

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

KLEMS

Entwicklung einer Prüfnorm zur Bestimmung der winkelabhängigen solaren Strahlungstransmission von Bauteilen

Förderkennzeichen:
03TN0032D

Projektlaufzeit:
01.10.21-30.09.23

Dieser Projektbericht wurde verfasst von Fabian Deuchler, Adriana Enriquez Florat, Joshua Denschlag, Lukas Ziegler

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des *Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie* unter dem Förderkennzeichen 03TN0032D gefördert.
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

I	Kurze Darstellung	3
I.1	Aufgaben- und Zielstellung.....	3
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
II	Eingehende Darstellung	6
II.1	Erzielte Ergebnisse	6
II.1.1	Zusammenfassung.....	6
II.1.1	Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse	7
AP1	Definition von universellen und konsistenten Prüfparametern für die winkelabhängige, solare Energietransmission von Bauteilen:	7
AP3	Optimierung von existierenden Beleuchtungs- und Detektorsystemen für die erforderlichen Messparameter (spektral, angular).....	9
AP4b	Winkelabhängige Messungen an realen Prüfkörpern:	15
AP5	Konzeption von nationalen Standardisierungsaktivitäten und Anschluss zu nationalen, europäischen und internationalen Normungsaktivitäten.....	16
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	16
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	17
II.4	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	17
II.5	Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	17
II.6	Erfolgte Veröffentlichungen	17
	Referenzen.....	17

I Kurze Darstellung

I.1 Aufgaben- und Zielstellung

Im Rahmen des vorliegenden Förderprojekts wird die besondere Herausforderung adressiert, die sich aus der starken Abhängigkeit des Lichttransmissionsgrades lichtdurchlässiger Konstruktionselemente, wie solcher mit geometrischen Schattenelementen oder spezialisierten Verglasungen, von der Einstrahlrichtung der Sonne ergibt. Ziel ist die Entwicklung und Etablierung eines standardisierten Verfahrens zur Untersuchung des winkelabhängigen Lichttransmissionsgrades für großflächige Bauelemente, gestützt auf das D65-Standardlichtspektrum, und die Evaluierung der Anwendbarkeit dieses Verfahrens für die Bestimmung des solaren Transmissionsgrades sowie des Gesamtenergiedurchlassgrades.

Ein wesentlicher Bestandteil dieses Unterfangens ist die Erstellung eines Normentwurfs in Form einer VDI-Expertenempfehlung, um die Lücke in bestehenden Normen, die die Winkelabhängigkeit unzureichend berücksichtigen, zu schließen. Das Projekt sieht vor, vorhandene Messtechnologien anzupassen und ein standardisiertes Messverfahren zu entwickeln, wobei die bidirektionale Streufunktionsverteilung (BSDF) entsprechend parametrisiert und diskretisiert werden soll. Dies dient dem übergeordneten Ziel, die Energieeffizienz von Gebäuden durch präzise Bestimmung der winkelabhängigen Strahlungs- und Energietransmission großflächiger Bauelemente zu steigern und eröffnet Herstellern von Mess- und Beleuchtungstechnologien sowie Anbietern von innovativen Lichtführungskonzepten im Baubereich neue Vermarktungspotenziale.

Im spezifischen Kontext dieser Zielsetzungen übernimmt der Projektpartner **WAVELABS** folgende Aufgaben,

Die Entwicklung eines Simulationstools zur Homogenitätsverteilung LED basierter Beleuchtungssysteme für unterschiedliche Winkel zwischen Lichtquelle und Empfängerebene (für eine kleine Beleuchtungsfläche als Basiseinheit)

Die Verifizierung anhand von Messungen in Abhängigkeit von Abstand und Winkel zwischen Beleuchtungs- und Empfängerebene

Die Entwicklung einer Charakterisierungsmethode zur Bestimmung der Winkelverteilung eines LED-basierten Beleuchtungssystems •

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die gesamte Palette erforderlicher Fähigkeiten und Forschungsthemen für das KLEMS-Projekt wurde durch die beteiligten Projektpartner vollständig abgedeckt. Alle Partner verfügten bereits über Ergebnisse aus früheren Forschungsarbeiten oder internen Analysen, die für die Thematik der winkelabhängigen Transmissionsgrade und deren Messung relevant waren. Jeder Partner brachte spezifische Schwerpunkte und Expertisen in das Projekt ein, was zu einem fruchtbaren Austausch und zur Integration von wissenschaftlichen sowie praktischen Anforderungen an die Messverfahren und die Auswertung der Daten führte. Diese Zusammenarbeit erlaubte es, die unterschiedlichen Perspektiven auf die Herausforderungen und Lösungsansätze im Kontext der winkelabhängigen Messungen von Licht- und Energietransmission in die Forschungsarbeit einfließen zu lassen.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Eine effiziente und zielgerichtete Durchführung der geplanten Aktivitäten im KLEMS-Projekt wurde durch einen sorgfältig ausgearbeiteten Zeitplan und die Definition von Meilensteinen sichergestellt. Der Fortschritt gemäß diesem Plan ist in einer entsprechenden Übersicht dargestellt und wurde bezüglich der thematischen Schwerpunkte konsequent verfolgt.

Tabelle 1: Zeitgroßplanung von Arbeitspaketen und Meilensteinen

	2021							2022												2023				
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5
AP1			M1																					
AP2												M2												
AP3															M3									
AP4																					M4			
AP5																								M5

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Vor Projektbeginn existierten verschiedene Normverfahren zur Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen und Verschattungssystemen, wie etwa DIN EN 410, DIN EN 14500, DIN 4108-2 und DIN EN ISO 52022-3. Diese Normen behandeln jedoch die starke Abhängigkeit des Transmissionsgrades von der Sonneneinfallrichtung bei geometrischen Sonnenschutzsystemen (Lamellen, Gitter, Netze) nur sehr vereinfacht oder gar nicht.

Zusätzlich erlaubt DIN 4108-2 den Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes mithilfe von Simulationsprogrammen, die die Energieeffizienz und Lebensqualität in Gebäuden optimieren. Programme wie EnergyPlus und TRNSYS bieten Möglichkeiten, das energetische Verhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung winkelabhängiger Transmissionsgrade für Sonnenschutz in Kombination mit Verglasungen zu berechnen. Diese Modelle benötigen jedoch BSDF-Eingabedaten, die auf einer Klems-Diskretisierung mit 145 Einfallswinkeln und Ausfallswinkeln basieren. In der Praxis sind solche detaillierten Daten oft nur durch vereinfachte Simulationen oder aufwendige Raytracing-Verfahren zugänglich.

Im Rahmen unseres Projekts wurde daher ein neuer Messaufbau vorgeschlagen, um winkelabhängige Transmissionsgrade von Verschattungssystemen mit vergleichsweise geringem Aufwand messtechnisch zu erfassen. Dieser Aufbau soll, unterstützt durch Simulationsmodelle, in eine diskret-aufgelöste und vollständige bidirektionale Transmissionsverteilungsfunktion (BTDF) überführt werden können. Hierbei wird eine innovative Methode empfohlen, die es ermöglicht, die Eingabedaten für die erwähnten Simulationsprogramme effizient und kostengünstig zu generieren, wodurch die gesetzlichen Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz und die Energieeffizienz von Gebäuden besser erfüllt werden können.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Assoziierte Partner

Im Projekt KLEMS gab es keine assoziierten Partner.

Als Mitglieder des VDI-Expertengremiums zur Erstellung der VDI waren jedoch Carsten Horch von der Glasmanufaktur Brandenburg, Ulrich Lang und Markus Schwab von Warema, David Geisler-Moroder sowie Lars Oliver Grobe von der Hochschule Luzern in das Projekt eingebunden

Unteraufträge

Im Rahmen des Projekts wurden von WVELABS keine Unteraufträge vergeben.

II Eingehende Darstellung

II.1 Erzielte Ergebnisse

II.1.1 Zusammenfassung

Das Hauptziel, eine Spezifikation für ein Verfahren zu entwickeln, das die Bestimmung der winkelabhängigen solaren Strahlungstransmission bei großen Gebäudeabschlüssen ermöglicht und für die nationale sowie internationale Normung geeignet ist, wurde erfolgreich umgesetzt. Die entsprechende Expertenempfehlung, VDI-EE 2068 mit dem Titel „Mess- und Berechnungsverfahren zur Bestimmung der winkelabhängigen solaren Strahlungstransmission von Gebäudeabschlüssen mit ausgedehnten Strukturen“, wurde am 1. April 2024 veröffentlicht. Diese Empfehlung führt ein innovatives Messverfahren sowie einen neuen Messaufbau ein, der speziell darauf ausgerichtet ist, die Strahlungstransmissionsgrade von Abschlüssen, die lateral ausgedehnte Strukturelemente aufweisen, präzise zu messen. Der Messaufbau bietet dabei den Vorteil, dass er auch auf komplex strukturierte Proben anwendbar ist. Zudem enthält die Empfehlung Richtlinien zur Nutzung des Messaufbaus und zur weiteren Verwendung der ermittelten Daten. Die VDI-EE 2068 ergänzt die bestehende Norm DIN EN 14500 und erläutert weiterhin, wie die gemessenen Transmissionsgrade mit Unterstützung eines Simulationsmodells in eine präzise und diskret aufgelöste bidirektionale Transmissionsverteilungsfunktion (BTDF) integriert werden können.

Zielvorgaben für das Projekt wurden entsprechend des Antrags erfolgreich erreicht. Es wurde ein fortschrittliches Simulationswerkzeug von WAVELABS entwickelt, das speziell für die Optimierung der Homogenität von LED-basierten Beleuchtungseinheiten konzipiert wurde. Diese Software ermöglicht eine präzise Steuerung der Lichtverteilung, was für die Qualität und Effizienz der Beleuchtung entscheidend ist. Darüber hinaus wurden die durch die Simulation vorhergesagten Ergebnisse durch Messungen an realen Prüfkörpern und Teststrukturen bei CSP, WAVELABS und TUK validiert. Diese Validierungsprozesse bestätigten die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der neu entwickelten Simulations- und Messtechniken unter realen Bedingungen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Projekts war die Entwicklung eines nationalen Vor-Normentwurfs, der erfolgreich in die nationalen Normungsaktivitäten eingebunden wurde. Zusätzlich wurde die Anbindung an internationale Normungsaktivitäten geprüft und etabliert, was in enger Zusammenarbeit mit dem VDI und allen beteiligten Projektpartnern realisiert wurde. Diese Maßnahmen trugen maßgeblich dazu bei, die Grundlage für verbesserte Mess- und Simulationstandards in der LED-Beleuchtungstechnologie zu legen und den Weg für weitere Entwicklungen in diesem Bereich zu ebnen.

II.1.1 Ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse

AP1 Definition von universellen und konsistenten Prüfparametern für die winkelabhängige, solare Energietransmission von Bauteilen:

AP1a

In diesem Arbeitspaket erfolgte ein Informationsaustausch zu aktuell eingesetzten messtechnischen Verfahren und Spezifikationen bei den Partnern (Spektrum, Homogenität, Winkel usw.). Am CSP wurde dazu relevante Messtechnik spezifiziert bzw. charakterisiert. Wichtige Ergebnisse aus der Charakterisierung der Messtechnik sind in Abb. 1 gezeigt. Der Informationsaustausch erfolgte vor dem Hintergrund zu den spektralen, geometrischen und winkelbezogenen Basisanforderungen (s. nächster Abschnitt) an die Messtechnik. Dabei stellt die Anforderung an die Winkelauflösung eine zentrale Anforderung dar, aus der sich eine maximale Winkeldivergenz der Lichtquelle von 5° am FWTM ergibt. Diese erfüllte die WVELABS-Lichtquelle ohne weitere Ergänzungen zunächst nicht. Es sollten, im Rahmen von AP3 mögliche Methoden zur Einschränkung der Divergenz der LED-Lichtquellen entwickelt und getestet werden, wie beispielsweise die Veränderung der Lichtführung innerhalb der Lichtquelle oder mittels geeigneter Winkelfilter außerhalb der Lichtquelle.

Dazu wurden in AP3 Simulationstools zur Prüfung der Lichtführungskonzepte von WVELABS entwickelt. Ein wichtiges Fazit war, dass das angedachte Messverfahren unbedingt zunächst mit einer bereits vorhandenen Lichtquelle mit geringer Divergenz geprüft werden musste, um den Zeitplan des Projekts einhalten zu können. Die mit einer speziellen Messmethode des CSPs gemessene Verteilung der Abstrahlwinkel bzw. die Winkeldivergenz sowie die Lichtführung des verwendeten Sonnensimulators von Abet Technologies ist Abbildung 1 zu entnehmen.

Ein weiteres zentrales Ergebnis des Informationsaustauschs war, dass die verschiedenen Einrichtungen für Messungen der bidirektionalen Transmissionsverteilungsfunktion (BTDF), in den allermeisten Fällen Siliziumdetektoren verwenden. Dies ergibt sich aus praktischen Erwägungen, da i.d.R. der VIS-Spektralbereich (380 nm - 780 nm) oder der Empfindlichkeitsbereich eines siliziumbasierten Detektors (ca. 380 nm –1150 nm, Vgl. Abbildung 1 Mitte) für den für den Kunden ausreichend ist bzw. Vorabprüfungen oft zeigen, dass die Winkelabhängigkeit in den angrenzenden Spektralbereichen sehr ähnlich ist. Um einen größeren Spektralbereich abzudecken, werden üblicherweise mehrere Detektoren verwendet (z.B. zusätzlich zu den Si-Detektoren noch InGaAs-Detektoren mit Empfindlichkeiten bis zu 2500 nm). Ein zweiter Detektor für den NIR/MIR-Spektralbereich verdoppelt die Anzahl der benötigten Messungen ist aber prinzipiell möglich, wobei die Integrationszeiten für diese NIR/MIR-Detektoren aufgrund einer geringeren Detektorsensitivität i.d.R. wesentlich höher ist.

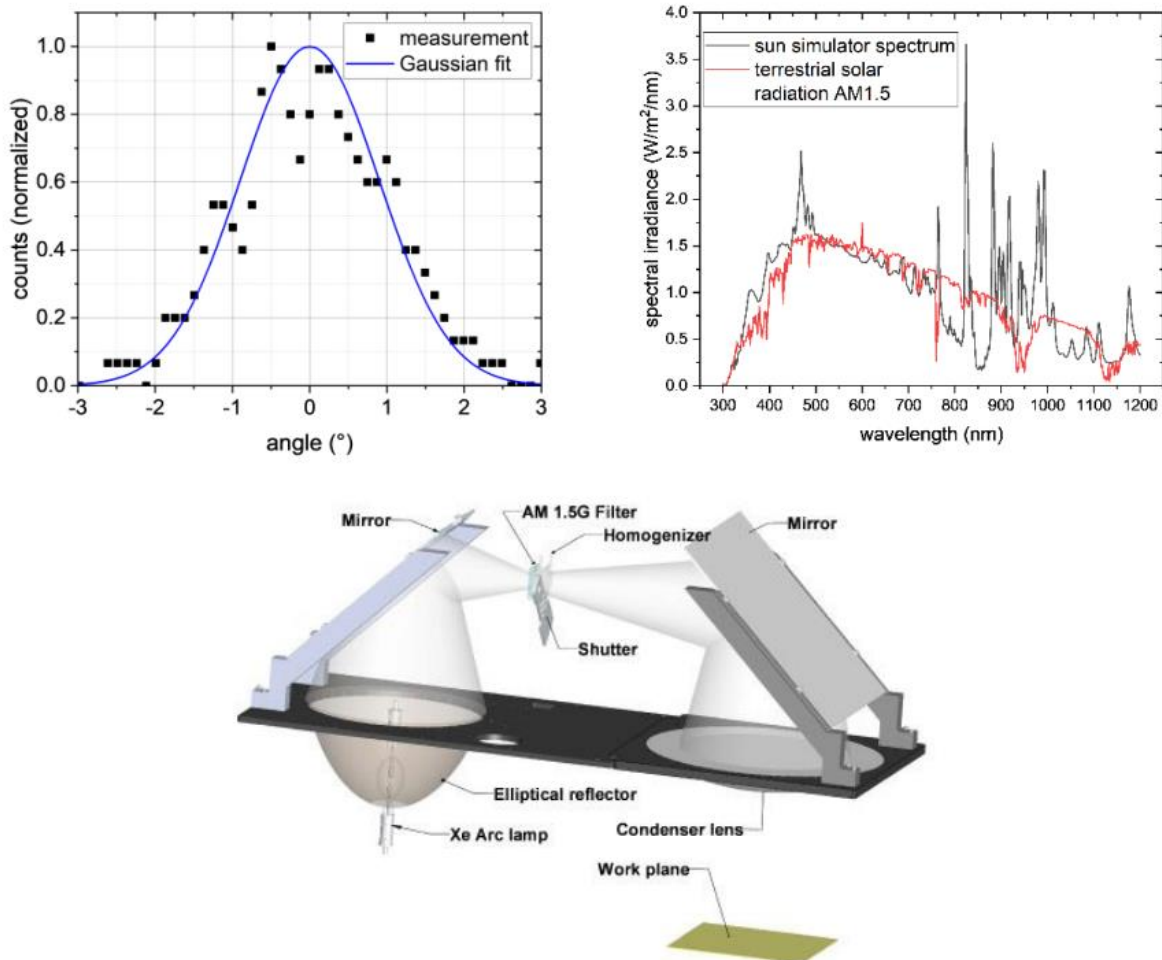


Abbildung 1 Gemessene Verteilung der Abstrahlwinkel (oben links), schematische Darstellung der Lichtführung (unten) und gemessenes Spektrum (oben rechts) des Abet sun Sonnensimulators 2000

AP1b

Im Zuge des Arbeitspakets 1 (AP 1) werden die Anforderungen an die Sonnensimulatortechnik für die beabsichtigte Norm konkretisiert.

Die spektralen Eigenschaften der Lichtquelle sind zentral für die Erfüllung der Normen DIN EN 410 und IEC 60904-3. Die Lichtquelle soll im gewählten Wellenlängenbereich eine hohe Übereinstimmung mit dem D65-Normspektrum für die Bewertung des visuellen Komforts sowie mit dem AM1.5 Normspektrum für die Bewertung des thermischen Komforts und die Bestimmung energetischer Kenngrößen aufweisen. Die spektrale Güte wird durch den Vergleich des Spektrums der Lichtquelle mit dem Normspektrum ermittelt und in Klassen A bis C, gemäß IEC 60904-3, eingeteilt.

Es ist zu beachten, dass die LED-basierte Sonnensimulatoren von WVELABS spektral Licht im Bereich von 300 bis 1250 nm erzeugen können. Damit lässt sich sehr gut das D65-Normspektrum abbilden. Jedoch ist die vollständige Abdeckung des AM1.5G-Spektrums, das

sich von 300 bis 2500 nm erstreckt begrenzt. Dies ist bei der Bewertung des thermischen Komforts zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der Uniformität und Ausdehnung der Bestrahlungsstärke auf dem Prüfkörper, ist gefordert, dass die Lichtquelle einen Bereich beleuchtet, der mindestens dem 1,5-fachen Durchmesser der Apertur in allen Richtungen entspricht. Dies dient dazu, laterale Verluste bei dicken, lichtdurchlässigen Proben zu vermeiden, wie in DIN EN 14500 Abschnitt 6.4.4 und 6.5.4.2.2 beschrieben.

Die zeitliche Stabilität der Lichtquelle muss während der Messung konstant sein und ist ebenfalls gemäß DIN EN 60904-9 in den Klassen A bis C anzugeben. WAVELABS LED Solarsimulatoren erreichen hier die Klasse A.

Für die Bestrahlungsstärke und die Polarisation des Lichtes sind keine spezifischen Anforderungen an den Betrag der Bestrahlungsstärke gestellt. Es ist jedoch wichtig, dass die Lichtquelle unpolarisiertes Licht erzeugt und das Detektionssystem gegenüber der Polarisation unempfindlich ist, um genaue Messungen des Transmissionsgrades zu ermöglichen.

Ein wesentlicher Aspekt des Arbeitspakets 1 ist die Winkelverteilung des Lichtes. Die Anordnung der Lichtquelle im Versuchsaufbau muss gewährleisten, dass mindestens 95% der einfallenden Lichtstrahlen auf dem Prüfkörper eine Winkeldivergenz von $\pm 5^\circ$ nicht überschreiten. Durch die spezifische Durchmischungsoptik bei LED-basierten Sonnensimulatoren kann es jedoch zu maximalen Einfallswinkeln von etwa 16° kommen. Diese größeren Einfallswinkel beeinflussen die Anforderungen an die Winkelverteilung und müssen bei der Gestaltung des Versuchsaufbaus berücksichtigt werden. Um die maximalen Einfallswinkel zu beschränken, kann der Einsatz eines Winkelfilters vorgesehen werden. Allerdings ist zu beachten, dass durch den Einsatz eines solchen Filters mit einer Veränderung des Spektrums, der Homogenität und der Intensität des einfallenden Lichts gerechnet werden muss.

Diese potenziellen Veränderungen und deren Auswirkungen auf die Messergebnisse wurden als integraler Bestandteil der Untersuchungen in den nachfolgenden Arbeitspaketen berücksichtigt.

AP1c

Meilenstein M1:

Innerhalb von AP1 wurde auf Basis des Informationsaustauschs und von Recherchen zu den anwendungsrelevanten Prüfergebnissen der Meilenstein M1 nach 3 Monaten erreicht:

M1 (nach 3 Monaten Projektlaufzeit)

Prüfparameter für die winkelabhängige solare Energietransmission sind ausgewählt.

AP3 Optimierung von existierenden Beleuchtungs- und Detektorsystemen für die erforderlichen Messparameter (spektral, angular)

AP3a: Test und Optimierung eines Winkelfilters für Lichtfelder (CSP)

Dieses Arbeitspaket wurde ausschließlich vom Projektpartner CSP bearbeitet und ist

nicht Bestandteil dieses Teilvorhabens-Abschlussberichts

AP3b: Entwicklung eines Simulationstools zur Homogenitätsverteilung vorhandener LED-basierter Beleuchtungssysteme

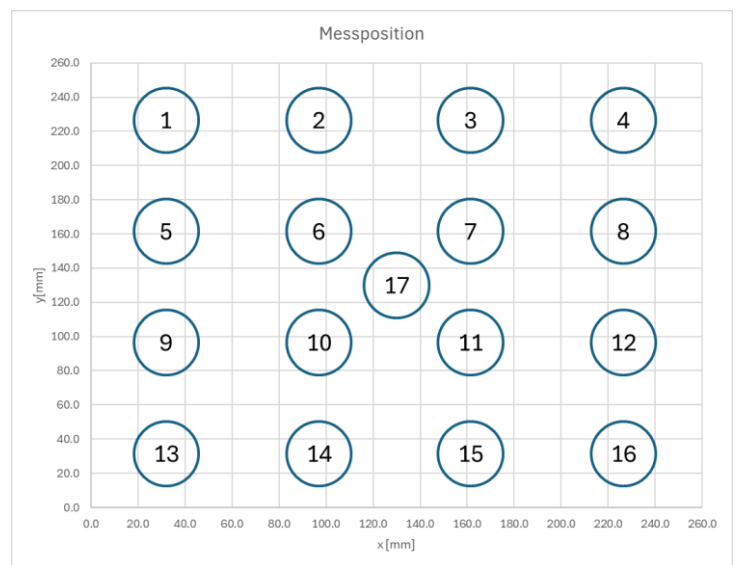
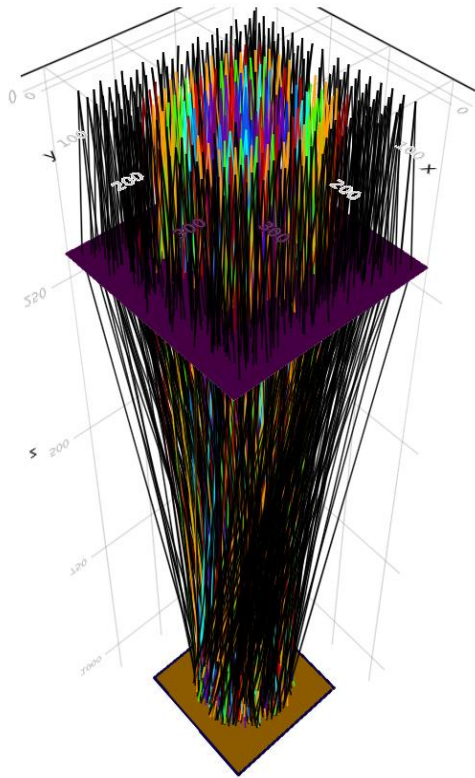


Abbildung 3: Simulation von Abbildung 2 - Messpositionen Lichtstrahlen im Sonnensimulator

Bei der Entwicklung der Simulationssoftware kam die Bibliothek OpticSim zum Einsatz, die speziell für die Erfordernisse dieses Projekts modifiziert wurde. Diese Anwendung erlaubt die detailgetreue Nachbildung der Propagation von Lichtstrahlen durch diverse optische Systeme (Abbildung 3). Dabei wird jedem Strahl eine spezifische Wellenlänge sowie eine definierte Leistung zugeordnet. Die resultierende Intensität am Detektor resultiert aus der aggregierten Strahlungsleistung aller Strahlen, wobei sowohl die Dichte als auch die individuelle Leistung der Strahlen einbezogen werden.

Die durchgeführten Simulationen gliederten sich in zwei Kategorien: praktische und theoretische Simulationen. Die praktische Simulation replizierte den tatsächlichen experimentellen Aufbau, einschließlich der Positionierung eines zylindrischen Winkelfilters über jeder Detektorzelle zur Filterung des einfallenden Lichts. Im Gegensatz dazu verzichtete die theoretische Simulation auf die Implementierung eines physischen Winkelfilters. Stattdessen wurden Winkel- und Positionsdaten der Lichtstrahlen herangezogen, um eine optimale Einschätzung der Homogenitätsverteilung über verschiedene Winkel zu ermöglichen. Diese methodische Differenzierung ermöglichte eine umfassende Analyse der

Lichtausbreitung und der Effektivität der Winkelfilter innerhalb des untersuchten optischen Systems

Simulation eines theoretischen Winkelfilter

Im Rahmen der Untersuchungen bei WAVELABS werden 16 Positionen in einem 4x4-Raster sowie eine Mittenposition untersucht (siehe Abbildung 2). Die Simulation macht es möglich, nicht nur die Intensität unter Einfluss von verschiedenen Filterparameter zu untersuchen, sondern zeigt auch die genaue positionsabhängige Winkelverteilung der einfallenden Strahlen. Exemplarisch ist die Winkelverteilung für Position 7 (Abbildung 5) und Position 16 (Abbildung 5) dargestellt. Man erkennt große Unterschiede in der Winkelzusammensetzung des einfallenden Lichts. Dies ist auf die unterschiedlichen Positionen und Intensitäten der LEDs in der Lichtquelle zurückzuführen. Trotz der unterschiedlichen Einstrahlcharakteristika zeigt eine Untersuchung der Gesamtintensität aber, dass bis zu 10° Einstrahlwinkel es zu Intensitätsverlusten <10% kommt. Erst ab Winkeln <5° kommt es zu erheblichen Intensitätsverlusten und Inhomogenitäten. Durch die enge Eingrenzung der Akzeptanzwinkel wird die Durchmischung der verschiedenen LEDs verringert. Somit ist die Intensität an einer bestimmten Messposition im großen Maße abhängig von der Intensität der direkt darüber befindlichen LED. So erreicht die Lichtintensität in der Mitte des Messfeldes an Pos. 17 nur noch 54% ihrer ursprünglichen Intensität und an Position 5 noch 74%.

Simulation eines praktischen Winkelfilter

Die praktische Simulation besteht ebenfalls aus zwei Teilen: einer Gesamtsimulation aller 27 Kanäle und einer individuellen Simulation für jeden Kanal.

Tabelle 2 – Gesamtintensität (rel. zu 90° Öffnungswinkel) in Abhängigkeit des erlaubten maximalen Einfallswinkels

Position [#]	+/-10° [%]	+/-7° [%]	+/-5° [%]
1	97,78	89,38	74,37
2	96,03	75,31	56,74
3	95,95	75,94	57,25
4	97,64	88,95	73,19
5	98,17	90,88	74,03
6	95,99	74,22	55,12
7	95,52	73,31	54,7
8	98,34	91,05	74,22
9	97,96	90,85	74,85
10	95,55	73,64	54,37
11	95,31	73,21	54,57
12	98,12	91,06	74,42
13	97,69	88,92	73,21
14	95,93	75,73	56,99
15	95,99	75,71	57,04
16	97,62	89,11	73,08
17	93,11	71,15	54,64

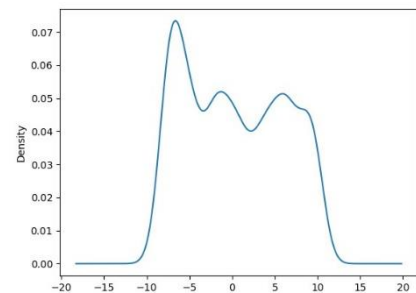


Abbildung 5 - Winkelverteilung an Pos. 7

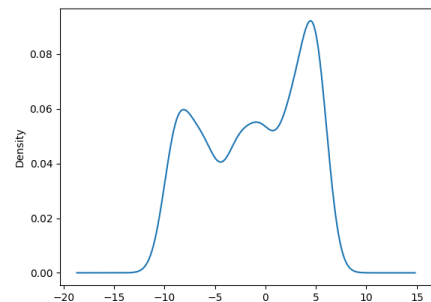


Abbildung 5 - Winkelverteilung an Pos. 16

Alle Kanäle

Die entwickelte Simulationssoftware macht es möglich auch mit einer sehr feinen Ortsauflösung die Intensität des einfallenden Lichts zu untersuchen. Abbildung 6 zeigt die Heatmap der durch den Winkelfilter auf die Detektorebene fallende Strahlen. Zu erkennen ist eine Mikroinhomogenität innerhalb eines Winkelfilters. Durch die Software ist ein signifikanter Trend der Intensitätsabnahme innerhalb jeder Zelle in Richtung ihres Randes zu beobachten. Dieser Trend wird durch die geometrische Beschaffenheit des Zylinders beeinflusst, wie in

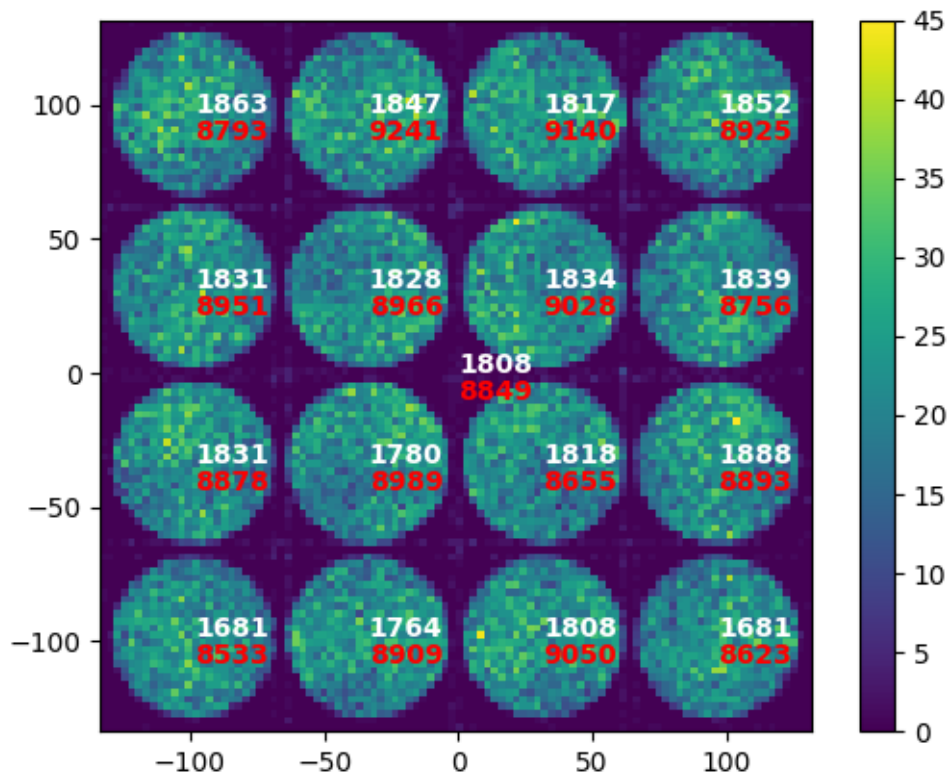


Abbildung 6: Heatmap im Lichtfeld mit zylindrischen Winkelfilter. Zahl weiß: Leistung, Zahl rot: Anzahl Strahlen illustriert.

Einzel Kanäle

Hier wurden individuelle Kanäle simuliert. Beim Vergleich der hochauflösenden Heatmaps einzelner LED Kanäle lassen sich einige Unterschiede feststellen. Betrachtet man beispielsweise Kanal 04 und Kanal 25, so zeigt sich eine sehr unterschiedliche Verteilung des Lichts über die gesamte Oberfläche. Es ist erkennbar, dass Kanal 04 (Abbildung 7) die inneren Bereiche der äußeren Positionen nicht ausleuchtet. Dies hängt mit der Positionierung der

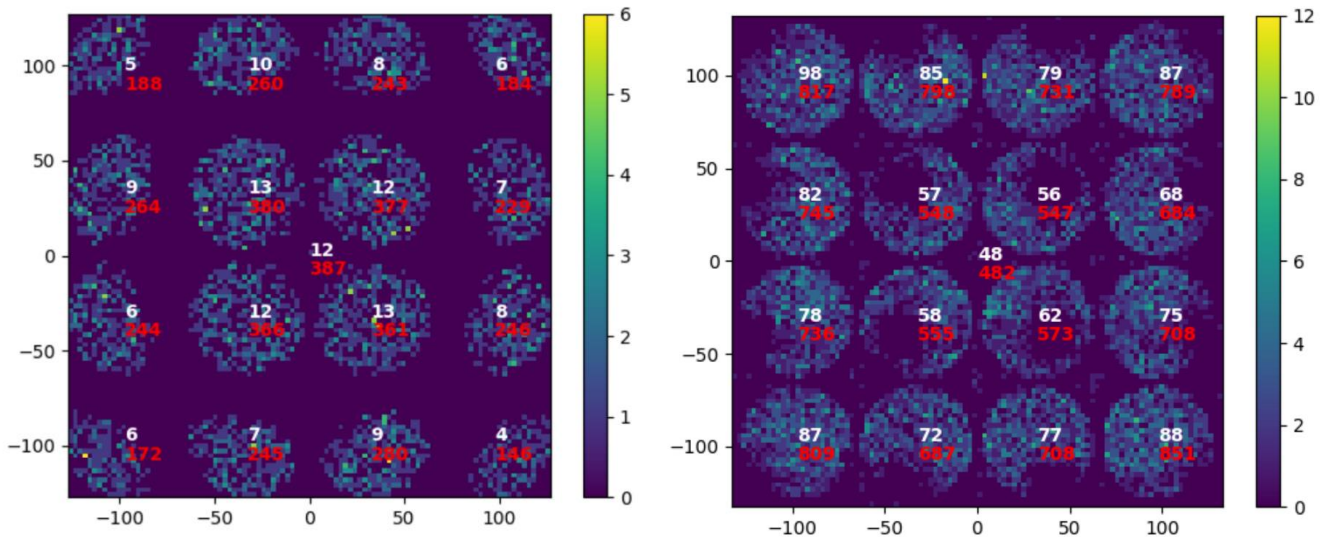


Abbildung 7 - Heatmap LED Kanal 06 und LED Kanal 08

LEDs zusammen. Da die LEDs von Kanal 06 im Inneren des LED-Arrays platziert sind, blockiert der Zylinder das Licht, das die Innenseiten der äußeren Positionen erreichen soll. Bei den LEDs von Kanal 25 (Abbildung 7) tritt ein umgekehrter Effekt auf.

Aufbau eines Messsystems zur Bestimmung der Winkel- und Homogenitätsverteilung einer Beleuchtungsquelle

Im experimentellen Teil wurde ein zylindrischer Filter mit der Fused Deposition Modeling Technik hergestellt, um Lichtstrahlen mit größeren Einfallswinkeln zu filtern. Der Filter hat ein Durchmesser von 6cm und eine Höhe von 33cm. Daraus ergibt sich ein Akzeptanzwinkel von 10° . Die Filtermaße wurde so gewählt, dass Licht unter Berücksichtigung des geforderten Filterwinkels noch auf das Reflektionstarget eines Spektrometers fällt. Als Spektrometer wird ein Broadcom Qmini für den Wellenlängenbereich von 300-1100nm und ein Broadcom Qneo für den Wellenlängenbereich 1100-1700nm verwendet.

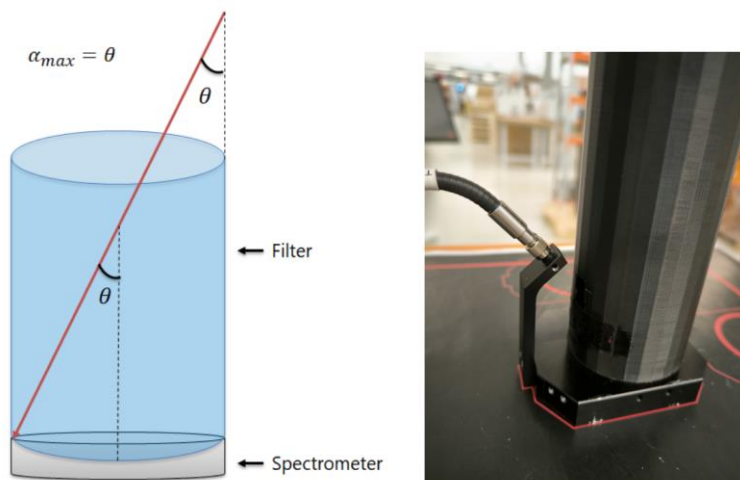


Abbildung 8 - Aufbau des Winkelfilter

Verifizierung der Simulationen anhand von Messungen

Die Verifizierung der Simulationen erfolgte durch den direkten Vergleich der experimentellen Daten mit den Simulationsergebnissen. Die Beleuchtungsstärke an verschiedenen Positionen gemessen und mit den simulierten Werten verglichen, um die Muster oder Verteilungen der Intensitäten zu analysieren. Es hat sich gezeigt, dass Simulation leicht höhere Intensitäten errechnet, hat als im Experiment gemessen worden sind (siehe Abbildung 9). Dies kann auf eine nicht optimale Modellierung der Reflektionseigenschaften des Filtermaterials in der Simulation sowie auf die nicht ideellen Detektoreigenschaften des Spektrometers zurückzuführen sein. Trotzdem ist die Simulation in der Lage die qualitativen Eigenschaften des Lichtfeldes vorherzusagen.

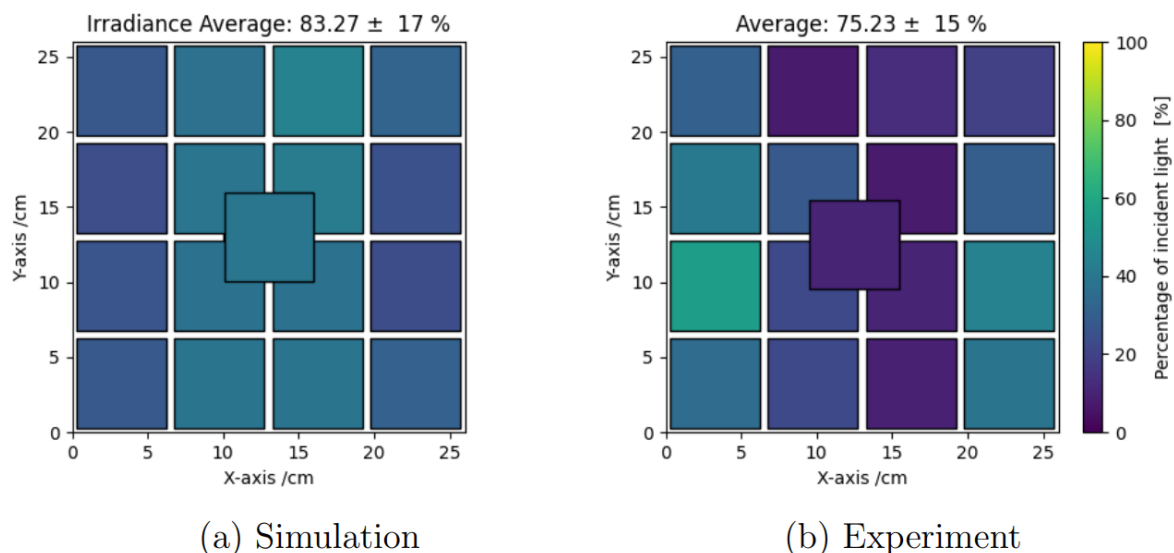


Abbildung 9 - Vergleich LED Kanal 09

Prüfung der Anwendbarkeit der Winkelfilter aus AP1.1 für die Parallelisierung der Lichtfelder

Die Winkelfilter aus AP1.1 sind prinzipiell geeignet, um Licht aus LED basierten Lichtquellen zu parallelisieren (Untersuchungen dazu sind in AP3c ausgeführt).

AP3c Optimierung von Flächendetektoren für die großflächige, spektrale Intensitätsanalyse

Beim CSP wurden Test mit den Winkelfilter durchgeführt. Die Homogenitätsanforderung von <6% konnten erfüllt werden. Bei Verwendung des Filters kamen nur ~2% der Leistung am Detektor an. Das am CSP kleinere Intensitäten gemessen worden sind als bei WAVELABS liegt an der kleineren Akzeptanzwinkel des Filters und an der größeren nicht nutzbaren Fläche des Filters.

Meilenstein M3:

Innerhalb von AP3 wurde der Meilenstein M3 auf Basis der ersten Version des neuartigen Teststandes für winkelabhängigen Transmissionsmessungen nach 15 Monaten erreicht:

M3 (nach 15 Monaten Projektlaufzeit)

Erste Messungen unter der unter AP1 ermittelten Prüfparametern mit optimierten Beleuchtungssystemen.

AP4b Winkelabhängige Messungen an realen Prüfkörpern:

Die in Abbildung 10 dargestellte Grafik illustriert die mittels Simulationssoftware erzeugte Winkelverteilung des Lichtfeldes, das auf eine Probe trifft. Diese Simulationstechnik ermöglicht eine detaillierte Charakterisierung der Lichtstrahlen, wobei verschiedene Winkel und Positionen berücksichtigt werden, die durch räumlich getrennte LEDs verursacht werden. Die Kurven in der Grafik zeigen deutlich, dass die Winkelverteilung nicht nur stark um den Mittelwert zentriert ist, sondern auch signifikante Variationen aufweist, die die räumliche Anordnung und die unterschiedlichen Emissionswinkel der LEDs widerspiegeln. Trotz dieser Komplexität leistet die verwendete Simulationssoftware zuverlässig gute Dienste, um diese Winkelabhängigkeiten präzise zu simulieren und zu visualisieren.

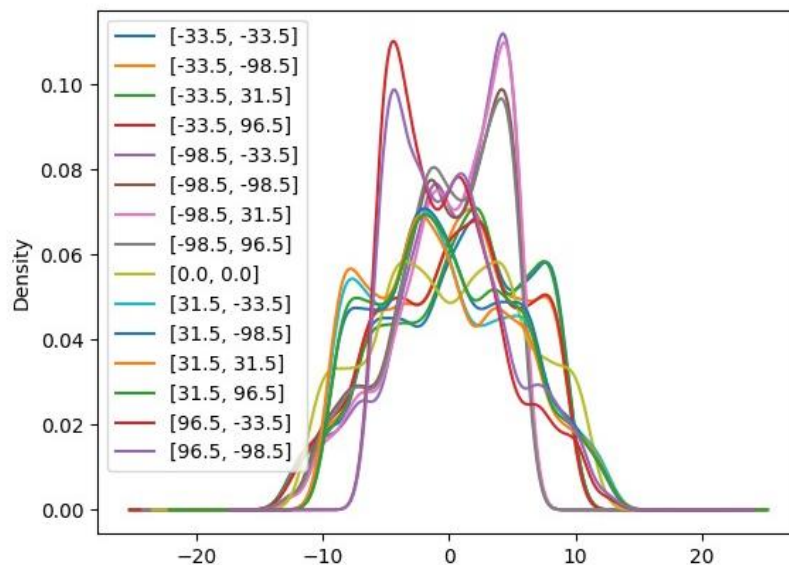


Abbildung 10: Winkelverteilung des Lichtfeldes auf Probenoberflächen an 17 Positionen

Meilenstein M4:

Innerhalb von AP4 wurde der Meilenstein M4 auf Basis der erfolgreichen Validierungsmessungen an realen Prüfkörpern mit herkömmlichen Verfahren und dem optimierten neuartigen Teststand sowie des erstellten und validierten Simulationstools der RPTU nach 21 Monaten erreicht:

M4 (nach 21 Monaten Projektlaufzeit)

Konzept des Messverfahrens praktisch getestet, validiert und ggf. angepasst sowie Interpolationstool zum Einsatz der Messdaten in der Gebäudesimulation erstellt und validiert.

AP5 Konzeption von nationalen Standardisierungsaktivitäten und Anschluss zu nationalen, europäischen und internationalen Normungsaktivitäten

AP5a:

In diesem Arbeitspaket wurden die Ergebnisse aus AP1 bis AP4 fortlaufend bewertet und ausgewählt, welche Erkenntnisse und Inhalte in die Normung und Standardisierung überführt werden sollen. Dazu wurden insbesondere die Beschreibung des praktikablen neuartigen Messverfahrens, als auch geeignete Simulations- und Diskretisierungskonzepte ausgewählt, die auch für die Überführung der Ergebnisse aus herkömmlichen Messverfahren in Datensätze für bauphysikalische Softwaretools von Nutzen sind.

AP5b:

Initiierung der Standardisierungsarbeit In diesem Arbeitspaket wurden das Thema und der Scope für den Standard durch das Projektkonsortium und ein breit aufgestelltes Expertengremium genau festgelegt, diese sind der VDI-EE 2068 zu entnehmen.

AP5c:

Erstellung und Veröffentlichung einer VDI-Expertenempfehlung Zur Erstellung und Veröffentlichung der VDI-EE haben die Projektpartner an zahlreichen Projektmeetings und VDI-Sitzungen teilgenommen. Neben 6 ausgiebigen Projekttreffen und 8 VDI-Arbeitssitzungen, haben zahlreiche bilaterale Treffen zwischen den Projektpartnern sowie themenbereichsbezogene Arbeitsgruppensitzungen zwischen Experten aus dem VDI Gremium stattgefunden. Die VDI-EE 2068 wurde im April 2024 veröffentlicht

Meilenstein M5:

Innerhalb von AP5 wurde mit der Veröffentlichung der VDI-EE im April 2024 und der vom VDI eingeleiteten weiteren Standardisierungsarbeiten der Meilenstein M5 erreicht:

M5 (im April 2024)

Eine VDI-Expertenempfehlung auf Basis der Messergebnisse ist erstellt und veröffentlicht, weitere Standardisierungsarbeiten sind eingeleitet.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personal- sowie die Sachmittel erklären sich aus den in II.1 beschriebenen durchgeführten Untersuchungen und erzielten Ergebnissen. Eine detaillierte Aufstellung ergibt sich aus dem Verwendungsnachweis von WAVELABS.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die erreichten Fortschritte im Bereich der Standardisierung zur Bestimmung der solaren winkelabhängigen Transmissionsgrade von Bauteilen mit großflächigen Strukturen in einer so kurzen Zeit sind erst durch das Projekt ermöglicht worden. Dieses Ziel konnte nur durch die effektive Zusammenarbeit der Projektpartner und den durch das Projekt möglichen umfangreichen Kontakt zu und die Einbindung von potenziellen Anwendern erreicht werden. Die detaillierte Verwendung der Mittel ist im Zahlungsnachweis aufgeführt.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Entwicklung der Simulationssoftware hat entscheidend zur Verbesserung der LED-basierten Sonnensimulationen beigetragen. Diese Software erlaubt es, die Homogenität und Intensitätsverteilung des Lichts aus LED-Quellen präzise ermitteln. Durch den Einsatz von fortschrittlichen Algorithmen kann die Software die Propagation und Streuung von Lichtstrahlen in einem simulierten Umfeld detailgetreu nachbilden. Dies ermöglicht es, unterschiedliche Szenarien und Konfigurationen zu testen, ohne dass physische Prototypen erstellt werden müssen.

Insbesondere ermöglicht die Software die präzise Anpassung der Lichtintensität und -verteilung, um eine gleichmäßigere Ausleuchtung zu gewährleisten, was in der Praxis oft eine Herausforderung darstellt. Die Fähigkeit, Winkelabhängigkeiten und spektrale Verteilungen genau zu simulieren, verbessert zudem die Fähigkeit der Sonnensimulatoren, das natürliche Sonnenlicht realistisch zu imitieren. Dies ist besonders wichtig für Anwendungen in der Photovoltaik und Materialforschung, wo exakte und reproduzierbare Lichtbedingungen essenziell sind.

Darüber hinaus trägt die Software dazu bei, die Entwicklungskosten zu senken und die Effizienz der Entwicklung neuer LED-basierter Sonnensimulationssysteme zu steigern. Durch die frühzeitige Identifikation von potenziellen Problemen in der Lichtverteilung können Anpassungen vorgenommen werden, bevor physische Modelle gebaut und getestet werden. Dies verkürzt die Zeit bis zur Markteinführung neuer Produkte und erhöht die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in der schnelllebigen LED-Industrie.

II.5 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Hinsichtlich Verfahren für die Bestimmung winkelabhängiger Transmissionsgrade von Gebäudeabschlüssen mit ausgedehnten Strukturen ist den Autoren kein Fortschritt bei anderen Stellen bekannt. Somit ist die in diesem Projekt entwickelte Testnorm weiterhin von zentraler Bedeutung.

II.6 Erfolgte Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts erfolgten von WAVELABS keine Veröffentlichungen.

Referenzen

Kein Referenzen