ mit Beschichtung und ohne Bestrahlung



Abbildung 91: Durchsicht „Ettlin $\beta 35$ “ mit Beschichtung und mit Bestrahlung von 1.000 W/m²

Farbwiedergabe

Ziel: Es wird ein Farbwiedergabeindex $R_a \geq 80$ angestrebt.

Der Farbwiedergabeindex ist dafür vorgesehen, eine quantitative Bewertung der Farbunterschiede zwischen acht Prüffarben zu ermöglichen, die direkt von der Normlichtart D_{65} und anschließend von derselben Lichtart durch eine Sonnenschutzeinrichtung hindurch beleuchtet werden.

Die Veränderung der Farbwiedergabe durch transparente Gewebe (Screens) ist i. d. R. gering, da der diffuse Lichttransmissionsanteil (Lichttransmission durch den Faden und Reflektion an den Fadenrändern) wesentlich geringer ist als der direkte Lichttransmissionsanteil.

Der Farbwiedergabeindex wurde für die Funktionsmuster nicht messtechnisch bestimmt, da die unbeschichteten Gewebe keine qualitativ erkennbaren Farbveränderungen im Innenraum erkennen ließen und die beschichteten Gewebe mit einem Farbstoff modifiziert wurden, der sich nach der Bestrahlung „lila“ färbt. Dieser Farbstoff wurde zur besseren Erkennbarkeit der Verfärbung gewählt. Für weiterführende Untersuchungen sollte analog der Messkampagne 5 ein hellgrauer Farbstoff gewählt werden. Damit ist eine Verringerung des Farbwiedergabeindex unter einen Wert von 80 nicht zu erwarten.

Wärmeschutz

Ziel: Für den Winterfall (Nutzung solarer Wärmegewinne) wird ein Verschattungsgrad/Abminderungsfaktor (F_c) von 0,4 angestrebt und für den Sommerfall (Vermeidung solarer Wärmeeinträge) wird ein F_c -Wert von 0,2 angestrebt.

Die Strahlungsleistung der Sonne beträgt in Deutschland standortabhängig 900 - 1.200 W/m^2 .

Im Durchschnitt ergeben sich in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Bewölkung folgende Strahlungsleistungen.

Wettersituation	Sommer [W/m^2]	Winter [W/m^2]
Sonnenschein, klarer bis leicht diffuser Himmel	600 – 1.000	300 – 500
Sonnenschein, leichte bis mittlere Bewölkung	300 – 600	150 – 300
stark bewölkt bis neblig-trüb	100 – 300	50 – 150

Tabelle 41: Durchschnittliche Strahlungsleistungen der Sonne in Deutschland in Abhängigkeit vom Himmel

Im Winter, das heißt in der Heizperiode, hat ein außenliegender Sonnenschutz nur an wenigen Tagen die Funktion den Wärmeeintrag der Sonnenstrahlung zu verhindern, sondern wirkt vorwiegend als Blendschutz (wenn kein zusätzlicher innenliegender Blendschutz vorhanden ist).

Die Strahlungsleistungen im Winter haben gemäß Tabelle 39 und unter Berücksichtigung des nicht senkrechten Sonneneinfalls (trotz flachen Sonnenstandes) eine Größenordnung, die ein strahlungsadaptives Verhalten des Sonnenschutzes nur in der Übergangszeit (April/Mai und September/Okttober) benötigt. Daher kann der Verschattungsgrad maßgeblich durch Wahl des Markisengewebes beeinflusst werden.

Die Abbildung 67 zeigt die Änderung des F_c -Wertes der PET-Gewebe, die mit zwei verschiedenen Farbstoffmengen (5 ml und 10 ml) beschichtet und mit dem Sonnensimulator bis zu einer Strahlungsleistung von 1.000 W/m^2 bestrahlt wurden.

Das PET-Gewebe „Ettlin $\beta 35$ “ hat bei 400 W/m^2 einen F_c -Wert von ca. 0,48. Dieser sinkt bei 1.000 W/m^2 auf ca. 0,35. Die Wirkung der phototropen Beschichtung ist erkennbar. Die Abminderung um 27 % entspricht noch nicht dem Zielwert von 50 % (F_c -Änderung von 0,4 auf 0,2).

Die Verbesserung des Ergebnisses kann erreicht werden, wenn gemäß 5.3.2 auch die Gewebezwischenräume mit dem phototrop ausgerüsteten Polymer ausgefüllt werden und somit eine Folie bilden.

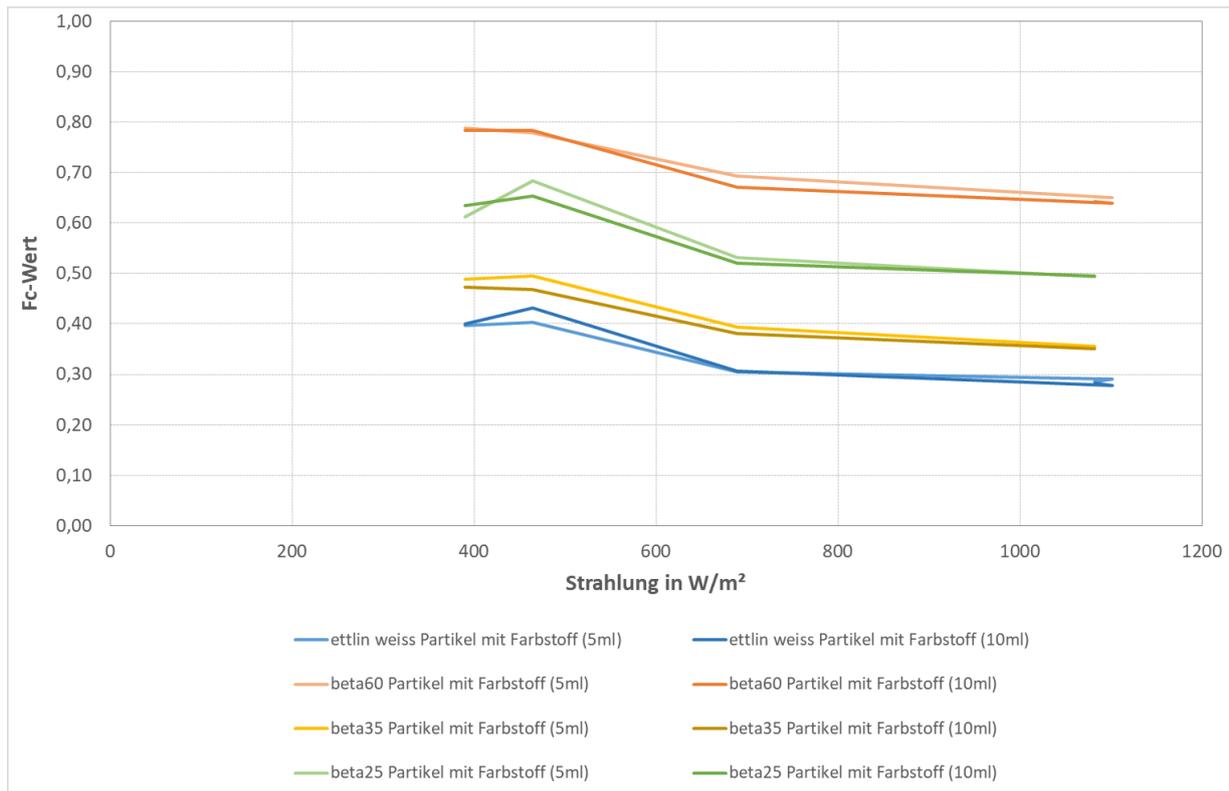


Abbildung 92: F_c -Wert beschichteter und bestrahlter Prüfmuster

Zur Abschätzung der Wirkung einer Folie in den Gewebezweischenräumen, wurde aus der phototrop ausgerüsteten Polymersuspension eine Folie ohne textilen Träger hergestellt und ebenso messtechnisch mit folgenden Ergebnissen untersucht.

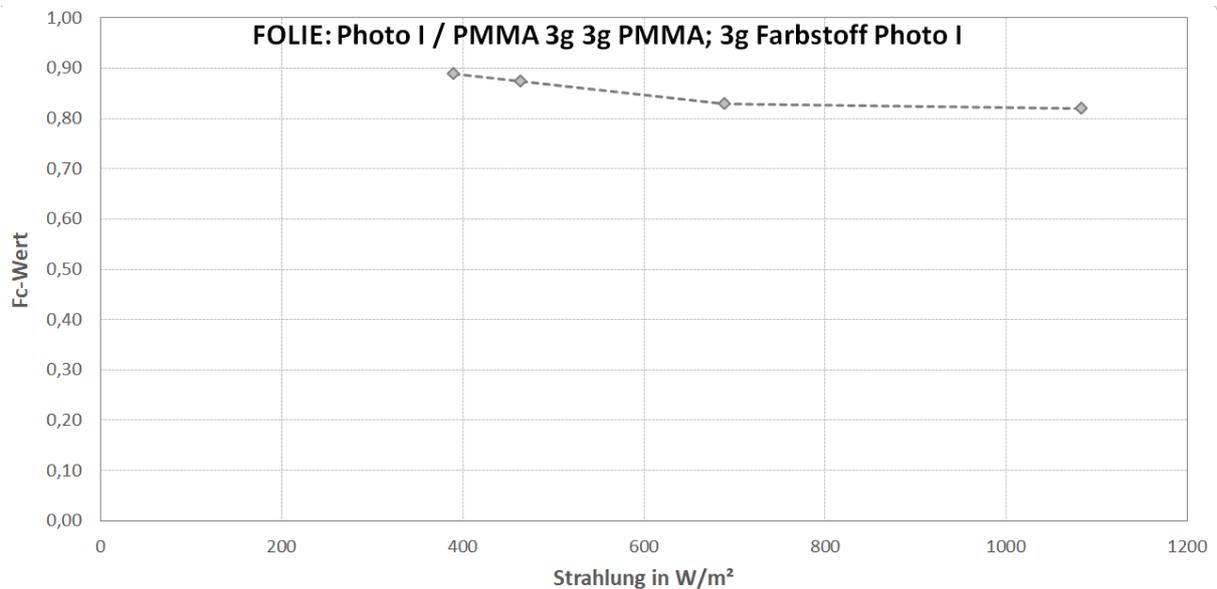


Abbildung 93: Veränderung des F_c -Wertes einer Folie aus einem phototrop ausgerüsteten Polymer

Die Änderung des F_c -Wertes beträgt ca. 10 %, so dass damit das Ergebnis der beschichteten PET-Gewebe verbessert werden könnte.

Bei der Lichttransmission ergaben sich wesentlich größere Unterschiede, die in Abbildung 94 dargestellt sind.

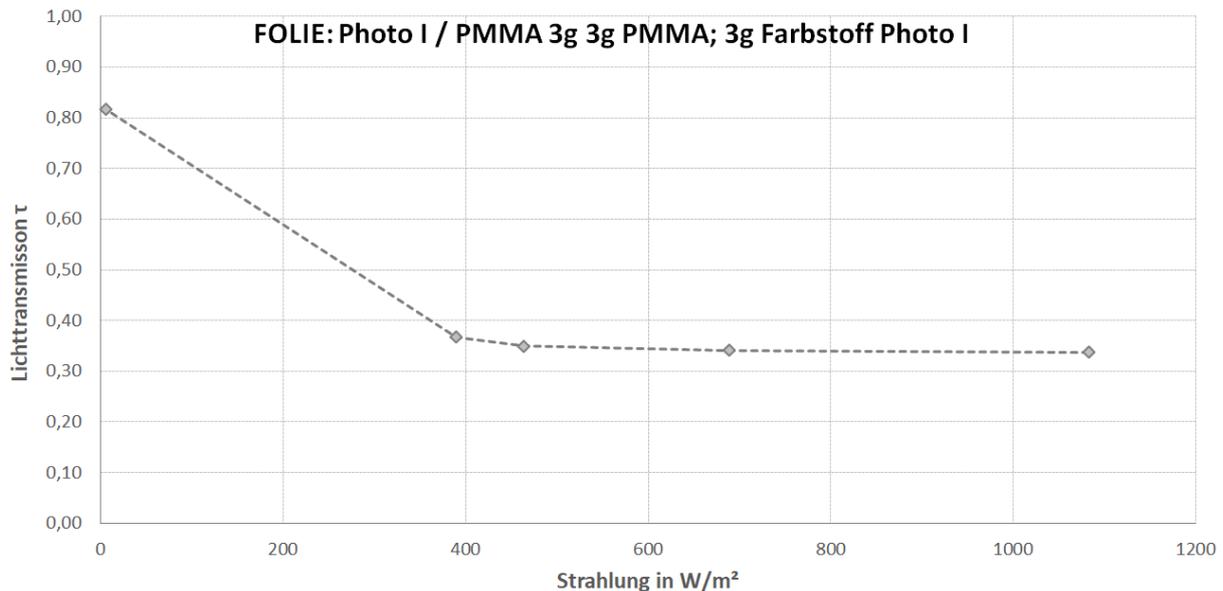


Abbildung 94: Veränderung der Lichttransmission einer Folie aus einem phototrop ausgerüsteten Polymer

6.2 Verwertung der Ergebnisse und weiterführende Entwicklungen

Aus Sicht der Forschungsgruppe und des Praxispartners werden die Ergebnisse positiv bewertet. Die Funktionalisierung von schwer modifizierbaren PET-Geweben mit Nanopartikeln, die zuvor eine Modifizierung mit photochromen Farbstoffen erhielten, ist gelungen und reproduzierbar. Auch die Modifikation von PET-Geweben mit photochromen Farbstoffen über dünne Folienschichten war erfolgreich.

Die Beeinflussung der wichtigsten Zielgrößen „Lichttransmissionsgrad“ und „Verschattungsgrad“ konnte nachgewiesen werden. Das Maß der Beeinflussung erreichte noch nicht die im Forschungsantrag formulierte und für die Praxis notwendige Größenordnung (bisher ca. 50 % erreicht).

Die Ergebnisse eröffnen zwei Wege für weiterführende Untersuchungen.

1. Laminierung des PET-Gewebes „Ettlin β35“ mit dem phototrop ausgerüsteten Polymer
2. Weiterentwicklung des phototrop ausgerüsteten Polymers als Folie

Beide Wege haben ihre Vor- und Nachteile.

1. Laminierung PET-Gewebe

Vorteile

Die mechanische Stabilität des Gewebes könnte genutzt werden. Das Laminieren würde keine technischen Schwierigkeiten haben und könnte als zusätzliche Veredelungsstufe in den Herstellungsprozess integriert werden.

Nachteile

Der Materialeinsatz wäre wesentlich höher, so dass die Wirtschaftlichkeit beeinflusst würde. Die Biegsamkeit würde ggf. reduziert werden.

2. Folie aus phototrop ausgerüstetem Polymer

Vorteile

Der Verfahrensschritt „Modifizieren der Gewebe für die Kopplungsfähigkeit mit PMMA“ entfällt.
Das Maß der Änderung des Lichttransmissionsgrades ist sehr groß.

Nachteile

Die als Funktionsmuster hergestellten Folien wurden gegossen. Dieses Verfahren eignet sich nicht für eine industrielle Fertigung.

Die industrielle Herstellung mittels Spritzverfahren muss untersucht werden.

Die Sicherstellung einer nutzungsadäquaten Kratz- und Reifefestigkeit muss ebenfalls untersucht werden.

Bei einer weiterführenden Entwicklung der strahlungsadaptiven Markise müssen folgende Probleme gelöst werden.

1. Farbstoffe (grau, beige) einsetzen, welche die Farbwiedergabe nur gering beeinflussen
2. Farbstoffe mit unterschiedlichen Schaltepunkten in Abhängigkeit von der Strahlungsleistung mischen
3. Reversibilität des Verdunklungseffektes durch geeigneten Farbstoff beschleunigen
4. Erhöhung der Durchsichtqualität durch Anpassung von Fadenstärke und Gewebestruktur (Vermeidung von Zerrbildern, die durch Reflektion an den Fadenrändern entstehen)
5. Sicherung des UV-Schutzes bei Herstellung von Laminaten (Fäden sind bereits UV-stabil) oder Folien
6. Sicherung eines reduzierten Anschmutzverhaltens durch hydrophobe Ausrüstung
7. Sicherung der Schweißbarkeit (mit Ultraschall) der laminierten Gewebe für das Anbringen eines ZIP-Systems zur Randführung und Spannung der Markise

Die Firma ETTLIN, vertreten durch den Geschäftsführer Herrn Dr.-Ing. Oliver Maetschke, hat bereits Interesse signalisiert, die Entwicklung fortzuführen und diese finanziell zu unterstützen.

7 Quellen- und Literaturverzeichnis

Richtlinien und Normen

BRG 131	Natürliche und künstliche Beleuchtung von Arbeitsstätten
DIN 4108-2	Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz
DIN 5034	Tageslicht in Innenräumen
DIN 5035	Beleuchtung mit künstlichem Licht
DIN 53890	Prüfung von Textilien - Bestimmung des Knittererholungswinkels von textilen Flächengebilden, Meßverfahren an der lufttrockenen Probe mit waagerechter Faltenkante und hochstehendem freien Schenkel
DIN 6169-2	Farbwiedergabe – Farbwiedergabe-Eigenschaften von Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik
DIN EN 1049-2	Textilien – Gewebe - Konstruktion — Untersuchungsverfahren Teil 2: Bestimmung der Anzahl der Fäden je Längeneinheit
DIN EN 12127	Textilien - Textile Flächengebilde - Bestimmung der flächenbezogenen Masse unter Verwendung kleiner Proben
DIN EN 12464-1	Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Arbeitsstätten in Innenräumen
DIN EN 13163	Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol (EPS) – Spezifikation
DIN EN 13363	Sonnenschutzeinrichtungen in Kombination mit Verglasungen
DIN EN 13659	Abschlüsse außen und Außenjalousien – Leistungs- und Sicherheitsanforderungen: Juli 2015 („Teil einer Normenreihe über Abschlüsse an Gebäuden, die in EN 12216 definiert sind“).
DIN EN 14500	Thermischer und visueller Komfort – Prüf- und Berechnungsverfahren
DIN EN 14501	Thermischer und visueller Komfort – Leistungsanforderungen und Klassifizierung
DIN EN 15251	Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik
DIN EN 410	Glas im Bauwesen – Bestimmung der lichttechnischen und strahlungs- physikalischen Kenngrößen von Verglasungen
DIN EN ISO 12947	Textilien – Bestimmung der Scheuerbeständigkeit von textilen Flächengebilden mit dem Martindale-Verfahren – Teil 1: Martindale-Scheuerprüfgerät
DIN EN ISO 12947	Textilien – Bestimmung der Scheuerbeständigkeit von textilen Flächengebilden mit dem Martindale-Verfahren – Teil 3: Bestimmung des Masseverlustes
DIN EN ISO 13791	Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Sommerliche Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren
DIN EN ISO 13792	Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung sommerlicher Raumtemperaturen bei Gebäuden ohne Anlagentechnik – Vereinfachtes Berechnungsverfahren
DIN EN ISO 13934	Textilien - Zugeigenschaften von textilen Flächengebilden – Teil 1: Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraft-Dehnung mit dem Streifen

DIN EN ISO 13937	Textilien - Weiterreißigenschaften von textilen Flächengebilden - Teil 2: Bestimmung der Weiterreißkraft mit dem Schenkel-Weiterreißversuch (einfacher Weiterreißversuch)
DIN EN ISO 13937	Textilien - Weiterreißigenschaften von textilen Flächengebilden - Teil 4: Bestimmung der Weiterreißkraft mit dem Zungen-Weiterreißversuch (doppelter Weiterreißversuch)
DIN EN ISO 1421	Mit Kautschuk oder Kunststoff beschichtete Textilien - Bestimmung der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung
DIN EN ISO 5084	Textilien - Bestimmung der Dicke von Textilien und textilen Erzeugnissen
DIN EN ISO 7730	Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der Thermische Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit
DIN EN ISO 9237	Textilien - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von textilen Flächengebilden
DIN ISO 6133	Elastomere und Kunststoffe – Auswertung der bei Bestimmung der Weiterreißfestigkeit und der Trennfestigkeit erhaltenen Vielspitzen-Diagramme
DIN V 18599	Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Trinkwasser und Beleuchtung; Teil 4: Nutz- und Endenergiebedarf für Beleuchtung; Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten
VDI 6011	Optimierung von Tageslichtnutzung und künstlicher Beleuchtung

Literaturquellen

Eicker, U.; Bauer, U.; Fux, V.: Optimierung von Fassaden zur Vermeidung von sommerlicher Überhitzung. Forschungsbericht der FH Stuttgart FZKA-BWPLUS; Förderkennzeichen ZO3K 23001. April 2006.

Frick, M.: Photochrome Textilien – Herstellung und Eigenschaften; Dissertation. Universität Stuttgart 2008.

Goncalves, O.; Nogueira, A.; Machado, R.; Schilischting, R.; Coan, T.; Sanches, A.: Methyl Methacrylate Suspension Polymerization: Strategies on Particle Size Distribution. Selected papers from ENPROMER-2005, 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering and 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering. 14.-18. August 2005.

Informationsschrift der VBG Verwaltungs-Berufsgenossenschaft: Sonnenschutz im Büro – Hilfen für die Auswahl von geeigneten Blend- und Wärmeschutzvorrichtungen an Bildschirm- und Büroarbeitsplätzen. SP 2.5 (BGI 827), Carl Heymanns Verlag 2005.

Miluski, P.; Dorosz, D.; Kochanowicz, M.; Zmojda, J.; Dorosz, J.: The xanthene dyes doped PMMA microspheres for optical sensor application. Optical Fibers and Their Applications 2015; 16TH CONFERENCE ON OPTICAL FIBERS AND THEIR APPLICATIONS, PROCEEDINGS VOLUME 9816, S. 981607-1 - 981607-5. 22.-25. September 2015.

Preussmann, R.; Schneider, H.; Epple, F.: Identification of alkylating agents. II. Identification of different classes of alkylating agents by a modification of the color reaction with 4-(4-nitrobenzyl)-pyridine (NBP)]. Arzneimittelforschung 19 [7] (1969) 1059-1073.

Reumann, R.-D.: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Berlin Heidelberg New York. Springer Verlag. 2000. ISBN 3-540-66147-6

ROMA Gewebe-Berater – Ratgeber für den optimalen Einsatz von Textilscreens. August 2016.

Santos, C.; Miller, A.; Pace, T.; Morimitsu, K.; Bohne, C.: Photochromism of a Spiropyran and a Diarylethene in Bile Salt. Langmuir, 30, S. 11319-11328. 2014.

Winslow, F.; Matreyek, W.: Particle Size in Suspension Polymerization. Industrial and engineering chemistry, 43(5), S. 1108-1112. Mai 1951.

Internetquellen

http://www.muehlmeier.de/fileadmin/user_upload/DE/mahltechnik/produktinformation/muehlmeier_de_strahlp.pdf.

<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/637238?lang=de®ion=DE>

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitplan für das Forschungsprojekt	6
Tabelle 2: Textilnormen zur Beurteilung von konfektionierten Markisentüchern lt. ITRS	10
Tabelle 3: Charakterisierung der Textilien für Sonnenschutzanwendungen verschiedener Anbieter	11
Tabelle 4: Darstellung der verwendeten Dreher-Gewebe	13
Tabelle 5: Garn-Kennwerte	13
Tabelle 6: Textil-physikalische Charakterisierung von verschiedenartigen Geweben	14
Tabelle 7: Größe der Öffnungen in den Geweben	16
Tabelle 8: Materialparameter der hergestellten Gewebe	17
Tabelle 9: Kennwertermittlung für Verglasung und Verschattung mit SatS oder Standardmarkise	24
Tabelle 10: Methoden zur Ermittlung der Kennwerte von Verglasung, Verschattung und solarer Strahlung	25
Tabelle 11: Einheitliche Anforderungs- und Lastprofile für die energetische Simulation	35
Tabelle 12: Einheitliche Gebäudehülle für die energetische Simulation	35
Tabelle 13: Visuell relevante Simulationsergebnisse im Vergleich (Kunstlichtbedarfe, variable Materialkenndaten)	38
Tabelle 14: Thermisch relevante Simulationsergebnisse am Beispiel eines Büroraums	39
Tabelle 15: Ergebnisse der Tageslichtsimulation für 8 Fassadenvarianten eines Musterbüros	42
Tabelle 16: Tageslichtversorgungsgrad eines Musterklassenraumes für verschiedene Fenster-Varianten	44
Tabelle 17: Ergebnisse der Tageslichtsimulation für 16 Fassadenvarianten des Musterbüros	45
Tabelle 18: Energiekostendifferenz in Abhängigkeit vom F_c -Wert für die Fassadenvarianten 4 und 5 des Musterbüros	46
Tabelle 19: Prüfmuster der Messkampagne 1 während der Messungen	54
Tabelle 20: Ergebnisse der Messkampagne 1	55
Tabelle 21: energetische und behaglichkeitsrelevante Parameter der Messungen aus Messkampagne 2	57
Tabelle 22: Ergebnisse der Messkampagne 2: lichttechnische und energetische Eigenschaften	57
Tabelle 23: Ergebnisse der Messkampagne 3: Einfluss des UV-Anteils auf lichttechnische und energetische Eigenschaften ..	61
Tabelle 24: Untersuchungsmatrix der Messkampagne 4	63
Tabelle 25: Messprotokoll Messkampagne 4: Transmissionsgrade und Abminderungsfaktoren	65
Tabelle 26: Untersuchungsmatrix der Messkampagne 5	68
Tabelle 27: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	77
Tabelle 28: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	77
Tabelle 29: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	77
Tabelle 30: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	78
Tabelle 31: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	78
Tabelle 32: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	78
Tabelle 33: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	79
Tabelle 34: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	79
Tabelle 35: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	79
Tabelle 36: Angaben zu Geweben eines Markisenherstellers (Kollektionsanpassung 2018)	82
Tabelle 37: Flächenmassen und Dicken von beschichteten Gewebe-Varianten	83
Tabelle 38: Maximale und minimale Weiterreißkraftwerte	86
Tabelle 39: Ermittelte Prozessparameter beim Fügen mittels Schweißen	95
Tabelle 40: Gewebemerkmale mit Einfluss auf die Lichttransmission	98
Tabelle 41: Durchschnittliche Strahlungsleistungen der Sonne in Deutschland in Abhängigkeit vom Himmel	100
Tabelle 42: Ansicht: Farbänderung Ettlin weiß in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	111
Tabelle 43: Transparenz von Ettlin weiß in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	112
Tabelle 44: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	113
Tabelle 45: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	113
Tabelle 46: Ansicht: Farbänderung Ettlin β25 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	114
Tabelle 47: Transparenz von Ettlin β25 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	115
Tabelle 48: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	116
Tabelle 49: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	116
Tabelle 50: Ansicht: Farbänderung Ettlin β35 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	117
Tabelle 51: Transparenz von Ettlin β35 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	118
Tabelle 52: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	119
Tabelle 53: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	119
Tabelle 54: Ansicht: Farbänderung Ettlin β55 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	120
Tabelle 55: Transparenz von Ettlin β55 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	120
Tabelle 56: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m ² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m ²) ..	121
Tabelle 57: Ansicht: Farbänderung Ettlin β60 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	122

Tabelle 58: Transparenz von Ettlin β 60 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	123
Tabelle 59: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m^2 (Zeitangaben in h:min, Umgebung: $0 \dots 300 \text{ lux}$; $0 \dots 5 \text{ W/m}^2$)	124
Tabelle 60: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m^2 (Zeitangaben in h:min, Umgebung: $0 \dots 300 \text{ lux}$; $0 \dots 5 \text{ W/m}^2$)	124
Tabelle 61: Strahlungsabhängige Farbänderung und Transparenz von Folien mit verschiedenen Farbstoffmengen	125
Tabelle 62: Farbänderung von Folien mit verschiedenen Farbstoffmengen in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität.....	126
Tabelle 63: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m^2 (Zeitangaben in h:min, Umgebung: $0 \dots 300 \text{ lux}$; $0 \dots 5 \text{ W/m}^2$)	127
Tabelle 64: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m^2 (Zeitangaben in h:min, Umgebung: $0 \dots 300 \text{ lux}$; $0 \dots 5 \text{ W/m}^2$)	128
Tabelle 65: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m^2 (Zeitangaben in h:min, Umgebung: $0 \dots 300 \text{ lux}$; $0 \dots 5 \text{ W/m}^2$)	129
Tabelle 66: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m^2 (Zeitangaben in h:min, Umgebung: $0 \dots 300 \text{ lux}$; $0 \dots 5 \text{ W/m}^2$)	130
Tabelle 67: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m^2 (Zeitangaben in h:min, Umgebung: $0 \dots 300 \text{ lux}$; $0 \dots 5 \text{ W/m}^2$)	131

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze des methodischen Vorgehens zur Herstellung des strahlungsadaptiven Sonnenschutzes.....	9
Abbildung 2: Halbdreher-Gewebe	12
Abbildung 3: Prinzipskizze der Strahlungsbilanz am Beispiel eines Raumes mit außen verschatteter Doppelverglasung	20
Abbildung 4: Prinzipskizze der winkelabhängigen Strahlungstransmission und -reflexion.....	21
Abbildung 5: XPS-Übersichtsspektren (links) und energieaufgelöste C 1s Spektren (rechts).....	27
Abbildung 6: Anfärben von PET-Gewebeprobe [PET weiß] mit Eosin Y	28
Abbildung 7: Mit PMMA-co-PGMA fixierte Mikrogelkugeln (Fa. Mühlmeier) auf einer PET-Gewebeprobe [PET schwarz].....	29
Abbildung 8: Partikelgrößen und Partikelgrößenverteilung von PMMA-Mikrogelkugeln,	31
Abbildung 9: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der PMMA-Mikrogelkugeln auf einem Stahlsubstrat.....	31
Abbildung 10: Chemische Struktur der ausgewählten phototroper Farbstoffe (I), (II) und (III).	32
Abbildung 11: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen	32
Abbildung 12: Rasterelektronenmikroskop. Aufnahme eines mit phototropen PMMA-Mikrogelkugeln beschichteten PET-Gewebes..	33
Abbildung 13: Modell-Gerüst für die energetischen Simulationen im TRNSYS-Studio.....	36
Abbildung 14: Winkelabhängiger Abminderungsfaktor eines nach Süden ausgerichteten Verschattungssystems im Winter	36
Abbildung 15: Wirkungsweise des SatS am Beispiel eines Büroraumes (Süden, zwei Sommertage, Belegung 7-18 Uhr).....	37
Abbildung 16: Raummodell für die Tageslichtsimulation im Musterbüro, Variante 4 (links) und Variante 5 (rechts)	41
Abbildung 17: Falschfarbendarstellung der Beleuchtungsstärke im Musterbüro, Variante 4 (links) und Variante 5 (rechts)	42
Abbildung 18: Musterklassenraum mit Brüstung.....	43
Abbildung 19: Tageslichtverfügbarkeit im Musterklassenraum	43
Abbildung 20: Markise mit F_c -Wert von 0,30 inkl. Verglasung.....	46
Abbildung 21: Markise mit F_c -Wert von 0,15 (inkl. Verglasung).....	46
Abbildung 22: Raumströmungslabor (links) und Sonnensimulator (rechts) im Versuchsfeld des ILK Dresden	48
Abbildung 23: Konzept und bauliche Umsetzung des Prüfraums in Form eines Büros	49
Abbildung 24: Darstellung (Schema) des versorgungstechnischen Equipments des Prüfraumes sowie des Messkonzepts	49
Abbildung 25: Messtechnische Ausstattung des Prüfraumes.....	50
Abbildung 26: Versuchsaufbau für kleinformatige Prüfmuster in DIN A4 - Größe.....	50
Abbildung 27: Sensorik zur Erfassung strahlungsrelevanter Parameter.....	51
Abbildung 28: Darstellung der Rastermessung strahlungsrelevanter Messgrößen vor und hinter der Verglasung	52
Abbildung 29: Anordnung der Sensorik vor und hinter der Verglasung im Fall des Versuchsaufbaus für DIN- A4- Testmuster..	52
Abbildung 30: Höhenwinkelabhängigkeit von Lichttransmission und Abminderungsfaktor potentieller Ausgangsmaterialien	55
Abbildung 31: Prüfmuster der Messkampagne 2 während der Messungen.....	56
Abbildung 32: Energiedurchlassgrad (o.) und Lichttransmission (u.) der Funktionsmuster	58
Abbildung 33: technische Daten des UV-Fluters;.....	59
Abbildung 34: Darstellung des mit erhöhtem UV-Lichtanteil bestrahlten Anteils der Fassade bzw. des Funktionsmusters.....	59
Abbildung 35: Versuchsanordnung im Rahmen der Messkampagne 3.....	60
Abbildung 36: F_c -Wert des Funktionsmusters β_{55} farbvariabel sowie des Ausgangsmaterials β_{60} bei 6 % UV-Lichtanteil.....	61
Abbildung 37: Lichttransmission des Funktionsmusters β_{55} farbvariabel	62
Abbildung 38: Farbänderung in Abhängigkeit von der Farbstoffmenge: Ausgangsmaterial Ettliln β_{60}	64
Abbildung 39: Farbänderung in Abhängigkeit von der Farbstoffmenge: Ausgangsmaterial Ettliln weiß.....	64
Abbildung 40: Farbänderung und Transparenz: Vergleichsmessung mit Ettliln β_{55} farbvariabel beschichtet.....	64
Abbildung 41: Ergebnisse der Messkampagne 4: Abhängigkeit des Abminderungsfaktors von der Farbstoffmenge	66
Abbildung 42: Ergebnisse der Messkampagne 4 – Abhängigkeit der Lichttransmission von der Farbstoffmenge	66
Abbildung 43: Versuchsstandsmodifikation für Messkampagne 5 und zugehörige Strahlungsintensitäten an der Fassade	67
Abbildung 44: Farbänderung und Transparenz von Ettliln β_{55} in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge ...	69
Abbildung 45: Farbänderung und Transparenz Ettliln β_{60} in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	70
Abbildung 46: Farbänderung und Transparenz Ettliln weiß in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge.....	71
Abbildung 47: Farbänderung und Transparenz Ettliln β_{35} in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	72
Abbildung 48: Farbänderung und Transparenz Ettliln β_{25} in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge	73
Abbildung 49: Ergebnisse der Messkampagne 5: Abhängigkeit der Lichttransmission von der Farbstoffmenge	74
Abbildung 50: Ergebnisse der Messkampagne 5 – Abhängigkeit des Abminderungsfaktors von der Farbstoffmenge.....	75
Abbildung 51: Ergebnisse der Messkampagne 5 – Abhängigkeit der Lichttransmission von der Strahlungsintensität	76
Abbildung 52: Ergebnisse der Messkampagne 5 – Abhängigkeit des Abminderungsfaktors von der Strahlungsintensität	76
Abbildung 53: Zugverhalten in Kettfadenrichtung	83
Abbildung 54: Zugverhalten im Schussfadenrichtung	83
Abbildung 55: Probenvorbereitung Zungen-Methode	85
Abbildung 56: Probenvorbereitung Schenkel-Methode.....	85
Abbildung 57: Probenvorbereitung Trapez-Methode	85

Abbildung 58: Prüfkurve – Variante 5, SR (Trapez-Methode)	85
Abbildung 59: Gefaltete Proben, Knitterbankverfahren	87
Abbildung 60: Knitterverhalten der unmodifizierten Gewebe	87
Abbildung 61: Modifiziertes PET-Gewebe schwarz	88
Abbildung 62: Modifiziertes PET-Gewebe weiß	88
Abbildung 63: Rückseite des PET-Gewebes	88
Abbildung 64: Probe 1 vor dem Scheuern	89
Abbildung 65: Probe 1 nach dem Scheuern	89
Abbildung 66: Probe 2 vor dem Scheuern	89
Abbildung 67: Probe 2 nach dem Scheuern	89
Abbildung 68: Probe 3 vor dem Scheuern	90
Abbildung 69: Probe 3 nach dem Scheuern	90
Abbildung 70: Probengewichte der unbehandelten und beschichteten Proben, ungescheuert	90
Abbildung 71: Berechnete Masse der Beschichtung je Beschichtungsvariante, ungescheuert	90
Abbildung 72: Variante 2 nach Scheuern	91
Abbildung 73: Variante 2 nach Scheuern	91
Abbildung 74: Variante 4 nach Scheuern	91
Abbildung 75: Variante 4 nach Scheuern	91
Abbildung 76: Masseverlust an Gewebe-Variante 2	92
Abbildung 77: Masseverlust an Gewebe-Variante 4	92
Abbildung 78: Prozentualer Verlust durch Scheuern an unterschiedlich beschichteten Proben	92
Abbildung 79: Gewebe-Variante 5-SR,	94
Abbildung 80: Gewebe-Variante 4-SR,	94
Abbildung 81: Gewebeschädigung durch OT	94
Abbildung 82: Verdrängte SF durch den Einstich der Nadel (Gewebe-Variante 4-KR, Pfaff, DSS , UT)	94
Abbildung 83: Ultraschall-Schweißmaschine, Pfaff 8310	96
Abbildung 84: Gewebe-Variante 2, KR	96
Abbildung 85: Gewebe-Variante 2, SR	96
Abbildung 86: Gewebe-Variante 4, SR	96
Abbildung 87: Gewebe- Variante 4, beschichtet, SR	96
Abbildung 88: Durchsicht „Ettlin β35“ ohne Beschichtung und ohne Bestrahlung	99
Abbildung 89: Durchsicht „Ettlin β35“ ohne Beschichtung und mit Bestrahlung von 1.000 W/m ²	99
Abbildung 90: Durchsicht „Ettlin β35“ mit Beschichtung und ohne Bestrahlung	99
Abbildung 91: Durchsicht „Ettlin β35“ mit Beschichtung und mit Bestrahlung von 1.000 W/m ²	99
Abbildung 92: F _c -Wert beschichteter und bestrahlter Prüfmuster	101
Abbildung 93: Veränderung des F _c -Wertes einer Folie aus einem phototrop ausgerüsteten Polymer	101
Abbildung 94: Veränderung der Lichttransmission einer Folie aus einem phototrop ausgerüsteten Polymer	102

10 Anhang

10.1 Fotodokumentation zur Strahlungsadaption untersuchter Gewebevarianten

10.1.1 Gewebevariante Ettlin weiß



Tabelle 42: Ansicht: Farbänderung Ettlin weiß in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

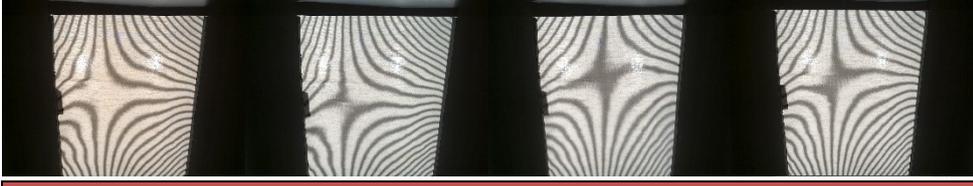
Strahlungsabhängige Transparenz				
1.020...1.080 W/m ²	660...690 W/m ²	445...465 W/m ²	370...390 W/m ²	0...10 W/m ²
Ettlin weiß [unbehandelte Referenz]				
				
Ettlin weiß [vorbehandelt mit Polyamin PEI 0,1 %]				
				
Ettlin weiß [beschichtet ohne Farbstoff]				
				
Ettlin weiß [Farbstoff 5 ml]				
				
Ettlin weiß [Farbstoff 10 ml]				
				

Tabelle 43: Transparenz von Ettlin weiß in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

Abklingverhalten der strahlungsadaptiv beschichteten Varianten

(Zeitangaben in h:min)

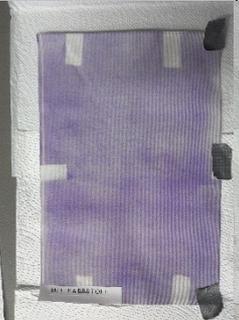
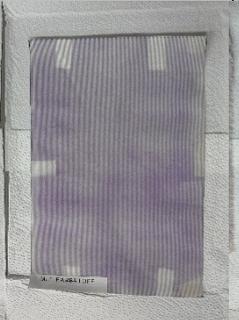
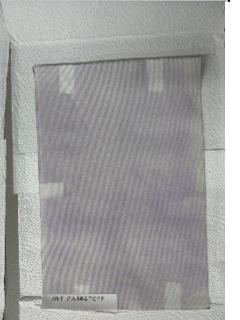
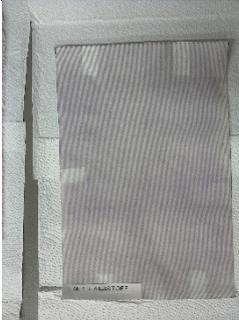
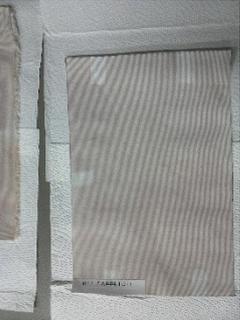
Ettlin weiß [Farbstoff 5 ml]				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:30 nach Messung	1:20 nach Messung	3:00 nach Messung
				
5:05 nach Messung	19 h nach Messung			
				

Tabelle 44: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

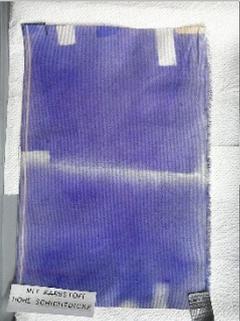
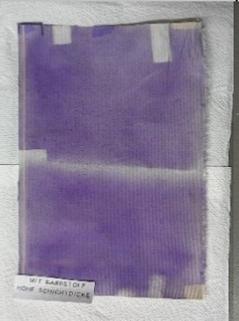
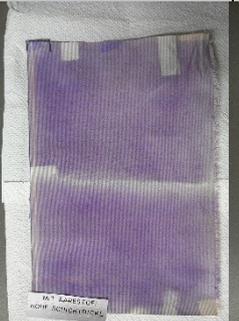
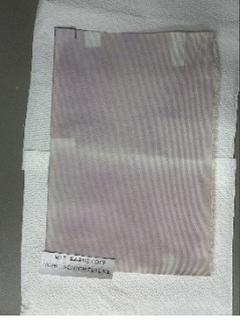
Ettlin weiß [Farbstoff 10 ml]				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:23 nach Messung	0:50 nach Messung	1:45 nach Messung
				
3:20 nach Messung	5:30 nach Messung	19 h nach Messung		
				

Tabelle 45: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

10.1.2 Gewebevariante Ettlin β 25

Strahlungsabhängige Farbänderung				
1.020....1.080 W/m ²	660...690 W/m ²	445...465 W/m ²	370...390 W/m ²	0 W/m ² (vor Messung)
Ettlin β25 [unbehandelte Referenz]				
Ettlin β25 [vorbehandelt mit Polyamin PEI 0,1 %]				
Ettlin β25 [beschichtet ohne Farbstoff]				
Ettlin β25 [Farbstoff 5 ml]				
Ettlin β25 [Farbstoff 10 ml]				

Tabelle 46: Ansicht: Farbänderung Ettlin β 25 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

Strahlungsabhängige Transparenz				
1.020...1.080 W/m ²	660...690 W/m ²	445...465 W/m ²	370...390 W/m ²	0...10 W/m ²
Ettlin β25 [unbehandelte Referenz]				
Ettlin β25 [vorbehandelt mit Polyamin PEI 0,1 %]				
Ettlin β25 [beschichtet ohne Farbstoff]				
Ettlin β25 [Farbstoff 5 ml]				
Ettlin β25 [Farbstoff 10 ml]				

Tabelle 47: Transparenz von Ettlin β25 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

Abklingverhalten der strahlungsadaptiv beschichteten Gewebevariante $\beta 25$

(Zeitangaben in h:min)

Ettlin $\beta 25$ [Farbstoff 5 ml]				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:45 nach Messung	1:15 nach Messung	2:15 nach Messung
				
2:30 nach Messung	3:30 nach Messung	45 h nach Messung		
				

Tabelle 48: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

Ettlin $\beta 25$ [Farbstoff 10 ml]				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:50 nach Messung	1:10 nach Messung	2:10 nach Messung
				
44 h nach Messung				
				

Tabelle 49: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

10.1.3 Gewebevariante Ettlin β 35

Strahlungsabhängige Farbänderung				
1.020...1.080 W/m ²	660...690 W/m ²	445...465 W/m ²	370...390 W/m ²	0 W/m ² (vor Messung)
Ettlin β35 [unbehandelte Referenz]				
				
Ettlin β35 [vorbehandelt mit Polyamin PEI 0,1 %]				
				
Ettlin β35 [beschichtet ohne Farbstoff]				
				
Ettlin β35 [Farbstoff 5 ml]				
				
Ettlin β35 [Farbstoff 10 ml]				
				

Tabelle 50: Ansicht: Farbänderung Ettlin β 35 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

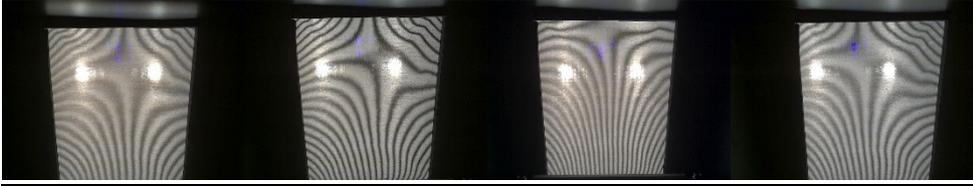
Strahlungsabhängige Transparenz				
1.020...1.080 W/m ²	660...690 W/m ²	445...465 W/m ²	370...390 W/m ²	0...10 W/m ²
Ettlin β35 [unbehandelte Referenz]				
				
Ettlin β35 [vorbehandelt mit Polyamin PEI 0,1 %]				
				
Ettlin β35 [beschichtet ohne Farbstoff]				
				
Ettlin β35 [Farbstoff 5 ml]				
				
Ettlin β35 [Farbstoff 10 ml]				
				

Tabelle 51: Transparenz von Ettlin β35 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

Abklingverhalten der strahlungsadaptiv beschichteten Gewebevariante Ettlin β35

(Zeitangaben in h:min)

Ettlin β35 [Farbstoff 5 ml]				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	1:00 nach Messung	42 h nach Messung	
				

Tabelle 52: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

Ettlin β35 [Farbstoff 10 ml]				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:20 nach Messung	1:20 nach Messung	41 h nach Messung
				

Tabelle 53: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

10.1.4 Gewebevariante Ettlin β55



Tabelle 54: Ansicht: Farbänderung Ettlin β55 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge



Tabelle 55: Transparenz von Ettlin β55 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

Abklingverhalten der strahlungsadaptiv beschichteten Gewebevariante $\beta 55$

(Zeitangaben in h:min)

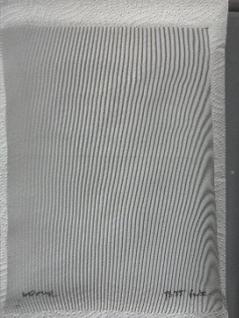
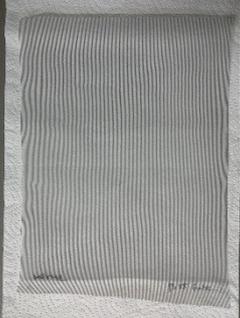
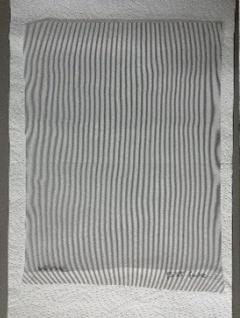
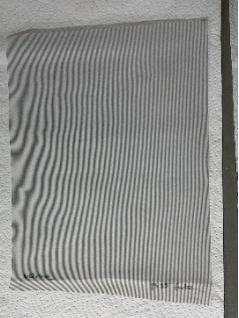
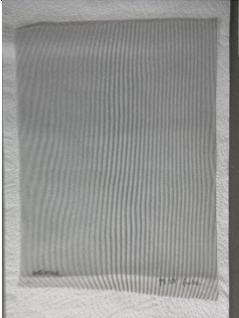
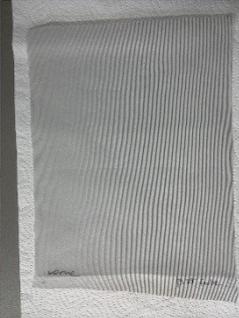
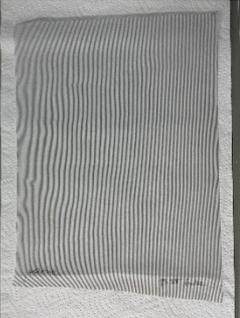
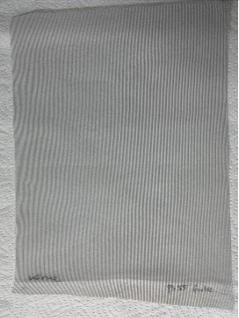
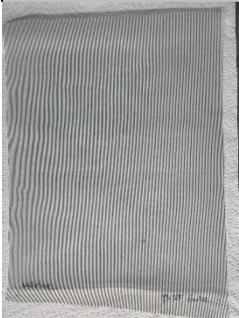
Ettlin $\beta 55$ farbvariabel beschichtet [Farbstoff]				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:50 nach Messung	1:30 nach Messung	2:00 nach Messung
				
2:20 nach Messung	2:50 nach Messung	3:45 nach Messung	5:20 nach Messung	7:30 nach Messung
				
21 h nach Messung				
				

Tabelle 56: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

10.1.5 Gewebevariante Ettlin β60

Strahlungsabhängige Farbänderung				
1.020...1.080 W/m ²	660...690 W/m ²	445...465 W/m ²	370...390 W/m ²	0 W/m ² (vor Messung)
Ettlin β60 [unbehandelte Referenz]				
Ettlin β60 [vorbehandelt mit Polyamin PEI 0,1 %]				
Ettlin β60 [beschichtet ohne Farbstoff]				
Ettlin β60 [Farbstoff 5 ml]				
Ettlin β60 [Farbstoff 10 ml]				

Tabelle 57: Ansicht: Farbänderung Ettlin β60 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

Strahlungsabhängige Transparenz				
1020...1080 W/m ²	660...690 W/m ²	445...465 W/m ²	370...390 W/m ²	0...10 W/m ²
Ettlin β60 [unbehandelte Referenz]				
Ettlin β60 [vorbehandelt mit Polyamin PEI 0,1 %]				
Ettlin β60 [beschichtet ohne Farbstoff]				
Ettlin β60 [Farbstoff 5 ml]				
Ettlin β60 [Farbstoff 10 ml]				

Tabelle 58: Transparenz von Ettlin β60 in Abhängigkeit von Strahlungsintensität und Farbstoffmenge

Abklingverhalten der strahlungsadaptiv beschichteten Gewebevariante $\beta 60$

(Zeitangaben in h:min)

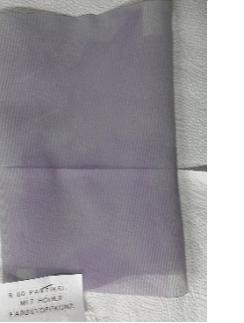
Ettlin $\beta 60$ [Farbstoff 5 ml]				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:20 nach Messung	0:50 nach Messung	1:10 nach Messung
				
1:35 nach Messung	2:30 nach Messung	4:10 nach Messung	6:15 nach Messung	20 h nach Messung
				

Tabelle 59: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

Ettlin $\beta 60$ [Farbstoff 10 ml]				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:30 nach Messung	0:50 nach Messung	1:15 nach Messung
				
2:10 nach Messung	3:50 nach Messung	6:00 nach Messung	20 h nach Messung	
				

Tabelle 60: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

10.2 Fotodokumentation zur Strahlungsadaption untersuchter Folien

10.2.1 Strahlungsabhängige Transparenz

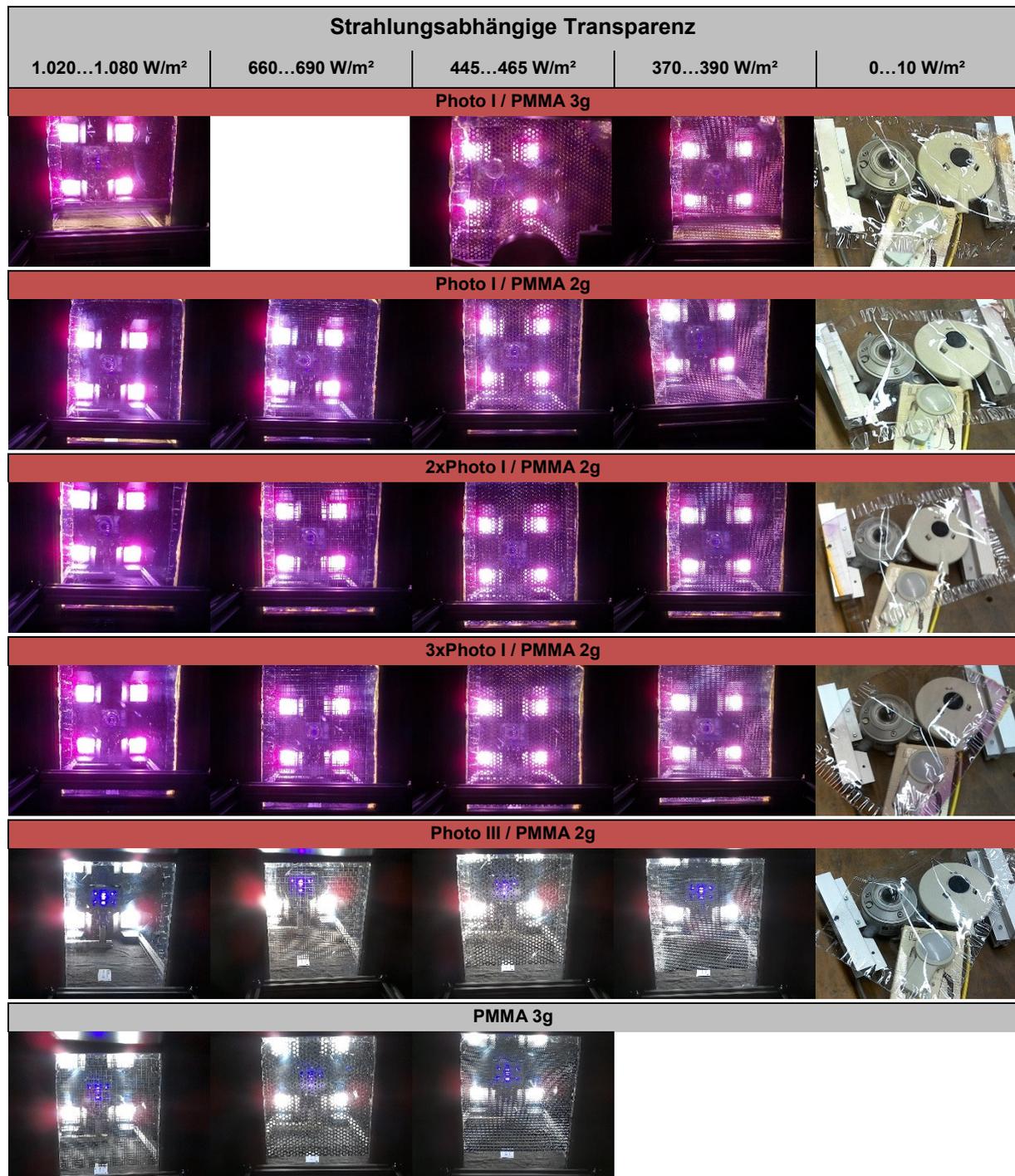


Tabelle 61: Strahlungsabhängige Farbänderung und Transparenz von Folien mit verschiedenen Farbstoffmengen

10.2.2 Strahlungsabhängige Farbänderung



Tabelle 62: Farbänderung von Folien mit verschiedenen Farbstoffmengen in Abhängigkeit von der Strahlungsintensität

10.2.3 Abklingverhalten

(Zeitangaben in h:min)

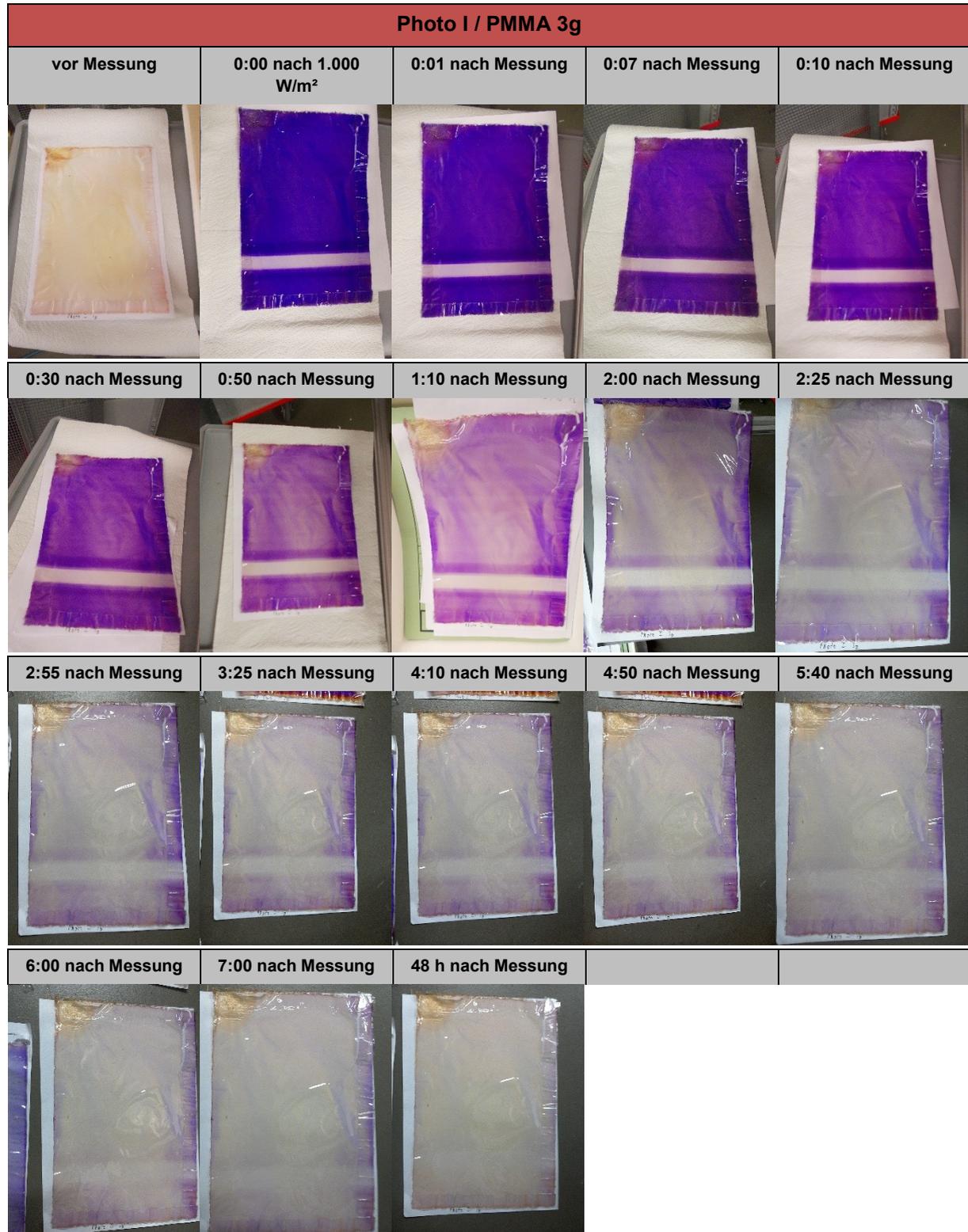


Tabelle 63: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

Photo I / PMMA 2g				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:20 nach Messung	0:40 nach Messung	1:30 nach Messung
				
1:55 nach Messung	2:25 nach Messung	2:55 nach Messung	3:40 nach Messung	4:10 nach Messung
				
5:00 nach Messung	5:20 nach Messung	6:15 nach Messung	48 h nach Messung	
				

Tabelle 64: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

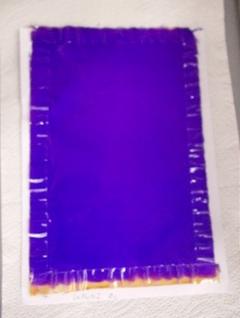
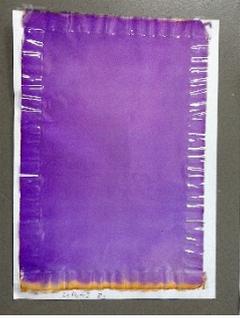
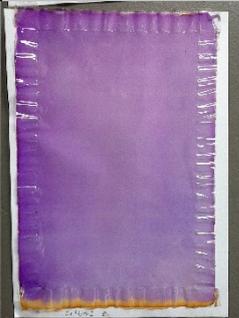
2xPhoto I / PMMA 2g				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:30 nach Messung	1:15 nach Messung	1:40 nach Messung
				
2:10 nach Messung	2:40 nach Messung	3:30 nach Messung	4:00 nach Messung	4:50 nach Messung
				
5:10 nach Messung	6:10 nach Messung	47 h nach Messung		
				

Tabelle 65: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

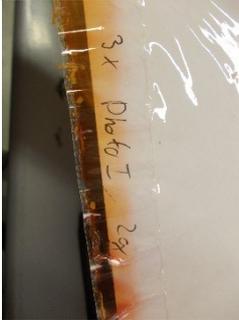
3xPhoto I / PMMA 2g				
vor Messung	0:00 nach 1.000 W/m ²	0:50 nach Messung	1:10 nach Messung	1:45 nach Messung
				
2:15 nach Messung	3:00 nach Messung	3:35 nach Messung	4:25 nach Messung	4:45 nach Messung
				
5:45 nach Messung	47 h nach Messung			
				

Tabelle 66: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)

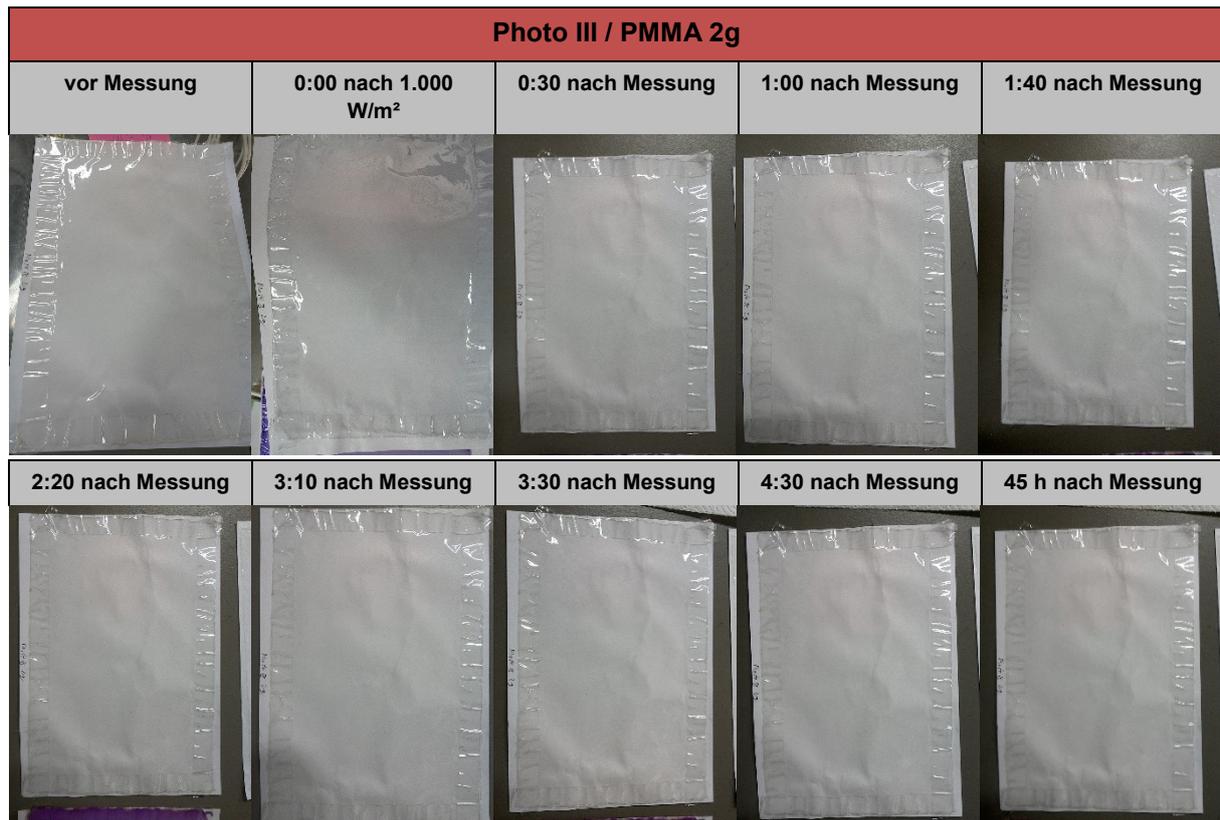


Tabelle 67: Abklingverhalten nach Einstrahlung von 1.000 W/m² (Zeitangaben in h:min, Umgebung: 0...300 lux; 0...5 W/m²)