

Follow-e-demo Schlussbericht

Förderkennzeichen: {03EN1032A-F}

Laufzeit: 01.05.2021 - 31.07.2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Dieser Bericht wurde von den folgenden Autoren aus ihren jeweiligen Unternehmen oder Institutionen verfasst:

Gledhill, Sophie; Hildebrandt, Christina;

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

Kindle-Hasse, Brunhilde; Siefert, Wolfgang;

ROWO Coating GmbH, Allmendstr.7, 79336 Herbolzheim

Liebhart, Haiko; Cremers, Jan;

Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstrasse 24, 70174 Stuttgart

Pfannkuchen, Nina; Konetznic, Ulrich;

DUNMORE Europe GmbH, Hausener Weg 1, 79111 Freiburg

Zabel, Hansjörg;

2Construct, Sebaldweg 20, 89079 Ulm

Grüneisen, Albrecht; Noatzsch, Mathias

Novum Membranes GmbH Im Voigtstedter Feld 6, 06528 Edersleben

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Hochschule für Technik
Stuttgart



Danksagung

Das Forschungsprojekt Follow-e-demo wurde in der Zeit vom 01.05.2021 bis zum 31.07.2024 durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EN1032 betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt von ROWO Coating GmbH, Dunmore Europe GmbH, 2Construct GmbH & Co KG, Novum Membranes GmbH, Hochschule für Technik Stuttgart und Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, gemeinsam durchgeführt. **Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung aller Teilprojekte im Sinne eines Gesamtberichts.** Dieser umfasst so auch die folgenden Teilprojekte:

Teilprojekt A Fkz: 03EN1032A ROWO Coating GmbH
Teilprojekt B Fkz: 03EN1032B Dunmore Europe GmbH
Teilprojekt C Fkz: 03EN1032C 2Construct GmbH & Co KG
Teilprojekt D Fkz: 03EN1032D Novum Membranes GmbH
Teilprojekt E Fkz: 03EN1032E Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Teilprojekt F Fkz: 03EN1032F Hochschule für Technik Stuttgart (HFT)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Follow-e-demo

**Energiesparende funktionelle Beschichtungen von ETFE für die
Folienarchitektur:**

***Monitoring eines Prototyps unter Betriebsbedingungen und
Weiterentwicklung der Schichtsysteme***

Verbundkoordinator:

Dr. W. Siefert
ROWO Coating GmbH
Allmendstr. 7
79336 Herbolzheim
Tel.: 07643.40017
Email: wolfgang.siefert@rowo-coating.de

Verbundpartner:

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE),
Dunmore Europe GmbH
2Construct GmbH & Co KG
NOVUM Membranes GmbH
Hochschule für Technik Stuttgart (HFT)

Inhalt

1. Ausgangssituation des Vorhabens	5
1.1 Aufgabenstellung.....	5
1.2 Voraussetzungen	5
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	6
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	9
2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens	12
2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse	12
2.1.1 AP 1 Projektmanagement.....	12
2.1.2 AP 2 Herstellung und Installation der ETFE-Kissen in Demonstratoren	12
2.1.3 AP 3 Monitoring und Bewertung.....	28
2.1.4 AP 4 Entwicklung der spektralselektiven Doppelsilberbeschichtung.....	58
2.1.5 AP 5 Kontrolle und Auswahl der farbstabilen Beschichtungen und der optimalen Lackdicke	84
2.1.6 AP 6 Prüfung der neu entwickelten Beschichtungen	91
2.1.7 AP 7 Potentialabschätzung zur Anwendungsverbreiterung.....	94
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	101
2.3 Notwendigkeit der Arbeit.....	101
2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	102
2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite	105
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	105
3. Anlagen	106
3.1 Erfolgskontrollbericht.....	106
3.2 Berichtsblatt	106

1. Ausgangssituation des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Im Vorhaben waren ETFE-Kissen mit transparenter Sonnenschutz- sowie Wärmeschutzbeschichtung in relevanter Größe hergestellt, aufgebaut und über einen Zeitraum von 2 Jahren unter realen Betriebsbedingungen betrieben und überwacht worden. Dazu waren 5 große ETFE-Kissen (3x3 m²) und 9 kleine ETFE-Kissen (1x1 m²) mit verschiedenen Beschichtungsvarianten bei Novum Membranes aufgebaut. Die beschichteten Folien waren teilweise gezielt mit Defekten versehen, diese wiederum teilweise mit Reparaturlack behandelt, um somit drei Varianten - Defekte, reparierte Defekte und makellose Folie - über die Zeit beobachten zu können. Umfangreiche Sensorik hat die Betriebsbedingungen festgehalten. Nach 1 und 2 Jahren wurden aus den großen Demonstratoren Proben entnommen und jeweils ein kleiner Demonstrator je Variante geöffnet. Die beschichteten Folien wurden auf Schäden untersucht und die Beständigkeit der Folien positiv bewertet. Im Projektverlauf war daher TRL 7-8 erreicht.

Die Demonstratoren waren mit einem Lack auf Basis eines fluorierten Acrylatharzes beschichtet. In der Mitte der Projektlaufzeit teilte der Projektpartner Dunmore mit, dass der Lack nicht mehr verfügbar sei (die Produktion dieses Lacks wird eingestellt). Das grundlegendere Problem, das damit verbunden war, war das von der Europäischen Kommission angedrohte teilweise Verbot bestimmter PFA-Materialien, was zur Folge hatte, dass die Entwicklung von Verwendungsmöglichkeiten von fluorierten Lacken nicht mehr so attraktiv war.

Im Projektänderungsantrag vom 12.7.23 wurden vor dem Hintergrund des zukünftigen Verbots fluorierter Lacke Änderungen bezüglich der Zielsetzung des Projekts beantragt und am 27.10.23 genehmigt. Es wurde vereinbart, die restlichen Projektmittel für die Recherche zu fluorfreien Lacken zu verwenden. Mit geeigneten Lacken wurden Beschichtungen und Stabilitätstests durchgeführt, um eine Vorqualifizierung zu durchzuführen.

Der zweite Schwerpunkt der ursprünglichen Vorhaben war die funktionalen Sonnenschutzschichten hinsichtlich ihrer Selektivität weiterzuentwickeln. Zudem wurde in einem weiteren Arbeitspaket der Einfluss der Schichtdicken auf Farbe und Farbstabilität genauer untersucht. In demselben Projektänderungsantrag wurde der Schwerpunkt auf die Entwicklung dunklerer Sonnenschutzbeschichtungen unter Verwendung der Sonnenschutzspezialbeschichtung und weg von der Doppel-Low-E-Beschichtung gelegt.

Das Sonnenschutzspezialprodukt erwies sich in den 2-Jahres-Feldtests als sehr stabil, und auch der Sonnenschutz wurde von Novum Membranes als ein interessantes Produkt beurteilt. Die Abscheidung der doppelten Low-E-Beschichtung hingegen war aufwändig und deren Selektivitätsgewinn wurde für die Verwendung von ETFE-Kissen als nicht signifikant angesehen.

1.2 Voraussetzungen

Um die Projektziele zu erreichen, wurde folgendes Vorgehen durchgeführt:

- Aufbau von geeigneten Demonstratoren (Sonnenschutz sowie Wärmeschutz) in relevanter Größe (3 m x 3 m) inklusive Luftstromversorgung und -konditionierung
- Aufbau von kleineren Demonstratoren (1 m x 1 m) zur Beurteilung von Schichtvarianten (eine dunklere funktionale Schicht, höhere Lackdicke) inklusive Luftstromversorgung und -konditionierung
- Monitoring der Demonstratoren und Umgebungsbedingungen über einen Zeitraum von mindestens zwei Jahren
- Beurteilen der Beständigkeit der Beschichtungen durch Probenentnahme bei den großen Demonstratoren sowie Öffnen der kleinen Kissen nach einem Jahr und 2 Jahren

- Weiterentwicklung des funktionellen Schichtsystems in Hinblick auf Selektivität der Sonnenschutzschicht (Doppelsilberschicht); Annäherung an Werte in der Glasindustrie
- Betrachtung alternativer Einsatzmöglichkeiten von funktionalen ETFE-Folien
- Durchführen von g-Wert Messungen

Mit der Projektänderung wurde der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeit auf folgende Themen gelegt:

- Screening einer Reihe von neuen Lacken, die PFA-frei sind
- Beschichtung von gesputterten Proben und deren Prüfung in der zuvor definierten „Testmatrix“ (Klimakammer, Kondensationstests, „Pressure-Cooker“-Tests, Prüfung auf Schweißbarkeit)

Damit waren folgende Ziele bis zum Projektende erreicht:

- Vervollständigung und Bewertung der Beschichtung von Prototyp-ETFE-Kissen im betrieblichen Umfeld (TRL 7/8 erreicht)
 - ✓ Sonnenschutz Spezial-Beschichtungen wurden als sehr beständig bewertet
 - ✓ Wärmeschutz-Beschichtungen auf der Mittellage wurden als vielversprechend und beständig bewertet
- Qualifizierung des g-Wertes des ETFE-Kissens
- Besseres Verständnis der Farbstabilität in Abhängigkeit von der Barriere-Schicht und den Beschichtungsbedingungen
- Identifizierung von möglichen PFA-freien Ersatzlacken

Am Ende des Projekts wurde vereinbart, dass die 5 Demonstratorkissen von Novum (3m x 3m) und die verbliebenen 4 Demonstratorkissen von 2construct (1m x 1m) noch 2 Jahre im Outdoor-Teststand bei Novum bleiben werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde im Rahmen von 7 Arbeitspaketen durchgeführt, die im nächsten Abschnitt und im nachstehenden Gantt-Diagramm beschrieben sind. Wie in Abschnitt 1.1 beschrieben, wurde das Projekt nach zwei Jahren geändert (nach Antrag auf Änderung am 12.7.23), was sich hauptsächlich auf AP 4.3 und AP 5.3 auswirkte.

FKZ 03EN1032

Tabelle 1 Aktualisierter Gantt Chart (seit der Projektänderung) und echter Arbeitsplan, der eingehalten wurde.

		2021							2022												2023												2024								
Arbeitspakete		Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Juni	Juli	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb	März	Apr	Mai	Juni	Juli	
AP	Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
AP1	Projektmanagement																																								
AP2	Herstellung und Installation der ETFE-Kissen in Demonstratoren																																								
2.1	Herstellung des beschichteten ETFE																																								
2.2	Konstruktion und Installation des Kissens auf dem Testgelände						M1																																		
AP3	Monitoring und Bewertung																																								
3.1	Sensoreinrichtung und tägliche Überwachung der Eingangsparameter und des visuellen Zustands des Kissens					M2																																			
3.2	Jährliche Zerlegung der Kissen und Laborcharakterisierung der Beschichtungen																																						M3		
3.3	Bewertung des g-Wertes der Demonstratorkissen																																								
AP4	Entwicklung der spektralselektiven Doppelsilberbeschichtung																																								
4.1	Gebäudesimulationen																																								
4.2	Entwicklung des doppelten Low-e Beschichtungssystems																																								
4.3	Entwicklung von Schichtsystemen mit niedriger solarer Transmission (Schwerpunkt: Sonnenschutz Spezial)																																								
AP5	Kontrolle und Auswahl der farbstabilen Beschichtungen und der optimalen Lackdicke																																								
5.1	Simulation und Herstellung von Sputterbeschichtungen mit spezifizierten und stabilen optischen Eigenschaften																																						M6		
5.2	Installation eines aufgerüsteten Online-Monitorings an der Rolle-zu-Rolle-Sputteranlage									M5																															
5.3	Recherche und Auswahl von fluorfreen Lacken																																								
AP6	Prüfung der neu entwickelten Beschichtungen																																								
AP7	Potentialabschätzung zur Anwendungsverbreiterung																																								
	Personenmonate [PM] von ISE und HFT																																								
	Produktive Arbeitsstunden [h] von ROWO, Dunmore, 2Construct u. Novum																																								

Dieses Projekt wurde als Verbundprojekt durchgeführt. Die Schwerpunkte der einzelnen Partner sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Arbeitsteilung

Nr.	Institution	Typ	Arbeitsschwerpunkte
1	ROWO Coating	Hersteller	Projekt-Koordinierung. Sputterbeschichtungen von ETFE-Folienrollen für die Demonstratorkissen. Bereitstellung von Musterrollen für die Demonstratorkissen (Lieferung an 2Construct und Novum Membranes) Weiterentwicklung der gesputterten funktionalen Schichten und Upscaling auf größere Breiten Musterentnahme und optische Kontrollmessung, Schnellkorrosionstests nach Lackierung bei Dunmore, Abriebbelastungen
2	Fraunhofer ISE	FuE	Untersuchung und Bewertung der entnommenen Demonstratorproben aus den großen Demonstratorkissen sowie der entnommenen kleinen Demonstratorkissen nach Beenden der Tests mittels Fotos, Lichtmikroskop, ggf. REM, EDX und Fourierspektrometer Entwicklung Sputterschichten, Entwicklung, Durchführung und Analyse von Stabilitätstests Besonderer Schwerpunkt sind doppelte Low-E-Beschichtungen und Low-Tsol-Produkte. Im letzten Jahr intensive Unterstützung bei der Entwicklung von PFA-freien Lacken. g-Wert Messung von Demonstratorkissen
3	Dunmore Europe	Hersteller	Lackierung des Materials für die Demonstratorkissen. Recherche PFA-freie Lacke, Versuche und Stabilitätstests.
4	2Construct	Anwender	Verschweißen der beschichteten ETFE-Folien für die kleinen Demonstratorkissen Einbringen der gezielten Schädigungen der beschichteten Folien und Aufbringen des Reparaturlacks Herstellung der kleinen Demonstratorkissen (10 Stück à 1 m x 1 m). Konstruktion der kleinen Rahmen Herstellung von Demonstratorkissen für g-Wert Messung
5	Hochschule für Technik Stuttgart	FuE	Erstellen des Monitoringkonzepts für die Demonstratorkissen; Installation des Monitorings Monitoring und Auswertung der erfassten Daten

		Analyse weiterer Einsatzmöglichkeiten von beschichteten ETFE-Folien mittels Gebäudesimulationen
Novum Membranes	Anwender	Bereitstellung des Demonstratortestgeländes Erprobung der Schweißtechnik und des Handlings in Seriengröße; Verschweißen der beschichteten ETFE-Folien für die großen Demonstratorkissen, Herstellung der großen Demonstratorkissen (5 Stück à 3 m x 3 m) Aufbau der Demonstratorkissen inklusive Einhausung von 3 der kleinen Demonstratorkissen Bereitstellung der Infrastruktur zum Betrieb der Demonstratorkissen inklusive Bereitstellung der Luftversorgung und – konditionierung Monatliches Monitoring der ETFE-Kissen mittels Fotos sowie nach extremen Wetterereignissen (beispielsweise Hagel oder Starkregen)

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die transparenten Elemente der Gebäudehülle sehen sich mitunter den widerstreitenden Anforderungen ausgesetzt, eine freie Sichtverbindung in den Außenbereich bei gleichzeitigem leistungsfähigen Wärme- bzw. Kälteschutz zum Erhalt eines energieeffizienten Komforts im Innenraum gewährleisten zu müssen. Bei konventionellen Mehrscheibenverglasungen existieren eine Reihe technischer Lösungen wie die Befüllung des Gaszwischenraumes mit Edelgasen, die Erhöhung der Anzahl der Glasschichten und – zwischenräume und das Aufbringen von Beschichtungen mit selektiver Wirkung und/oder niedriger Emissivität, die seit langem Standard am Markt sind - u.a. in Deutschland - mit entsprechender Breite zur Anwendung kommen. Darüber hinaus gibt es für Glaselemente weitere innovative Lösungen, welche sich zum Teil bereits als kommerzielle Lösung etabliert haben. Darunter fallen Fensterelemente mit sog. Vakuumverglasungen, bei denen der Scheibenzwischenraum evakuiert ist, sowie Lösungen zur dynamischen Beeinflussung des Wärme- und/oder Strahlungsdurchgangs mittels photochromer, thermochromer und elektrochromer Schichtsysteme.

Die technischen Lösungen zum sommerlichen bzw. winterlichen Wärmeschutz, die bei konventioneller Mehrscheibenverglasung zur Anwendung kommen (Füllung mit Edelgasen, Beschichtungen mit niedrigem Emissionsgrad) können bisher im Membranbau nicht umgesetzt werden, da es hier keine marktverfügbaren Lösungen gibt. Die Befüllung mit Edelgasen ist aufgrund des hohen Volumens des Folienzwischenraumes sowie der Leckage, insbesondere bei pneumatisch gestützten Membranen und deren Lufthaltungssystem, unpraktikabel. Eine Erhöhung der Anzahl der Zwischenlagen erzielt eine Verbesserung des Wärme- und Kälteschutzes auf Kosten der Transmissivität. Der Transfer innovativer dynamischer Verschattungssysteme mittels photo-, thermo- bzw. elektrochromer Systeme auf den Membranbau ist bisher Gegenstand verschiedener Forschungsvorhaben (z.B. das Verbundvorhaben FLEX-G, FKZ 03ET1470) und hat bisher noch nicht die Reife einer anwendbaren technischen Lösung erreicht.

Die im Membranbau marktüblichen Lösungen zur Beeinflussung des Wärmedurchgangs beschränken sich zumeist auf durchgehende bzw. strukturierte Bedruckung oder Einfärbung des Folienmaterials und einer

damit verbundenen Reduzierung der Transmission und des radiativen Wärmestroms durch die Gebäudehülle.

Auch im Membranbau existieren innovative Lösungen zur Beeinflussung des Wärmedurchgangs, welche in Einzelprojekten zur Anwendung kommen. Dazu zählen beispielsweise dynamische Verschattungslösungen mittels mobiler komplementär bedruckter Zwischenlagen, welche druckgesteuert zur Überlagerung gebracht werden sowie statische Ansätze durch die Bedruckung der sonnenzugewandten Seite der gewölbten Außenlage, wodurch eine winkelselektive Beschränkung der direkten Einstrahlung ermöglicht wird.

Kommerziell verfügbar sind im ETFE-Membranbau bislang bedruckte ETFE-Folien, die durch Teilabschattung der bedruckten Bereiche die einfallende Solarstrahlung reduzieren, siehe Abbildung 1. Die visuelle und solare Transmission ist hier in etwa gleich, diese Schichten sind nicht wellenlängenselektiv. (Teil)transparente Wärmeschutzfolien auf ETFE-Basis sind derzeit nicht kommerziell verfügbar.

Wellenlängenselektive Beschichtungen mit geringem Emissionsgrad bei gleichzeitig hoher visueller Transmission, analog zu low-e Beschichtungen von Glaselementen, sind auf ETFE bisher nicht kommerziell verfügbar.

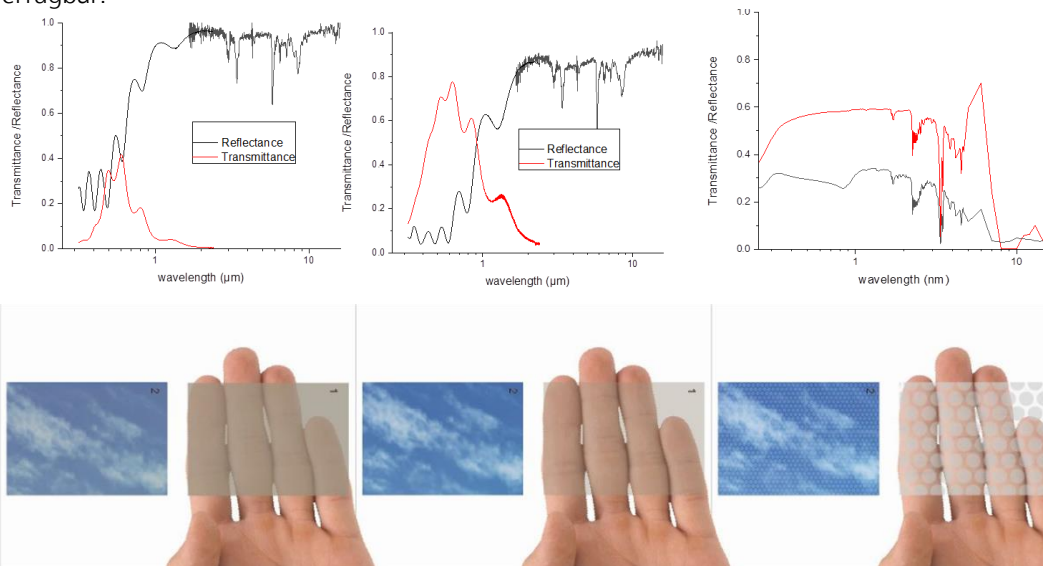


Abbildung 1: Im Vorgängerprojekt follow-e2 entwickelte Sonnen- und Wärmeschutzschichten (links, Mitte) im Vergleich zur kommerziell erhältlichen bedruckten ETFE-Folie (rechts); Reflexions- und Transmissionspektren der Schichten (oben) sowie Fotos (unten)

Um teilweise vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, werden ETFE-Kissen, entsprechend heutigem technischen Stand, mit bis zu 6 Folienlagen und Kombination verschiedener Bedruckungen / Einfärbungen ausgeführt. Dieses bedeutet im Vergleich zu selektiven Folien (2–3-lagiger Aufbau) einen mehrfachen Materialaufwand, nicht nur der Folien, sondern auch im Bereich der Aluminiumprofile und weiterer Konstruktionsteile. Diese Lösungen sind grenzwertig in Bezug auf Betriebssicherheit, Haltbarkeit, Instandhaltung, sowie hohem Risiko für Betreiber und Hersteller. Weiterhin basieren diese Lösungen auf unregelmäßigen Durchströmungsöffnungen zwischen den einzelnen Lagen, welche in den Kammern ein Druckdelta erzeugen. Letztendlich wird am Ende der Durchströmungskette die konditionierte Stützluft permanent in die Umwelt abgelassen, was einen hohen Energieverlust /-bedarf bedeutet. Selektive Folien sind somit ein Key-Produkt, um den Stand der Technik und Einsatzbereiche auf ein benötigtes neues Level zu heben.

Neben der technischen Reduktion der Transmission ist eine Bedruckung oder Einfärbung auch ein Eingriff in die Ästhetik des Gebäudes und muss daher bereits frühzeitig bei der Konzeption eines Bauwerkes mit ETFE Folien bedacht werden. Eine wünschenswerte Trennung von Aussehen und thermischer Leistung ist mit der bisherigen Technik nicht möglich.

Die Beschichtung der Oberfläche des Fluorpolymers ETFE ist aufgrund der hydrophoben Grenzflächen sowie der mechanischen Eigenschaften (Wärmeausdehnung und E-Modul) und der damit verbundenen mechanischen Lasten auf die Schichtsysteme, im Gegensatz zu Glas bzw. anderen in der Architektur üblichen Polymeren, mit besonderen Herausforderungen verbunden, welche bisher noch nicht vollumfänglich gelöst werden konnten. Eine weitere Herausforderung stellt die Gewährleistung der Resistivität der Schichten gegen Umwelteinflüsse und der Handhabung bei der Montage dar.

Im Vorgängerprojekt FOLLOW-E 2 konnten diese Herausforderungen soweit bewältigt werden, dass es erfolgreich gelungen ist, wellenlängenselektive Schichtsysteme niedriger Emissivität auf ETFE aufzubringen und mittels eines Schutzlacks gegen Umwelteinflüsse zu schützen.

Ein Nachweis der Dauerhaftigkeit und Widerstandsfähigkeit der applizierten Schichtsysteme im Feldtest steht noch aus und soll im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erbracht werden. Damit soll die nächste Stufe zur technischen Reife erreicht werden.

2. Ablauf und Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

2.1.1 AP 1 Projektmanagement

Die Koordination erfolgt primär durch ROWO GmbH als Projektkoordinator unterstützt durch Fraunhofer ISE. Neben der Steuerung und Überwachung des Projektverlaufs und der termingerechten Erbringung der geplanten Meilensteine und Ergebnisse, beinhaltet das Arbeitspaket auch die Erstellung und Sicherstellung der termingerechten Lieferung entsprechender Unterlagen und Projektberichte sowie die Kommunikation mit dem Projektträger und den Verbundprojektpartnern.

2.1.2 AP 2 Herstellung und Installation der ETFE-Kissen in Demonstratoren

(ROWO, Dunmore, ISE, 2Construct, Novum)

Produktion und Installation der beschichteten ETFE-Kissen am Hauptsitz von Novum Membrane in Edersleben.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M1 Installation der ETFE-Kissen und des Monitorings (Monat 6)	Installation der ETFE Kissen	M9 (Feb 22)	Ziel war M6 – 3 Monate Verspätung wegen Verzögerungen bei der Beschichtung.
	Einrichtung des Sensorsystems erste Datenerfassung	M12(Mai 22)	
	Vervollständigung der Sensorik, dauerhafte Datenerfassung	M16 (Aug 22)	Verschiedene Unwägbarkeiten in der Personalsituation und der Beschaffung der Messtechnik haben zu einer Verzögerung in der Fertigstellung des Monitoringsystems geführt

AP2.1: Herstellung des beschichteten ETFE

Die erste Aufgabe bestand darin, das ETFE entsprechend dem bisherigen Entwicklungsstand aus dem Vorgängerprojekt zu beschichten. Die Rolle-zu-Rolle-Beschichtung von ETFE-Folien gestaltet sich im Vergleich zu Polyesterfolien deutlich schwieriger. Die wesentlichen Merkmale von ETFE-Folien sind die Dehnung der Folie unter der Temperatur- und Zugbelastung im Abscheideprozess im Produktionsrollcoater, die Dickenschwankungen der ETFE-Folie und damit einhergehend eine ungleichmäßige Kühlung auf der Beschichtungswalze und z. T. eine hohe texturierte Oberflächenrauheit mit negativen Auswirkungen auf die erforderliche Barrierschicht oder auch milchige Folienoberflächen mit einem hohen Haze (6 – 9,5%). Von großem Nachteil ist die geringe thermomechanische Belastbarkeit, die gerade in ausgeprägten Kolbenringen zu erheblichem Schrumpf führen kann.

Tabelle 3: Optische Charakterisierung der eingesetzten ETFE-Folien und PET-Folien mittels Fotospektrometer Shimadzu 2600UV mit Ulbrichkugel

ETFE (250 μm)	Tvis [%]	b*	Rvis [%]	b*	Avis [%]
ETFE_1	88,91	2,48	8,89	-11,33	2,2
ETFE_2.1	90,83	2,01	6,7	-8,51	2,47
ETFE_2.2	91,33	1,69	6,67	-8,15	1,97
PET_1	87,61	1,69	10,82	0,768	1,58
PET_2	88,35	0,75	10,53	-1,87	1,47

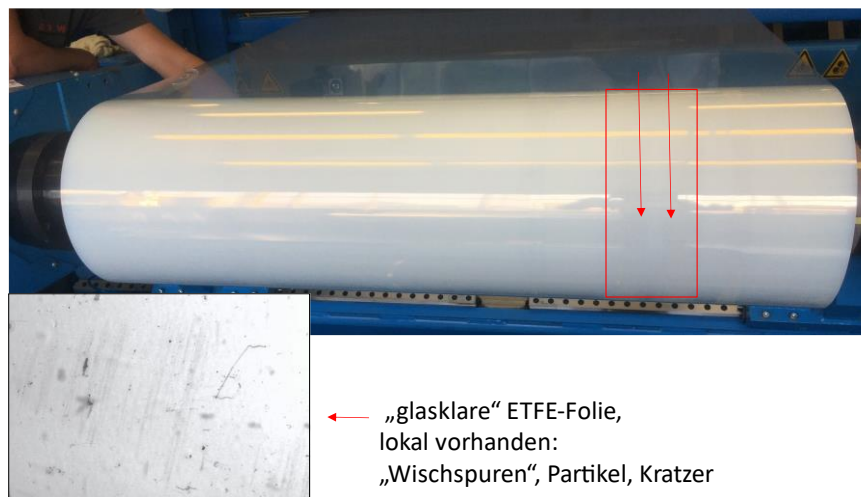


Abbildung 2: Unbeschichtete ETFE-Folienrolle mit z.T. matten Streifen und lokal auftretenden Kolbenringen (siehe rote Pfeile)

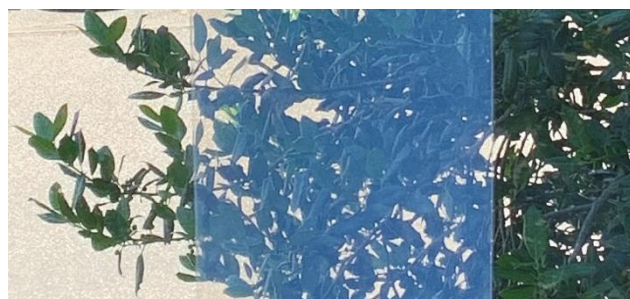


Abbildung 3: ETFE-Folie mit milchigem Erscheinungsbild im Vergleich zum Fensterglas in Durchsicht

Auch sind die ETFE-Folienrollen erfahrungsgemäß als nicht so partikelarm einzustufen wie beispielsweise Display-Folien aus Polyester. Große Vorteile bieten die ETFE-Folien jedoch hinsichtlich Zugbelastbarkeit, sehr geringer Wasseraufnahme und vor allem großer Korrosionsbeständigkeit im Außenbereich. Aufgrund der oben beschriebenen Nachteile gestaltet sich die Beschichtung von ETFE-Folienrollen im

Vergleich zu Polyesterfolien-rollen deutlich schwieriger. Bei Untersuchungen von ETFE-Folienrollen verschiedener Folienherstellern schnitten im Vorgängerprojekt FOLLOW-E 2 die NOWOFOL-Folien am besten ab. Auch der Ausblick auf eine zukünftige bessere Folienqualität noch während der Projektlaufzeit beeinflusste die Entscheidung für den Einsatz der ETFE-Folie von NOWOFOL positiv. Denn NOWOFOL hatte die Investition in eine neue ETFE Folienproduktionsanlage Anfang 2021 getätigt. Zu Projektbeginn wurden mit der neuen ETFE-Anlage bereits erste Rollen hergestellt, so dass für die Membranfolienbeschichtungen sowohl die neue Folienqualitäten (ETFE_2) in 100 µm und 250 µm als auch die alte ETFE_1 eingesetzt werden konnten. An die im Projekt zu beschichtenden ETFE-Folienrollen wurden immer Vorlauf- und Nachlaufrollen angebracht. Dafür wurden im Vergleich zu den ETFE-Folien die kostengünstigeren Polyesterfolien in optisch guter Qualität verwendet. Diese Folien wurden auch für das Einfahren der Einzelschichten sowie für die Schichtentwicklungen eingesetzt.

Während des Follow-e-demo Projektes wurden bei ROWO die Schichtentwicklungen und Aufskalierungen auf zwei verschiedenen Produktionsrollcoatern durchgeführt. Wie in den Vorgängerprojekten kam dafür - wie im Projektantrag geplant - zunächst der Galileo Rollcoater zum Einsatz (AP 4.3.1). In den ersten 2,5 Projektjahren wurden die Entwicklungsschritte auf dieser Anlage durchgeführt, bevor dann im Zuge der Arbeitsplanänderung die Aufskalierbarkeit der Sonnenschutzschichten auf ROWOs neuem Sputterrollcoater auf ETFE-Folienrollen untersucht werden konnte (AP 4.3.2)



Abbildung 4: Im Follow-e-demo Projekt bei ROWO Coating eingesetzte Produktionsrollcoater:
Bild links: Galileo Rollcoater; Bild rechts: neuer Sputterrollcoater

Beide Sputteranlagen unterscheiden sich grundsätzlich hinsichtlich der Abscheidung der Sputterschichten. Die Bahngeschwindigkeit bei der Galileo-Anlage kann prinzipiell oberhalb von 3 m/min in diskreten 1 m/min- Schritten erhöht und die Walzentemperatur von -32 bis + 40 °C eingestellt werden. Aufgrund dieser Vorgaben müssten hohe Leistungen bei den Sputterquellen eingesetzt werden, um die erforderlichen Schichtdicken prinzipiell abscheiden zu können. Die hohen Sputterleistungen sind aber aufgrund der geringen thermo-mechanischen Belastbarkeit nicht zielführend. Daher wurden die geplanten Schichten in mehrere Beschichtungsläufe aufgeteilt. Die Plasmabehandlung, die Abscheidung der Barrierschichten B und der Elektroden-schicht H1/Ag/H2 wurden je in separaten Läufen unter Anpassung der Wickelparameter durchgeführt. Für den Folientransport unter Bewahrung einer möglichst guten Planlage musste ein Kompromiss erarbeitet werden. Eine zu hohe Zugspannung hätte die Folie im Bereich der Kolbenringe und am Folienrand stärker aufgebaut, eine zu geringe Zugspannung den Folientransport erschwert, da die ETFE-Folie bereits nach der ersten Plasmabehandlung „Klee-eigenschaften“ zeigte. Die realisierbare Planlage ist mehr oder weniger aber schon durch die jeweils vom Folienhersteller gelieferte Qualität gegeben. Eine sehr schlechte Planlage, die im Allgemeinen vermieden werden konnte, führte eher zu Kratzern.

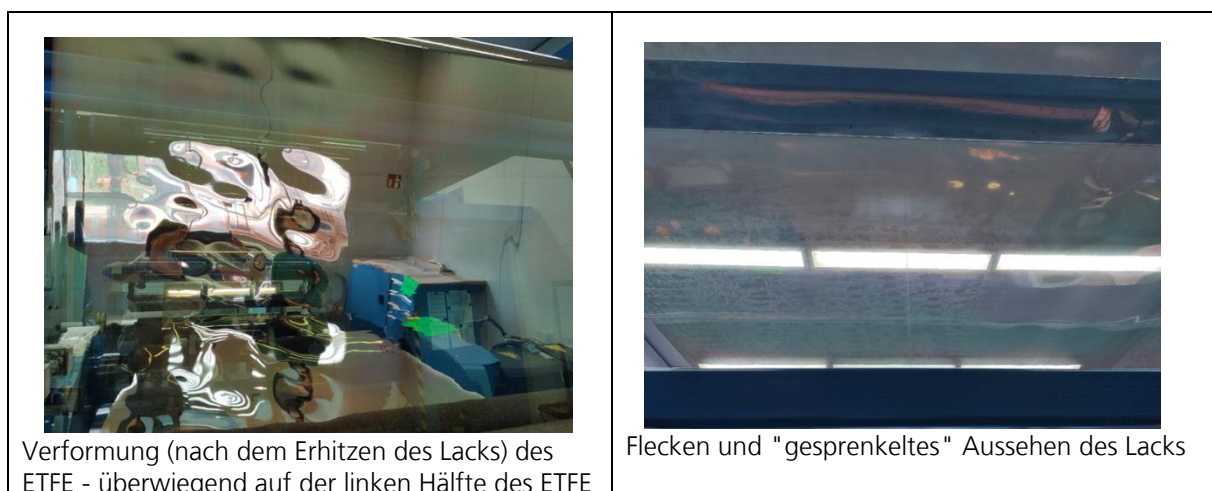
Im Gegensatz dazu kann die Bahngeschwindigkeit im neuen Sputterrollcoater ab einer Geschwindigkeit von 0,25 m/min in 0,01 m/min-Schritten erhöht werden und die Walzentemperatur von -15 °C bis + 40°C und erfüllt aufgrund der damit einhergehenden effektiveren Kühlung der beschichteten Folie eher die Voraussetzungen für die Sonnenschutzbeschichtung einer hoch qualitativen ETFE-Folienrolle in nur einem Beschichtungslauf, was im Arbeitspaket AP 4.3.2 umfassend geprüft wurde.

Bereits bei der Beschichtung der ETFE-Folienrollen für die Herstellung der Membranfolienkissen wurde für den Sonnenschutz ein neues Schichtsystem auf dem Galileo Rollcoater aufskaliert. Die Details zu dem Schichtsystem sind in AP 4.3.1 beschrieben. Das Schichtsystem wurde zunächst auf der Rolle-zu-Rolle-Produktionslinie bei ROWO gesputtert und dann bei Dunmore mit dem im Vorgängerprojekt (Follow-e2) entwickelten Standardlack (Acrylat mit Zusätzen von Fluor-Oligomeren) lackiert. Vier verschiedene beschichtete ETFE-Rollen wurden hergestellt. Diese sind in **Tabelle 4** beschrieben.

Tabelle 4: Zusammenfassung der verschiedenen Beschichtungen, die für die Prototypen der ETFE-Membrankissen hergestellt wurden.

Beschichtung	ETFE dicke (µm)	Beschreibung Sputterschicht	Lackdicke (µm)
Sonnenschutz Standard – mit Standardlack	250	Dickeres gesputtertes Silber mit optisch optimierten Antireflex-Barriereschichten	1,35
Sonnenschutz Standard – mit dickem Lack	250	Dickeres gesputtertes Silber mit optisch optimierten Antireflex-Barriereschichten	1,6
Sonnenschutz Spezial - mit Standardlack	250	Materialvariationen zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit	1,35
Wärmeschutz Standard – mit Standardlack	100	Dünnes gesputtertes Silber mit optisch optimierten Antireflex-Barriereschichten	1,25

Das beschichtete ETFE wurde bei ROWO visuell geprüft. Von jeder Variante wurden Proben ausgeschnitten und unter dem Lichtmikroskop untersucht. Eine Zusammenfassung der Fotos und lichtmikroskopischen Aufnahmen ist in den drei folgenden Tabellen enthalten.



FKZ 03EN1032

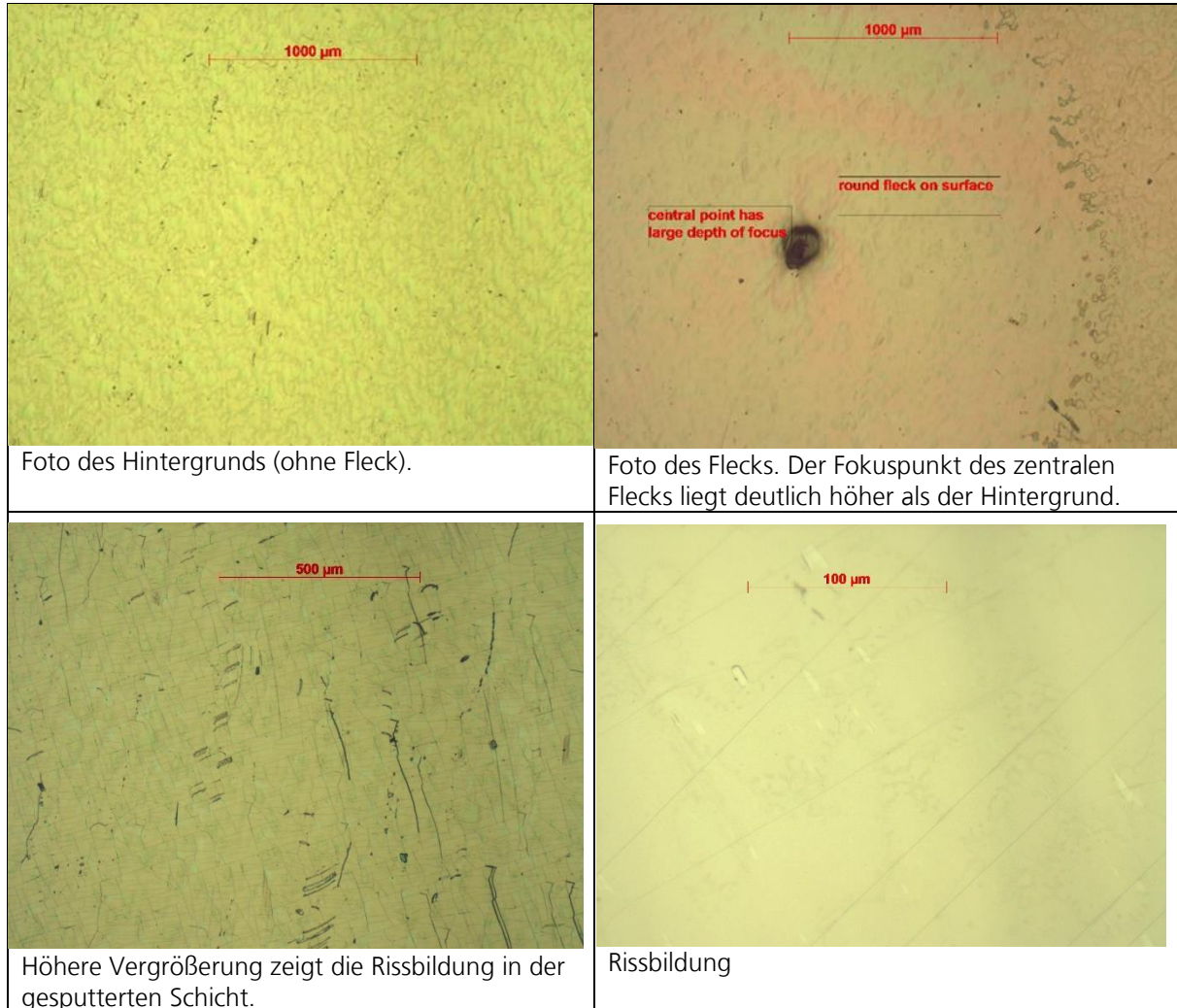


Abbildung 5 Sonnenschutz-Standard mit Standardlack- Beschichtung auf ETFE. Oben: Fotos auf Umwickler bei ROWO. Mitte und Unten: Lichtmikroskop Bilder der Proben.

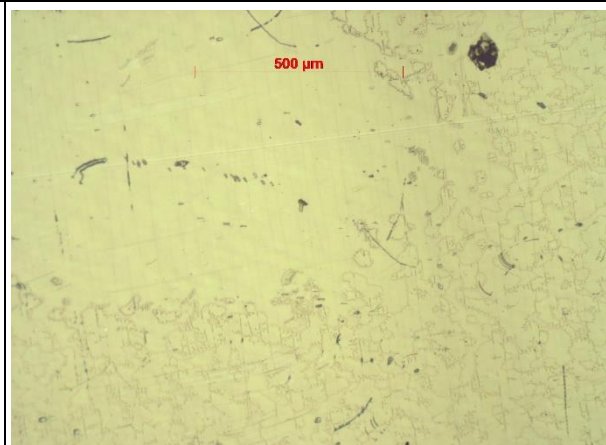
FKZ 03EN1032



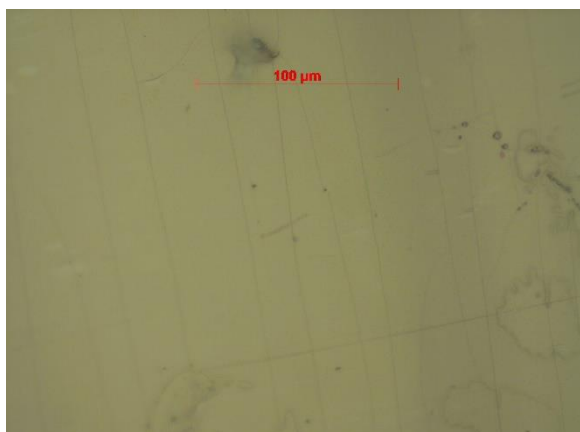
Flecken und "gesprenkeltes" Aussehen des Lacks
- bei dickerem Lack stärker ausgeprägt als bei
dünnerem Lack



Lichtmikroskopische Aufnahme mit Flecken und
Hintergrundstruktur im Lack.



Lichtmikroskopische Aufnahme mit Flecken und
Hintergrundstruktur im Lack (höhere
Vergrößerung).



Höhere Vergrößerung zeigt die Rissbildung in der
gesputterten Schicht.

Abbildung. 6: Sonnenschutz-Standard mit dicker Lackbeschichtung auf ETFE. Oben: Fotos auf Umwickler bei ROWO.
Mitte und Unten: Lichtmikroskop Bilder mit steigender Vergrößerung.

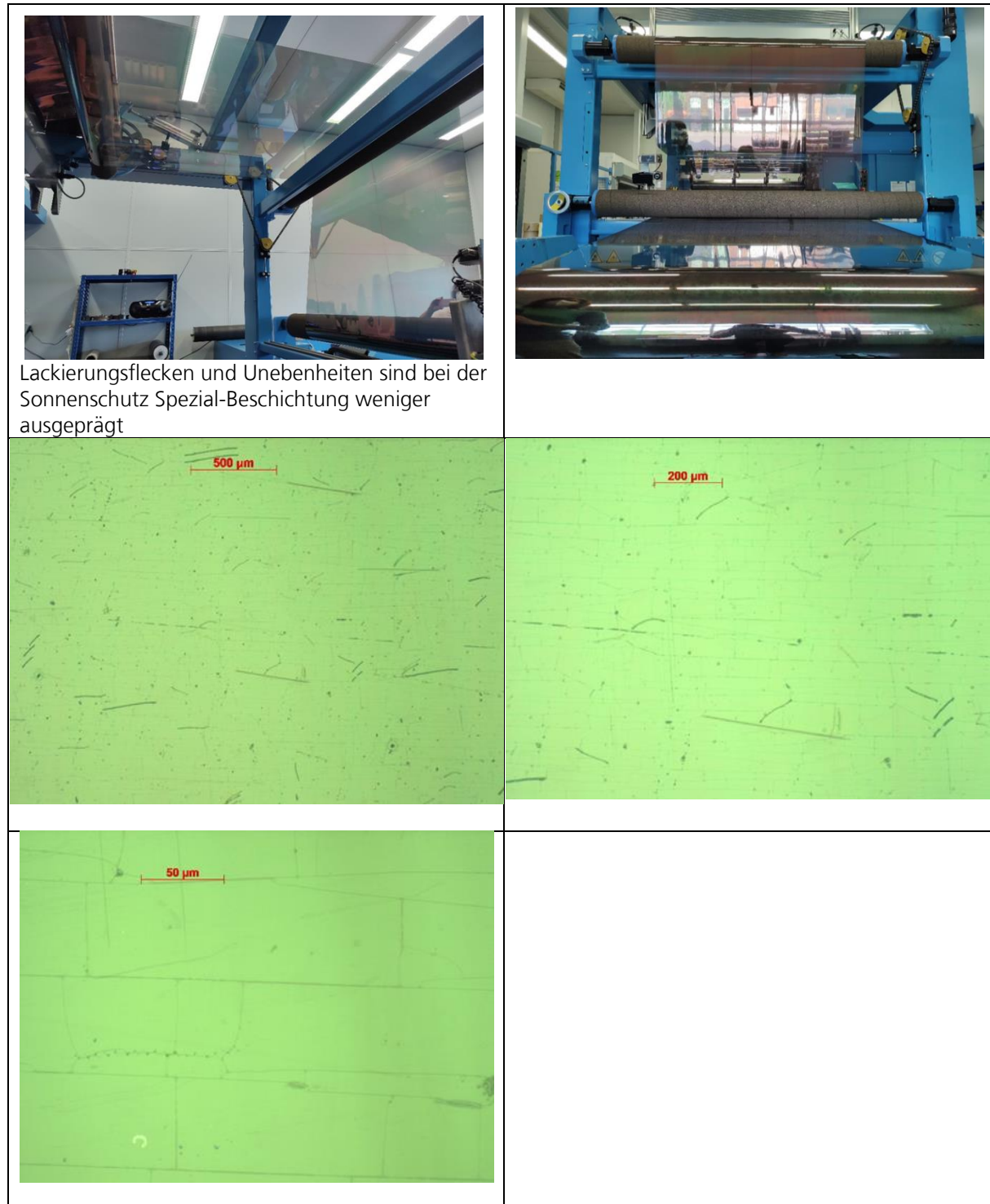


Abbildung. 7: Sonnenschutz-Spezial – mit Standardlack- Beschichtung auf ETFE. Oben: Fotos auf Umwickler bei ROWO. Mitte und Unten: Lichtmikroskop Bilder: Rissbildung in der gesputterten Schicht, aber keine Flecken.

FKZ 03EN1032

Die Hauptaufgabe des Fraunhofer ISE bestand in der Analyse der gesputterten Beschichtungen vor und nach der Lackierung. Das beschichtete ETFE wurde außerdem in der Klimakammer bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach dem Aufenthalt in der Klimakammer wurden die Proben erneut mit dem Spektrometer gemessen und im Lichtmikroskop untersucht. Die spektralen Parameter sind in Tabelle 5 aufgeführt.

Das Spektrum der verschiedenen Beschichtungen ist in den Abbildung. 8 bis Abbildung. 10 dargestellt.

Tabelle 5: Spektrale Parameter der verschiedenen Beschichtungen vor und nach 10 Tagen Klimakammer. (*Werte nach 10 Tagen in der Klimakammer kursiv und hell-blau unterlegt. ** Werte nach 30 Tagen in der Klimakammer kursiv und dunkle-blau unterlegt).

Product	Tvis	<i>Tvis*</i>	Tsol	<i>Tsol*</i>	e	<i>e*</i>	<i>e**</i>
Sonnenschutz Standard – ohne Lack	52,8	<i>53,4</i>	27,1	<i>27,3</i>	2,3	<i>3,5</i>	
Sonnenschutz Standard – mit Standard- lack	47	<i>46</i>	26,4	<i>26,3</i>	12	<i>15</i>	16
Sonnenschutz Standard – mit dickem Lack	45,8	<i>44,2</i>	25,3	<i>25</i>	18	<i>18</i>	18
Sonnenschutz Spezial – ohne Lack	42,5	<i>41</i>	25,9	<i>25</i>	5,4	<i>12,5</i>	
Sonnenschutz Spezial -mit Standardlack	47	<i>46</i>	32	<i>32</i>	19	<i>23</i>	19
Wärmeschutz Standard – mit Standard- lack	73	<i>73,5</i>	54	<i>54</i>	22	<i>20</i>	20

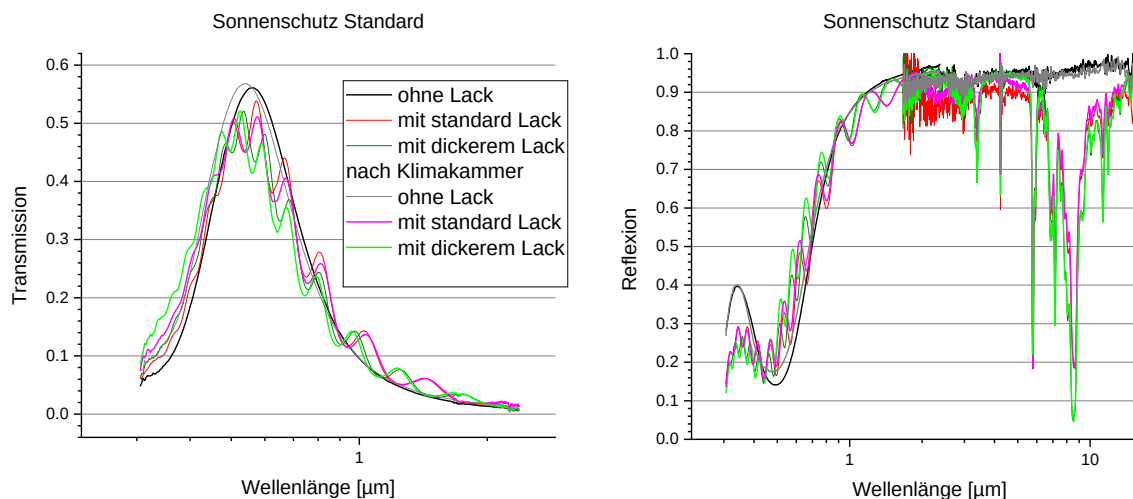


Abbildung. 8: Spektrum der Sonnenschutz-Standard-Beschichtung mit Lack, dickerem Lack und ohne Lack, bevor und nach Klimakammer.

FKZ 03EN1032

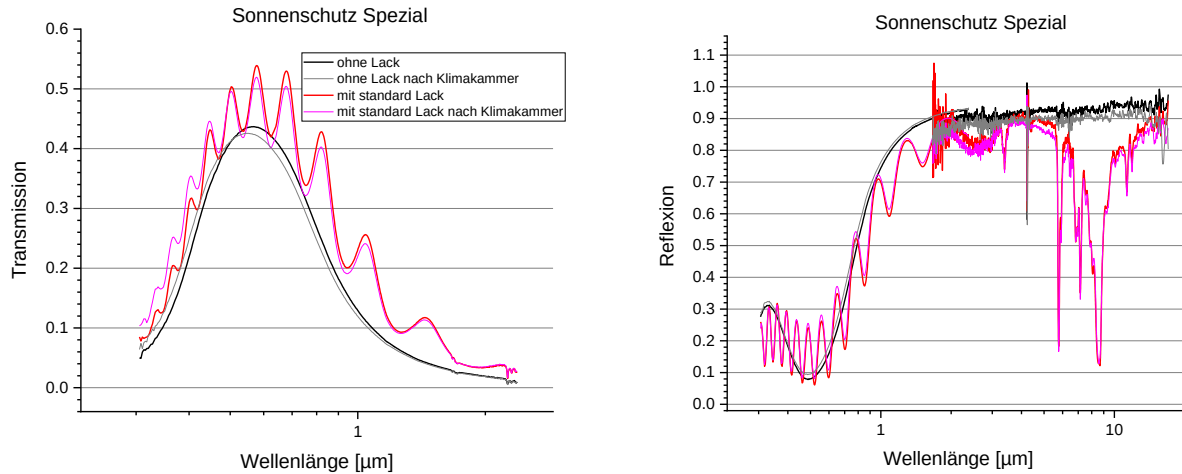


Abbildung. 9: Spektrum der Sonnenschutz-Spezial-Beschichtung mit und ohne Lack, bevor und nach 30 Tagen in Klimakammer.

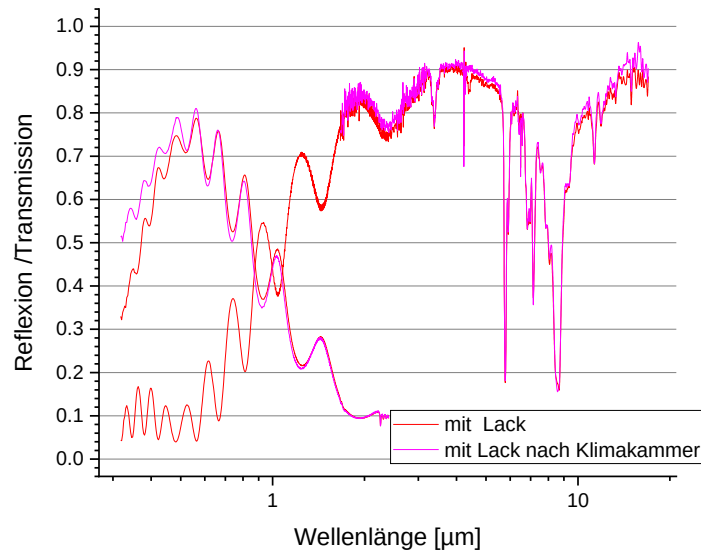


Abbildung. 10: Spektrum der Wärmeschutz-Standard-Beschichtung mit Lack, bevor und nach 30 Tagen in Klimakammer.

AP2.2: Konstruktion und Installation des Kissens auf dem Testgelände

Konstruktion der Demonstratorkissen (Novum, 2Construct)

FKZ 03EN1032

Zur Vorbereitung der Demonstratoren wurde der Platz auf dem Firmengelände von NOVUM festgelegt.

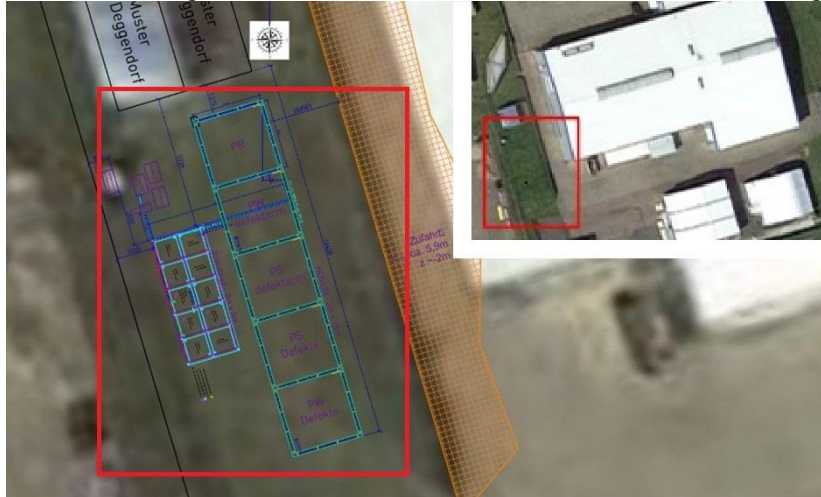


Abbildung 11: Standort der Demonstratoren bei NOVUM Membranes



Abbildung 12: Eingebaute Demonstratoren

Für die unterschiedlichen Kombinationen aus Beschichtungstyp und Schutzlackaufbau waren verschiedenste Schweißversuche, sowohl für die Flächen- als auch für die Kedernähte, nötig.



Abbildung 13: Beispiele fehlerhafter Schweißversuche

Die einzelnen ETFE Kissen der Demonstratoren wurden von den Projektpartnern Novum Membranes und 2Construct in verschiedenen Konfigurationen erstellt, welche sich in ihrem Aufbau, der bauphysikalischen Wirkung sowie der Lage der integrierten Funktionsschichten unterscheiden.

FKZ 03EN1032

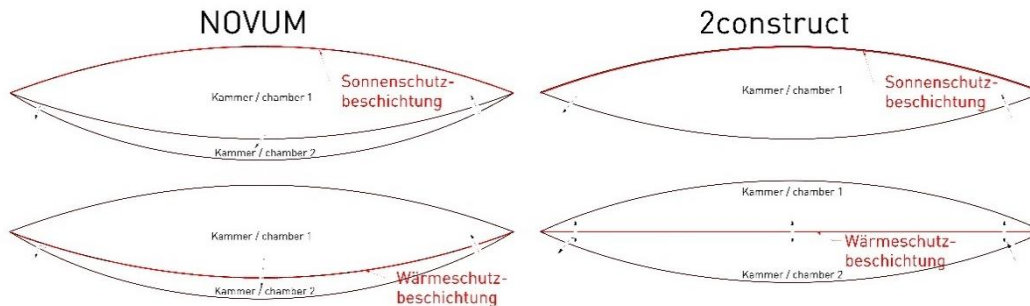


Abbildung 14: Unterschiede im Kissenbau

Tabelle 6: Varianten der großen 3 x 3 m² ETFE-Demonstratoren.

Alle 3 x 3 m ² Kissen sind dreilagig			Spektral-Werte des Beschichtet ETFE		
Abkürzung	Funktion	Beschichtungsart/-position	T _{vis}	T _{sol}	ε(300K)
PR	Referenz	Keine Funktionsschicht	90	91	80
PW	Wärmeschutz (mit Defekten)	Mittellage unten	73	54	22
PW	Wärmeschutz (makellos)	Mittellage unten	73	54	22
PSSP	Sonnenschutz Spezial (mit Defekten)	Oberlage innen	47	32	19
PSSP	Sonnenschutz Spezial (makellos)	Oberlage innen	47	32	19

Tabelle 7: Varianten der kleinen 1 x 1 m² ETFE-Demonstratoren.

1 x 1 m ² Kissen -			Spektral-Werte des Beschichtet ETFE		
Abkürzung	Funktion	Beschichtungsart/-position	T _{vis}	T _{sol}	ε(300K)
PW	Wärmeschutz, nach einem Jahr abgebaut	Mittellage unten - dreilagig Kissen	73	54	22
PW	Wärmeschutz, nach zwei Jahren abgebaut		73	54	22
PW	Wärmeschutz		73	54	22
PSSP	Sonnenschutz Spezial	Oberlage innen zweilagig	47	32	19
PS	Sonnenschutz, nach einem Jahr abgebaut	Oberlage innen zweilagig	47	26	15
PS	Sonnenschutz, nach zwei Jahren abgebaut		47	26	15
PS	Sonnenschutz		47	26	15

FKZ 03EN1032

PSLD	Sonnenschutz mit höherer Lackdicke, nach einem Jahr abgebaut	Oberlage innen zweilagig	46	25	18
PSLD	Sonnenschutz mit höherer Lackdicke, nach zwei Jahren abgebaut		46	25	18
PSLD	Sonnenschutz mit höherer Lackdicke		46	25	18

(2Construct)

- Entwicklung (Abbildung 15), herstellen, liefern und Montage der Grund-Konstruktion (Abbildung 16) für 10 Stück 1,0 x 1,0 Demonstrator Kissen.

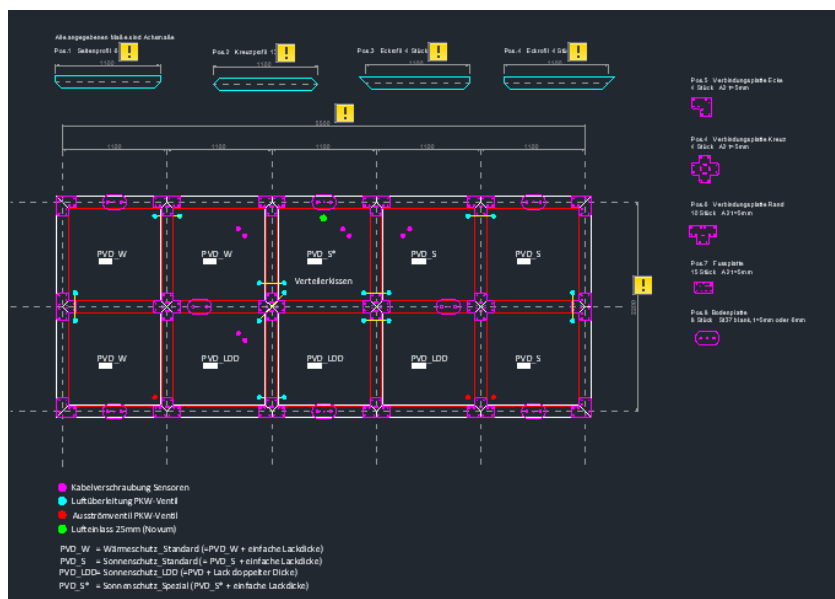


Abbildung 16: Grund-Konstruktion für 10 Stück 1,0 x 1,0 Demonstrator Kissen.

FKZ 03EN1032

- Entwicklung, herstellen, liefern und Umsetzung des in Followe2 definierten mehrstufigen Filtersystems der Prozessluft für alle Demonstratoren



Abbildung 17: Filtersystems der Prozessluft.

- Entwicklung eines geeigneten Luftverteilungs- und Durchströmungssystems, zwischen und innerhalb der mehrlagigen Demonstratorkissen, zur Vermeidung von Bildung von Kondensat an den Kisseninnenflächen (**Abbildung 15**).
- Geometrie und Zuschnittsermittlung der Kissen und einzelnen Lagen.

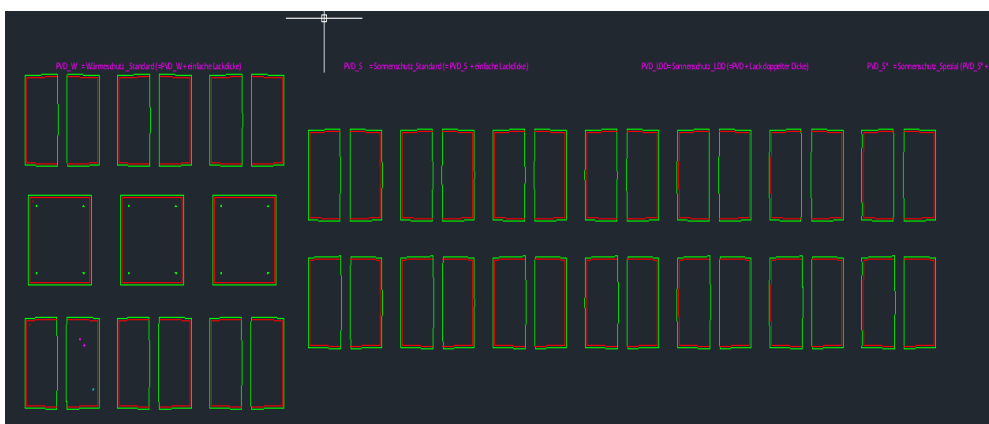


Abbildung 18: Geometrie und Zuschnittsermittlung der Kissen und einzelnen Lagen.

- Verschweißen der beschichteten ETFE-Folien, Herstellung der kleinen Demonstratorkissen (10 Stück à 1 m x 1 m).
- Dabei Einbringen von gezielten Schädigungen an beschichteten Folien entsprechend Vorgaben der entwickelten Beschädigungsmatrix followe2 und Applikation des Reparaturlacks auf die Schadstellen (Abbildung 19 und Abbildung 20).

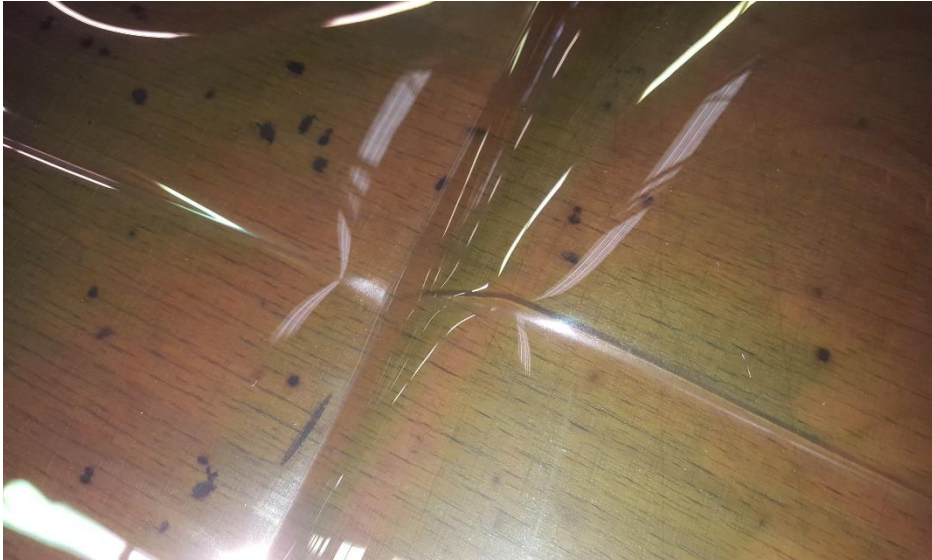


Abbildung 19: Doppelknick in der Fertigung.



Abbildung 20: Schadstelle in eingebautem Zustand.

Sensorik Installation (HFT)

Die Ausstattung der Membrankissen mit geeigneter Sensorik wurde in Absprache mit den Projektpartnern Novum Membranes GmbH und 2Construct erarbeitet und die damit verbundenen entsprechenden Schritte in der Fertigung der Membrankissen besprochen. Da der Innenraum der Kissen im Betrieb nicht mehr praktikabel zerstörungsfrei zugänglich ist, wurde die Positionierung der Messstellen sowie die Gestaltung der Leitungs-führung und der Durchgänge durch die Folienlagen im Vorfeld der Fertigung mit den Projektpartnern festgelegt. Im Zuge dieser Absprachen wurden Anzahl und Positionierung der Messstellen, Art und Anzahl der Sensoren sowie Art und Positionierung der Leitungs- und Sensordurchführung durch die Folienlagen der Membrankissen festgelegt. Zudem wurde die allgemeine Positionierung der Komponenten zur Datenerfassung und Übermittlung auf dem Gelände des Projektpartners Novum Membranes GmbH besprochen.

Die räumliche Anordnung der kleinen (1mx1m) und großen (3mx3m) Demonstratorkissen, sowie die Positionierung der Komponenten zur Messdatenerfassung auf dem Versuchsfeld beim Projektpartner Novum, ist in Abbildung 21 dargestellt.

Aus der Skizze wird die Positionierung der verschiedenen Kissen (PS, PW, PR, PSSP, PS LD, defektarm bzw. mit Defekten) ersichtlich. Zudem ist die Bezeichnung der Messstellen (I, II, III für die Pyranometer, A-F für

FKZ 03EN1032

die relative Luftfeuchte der großen Kissen, 1-4 für Oberflächentemperatur und relative Luftfeuchte in den kleinen Kissen) aufgeführt und die Systematik für die Bezeichnung der Oberflächentempersensoren der großen Kissen (bspw. PW-2-x-x) angedeutet. Auf die Bedeutung der Bezeichnungen wird im Weiteren näher eingegangen.

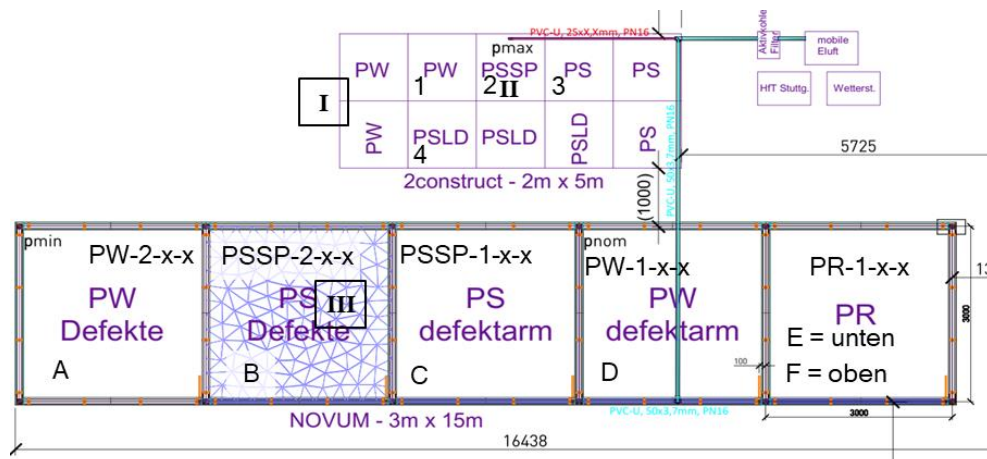


Abbildung 21: Räumliche Aufteilung des Testfeldes mit Positionierung der verschiedenen Demonstratorkissen.

Es wurde vorgesehen, im Innenraum der Kissen Messwerte zur Oberflächentemperatur der einzelnen Lagen, der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte in den Kissenkammern zu erfassen. Da die Sensoren zur Erfassung der Oberflächentemperatur funktionsbedingt mit Hilfe einer Klebeverbindung auf die Oberfläche der entsprechenden Folienlagen in Innenraum der Kissenkammern aufgebracht wurden, war es notwendig, insbesondere diese Sensorik zur Messung der Oberflächentemperaturen der Folien dabei im Vorfeld festzulegen.

Die Positionierung der Messstellen für Erfassung der Oberflächentemperaturen in den großen Demonstrator-kissen wurde in Absprache mit Novum Membranes so erarbeitet, dass sie problemlos mit der Konfektionierung der Folienlagen in Einklang gebracht werden kann und in die Fertigungs- und Installationsprozesse der Kissen, wie beispielsweise die Erstellung der Schweißnähte, integriert werden kann.

Die Positionierung der Sensoren sowie der Öffnungen für Zu-/Abluft und Überströmöffnung in den großen Demonstratorkissen ist schematisch in **Abbildung 22** dargestellt.

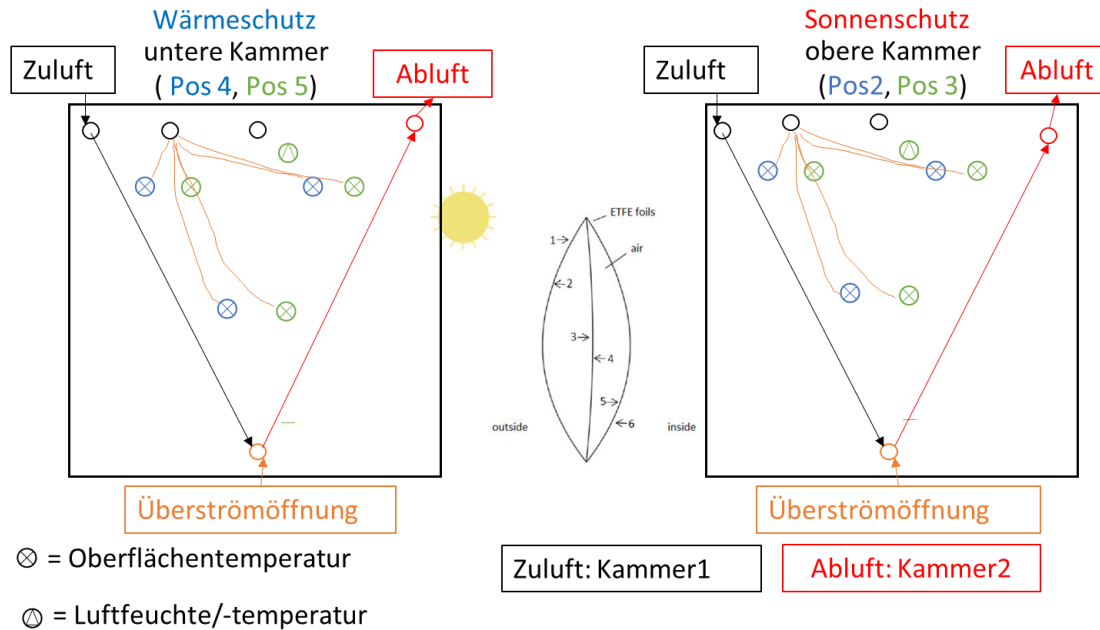


Abbildung 22: Schematische Positionierung der Messstellen für Oberflächentemperatur, Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in den Demonstratorkissen von Novum Membranes.

Die Messung der Oberflächentemperaturen wurde so konzipiert, dass Messwerte pro vermessener Folienlage an drei Positionen (Links, Mitte und Rechts aus Sicht der Leitungsdurchführung) aufgenommen werden. Auf diese Weise können Rückschlüsse auf die Homogenität des Temperaturverlaufs entlang der Oberfläche der Folienlagen getroffen werden. Die Messwerte zur Oberflächentemperatur, Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte wurden jeweils in der Kammer mit der zugewandten Seite der aktiven Beschichtung aufgenommen. Im Einzelnen bedeutet das, für das Demonstratorkissen in Wärmeschutz Konfiguration (PW, Beschichtung auf Unterseite Mittellage, Pos. 4) die Oberflächen vier und fünf der unteren Kammer, sowie für das Demonstratorkissen in Sonnenschutz Konfiguration (PS, bzw. PSSP, Beschichtung auf Unterseite Oberlage, Pos. 2) die Oberflächen zwei und drei. Für das Referenzkissen (PR, unbeschichtet) wurden Messwerte in beiden Kammern und allen innenliegenden Oberflächen aufgenommen.

Die Bezeichnung der Folienlagen folgt der im Fensterbau üblichen Konvention einer aufsteigenden Nummerierung der Oberflächen beginnend mit der nach außen gewandten Oberfläche mit eins.

Für die Messung der Oberflächentemperaturen in allen Demonstratorkissen kamen Thermocouple (Typ TX) zum Einsatz. Die Messung der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte in den Kammern der großen Kissen und im Außenbereich wurde mit Kombimessfühlern (WSTF0001c von F & C Forschungstechnik und Computersysteme GmbH) durchgeführt. Für die Messung der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte in den kleinen Demonstratorkissen wurden kompakte Kombisensoren vom Typ Hygrochip HYT-271, von Innovative Sensor Technology AG, eingesetzt. Die Messfühler und Datenleitungen wurden an der HFT in den entsprechenden Leitungslängen vorkonfiguriert und den Projektpartnern für die Errichtung des Demonstratoraufbaus bereitgestellt. Die kompakten Kombisensoren für den Einsatz in den kleinen Kissen sowie die vorkonfigurierten Thermocouple sind zur Anschauung in **Abbildung 23** dargestellt.

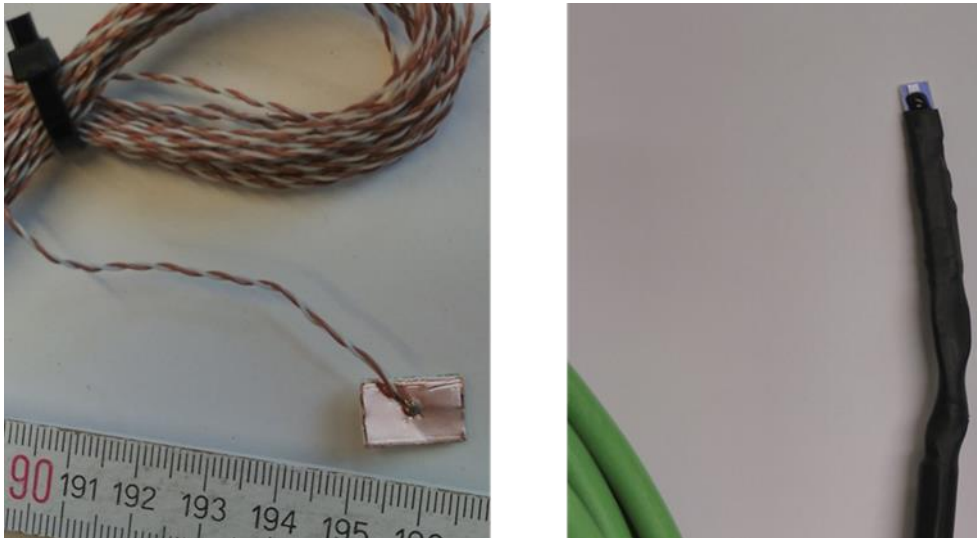


Abbildung 23: Sensoren für Oberflächentemperatur (links) und relative Luftfeuchte und Lufttemperatur (rechts) für die Integration in die kleinen Demonstratoren. Bilder: HFT Stuttgart

Die Integration der Sensorik in die Demonstratorkissen wurde von den Projektpartnern Novum Membranes und 2Construct im Zuge der Errichtung der Demonstratoren realisiert. Dies wurde bei den großen Demonstratorkissen im Fall der Sensoren für relative Luftfeuchte/-temperatur anhand einer eigens vom Projektpartner Novum Membranes entworfenen und im 3D Druckverfahren gefertigten Durchführung durch die Folienlagen mit Klemmung für den Sensor umgesetzt und von 2Construct mittels einer kompakten Leitungsdurchführung umgesetzt.

Neben den Messwerten zur Oberflächen-, Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte in den Kissenkammern wurde im Außenbereich ebenso Lufttemperatur und relative Luftfeuchte aufgenommen. Zudem wurde die solare Bestrahlungsstärke mittels Pyranometer aufgezeichnet. Die Positionierung der Pyranometer ist auf der Skizze anhand von römischen Ziffern gekennzeichnet. Es wurde zum einen im unverschatteten Außenbereich direkt angrenzend an das Testfeld der kleinen Demonstratorkissen (Pos. I in) und zum anderen unterhalb der kleinen und großen Demonstratorkissen (Pos. II respektive Pos. III in) jeweils ein Pyranometer positioniert.

Bedingt durch die Personalsituation an der HFT und allgemeine Verzögerungen in der Lieferkette der Sensoren kam es im Vergleich zum vorgesehenen Zeitplan zu einer Verzögerung bei der Bereitstellung der Sensorik und damit bei der Errichtung der Demonstratoren um etwa zwei Monate.

2.1.3 AP 3 Monitoring und Bewertung

(ISE, HFT, 2Construct, Novum)

Monitoring, Charakterisierung und Bewertung der Beschichtungen in den Kissen unter realen Bedingungen über einen Zeitraum von 2 Jahren.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M2 Monitoringprozesse definiert und Sensorausrüstung gerichtet (Monat 5)	Einrichtung des Sensorsystems, erste Datenerfassung Vervollständigung der Sensorik, dauerhafte Datenerfassung	M12 (Mai 22) M16 (Aug 22)	Personalmangel und allgemeine Lieferverzögerungen führten zu Verspätung im Zeitplan Behebung von Softwareproblemen bei der Datenübertragung und Einrichtung der Pyranometer, dauerhafte Datenerfassung
M3 Bewertung des Monitoringprozesses und der Beständigkeit der Beschichtung (Monat 36)	Durchgehende Datenerfassung und Auswertung	M16 (Aug 22) bis M39 (Juli 24)	Die vollständige Bewertung der Kissen war am Ende des Projekts abgeschlossen.

AP 3.1 Sensoreinrichtung und tägliche Überwachung der Eingangsparameter und des visuellen Zustands des Kissens

(HFT, Novum)

Im Rahmen von AP 3 wurde das System zur Messdatenerfassung konzipiert, die einzelnen Komponenten (Sensorik, Datenlogger, Messrechner, Datenübertragungselemente etc.) zusammengestellt, für die Einrichtung auf dem Testgelände vorbereitet (konfiguriert und vorjustiert, programmiert, getestet etc.), zum Projektpartner Novum Membranes verbracht und dort auf dem Testgelände aufgebaut und eingerichtet. Nach der lokalen Inbetriebnahme des Messsystems wurde ein System zum regelmäßigen Datenabruf und Wartungs-/Anpassungsarbeiten über einen Fernzugriff eingerichtet. Im weiteren Projektverlauf wurden die angefallenen Messdaten in regelmäßigen Zeitintervallen abgerufen und lokal an der HFT aufbereitet und ausgewertet.

In Absprache mit den Projektpartnern wurde die Bestückung der Demonstratoren mit Sensorik von der HFT ausgearbeitet und das erforderliche Material zusammengestellt.

Nach der Beschaffung, Konfektionierung und Überstellung der Sensorik an Novum Membranes wurde an der HFT die Infrastruktur und das System zur Messdatenerfassung zusammengestellt und vorbereitet. Die Hardware Messrechner, Datenlogger, Schaltschrank, Spannungsversorgung etc. wurden an der HFT vorbereitet, mit der benötigten Software ausgestattet und im Rahmen der vorhandenen Möglichkeiten getestet. Die Komponenten wurden im weiteren Projektablauf zum Projektpartner verbracht, auf dem Testgelände aufgebaut, mit den Messdatenleitungen der Sensoren verbunden und in Betrieb genommen.

Das Messdatenerfassungssystem besteht aus den folgenden Komponenten:

- Sensorik für Oberflächentemperatur, relative Luftfeuchte/-temperatur, Bestrahlungsstärke
- Messrechner mit WLAN Schnittstelle
- Datenlogger mit Messmodulen, Spannungsversorgungsmodul
- Externer WLAN Antenne für den Außenbereich
- Wetterstation
- Standfuß mit Befestigungsmast

Der Datenlogger des Messdatenerfassungssystems ist vom Typ CRIO 9074 von National Instruments mit verschiedenen Modulen für die Aufnahme der Messsignale. Der Datenlogger samt Spannungsversorgungseinheit ist in einem, für den Einsatz im Außenbereich ausgelegten, Schaltschrank untergebracht. Die erhobenen Messdaten werden an einen Messrechner übertragen. Dieser ist in einem an das Testgelände angrenzenden Raum im Firmengebäude des Partners Novum Membranes positioniert. Die Datenübertragung zwischen dem Datenlogger und dem Messrechner erfolgt über eine direkte kabellose (WLAN) Verbindung. Der Messrechner ist kabelgebunden über das Firmennetzwerk von Novum Membranes mit dem Internet verbunden. Der externe Zugang zum Messrechner wird über eine Fernwartungssoftware realisiert. Eine Verbindung zwischen dem Messrechner, dem Datenlogger und einem entfernten externen Teilnehmer (z.B.: HFT) zur Fernwartung und der Datenübertragung wird damit sichergestellt.

Die prinzipielle Gestaltung der Infrastruktur der Messdatenerfassung, Datenaufzeichnung und Fernzugriff ist in dem Schaubild in **Abbildung 24** dargestellt.

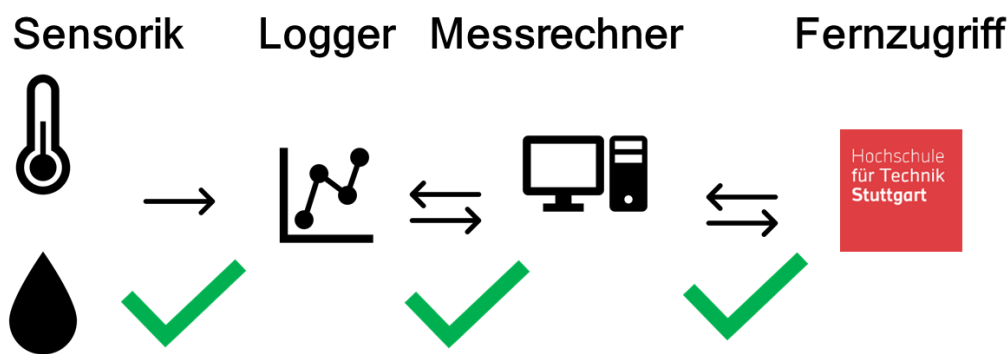


Abbildung 24: Schaubild zur Infrastruktur der Datenerfassung, -übertragung, lokalen Speicherung und Fernzugriff.

Der Datenlogger mit einigen Modulen und die Aufteilung im Schaltschrank ist in **Abbildung 25** gezeigt.

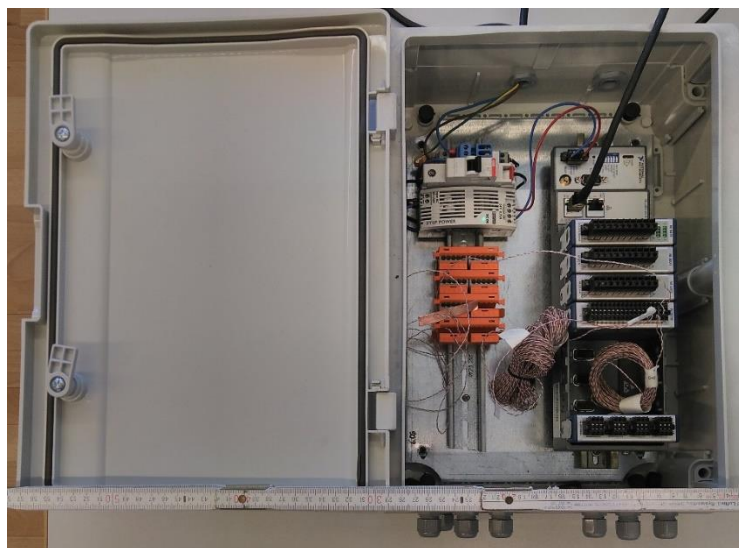


Abbildung 25: Datenlogger mit einigen Messmodulen im Schaltschrank.
Bild: HFT Stuttgart

Die Aufstellung des Messdatenerfassungssystems auf dem Testfeld wurde mit einem durch Steinplatten beschwerten Standfuß realisiert. An dem Mast des Standfußes wurden die einzelnen Komponenten (Wetterstation, Schaltschrank, WLAN Antenne) montiert. Das errichtete System ist in Abbildung 26 dargestellt.



Abbildung 26: Messdatenerfassungssystem mit Schaltschrank, Wetterstation, WLAN-Antenne auf dem Testfeld. Bild: HFT Stuttgart

In mehreren Vor-Ort-Terminen wurden die Komponenten auf dem Testfeld aufgebaut, mit der Sensorik verbunden und auf Ihre Funktion geprüft. Zudem wurden die großen Kissen mit den Sensoren für relative Luftfeuchte und Lufttemperatur ausgerüstet. Die Messleitungen wurden zusammengeführt und durch einen unterirdischen Kabelkanal zum Datenlogger geführt und an die Messmodule angeschlossen. In Abbildung 27 ist exemplarisch die Unterseite des Referenzkissens mit den Messleitungen der Oberflächentempersensoren, der Messleitungsdurchführung und den Feuchtesensoren gezeigt.



Abbildung 27: Unterseite des Referenzkissens (3m x 3m) mit Messleitungsdurchführung und Feuchtesensoren. Bild: HFT Stuttgart

Mit Unterstützung des Projektpartners Novum Membranes wurde die Anbindung des Messrechners an den Datenlogger und über die Netzwerkinfrastruktur des Projektpartners ans Internet realisiert. Das Testfeld der Demonstratorkissen mit dem errichteten Messdatenerfassungssystem ist in **Abbildung 28** zu sehen.

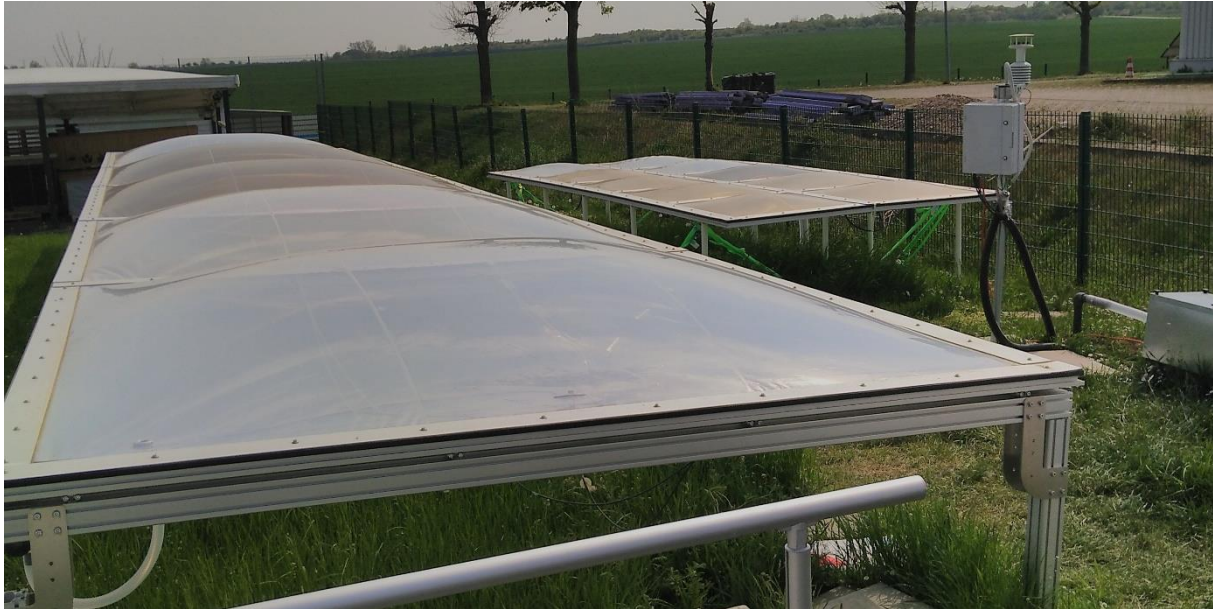


Abbildung 28: Testfeld mit Demonstratorkissen und Messdatenerfassungssystem. Bild: HFT Stuttgart

Das Messdatenerfassungssystem wurde auf dem Testgelände in Betrieb genommen und die Funktion der externen Verbindung über die Fernwartungssoftware eingerichtet und überprüft.

Das Sensorsystem wurde zudem hardwareseitig um drei Pyranometer vom Typ SMP3 von Kipp & Zonen zur Erfassung der Bestrahlungsstärke erweitert. Die Pyranometer wurden in KW 33 (am 18.08.2022) von der HFT erhalten. Anschließend wurden sie an der HFT für die Einrichtung auf dem Messfeld vorkonfiguriert. Hierzu wurden sie jeweils mit einem Halterungssystem auf einem mobilen Standfuß ausgestattet, einer Funktionsprüfung unterzogen und für die Integration in das Messdatenerfassungssystem vorbereitet. In einem vor Ort Termin beim Projektpartner Novum Membranes in KW 45 (am 07.11.2022) wurden die Pyranometer auf dem Messfeld installiert und in das Messdatenerfassungssystem integriert. Die Lage der Sensoren wurde dabei so gewählt, dass ein Pyranometer neben dem Messfeld (Pos. I) und jeweils ein Pyranometer unterhalb der kleinen (Pos. II) bzw. großen Demonstratorkissen (Pos. III) positioniert wurde. Das Pyranometer auf Pos. I neben den Demonstratorkissen wurde in einer Höhe von etwa 18 cm oberhalb der Demonstratorkissen errichtet, um die unverschattete Bestrahlungsstärke auf dem Messfeld aufzunehmen. Die beiden Pyranometer auf Pos. II und Pos. III, unterhalb der kleinen bzw. großen Demonstratorkissen, wurden etwa mittig unter dem „PSSP“ Kissen der kleinen bzw. dem Kissen „PS Defekte“ der großen Demonstratoren, in einem Abstand von etwa 33 cm, respektive 23 cm unterhalb der untersten Folienlage angebracht. Die Positionen der Pyranometer sind in mit **I**(freistehend), **II**(kleine Demonstratorkissen) und **III**(große Demonstratorkissen) gekennzeichnet.

Der Befestigungsaufbau für die Errichtung der Pyranometer ist exemplarisch in **Abbildung 29** gezeigt.



Abbildung 29: Pyranometer auf Standfuß und Gehwegplatte mit Rollen. Bild: HFT Stuttgart

Im Rahmen der Installation wurden die Sensoren in das Messdatenerfassungssystem integriert und einer Funktionsprüfung unterzogen. Die Messdatenerfassung der relativen Luftfeuchte der kleinen Demonstratorkissen, mittels der kompakten I2C Feuchtesensoren, wurde über ein ESP8266 Entwicklungsboard und einen Raspberry Pi (Pi) Singleboardcomputer realisiert. Diese Hardware Komponenten wurden auf den Hutschienen im Schaltschrank montiert. Die Anbindung an das Messdatenerfassungssystem erfolgte über eine drahtlose Kommunikation (WLAN) zwischen dem PI und dem Messrechner im angrenzenden Werksgebäude von Novum Membranes und Fernzugriff über das VNC (Virtual Network Computing) Protokoll. In

Tabelle 8 sind die eingesetzten Sensoren mit den jeweiligen Steckplätzen am Datenlogger aufgeführt

FKZ 03EN1032

Tabelle 8 Auflistung der Sensoren mit Position auf dem Messfeld und Steckplatz auf dem Datenlogger.

Sensor			Position				Logger		Bemerkung
#	Typ	Bezeichnung	Kissen	Kissenkammer	Folienlage	Messstelle	Modulslot	Kanal	
1	T_surf	PR-1-2-R	PR	oben	2	rechts	4	0	
2	T_surf	PR-1-2-M	PR	oben	2	mitte	4	1	
3	T_surf	PR-1-2-L	PR	oben	2	links	4	2	
4	T_surf	PR-1-3-R	PR	oben	3	rechts	4	3	
5	T_surf	PR-1-3-M	PR	oben	3	mitte	4	4	
6	T_surf	PR-1-3-L	PR	oben	3	links	4	5	
7	T_surf	PR-1-4-R	PR	unten	4	rechts	4	6	
8	T_surf	PR-1-4-M	PR	unten	4	mitte	4	7	defekt!
9	T_surf	PR-1-4-L	PR	unten	4	links	4	8	
10	T_surf	PR-1-5-R	PR	unten	5	rechts	4	9	
11	T_surf	PR-1-5-M	PR	unten	5	mitte	4	10	
12	T_surf	PR-1-5-L	PR	unten	5	links	4	11	
13	T_surf	PW-1-4-R	PW defektarm	unten	4	rechts	4	12	
14	T_surf	PW-1-4-M	PW defektarm	unten	4	mitte	4	13	
15	T_surf	PW-1-4-L	PW defektarm	unten	4	links	4	14	
16	T_surf	PW-1-5-R	PW defektarm	unten	5	rechts	4	15	
17	T_surf	PW-1-5-L	PW defektarm	unten	5	links	5	0	
18	T_surf	PSSP-2-2-R	PS Defekte	oben	2	rechts	5	1	
19	T_surf	PSSP-2-2-M	PS Defekte	oben	2	mitte	5	2	
20	T_surf	PSSP-2-2-L	PS Defekte	oben	2	links	5	3	
21	T_surf	PSSP-2-3-R	PS Defekte	oben	3	rechts	5	4	
22	T_surf	PSSP-2-3-M	PS Defekte	oben	3	mitte	5	5	
23	T_surf	PSSP-2-3-L	PS Defekte	oben	3	links	5	6	
24	T_surf	PSSP-1-2-R	PS defektarm	oben	2	rechts	5	7	
25	T_surf	PSSP-1-2-M	PS defektarm	oben	2	mitte	5	8	
26	T_surf	PSSP-1-2-L	PS defektarm	oben	2	links	5	9	
27	T_surf	PSSP-1-3-R	PS defektarm	oben	3	rechts	5	10	
28	T_surf	PSSP-1-3-M	PS defektarm	oben	3	mitte	5	11	
29	T_surf	PSSP-1-3-L	PS defektarm	oben	3	links	5	12	
30	T_surf	PW-2-4-R	PW Defekte	unten	4	rechts	5	13	
31	T_surf	PW-2-4-M	PW Defekte	unten	4	mitte	5	14	
32	T_surf	PW-2-4-L	PW Defekte	unten	4	links	5	15	
33	T_surf	T_surf-Schrnk	Schrnk	--	--	--	6	0	Oberflächentemp im Schaltschrank
34	T_surf	PW-2-5-R	PW Defekte	unten	5	rechts	6	1	
35	T_surf	PW-2-5-M	PW Defekte	unten	5	mitte	6	2	
36	T_surf	PW-2-5-L	PW Defekte	unten	5	links	6	3	
37	T_surf	PW-1-5-M	PW Defekte	unten	5	mitte	6	4	
38	T_surf	2-cnstrct-1	1 (=PW)	--	3	--	6	5	
39	T_surf	2-cnstrct-2	2 (=PSSP)	--	2	--	6	6	
40	T_surf	2-cnstrct-3	3 (=PS)	--	2	--	6	7	
41	T_surf	2-cnstrct-4	4 (=PSLD)	--	2	--	6	8	defekt!
42	H_rel	H_rel-A	PW Defekte	unten	--	--	2	0	
43	H_rel	H_rel-B	PS Defekte	oben	--	--	2	1	
44	H_rel	H_rel-C	PS defektarm	oben	--	--	2	2	
45	H_rel	H_rel-D	PW defektarm	unten	--	--	2	3	
46	H_rel	H_rel-E	PR	unten	--	--	2	4	
47	H_rel	H_rel-F	PR	oben	--	--	2	5	
48	T_amb	T_luft-A	PW Defekte	unten	--	--	2	6	
49	T_amb	T_luft-B	PS Defekte	oben	--	--	2	7	
50	H_rel	H_rel-Schrnk	Schrnk	--	--	--	1	0	Luftfeuchte im Schaltschrank
51	T_amb	T_luft-Schrnk	Schrnk	--	--	--	1	1	Lufttemperatur im Schaltschrank
52	T_amb	T_luft-C	PS defektarm	oben	--	--	1	2	
53	T_amb	T_luft-D	PW defektarm	unten	--	--	1	3	
54	T_amb	T_luft-E	PR	unten	--	--	1	0	
55	T_amb	T_luft-F	PR	oben	--	--	1	1	
56	Pyrano	Pyrano-I	I	--	--	--	7	0	
57	Pyrano	Pyrano-II	II	--	--	--	7	1	
58	Pyrano	Pyrano-III	III	--	--	--	7	2	

Die Nomenklatur der Sensoren für die Oberflächentemperaturen der großen Kissen folgt der untenstehenden Systematik. Diese entspricht einer Erweiterung der Systematik zur Bezeichnung der großen und kleinen Demonstratorkissen.

P	W	-	2	-	x	-	x
Pneu	Konfiguration:		Baureihe:		Oberfläche:		Messstelle:
	W = Wärmeschutz		1 = defektarm		1 bis 6, aufsteigend nummeriert, beginnend mit Oberlage außen		R = Rechts
	SSP = Sonnenschutz (spezial Beschichtung)		2 = mit Defekten				M = Mitte
	SLD = Sonnenschutz (doppelte Lackschicht)						L = Links
	R = Referenz (unbeschichtet)						

Die Bezeichnung besteht aus den vier durch Halbgeviertstriche getrennten Einträgen zur Kennzeichnung der Konfiguration, der Baureihe, der vermessenen Oberfläche und der Messstelle. Die Umsetzung soll hier zum leichteren Verständnis am Beispiel PW-1-4-R einmal im Detail nachvollzogen werden. Die erste Stelle besteht bei allen Bezeichnungen aus dem Buchstaben P als Abkürzung für Pneu (pneumatisch gestützte Struktur) und einer Abkürzung für die Kennzeichnung der Konfiguration. Dabei steht W für Wärmeschutz, S für Sonnenschutz, SSP für Sonnenschutz mit Spezialbeschichtung, SLD für Sonnenschutz mit doppelter Lackschicht. Die zweite Stelle besteht aus einem numerischen Eintrag (1 oder 2), welcher die Baureihe kennzeichnet. Dabei steht 1 für eine defektarme Ausführung und 2 für die Ausführung mit vorsätzlich kontrolliert in die Beschichtung eingebrachten Defekten. Die dritte Stelle besteht aus einem numerischen Eintrag (1 bis 6) welcher die Oberfläche kennzeichnet, auf der der jeweilige Temperatursensor angebracht ist. Dabei folgt die Bezeichnung der im Fensterbau üblichen Konvention einer ansteigenden Nummerierung beginnend mit 1 bei der äußeren (der Sonne zugewandten) Oberfläche. Die letzte Stelle besteht aus einem Buchstaben zur Kennzeichnung der Position der Messstelle. Dabei steht R für Rechts, L für Links und M für Mitte, entsprechend der Darstellung auf der Skizze aus **Abbildung 22**. Die Bezeichnung PW-1-4-R steht also für den Messwert der Oberflächentemperatur im Kissen in Wärmeschutzkonfiguration (W), in defektarmer Ausführung (1), an der Oberfläche der Unterseite der Mittellage (4) an der rechtsseitigen Messstelle (R).

Die aufgezeichneten Messwerte wurden zunächst über den Datenlogger auf dem Messrechner vor Ort übertragen und in regelmäßigen Abständen über den Fernzugriff an die HFT übermittelt. An der HFT wurden sie aufbereitet, in Tagesdatensätze unterteilt, ausgewertet und graphisch dargestellt.

Die Datensätze liegen im Rohformat und in aufbereiteter Form an der HFT vor und stehen zur Weiterverarbeitung durch die Projektpartner bzw. den Projektträger zur Verfügung.

Die Auswertung der Messwerte umfasste

- die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Messwerte der einzelnen Kissen in Tagesdatensätzen,
- die Untersuchung des Temperaturverlaufs entlang der Oberflächen als Abweichung vom Mittelwert,
- Untersuchungen zum Verhältnis der Bestrahlungsstärke im unverschatteten Bereich und unterhalb der Kissen im Verlauf der Betriebsdauer, als Maß für den Grad der Verschattung und eine etwaige Veränderung des Durchlasses in Folge von Umwelteinflüssen bzw. Degradierung der Beschichtung
- Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf des Taupunktes und der relativen Luftfeuchte in den Kissen als Anhaltspunkt zum Kondensationsrisiko an den innenliegenden Oberflächen.

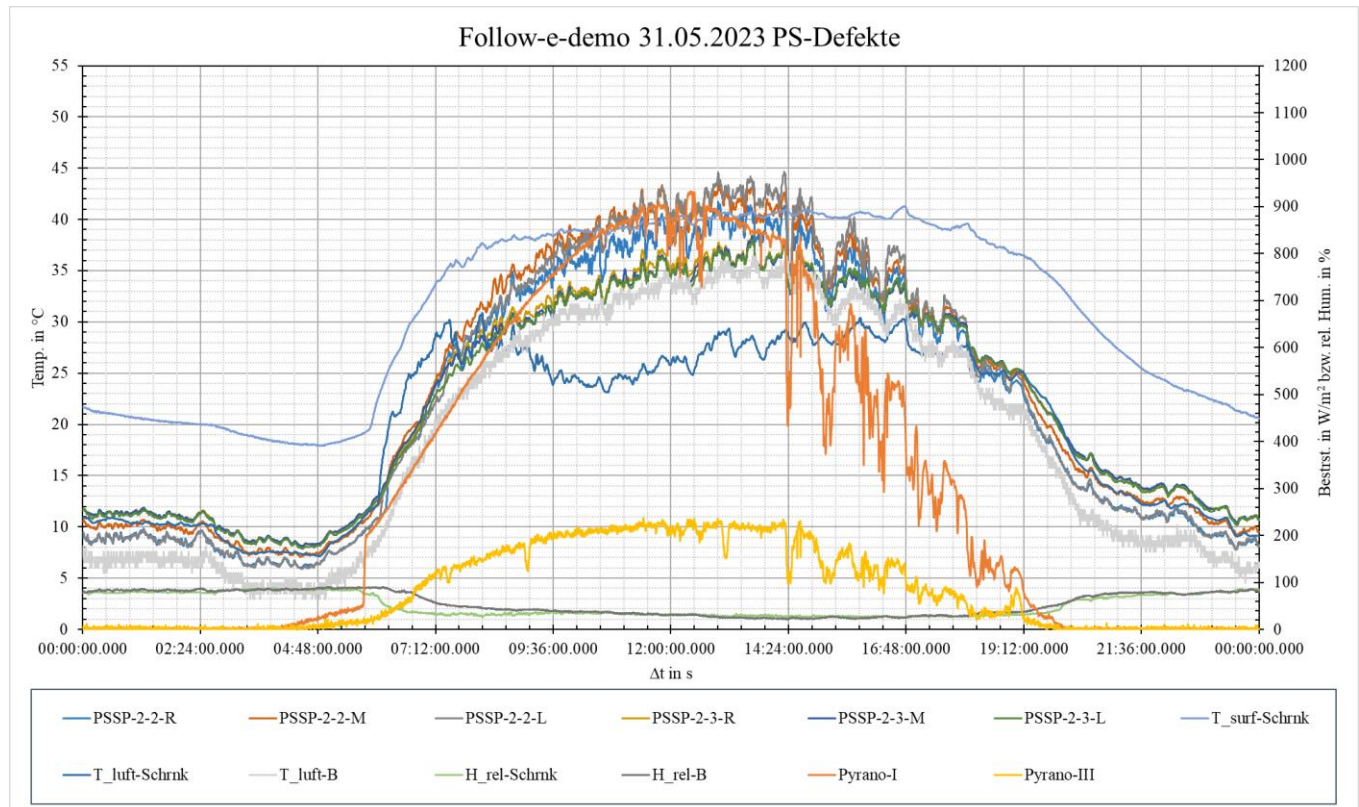


Abbildung 30: Zeitlicher Verlauf der Messwerte zum Demonstratorkissen „PS-Defekte“ des Tagesdatensatzes vom 31.05.2023.

Für die Auswertung des zeitlichen Verlaufs der Messwerte wurden aus den Gesamtdatensätzen Tagesdatensätze extrahiert und diese für die einzelnen Demonstratorkissen jeweils in graphischen Darstellungen aufbereitet. Beispielhaft ist hierfür der zeitliche Verlauf der Messwerte für ein großes Demonstratorkissen vom 31.05.2023 in **Abbildung 30** gezeigt. Dargestellt sind die Messwerte des großen Demonstratorkissens in Sonnenschutzkonfiguration mit eingebrachten Defekten (PS-Defekte) unter dem das Pyranometer II positioniert ist. Es ist gut zu erkennen, wie die Werte der Oberflächentemperaturen als auch der Lufttemperaturen im Kissen sowie im Außenbereich im Tagesverlauf etwa dem Verlauf der solaren Einstrahlung folgen. Die Lufttemperatur in der Kissenkammer erreicht Werte um etwa 35°C und folgt in ihrem Verlauf strukturell dem Verlauf der Oberflächentemperaturen der oberen bzw. unteren Folienoberflächen der Kammer. Die Temperaturen der oberen bzw. unteren Folienoberflächen erreichen Höchstwerte von etwa 45°C respektive etwa 35°C und bilden im Tagesverlauf eine Temperaturdifferenz von nahezu 10°C aus. Dabei liegen die Temperaturen der verschiedenen Messstellen auf einer Folienoberfläche (rechtsseitig, mittig, linksseitig) über den gesamten Tagesverlauf relativ nahe beieinander. Der Vergleich des Verlaufs der Werte Bestrahlungsstärken im unverschatteten Fall, am Pyranometer auf Position I neben den Demonstratorkissen und dem Pyranometer auf Position III unterhalb des Demonstratorkissens weist eine Dämpfung auf etwa 25% auf.

Eine quantitative Betrachtung zu der Temperaturdifferenz entlang der Oberfläche anhand des Vergleichs der Messwerte an den verschiedenen Messstellen der Folienoberflächen (rechtsseitig, mittig, linksseitig) ist beispielhaft in **Abbildung 31** und **Abbildung 32** gezeigt.

Dargestellt sind die Absolutwerte der gemessenen Temperaturen (Außenlufttemperatur $T_{\text{luft-Schrnk}}$, Lufttemperatur in der Kissenkammer $T_{\text{luft-C/D}}$) und der Mittelwert der Oberflächentemperatur, ermittelt aus den Messwerten an den drei Oberflächentemperatursensorpositionen (Rechts, Mitte, Links), aufgetragen auf der linksseitigen Ordinatenachse, sowie die Abweichungen der Werte der

FKZ 03EN1032

Oberflächentemperaturen vom Mittelwert (Rechts: „Differenz R ...“, Mitte: „Differenz M ...“ und Links: „Differenz L ...“), aufgetragen auf der rechtsseitigen Ordinatenachse.

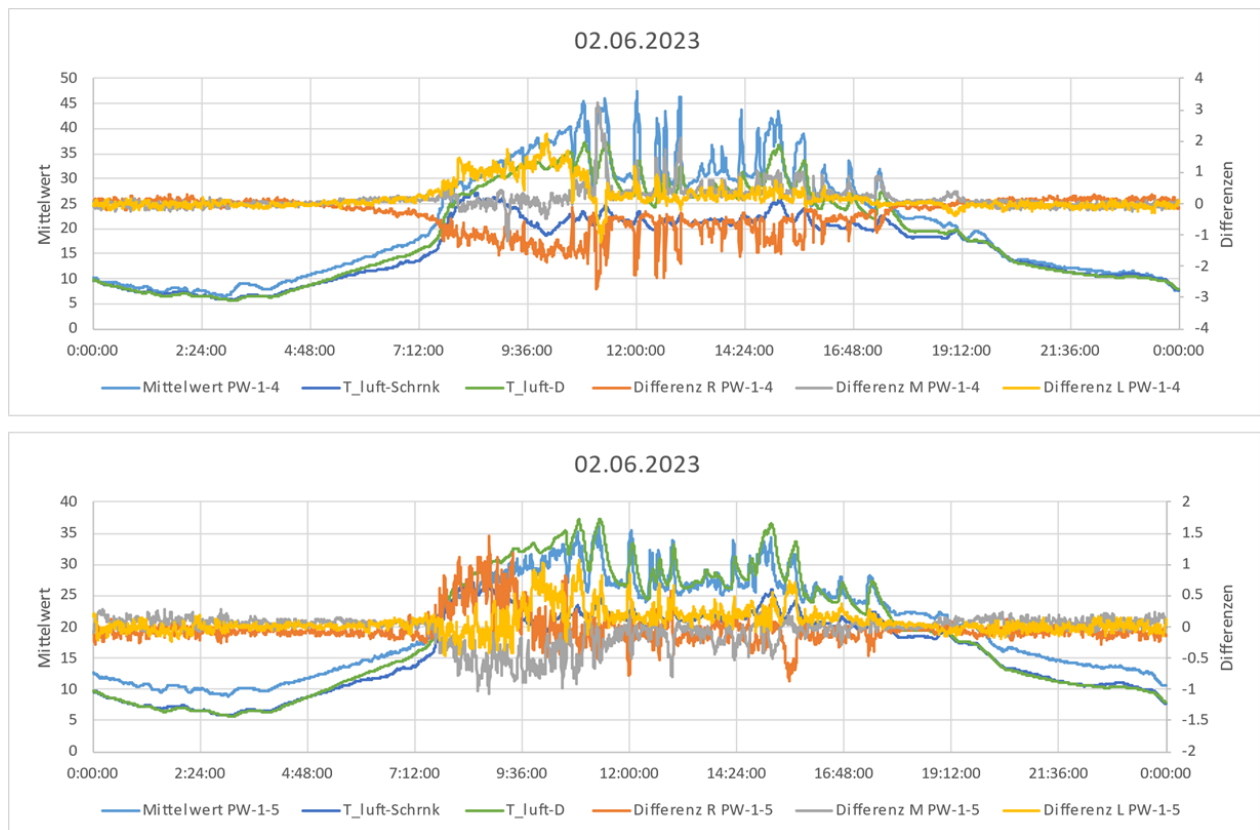


Abbildung 31: Zeitlicher Verlauf der Temperaturwerte im Demonstratorkissen „PW-defektarm“ des Tagessatzes vom 02.06.2023. (linksseitig: Außenlufttemperatur „T_Luft-Schrnk“, Lufttemperatur im Kissen in Kammer 2 „T_Luft-D“ und Mittelwert der Oberflächentemperaturen „Mittelwert PW-1-4/5“; rechtsseitig: Abweichung der Oberflächentemperaturen vom Mittelwert, an den Sensorpositionen Rechts: „Differenz R PW-1-4/5“, Mitte: „Differenz M PW-1-4/5“ und Links: „Differenz L PW-1-4/5“)

Die graphische Auswertung ergibt, dass die Abweichung der Oberflächentemperaturen vom Mittelwert über den täglichen Messzeitraum durchwegs verhältnismäßig niedrig ist und, abgesehen von seltenen Ausschlägen, im Betrag unterhalb von 1K liegt und sich damit im Bereich der Messgenauigkeit der Sensoren bewegt. Dies zeigt sich über den Großteil des Messzeitraums und deutet darauf hin, dass zumeist eine verhältnismäßig homogene Temperaturverteilung entlang der Folienoberfläche im Kissen angenommen werden kann.

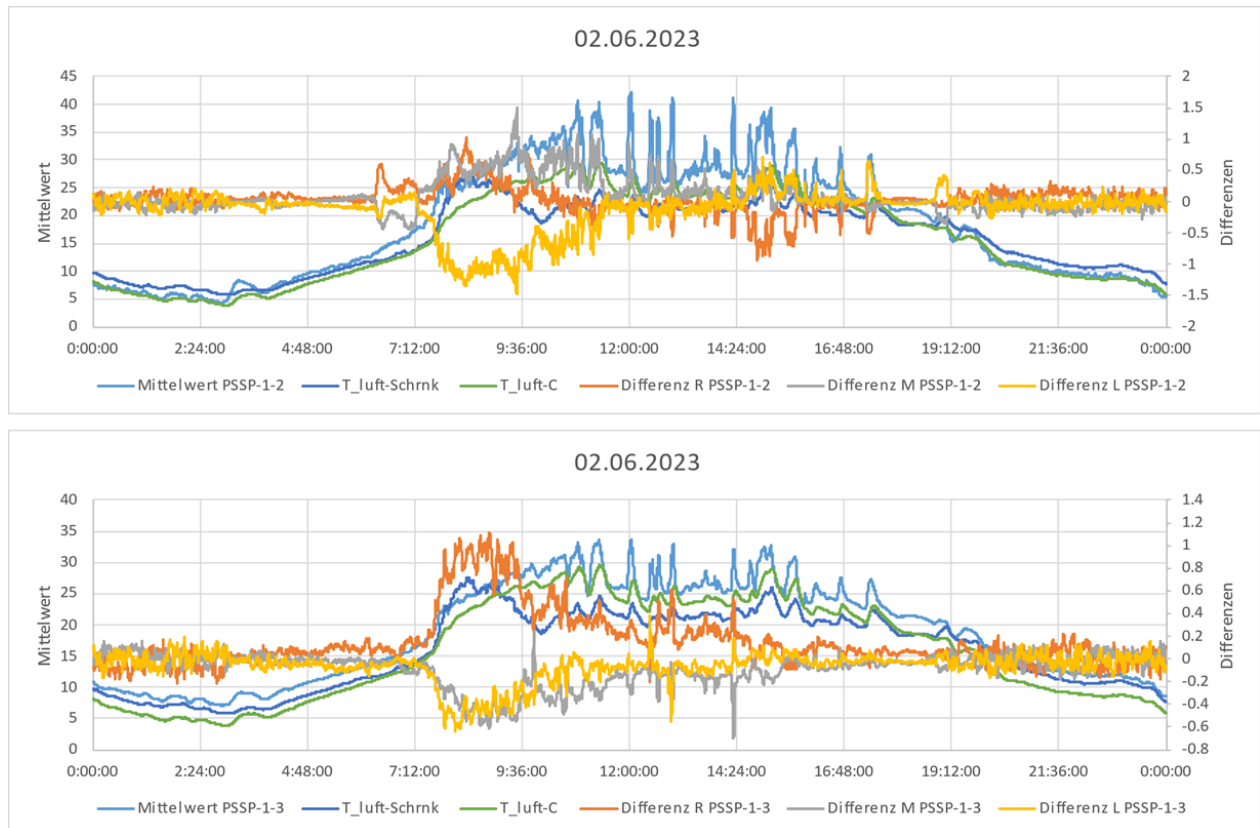


Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf der Temperaturwerte im Demonstratorkissen „PSSP-defektarm“ des Tagessatzes vom 02.06.2023. (linksseitig: Außenlufttemperatur „T_luft-Schrnk“, Lufttemperatur im Kissen in Kammer 1 „T_luft-C“ und Mittelwert der Oberflächentemperaturen „Mittelwert PSSP-1-2/3“; rechtsseitig: Abweichung der Oberflächentemperaturen vom Mittelwert, an den Sensorpositionen Rechts: „Differenz R PSSP-1-2/3“, Mitte: „Differenz M PSSP-1-2/3“ und Links: „Differenz L PSSP-1-2/3“)

Zur Einschätzung der Verschattungswirkung durch die Demonstratorkissen wurde der zeitliche Verlauf des Verhältnisses der Bestrahlungsstärke der verschatteten und unverschatteten Einstrahlung untersucht. In **Abbildung 33** ist das Verhältnis der verschatteten und unverschatteten Bestrahlungsstärke gezeigt.

Das Verhältnis der Bestrahlungsstärke wurde gebildet aus den Werten der verschatteten zu der unverschatteten Einstrahlung. Die unverschattete Einstrahlung wurde mit dem Pyranometer an Messstelle P-I unmittelbar angrenzend an das Testfeld der kleinen Demonstratorkissen aufgenommen und die verschattete Einstrahlung wurde mit einem baugleichen Pyranometer an der Messstelle P-III unterhalb des Testkissens PS-Defekte (mit Sonnenschutz Spezial Beschichtung) aufgenommen. Der Wert des Verhältnisses von verschatteter zu unverschatteter Bestrahlungsstärke gibt ein Maß für den Strahlungsenergiedurchlassgrad des Kissens. Der zeitliche Verlauf der Messwerte gibt einen Hinweis auf mögliche Veränderung bzw. Degradierung der Beschichtung. Abgesehen von Fluktuationen zu Beginn der Datenreihe liegt das Verhältnis der Bestrahlungsstärken im Mittel bei etwa 0.25. Dieser Wert liegt in etwa im Bereich des im Rahmen von AP4 rechnerisch ermittelten g-Wertes für ein dreilagiges ETFE Kissen mit entsprechender Beschichtung. Der generelle Verlauf zeigt über den Messzeitraum keine bemerkenswerte Veränderung im Sinne einer kontinuierlichen Abnahme bzw. Zunahme. Das lässt vermuten, dass die

Beschichtung über den Messzeitraum keine Alterungserscheinungen durchlaufen hat, welche sich erkennbar auf die Verschattung auswirken.

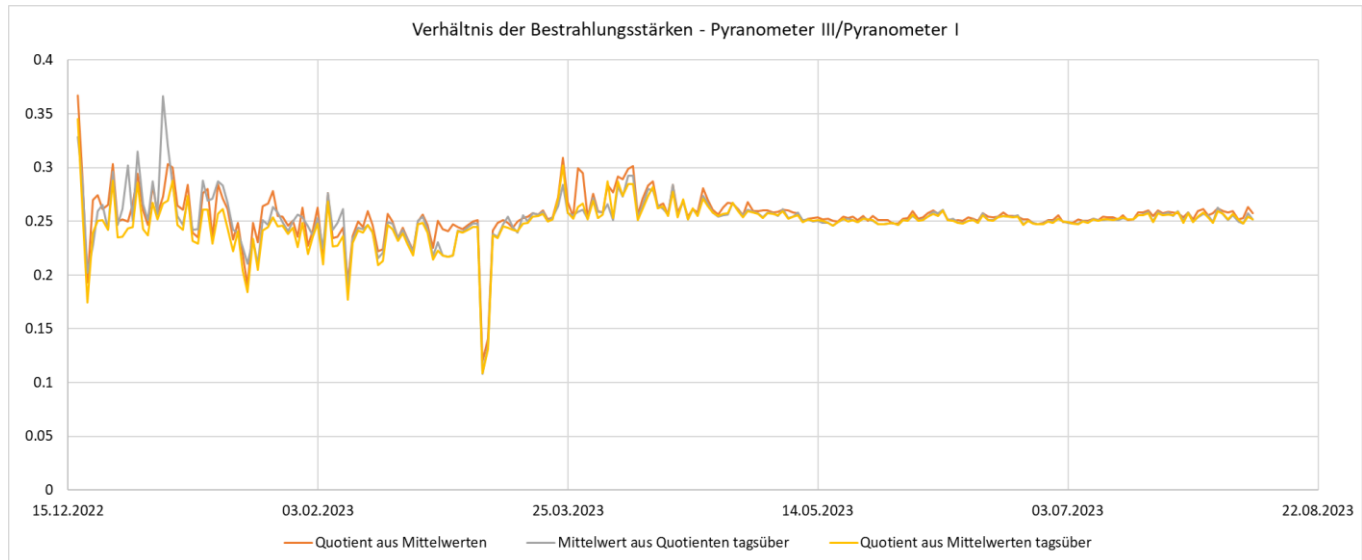


Abbildung 33: Verhältnis der Bestrahlungsstärken der unverschatteten Einstrahlung und der Einstrahlung unterhalb des Demonstratorkissen „PS-Defekte“.

Zur Untersuchung des Risikos von eventuell auftretender Kondensation in den Demonstratorkissen wurde aus den Umweltbedingungen im Kissen die Taupunkttemperatur in den Kissen berechnet. Bei einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur an den Oberflächen ist Kondensation an den Oberflächen zu erwarten. Bei einer Sättigung der relativen Luftfeuchte kann auch im Luftraum die Bildung von Tauwasser an Kondensationskeimen eintreten.

In **Abbildung 34** bis **Abbildung 39** ist dazu exemplarisch die Auswertung der Messwerte vom 24.03.2024 an den Demonstratorkissen:

- „PW-1“ (großes Kissen, Wärmeschutzausführung, defektarm),
- „PS-1“ (großes Kissen, Sonnenschutzausführung, defektarm),
- „PW-2“ (großes Kissen, Wärmeschutzausführung, mit Defekten),
- „PS-2“ (großes Kissen, Wärmeschutzausführung, mit Defekten),
- sowie der oberen und unteren Kammer des Referenzkissens
- „PR-O“ (großes Kissen, Referenzkissen, obere Kammer) und
- „PR-U“ (großes Kissen, Referenzkissen, untere Kammer), dargestellt.

Dargestellt ist jeweils der zeitliche Verlauf der Absolutwerte der gemessenen Temperaturen (Außenlufttemperatur $T_{\text{luft-Schrnk}}$, Lufttemperatur in der entsprechenden Kissenkammer $T_{\text{luft-D/C/A/B/E/F}}$ und der Oberflächentemperaturen der Folien an den Messstellen Rechts (R), Mitte (M) und Links (L)), sowie die Werte der relativen Luftfeuchte (im Außenraum $H_{\text{rel-Schrnk}}$ und in der entsprechenden Kammer $H_{\text{rel-D/C/A/B/E/F}}$). Neben dem Zeitverlauf der Messwerte ist zudem die errechnete Taupunkttemperatur in der jeweiligen Kammer (PW-1-(D-u-4-5), PS-1-(C-o-2-3), PW-2-Def-(A-u-4-5), PS-2-Def-(B-o-2-3), PR-O-(F-o-2-3), PR-U-(E-u-4-5)) in Rot aufgetragen. Bei einer Unterschreitung der Taupunkttemperatur ist an den entsprechenden Oberflächen mit einem Niederschlag von Kondensat zu rechnen.

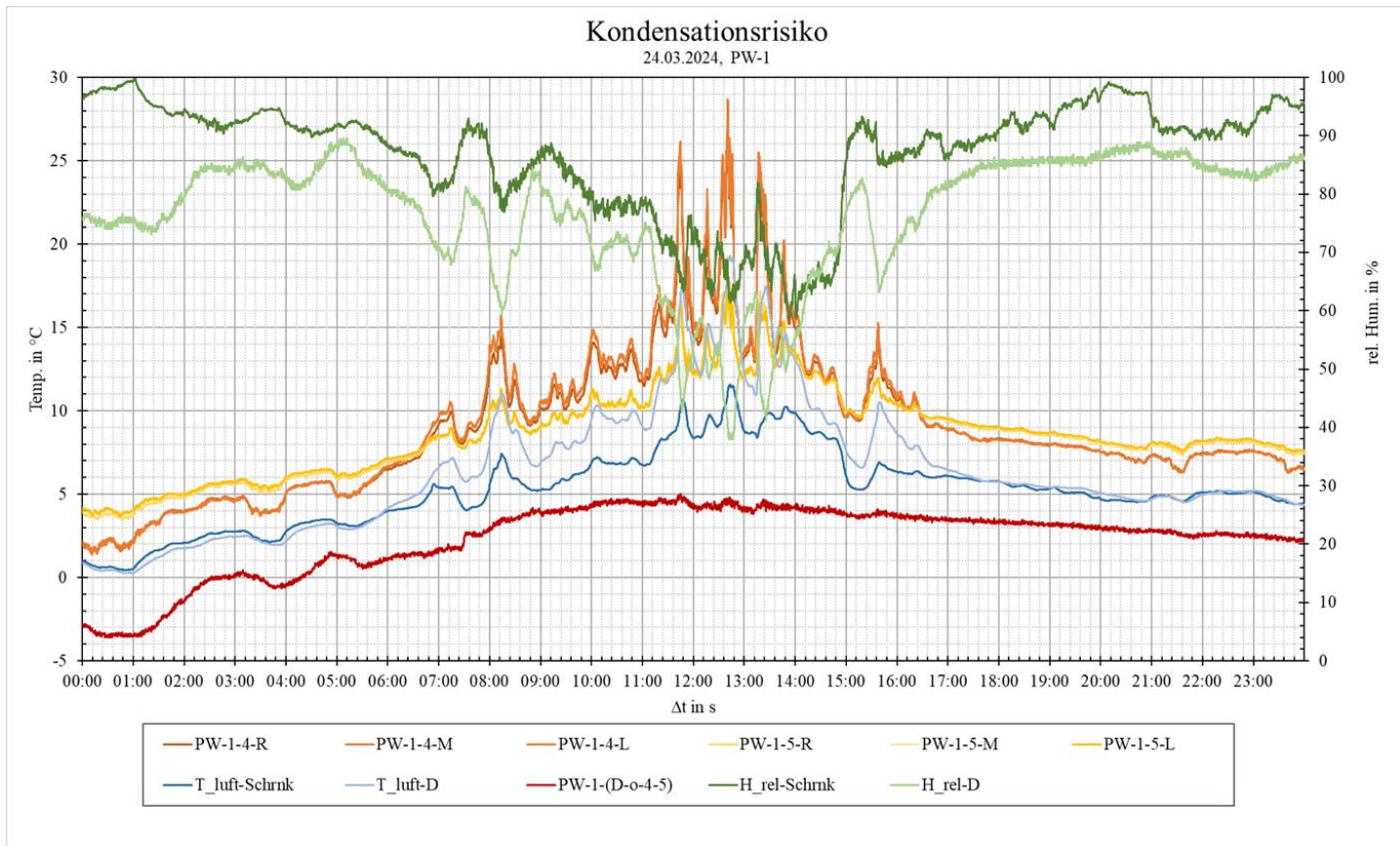


Abbildung 34: Zeitlicher Verlauf der Messwerte zum Demonstratorkissen „PW-1“ (defektarm) des Tagesdatensatzes vom 24.03.2024. Linkseitig aufgetragen: Temperaturen in °C, Außenlufttemperatur „T_luft-Schrnk“ (dunkelblau), Lufttemperatur im Kissen in Kammer 2 „T_luft-D“ (hellblau) und Temperaturen der Oberflächen 4 (Orangetöne) und 5 (Gelbtöne) an den Messstellen Rechts (R), Mitte (M) und Links (L). „PW-1-4/5-R/M/L“, sowie die errechnete Taupunkttemperatur „PW-1-(D-u-4-5)“ (rot). Rechtsseitig aufgetragen: relative Luftfeuchte in %, Luftfeuchte der Umgebung „H_rel-Schrnk“ (dunkelgrün) und Luftfeuchte in Kammer 2 „H_rel-D“ (hellgrün).

Die Temperaturen der Oberflächen unterschreiten die Taupunkttemperatur bei allen Kissen über den betrachteten Messzeitraum nicht. Bei den Kissen in Wärmeschutzkonfiguration und der unteren Kammer des Referenzkissens liegen die Werte der relativen Luftfeuchte in der jeweiligen Kissenkammer nahezu durchgängig unterhalb der Werte der relativen Luftfeuchte im Außenbereich und variieren über einen Bereich von etwa 50% bis 90%. Abgesehen von einigen Zeitabschnitten trifft dies auch für die Kissen in Sonnenschutzkonfiguration und für die obere Kammer des Referenzkissens zu. Lediglich beim Referenzkissen kommt es in einem Zeitabschnitt von etwa einer Stunde in der oberen Kammer dazu, dass die relative Luftfeuchte Werte von nahezu 100% also etwa Sättigung erreicht. Die Lufttemperatur im Demonstratorkissen PS-2 in Sonnenschutzkonfiguration mit Defekten liegt über einen Zeitraum von mehreren Stunden in den Morgenstunden im Bereich der Taupunkttemperatur, so dass hier ein Risiko von Niederschlag von Tauwasser an Kondensationskeimen in der Kammerluft gegeben sein könnte. Entsprechend dieser Beobachtungen ist in den dargestellten Fällen für die Kissen in Wärmeschutzkonfiguration und die untere Kammer des Referenzkissens nicht mit einem erhöhten Risiko

an Kondensationserscheinungen, bedingt durch eine Unterschreitung der Taupunkttemperatur an den Oberflächen, oder Niederschlag an Kondensationskeimen in der Kammerluft, bedingt durch Sättigung der Luftfeuchte, zu rechnen.

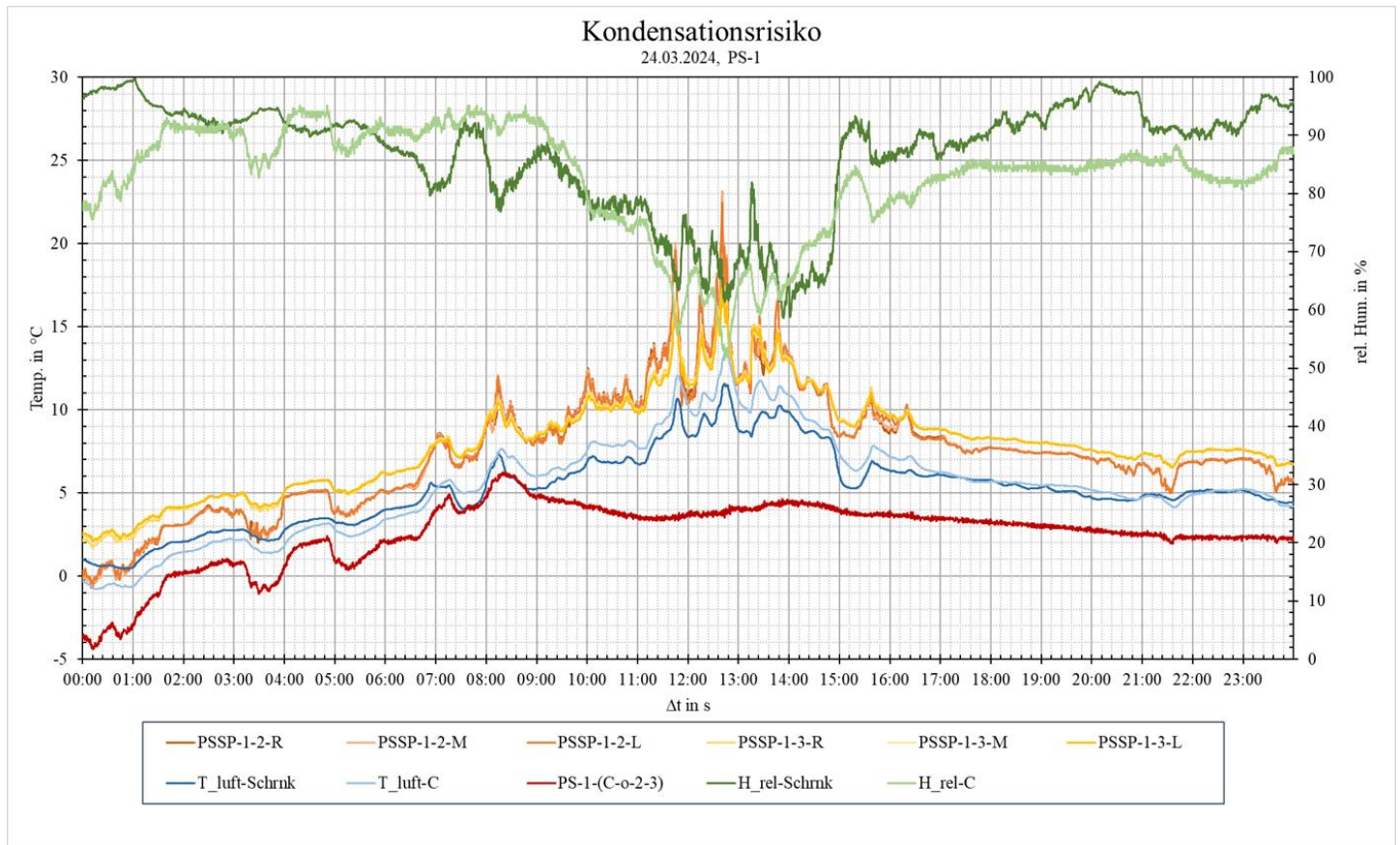


Abbildung 35: Zeitlicher Verlauf der Messwerte zum Demonstratorkissen „PS-1“ (defektarm) des Tagesdatensatzes vom 24.03.2024. Linksseitig aufgetragen: Temperaturen in °C, Außenlufttemperatur „T_luft-Schrnk“ (dunkelblau), Lufttemperatur im Kissen in Kammer 1 „T_luft-C“ (hellblau) und die Temperaturen der Oberflächen 2 (Orangetöne) und 3 (Gelbtöne) an den Messstellen Rechts (R), Mitte (M) und Links (L). „PSSP-1-2/3-R/M/L“, sowie die errechnete Taupunkttemperatur „PS-1-(C-o-2-3)“ (rot). Rechtsseitig aufgetragen: relative Luftfeuchte in %, Luftfeuchte der Umgebung „H_rel-Schrnk“ (dunkelgrün) und Luftfeuchte in Kammer 1 „H_rel-C“ (hellgrün).

Für die Kissen in Sonnenschutzkonfiguration und die obere Kammer des Referenzkissens ist mit einem geringen Risiko für Kondensationserscheinungen zu rechnen. In der Tat konnte an der oberen Innenseite des Kissens in den frühen Morgenstunden Kondensation beobachtet werden.

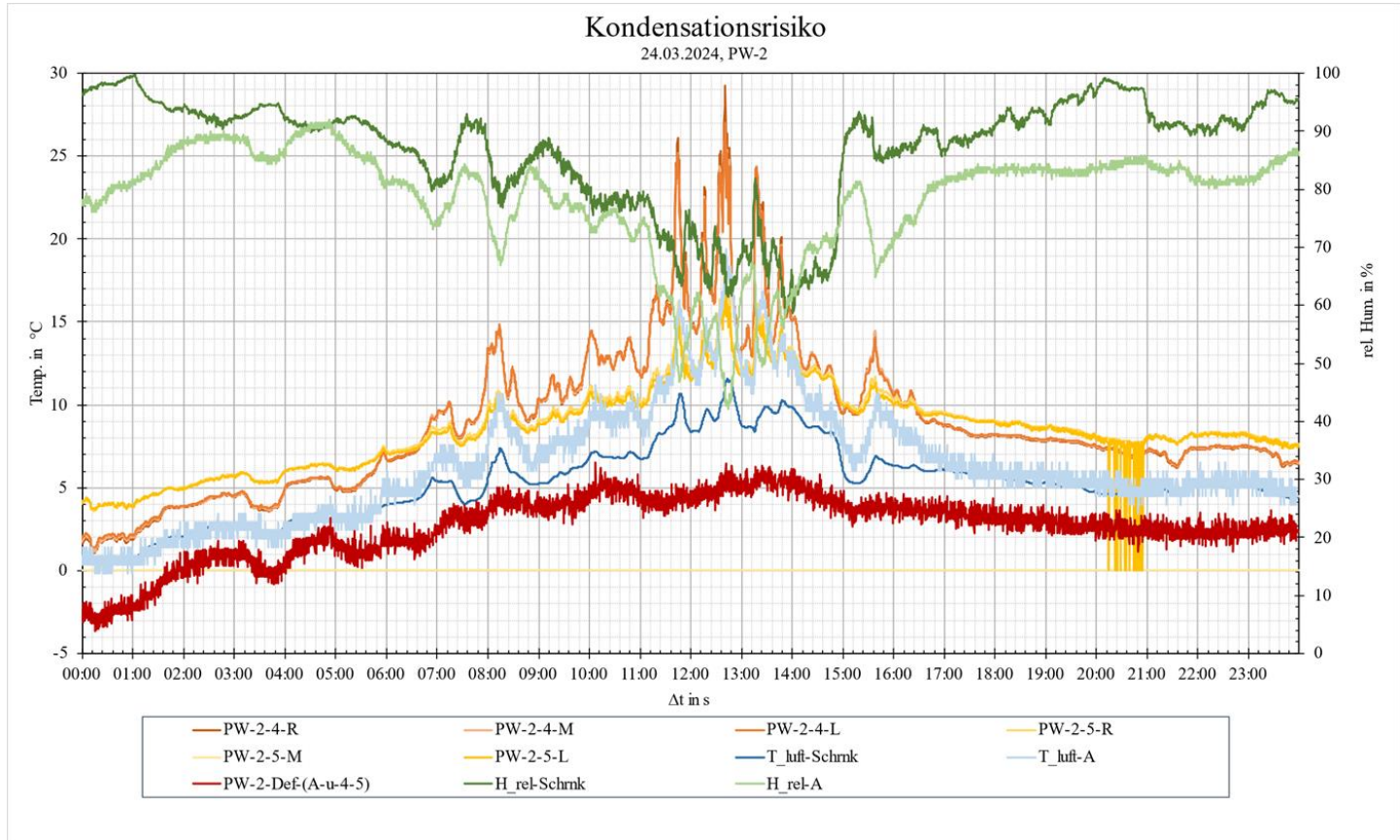


Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf der Messwerte zum im Demonstratorkissen „PW-2“ (Defekte) des Tagesdatensatzes vom 24.03.2024. Linksseitig aufgetragen: Temperaturen in °C, Außenlufttemperatur „T_{luft-Schrnk}“ (dunkelblau), Lufttemperatur im Kissen in Kammer 2 „T_{luft-A}“ (hellblau) und Temperaturen der Oberflächen 4 (Orangetöne) und 5 (Gelbtöne) an den Messstellen Rechts (R), Mitte (M) und Links (L). „PW-2-4/5-R/ML“, sowie die errechnete Taupunkttemperatur „PW-2-Def-(A-u-4-5)“ (rot). Rechtsseitig aufgetragen: relative Luftfeuchte in %, Luftfeuchte der Umgebung „H_{rel-Schrnk}“ (dunkelgrün) und Luftfeuchte in Kammer 2 „H_{rel-A}“ (hellgrün).

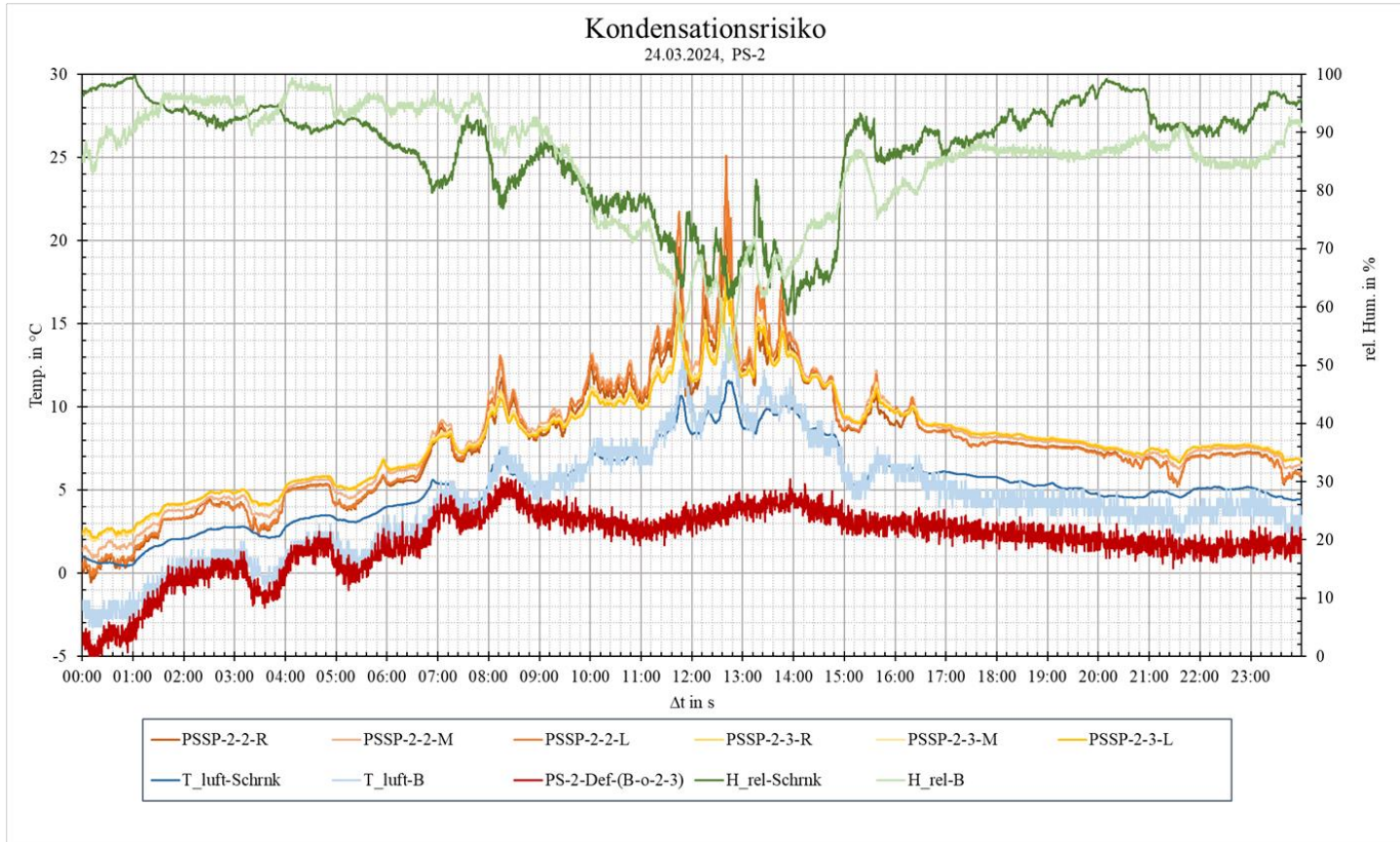


Abbildung 37: Zeitlicher Verlauf der Messwerte zum Demonstratorkissen „PS-2“ (Defekte) des Tagesdatensatzes vom 24.03.2024. Linksseitig aufgetragen: Temperaturen in °C, Außenlufttemperatur „T_luft-Schrnk“ (dunkelblau), Lufttemperatur im Kissen in Kammer 1 „T_luft-B“ (hellblau) und die Temperaturen der Oberflächen 2 (Orangetöne) und 3 (Gelbtöne) an den Messstellen Rechts (R), Mitte (M) und Links (L). „PSSP-2-2/3-R/ML“, sowie die errechnete Taupunkttemperatur „PS-2-Def-(B-o-2-3)“ (rot). Rechtsseitig aufgetragen: relative Luftfeuchte in %, Luftfeuchte der Umgebung „H_rel-Schrnk“ (dunkelgrün) und Luftfeuchte in Kammer 1 „H_rel-B“ (hellgrün).

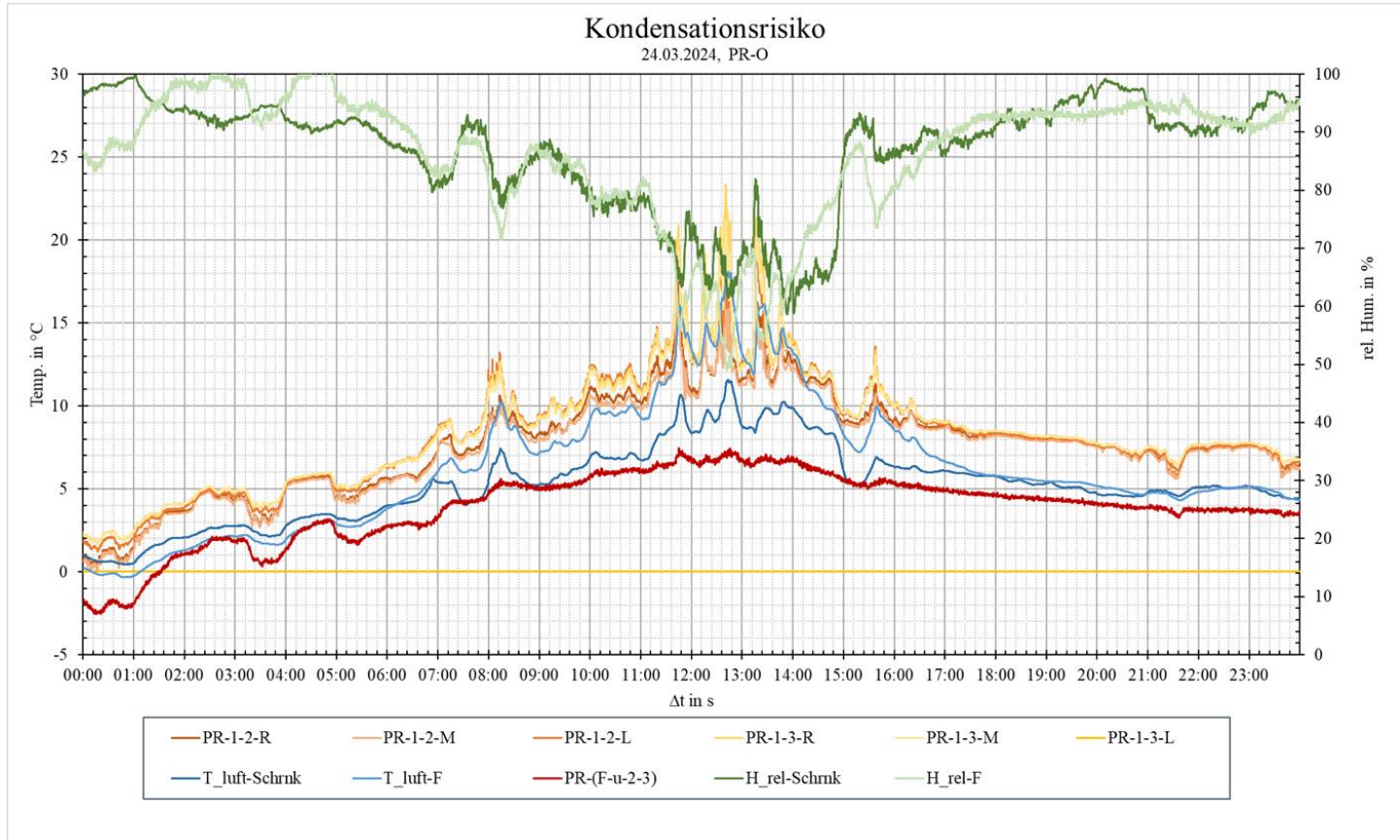


Abbildung 38: Zeitlicher Verlauf der Messwerte zum Demonstratorkissen „PR-O“ (Referenzkissen, obere Kammer) des Tagesdatensatzes vom 24.03.2024.

Linksseitig aufgetragen: Temperaturen in °C, Außenlufttemperatur „T_luft-Schrnk“ (dunkelblau), Lufttemperatur im Kissen in Kammer 1 „T_luft-F“ (hellblau) und die Temperaturen der Oberflächen 2 (Orangetöne) und 3 (Gelbtöne) an den Messstellen Rechts (R), Mitte (M) und Links (L). „PR-1-2/3-R/M/L“, sowie die errechnete Taupunkttemperatur „PR-(F-u-2-3)“ (rot).

Rechtsseitig aufgetragen: relative Luftfeuchte in %, Luftfeuchte der Umgebung „H_rel-Schrnk“ (dunkelgrün) und Luftfeuchte in Kammer 1 „H_rel-F“ (hellgrün).

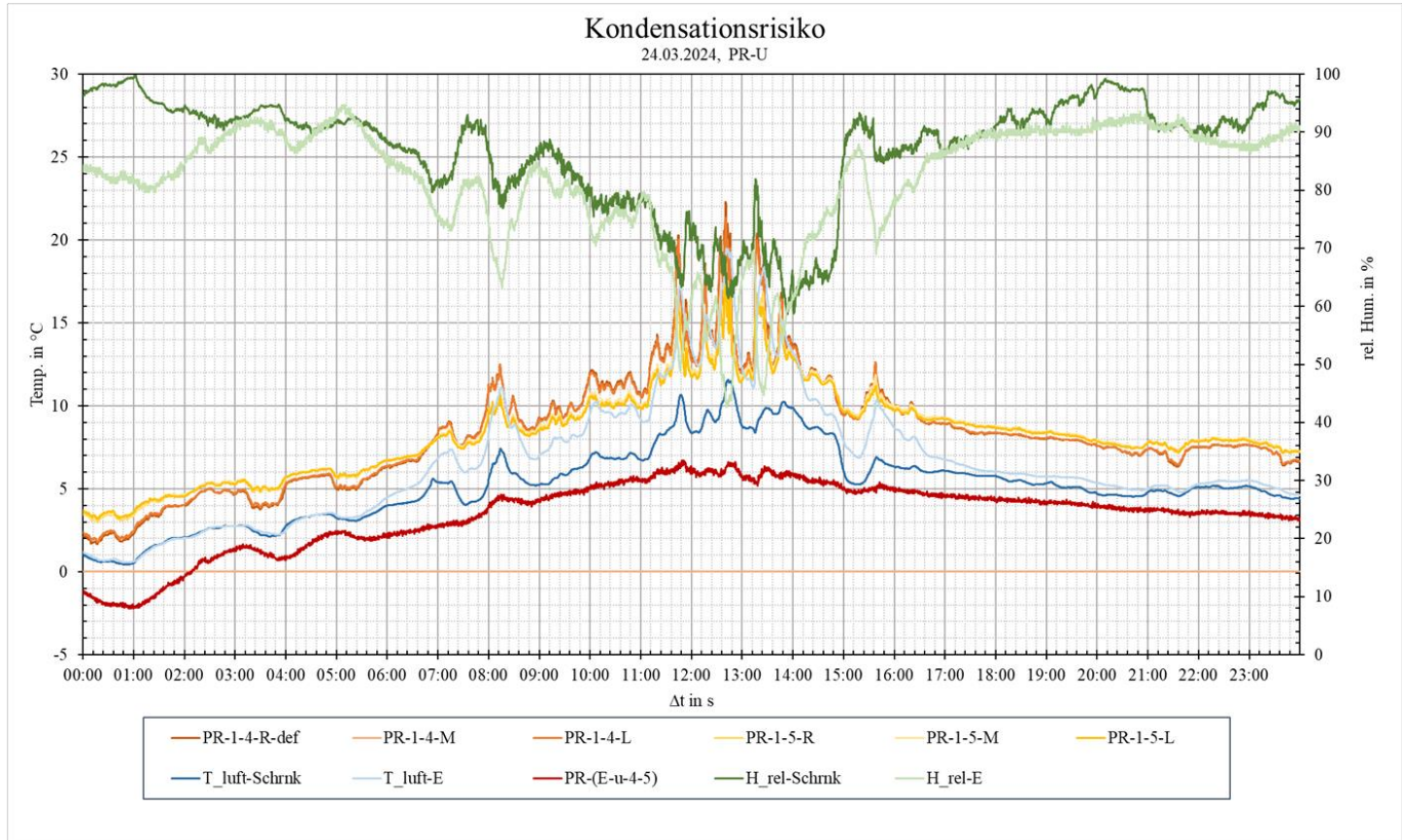


Abbildung 39: Zeitlicher Verlauf der Messwerte zum Demonstratorkissen „PR-U“ (Referenzkissen, untere Kammer) des Tagesdatensatzes vom 24.03.2024.

Linksseitig aufgetragen: Temperaturen in °C, Außenlufttemperatur „T_luft-Schrnk“ (dunkelblau), Lufttemperatur im Kissen in Kammer 2 „T_luft-E“ (hellblau) und die Temperaturen der Oberflächen 2 (Orangetöne) und 3 (Gelbtöne) an den Messstellen Rechts (R), Mitte (M) und Links (L). „PR-1-4/5-R/M/L“, sowie die errechnete Taupunkttemperatur „PR-(E-u-4-5)“ (rot).

Rechtsseitig aufgetragen: relative Luftfeuchte in %, Luftfeuchte der Umgebung „H_rel-Schrnk“ (dunkelgrün) und Luftfeuchte in Kammer 2 „H_rel-E“ (hellgrün).

AP 3.2 Jährliche Zerlegung der Kissen und Laborcharakterisierung der Beschichtungen

Nach 1 Jahr im Februar 2023 und danach nach 2 Jahre im Februar 2024 wurden die ETFE-Demonstrator-Kissen geöffnet, Proben entnommen und entsprechende Messungen durchgeführt. Jeweils ein kleines Demonstratorkissen je Variante ist demontiert, aufgeschnitten und die beschichtete ETFE-Folie gründlich auf Fehler und Degradationsphänomene untersucht worden. Dabei wurden gezielt die unterschiedlichen Bereiche der Kissen (makellos, gezielte Fehlstellen, mit Reparaturlack behandelte Fehlstellen) betrachtet. Die Untersuchung und Dokumentation erfolgt mittels visueller Inspektion mit Fotos und Lichtmikroskop. Einzelne Proben wurden im Fourierspektrometer vermessen, um evtl. spektrale Veränderungen der Beschichtungen zu dokumentieren.

FKZ 03EN1032

Die Ergebnisse von den beiden großen Kissen, die entweder eine Thermalschutzbeschichtung auf der mittleren Schicht des Kissens oder eine Sonnenschutzbeschichtung auf Position 2 der oberen Schicht des Kissens hatten, sind in der nachstehenden Tabelle und Graphen zusammengefasst.

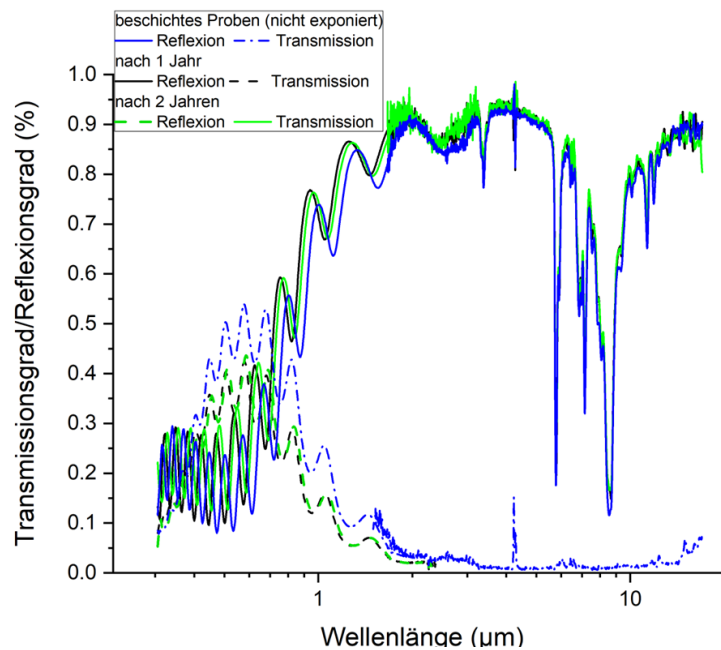


Abbildung 40: Spektren aus dem Sonnenschutz-beschichteten Kissen vor, und nach 1 und 2 Jahren im Demonstrationskissen.

Tabelle 9: Spektrale Parameter des mit Sonnenschutz-Spezial beschichteten Kissens vor und nach 1 und 2 Jahren Exposition.

	Sonnenschutz Special (nach beschichten)	Sonnenschutz Special (im März 2023 vom Prüfstand entfernt)	Sonnenschutz Special (im März 2024 vom Prüfstand entfernt)
Tsol	0,32	0,24	0,24
Tvis	0,47	0,36	0,37
L*	74,32	66,63	67,33
a*	-3,76	-3,44	-3,02
b*	9,58	5,74	8,28
Rsol	0,41	0,48	0,48
Rvis	0,18	0,25	0,25
L*	48,77	56,51	57,02
a*	5,23	8,08	4,62
b*	1,37	9,44	6,67
Emissivität (300K)	0,19	0,20	0,20

FKZ 03EN1032

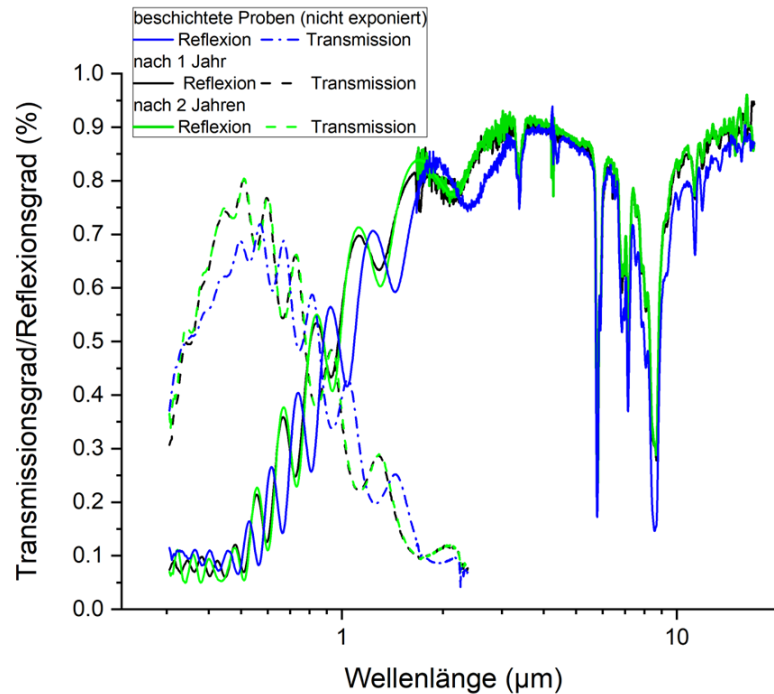


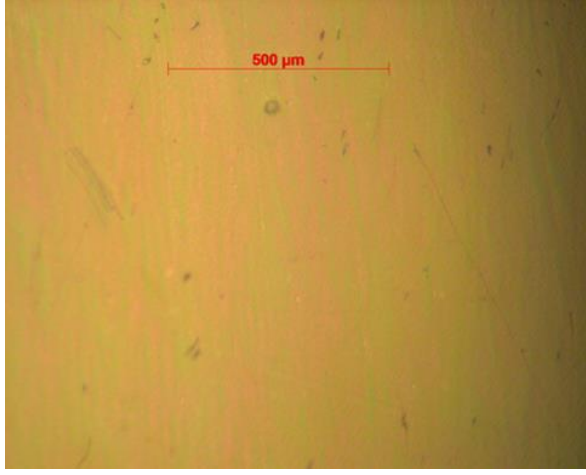
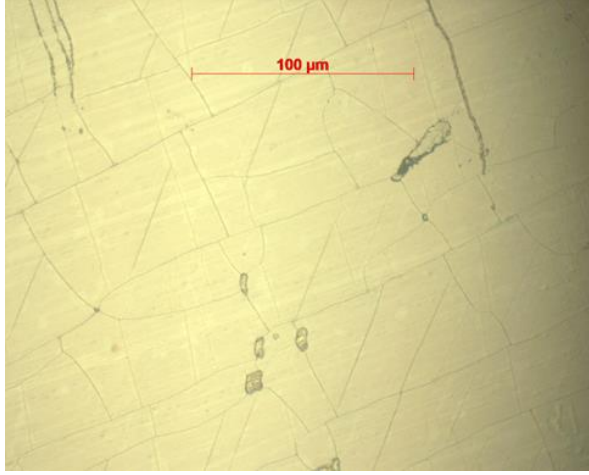
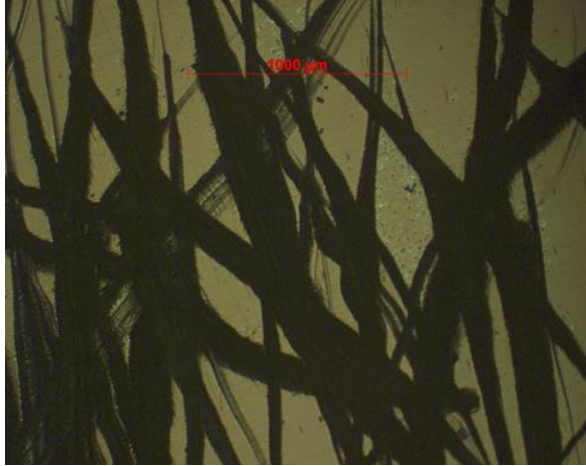
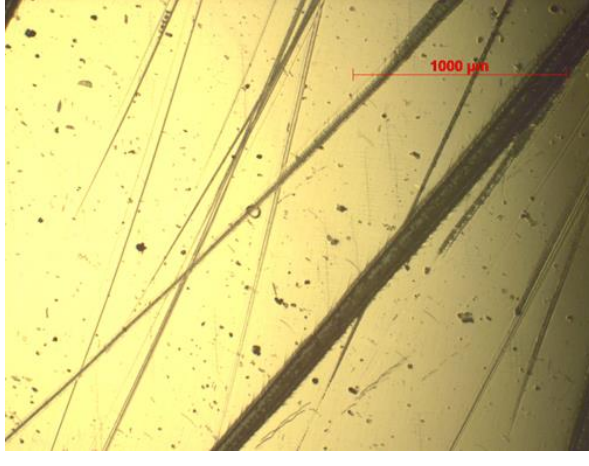
Abbildung 41: Spektren aus dem Thermalschutz-beschichteten Kissen vor, und nach 1 und 2 Jahren im Demonstrationskissen.

Tabelle 10: Spektrale Parameter des mit Thermalschutz beschichteten Kissens vor und nach 1 und 2 Jahren Exposition

	Wärmeschutz Standard (nach beschichten)	Wärmeschutz Standard (im März 2023 vom Prüfstand entfernt)	Wärmeschutz Standard (im März 2024 vom Prüfstand entfernt)
Tsol	0,54	0,51	0,51
Tvis	0,73	0,72	0,72
L*	88,42	88,03	88,04
a*	-5,04	-2,59	-2,28
b*	3,96	-0,85	-1,02
Rsol	0,31	0,37	0,37
Rvis	0,11	0,16	0,16
L*	38,96	46,99	46,65
a*	15,99	4,03	2,47
b*	7,25	21,02	23,39
Emissivität (300K)	0,22	0,18	0,17

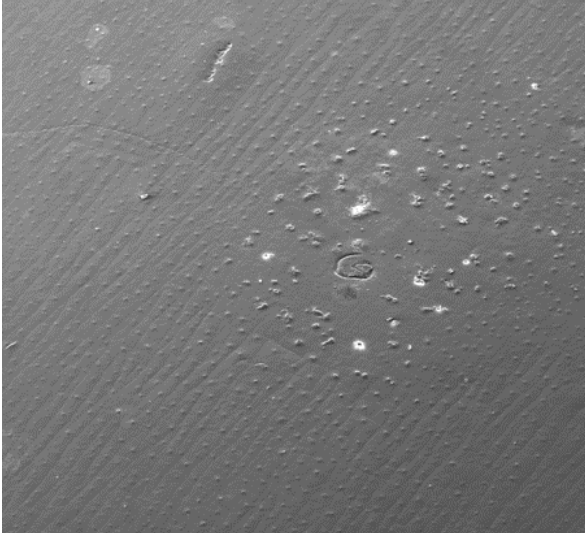
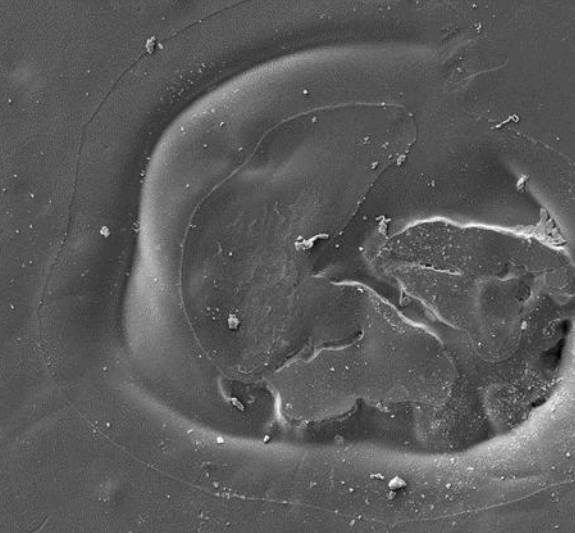
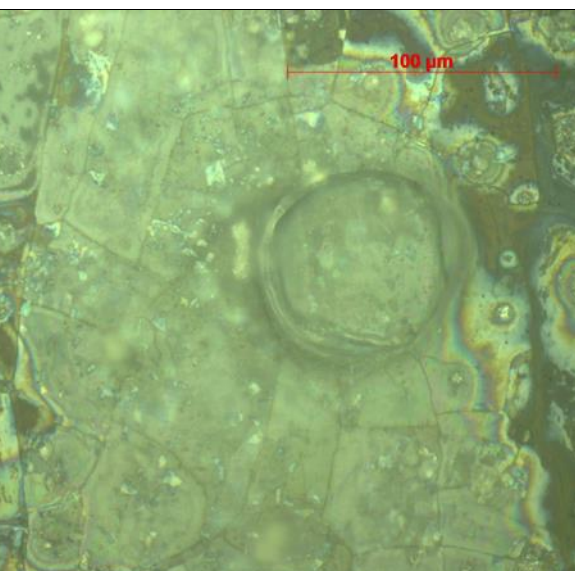
FKZ 03EN1032

Tabelle 11: Lichtmikroskopische Aufnahme von Sonnenschutz beschichteten Kissens nach 2 Jahren Exposition.

	
(a.) Übersicht über die allgemeine Beschichtung	(b.) Übersicht über die allgemeine Beschichtung
	
(c.) Absichtlich geschädigte Region	(d.) Beschädigte Stelle mit zusätzlichem Lack ausgebessert

FKZ 03EN1032

Tabelle 12: Lichtmikroskopische und REM Aufnahme von Sonnenschutz-spezial beschichteten Kissens nach 2 Jahren Exposition. Untersuchung des von Novum speziell beobachteten Punktkorrosionsbereichs.

 100 µm EHT = 12.00 kV Mag = 129 X Detector = SE2 Stage at T = 45.0°	 10 µm EHT = 4.00 kV Mag = 1.63 K X Detector = SE2 Stage at T = 0.0°
(a.) REM Bild	(b.) REM Bild
 1000 µm	 100 µm
(c.) Lichtmikroskope Bild	(d.) Lichtmikroskope Bild

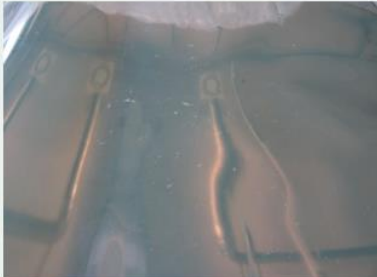
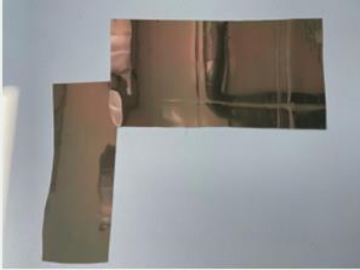
FKZ 03EN1032

Tabelle 13: Spektrale Parameter von Prototype-Beschichtungen: Messungen direkt nach der Herstellung und ein Jahr später, nachdem das Kissen auf dem Prüfstand von Novum Membranes in Betrieb war.

	Wärmeschutz		Sonnenschutz Standard		Sonnenschutz dicke Lack		Sonnenschutz Spezial	
	Messungen nach der Herstellung	Nach einem Jahr im Kissen	Messungen nach der Herstellung	Nach einem Jahr im Kissen	Messungen nach der Herstellung	Nach einem Jahr im Kissen	Messungen nach der Herstellung	Nach einem Jahr im Kissen
T_{sol}	0,54	0,51	0,26	0,25	0,25	0,25	0,32	0,24
T_{vis}	0,73	0,72	0,47	0,44	0,46	0,44	0,47	0,36
Farbverschiebung (T)		6,89		7,92		6,89		8,60
e @ 300K	0,22	0,20	0,12	0,20	0,18	0,20	0,19	0,20

FKZ 03EN1032

Tabelle 14: Ein Jahr nachdem das Kissen auf dem Prüfstand von Novum Membranes in Betrieb war, aufgenommene Fotos.

Beschichtung	Großteil der Beschichtung	Schweißnaht oder absichtlich beschädigten Stelle
Wärmeschutz		
Sonnenschutz		
Sonnenschutz (mit dicke Lack)		
Sonnenschutz Spezial		

FKZ 03EN1032

Tabelle 15: Licht-Mikroskopie Bilder von Prototype-Beschichtungen: Messungen direkt nach der Herstellung und ein Jahr später, nachdem das Kissen auf dem Prüfstand von Novum Membranes in Betrieb war.

Beschichtung	Beispiel einer reparierten Lackstelle auf einer absichtlich beschädigten Stelle			
Großteil der Beschichtung	Beispiel für punktuelle Korrosion in einer absichtlich beschädigten Region			
Beispiel einer punktuellen Korrosion in einer unbeschädigten Region	Beispiel einer punktuellen Korrosion in einer unbeschädigten Region			
Wärmeschutz	Beispiel einer punktuellen Korrosion in einer unbeschädigten Region			
Sonnenschutz	Beispiel einer punktuellen Korrosion in einer unbeschädigten Region			
Sonnenschutz (mit dicke Lack)	Beispiel einer punktuellen Korrosion in einer unbeschädigten Region			
Sonnenschutz Spezial	Beispiel einer punktuellen Korrosion in einer unbeschädigten Region			

Sonnenschutz-Beschichtung Zusammenfassung

- Korrosion entsteht durch Punktkorrosion der Silberfunktionsschicht.
- Die Sonnenschutzbeschichtung ist anfällig für Korrosion, da Wasser auf der obersten Schicht des ETFE-Kissens kondensiert, wo die Sonnenschutzbeschichtung angebracht ist.
- Korrosion bildet sich stark um den "absichtlich beschädigten" Bereich.



Abbildung 42: Sonnenschutzfolie, deutliche Veränderung der Beschichtung an Kratzstellen (Bild von 2Construct).

- Bei Verwendung von Reparaturlack an der "absichtlich beschädigten" Stelle tritt keine Korrosion auf.
- Verschlechterung des Emissionsgrades.

Sonnenschutz-mit dicker Lack Beschichtung Zusammenfassung

- Weniger Korrosion als beim Sonnenschutz-Standard-Beschichtung, da die dickere Lackschicht dies reduziert.
- Beschädigter Bereich weiterhin anfällig für Korrosion.
- Bei Verwendung von Reparaturlack an der "absichtlich beschädigten" Stelle tritt keine Korrosion auf.
- Keine Verschlechterung des Emissionsgrades. (In Gegensatz zu Sonnenschutz-Standard)
- Farbverschiebung 6,9

Wärmeschutz-Beschichtung Zusammenfassung

- Die Wärmeschutz-Beschichtung weist weniger Korrosion auf als die Sonnenschutz Standard- und die dicke Lack-Beschichtungen.
- Für das Auge sieht es gut aus, aber unter dem Mikroskop sieht man mikroskopische Korrosion.
- Beschichtung auf der inneren Schicht des Kissens, die weniger Wasserkondensation aufweist (die Expositionsbedingungen sind nicht so "anspruchsvoll" wie bei der Beschichtung der äußeren Kissenschicht)
- Keine Verschlechterung des Emissionsgrades.
- Beschädigter Bereich weiterhin anfällig für Korrosion aber mit bloßem Auge nicht erkennbar.



Abbildung 43: Wärmeschutzfolie: Vergrößerung Doppelknick, keine Veränderung erkennbar (Bild von 2Construct).

- Bei Verwendung von Reparaturlack an der "absichtlich beschädigten" Stelle tritt keine Korrosion auf.

Sonnenschutz-Spezial Beschichtung Zusammenfassung

- Im Allgemeinen zeigt die Sonnenschutzbeschichtung keine Korrosion, auch nicht an der absichtlich beschädigten Stelle. Es gab mehrere Korrosionsstellen, die vermutlich mit inhomogenen Partikeln in der ETFE-Folie selbst zusammenhingen. Diese wurden mit dem Mikroskop beobachtet und sind in **Tabelle 12** dargestellt.
- Für das Auge sieht es gut aus (siehe Fotos) auch unter Lichtmikroskope makellos.
- Keine Verschlechterung des Emissionsgrades.

Mit der Vervollständigung und Bewertung der Beschichtung von Prototyp-ETFE-Kissen im betrieblichen Umfeld war TRL 7/8 erreicht

- ✓ **Sonnenschutz Spezial-Beschichtungen waren als sehr beständig bewertet**
- ✓ **Wärmeschutz-Beschichtungen auf der Mittellage waren als vielversprechend und beständig bewertet**

Diese beiden Produkte wären in Verbindung mit dem Polyacrylat-Fluor-Lack ein marktreifes Produkt.

AP 3.3 Bewertung des g-Wertes der Demonstrator Kissen

Vier zusätzliche ETFE-Kissen wurden hergestellt. ROWO lieferte das beschichtete ETFE (aus früheren Chargen). Novum stellte die vier Kissen der Größe 1 x 1 m² her, die aus folgenden Materialien bestanden:

- ETFE-Referenz 3-lagig unbeschichtet
- Sonnenschutz Standard
- Sonnenschutz Spezial
- Wärmeschutz

Die Tests fanden auf dem g-Wert Messgerät am Fraunhofer ISE statt (siehe **Abbildung 44**) Bild des Messplatzes).

Die Kissen wurden auf einen Druck von 200 Pa aufgepumpt und mit einem Holzrahmen versehen, um sie starr zu halten.

Der g-Wert wurde für verschiedene Einfallswinkel des Lichtes (0, 30 und 60 Grad relativ zur Normalen) gemessen, das einfallende Licht hatte dabei eine spektrale Zusammensetzung entsprechend AM1,5 global. Der g-Wert setzt sich zusammen aus der direkt durchgelassenen Sonnenstrahlung und der sekundären Wärmeabgabe, die von Kissenlagen nach innen durch Abstrahlung und Konvektion erfolgt. Die gemessenen Werte sind in der Abbildung 45 und Tabelle 166 dargestellt.

Wie durch den *T_{vis}*-Wert erwartet, hat die Sonnenschutzbeschichtung den niedrigsten g-Wert. Sonnenschutz-spezial ist nicht so selektiv wie der Sonnenschutz und hat daher einen etwas höheren g-Wert. Auch die Wärmeschutzbeschichtung senkt den g-Wert im Vergleich zum unbeschichteten ETFE immer noch deutlich.

Die Messungen ergaben plausible Werte mit einem Abfall des g-Wertes bei steigendem Einfallswinkel (wie erwartet und zuvor bei Flachglasfenstern gemessen).

Verglichen mit der berechneten Transmission durch ein dreilagiges Kissen, ist die Abweichung beim Wärmeschuttkissen am höchsten. Hier ist die Mittellage beschichtet, weshalb es zu den höchsten sekundären Gewinnen durch Absorption in der Folie und Konvektion sowie Wärmestrahlung nach innen kommt. Sonnenschutz Spezial mit einer Abweichung von 0,035 ist zwar auf der Außenlage (Innenseite) beschichtet, hat aber die höchste solare Absorption und auch einen höheren IR-Weitergabe Anteil im Vergleich zu Sonnenschutz Standard. Die Messwerte sind also plausibel.

Auch sind die Messungen zur Bestimmung der solaren Transmission und Reflexion ja an ebenen Substraten durchgeführt, während im Folienkissen viele unterschiedliche Einstrahlwinkel auftreten.

FKZ 03EN1032

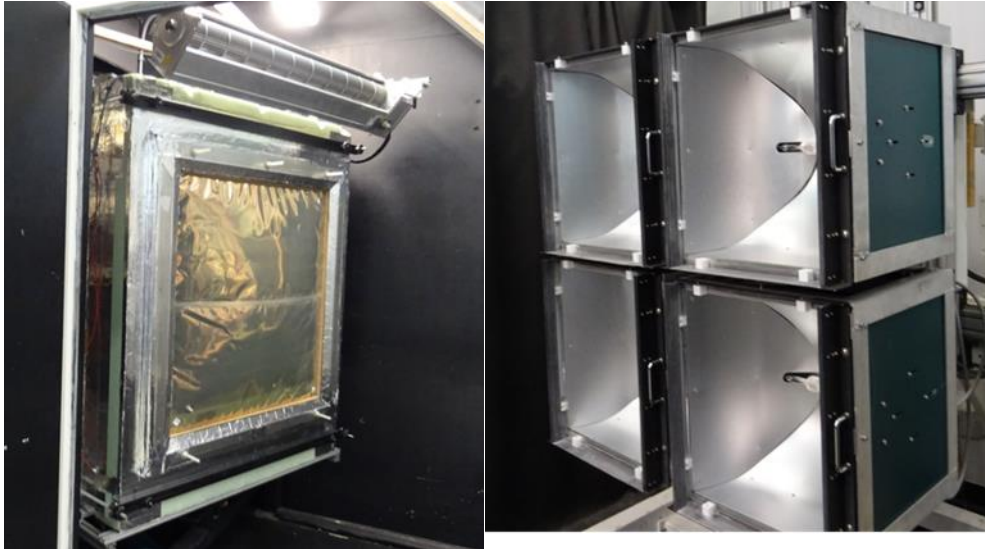


Abbildung 44: Der g-Wert-Messapparat am Fraunhofer ISE. Das Kissen in Messposition (links) und die Lichtquellenlampen (rechts).

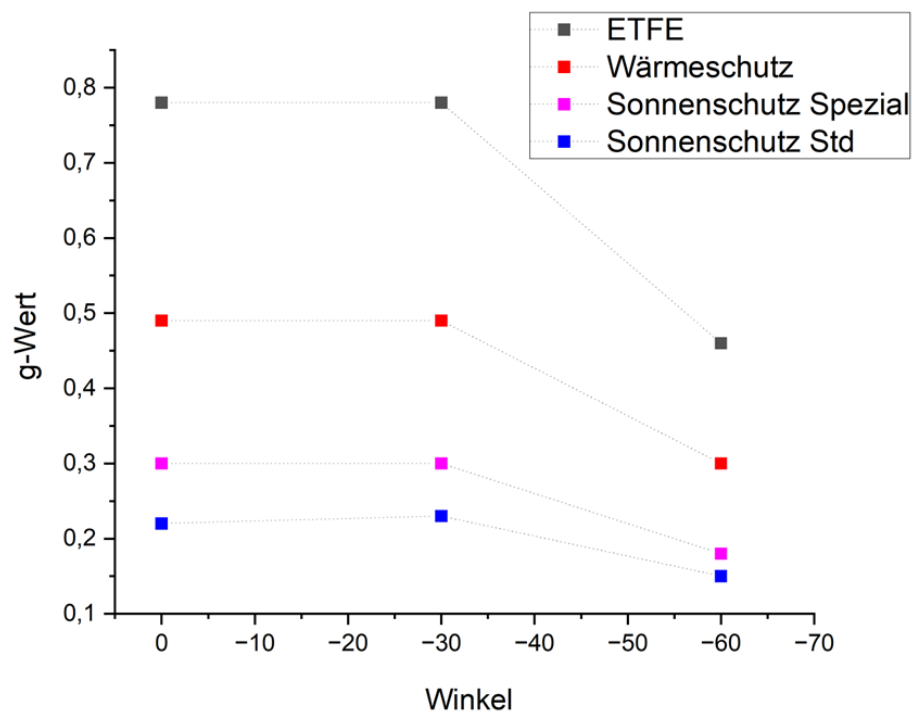


Abbildung 45: Graph des g-Wertes für die 4 verschiedenen Kissen als Funktion des Lichteinfallswinkels.

Tabelle 16: Gemessener g-Wert im Vergleich zu berechneten optischen Werten für die 4 verschiedenen Kissen.

		ETFE unbeschichtet	Sonnenschutz Standard	Sonnenschutz Spezial	Wärmeschutz
	beschichtete Lage	ohne	Außenlage	Außenlage	Innenlage
Messwerte	Tsol	0,91	0,26	0,32	0,54
	IR (1-Rplanck300k)	0,8	0,12	0,19	0,22
	Asol	0,01	0,18	0,27	0,16
	g -Wert	0,78	0,22	0,3	0,49
berechnet	Tsol(Folie1)* Tsol(Folie 2)* Tsol(Folie3)	0,754	0,215	0,265	0,447
	Abweichung von Messung	0,026	0,005	0,035	0,043
	Tsol(Folie1)* Tsol(Folie 2)* Tsol(Folie3)+ Asol*IR	0,762	0,237	0,316	0,482
	Abweichung von Messung	0,018	-0,017	-0,016	0,008

2.1.4 AP 4 Entwicklung der spektralselektiven Doppelsilberbeschichtung

(ROWO, ISE, Dunmore, HFT, 2Construct)

Das ursprüngliche Ziel von AP4 war die Entwicklung eines hoch selektiven und dauerhaften Beschichtungs-systems auf der Basis einer Doppelsilberbeschichtung.

Anfang 2023 teilte Dunmore mit, dass der Lieferant der bisher verwendeten Schutzbeschichtung die Produktion dieser Beschichtung einstellt. Dies war problematisch für die Entwicklung der Sonnenschutz- bzw. Low-E-Beschichtung auf ETFE, da die Beschichtung in früheren Projekten hinsichtlich Aussehens und Haltbarkeit in Verbindung mit der Sputterschicht qualifiziert wurde.

In AP4.3 müsste eigentlich im Projekt noch ein kleines Demonstratorkissen gefertigt werden. Dafür wäre eine neue Charge Lack notwendig, die Kosten würden sich auf 15 TEuro reine Materialkosten für den Lack belaufen (Mindestbestellmenge, letzte Herstellung). Alle Projektpartner und besonders auch die Kissenhersteller Novum und 2Construct waren sich einig, dass es wenig zukunftsweisend ist, noch weitere Versuche mit diesem Lack durchzuführen. Vielmehr sollten die restlichen Projektmittel in eine Recherche zu fluorfreien Lacken fließen.

Mit geeigneten Lacken würden wir Beschichtungen und Stabilitätstests durchführen, um eine Vorqualifizierung zu machen.

Zum Projektende hätten wir also statt dem letzten Demonstratorkissen mit niedriger solarer Transmission und zukünftig nicht mehr verfügbaren Lack eine Einschätzung, ob es alternative Lacke gibt, die dieselbe Schutzfunktion mit passenden optischen Eigenschaften erfüllen. Bestenfalls hätten wir in Stabilitätstests einen geeigneten Lack identifiziert.

Meilenstein M4 „Herstellung eines Demonstratorkissens mit einer Doppelsilberbeschichtung, die eine bessere Selektivität als eine Einfachsilberschicht aufweist“ (Monat 30) sowie die Teilergebnisse

„Entwicklung eines Beschichtungssystems mit einem gesputterten Doppelsilber (double low-e), das auf dem ROWO-Rolle-zu-Rolle-System hergestellt werden kann“ und „Herstellung eines Demonstratorkissens mit einer Doppelsilber-beschichtung“ würden damit entfallen.

Das Projektziel „Herstellung und Testen der ersten stabilen, robusten Doppelsilberbeschichtungen auf ETFE zur Erhöhung der Energieeffizienz der Beschichtungen“ würde nur eingeschränkt erreicht (AP4.2): Die Vorarbeiten und die Pilotlinienabscheidung der doppelten **Low-E-Beschichtungen wurden am Fraunhofer ISE durchgeführt. Die Proben wurden bei Dunmore lackiert und bei 2Construct wurden** Schweißversuche durchgeführt. Das Upscaling auf ROWO fand nicht statt und es wurde kein Demonstrationskissen hergestellt (wie im Vertrag vereinbart).

Statt Doppelsilberbeschichtung wurden Schichtsysteme mit niedriger solarer Transmission hinsichtlich ihrer bauphysikalischen Eigenschaften untersucht (AP4.1).

Diese Änderungen wurden im offiziellen Projektänderungsantrag präzisiert und bestätigt.

AP 4.1 Gebäudesimulationen

In Verbindung mit AP4 wurden von Seiten der HFT einige Arbeiten im Kontext der Gebäudesimulation durchgeführt. Bei der Modellierung der bauphysikalischen Eigenschaften im Allgemeinen und von Membranbauten im Besonderen sind die verschiedenen auftretenden physikalischen Phänomene entsprechend ihrer Wirkung auf die Wärmeübertragung und den Energietransport zu berücksichtigen. Eine Illustration der verschiedenen Phänomene wie sie insbesondere bei pneumatisch gestützten Membrankonstruktionen auftreten ist in **Abbildung 46** gezeigt.

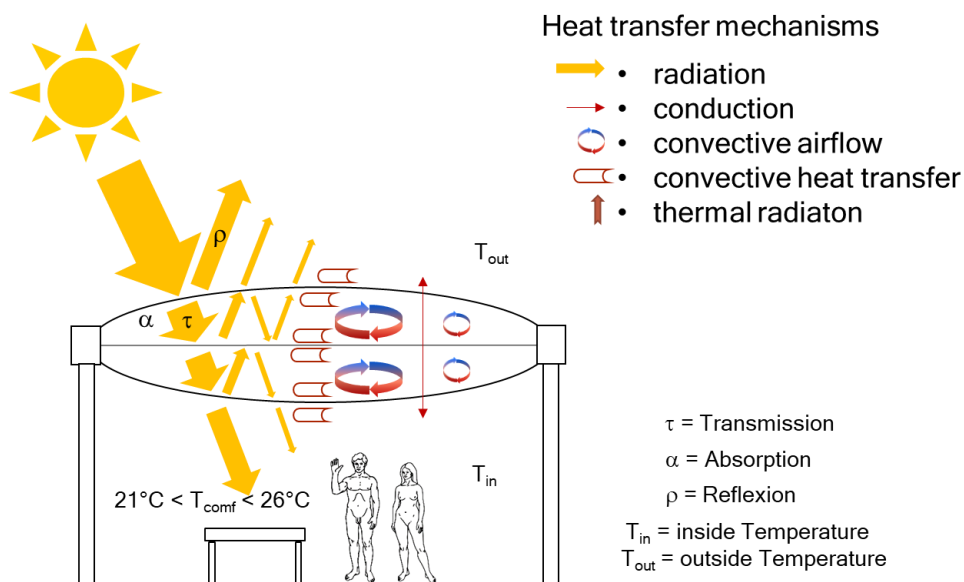


Abbildung 46: Schematische Darstellung der verschiedenen relevanten Phänomene der Wärmeübertragung in der Gebäudesimulation. Bild: HFT Stuttgart

Der Energietransfer durch ein pneumatisch gestütztes Gebäudehüllenelement wird neben konvektiven Wärmeübergängen und der Wärmeleitung vor allem durch den Strahlungsaustausch beeinflusst. Dieser radiative Wärmestrom steht in engem Zusammenhang zu den spektralen Eigenschaften, also der Absorption, Reflexion, und Transmission der entsprechenden Materialien und kann durch Veränderung dieser Parameter angepasst werden. Eine Beurteilung des radiativen Wärmeaustausches erfordert die Kenntnis dieser Materialparameter.

FKZ 03EN1032

Die für die Betrachtung des radiativen Wärmetransfer relevanten spektralen Größen sind beispielhaft in **Abbildung 47** dargestellt.

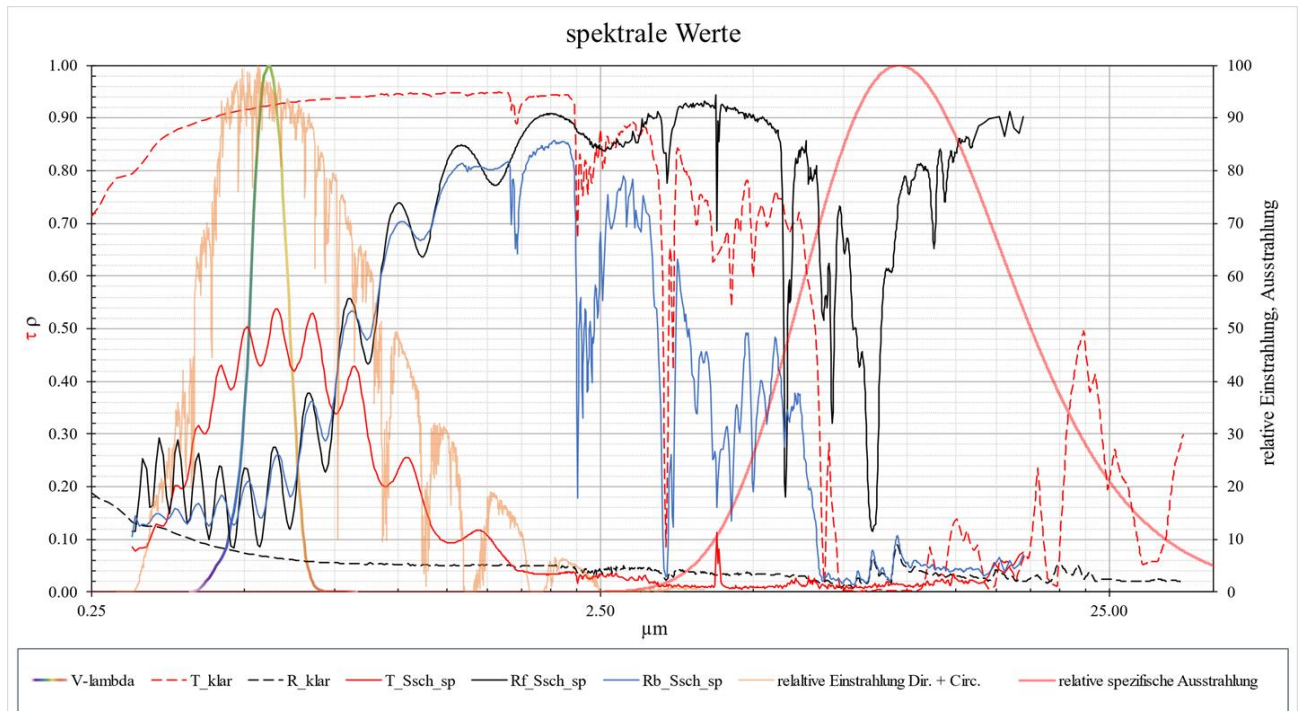


Abbildung 47: Relevante spektrale Größen für den radiativen Wärmetransfer der Gebäudehülle.

Dargestellt ist die relative solare Einstrahlung (orange), die relative spezifische Ausstrahlung als Schwarzkörperwärmestrahlung bei Raumtemperatur, die relative Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges V_{λ} und Werte zur Transmission (T), Reflexion (R) von unbeschichteter ETFE-Folie bei 250µm Dicke (klar) und der Vorder-(f) sowie Rückseite (b) beschichteter ETFE Folie mit Sonnenschutz-Spezial-Beschichtung ($Ssch_{sp}$).

Wie aus der graphischen Darstellung zu erkennen ist, weist die klare ETFE Folie Transmissions- (T_{klar} rot gestrichen) und Reflexionseigenschaften (R_{klar} schwarz gestrichen) auf, welche die solare Einstrahlung über den relevanten Spektralbereich bis etwa 2,5µm nahezu unbeeinflusst lassen ($T > 90\%$, $R < 12\%$). Im Spektralbereich des für das menschliche Auge sichtbaren Lichts, gekennzeichnet durch die Hellempfindlichkeitskurve V_{λ} , wird die Strahlung, und damit der Farbeindruck der Folie, dementsprechend ebenso nicht nennenswert beeinflusst. Im Spektralbereich der Infrarotstrahlung hingegen, insbesondere beim Maximalwert der Wärmestrahlung von 20°C bei einer Wellenlänge von 10µm, ist die klare ETFE Folie nahezu undurchlässig. Durch die Sonnenschutz-Spezial-Beschichtung werden die spektralen Eigenschaften der Transmission ($T_{Ssch-sp}$ rot durchgehend) und Reflexion der Vorder- ($Rf_{Ssch-sp}$ schwarz durchgehend) bzw. Rückseite ($Rb_{Ssch-sp}$ blau durchgehend) in einer Weise beeinflusst, dass der Energieeintrag aus der solaren Einstrahlung nennenswert reduziert wird, bei gleichzeitig möglichst geringem Einfluss auf dem Farbeindruck.

Für eine quantitative Beurteilung des Energietransfers werden diese spektralen Daten zu Transmission und Reflexion benötigt. Die Datensätze zu den spektralen Eigenschaften der verschiedenen Beschichtungsvarianten wurden vom Projektpartner Fraunhofer ISE aus Messwerten zur Verfügung gestellt. Diese wurden aufbereitet und für die Berechnung von Kennwerten bzw. der Erstellung von Datenblättern für die Gebäudesimulation herangezogen. Für diese Berechnungen wurden die

FKZ 03EN1032

computergestützten Berechnungswerkzeuge Optics 6 und Window 7.7 des Lawrence Berkeley National Laboratory genutzt.

Aus den diesen aufbereiteten spektralen Daten der beschichteten Folien wurden entsprechende Datensätze zur winkelabhängigen Transmission, Absorption und Reflexion generiert und für die Implementierung der einzelnen Folien, als auch mehrlagiger Kissen, als Fenstermodell in die Gebäudesimulation vorbereitet. Ein entsprechender Datensatz für ein dreilagiges luftgefülltes Kissen in Sonnenschutz Konfiguration mit Beschichtung „Sonnenschutz Spezial“ ist exemplarisch in **Abbildung 48** dargestellt.

```
ID:.....:180CR13
Name:.....:f-e-d-Ssch-spCR13
Tilt:.....:0.0CR13
Glazings:3CR13
KEFF:.....:1.217[W/m-K]CR13
Width:.....:602.250[mm]CR13
Uvalue:.....:1.507[W/m2-K]CR13
SHGCc:.....:0.434CR13
SCc:.....:0.499CR13
Tvis:.....:0.372CR13
RHG:.....:323.981[W/m2]CR13
CR13
Layer Data for Glazing System '180-f-e-d-Ssch-sp'CR13
CR13
ID:.....:Name:.....:D(mm):.....:Tsol:1:Rsol:2:Tvis:1:Rvis:2:Tir:1:Emis:2:Keff6
-----C
OutsideCR13
60020-ETFE_klar_HIGHT#1.0.928.062.062.923.067.067.000.830.830.230.
1-Air300.0.954.
60031-f-e-d-Ssch-sp-cf0.3.324.413.402.424.231.233.100.193.738.230.
1-Air300.0.1.75.
60020-ETFE_klar_HIGHT#1.0.928.062.062.923.067.067.000.830.830.230.
InsideCR13
CR13
Environmental Conditions:4-CENCR13
CR13
Tout:.....:Tin:.....:WndSpd:.....:WndDir:.....:Solar:.....:Tsky:.....:EskyCR13
(C):.....:(C):.....:(m/s):.....:(W/m2):.....:(C)CR13
-----CR13
Uvalue:.....:0.020.025.5.50Windward:.....:0.00.01.00CR13
Solar:.....:30.025.02.75Windward:.....:500.030.01.00CR13
CR13
Optical Properties for Glazing System '180-f-e-d-Ssch-sp'CR13
CR13
Angle:.....:0.....:10.....:20.....:30.....:40.....:50.....:60.....:70.....:80.....:90HemisCR13
CR13
Tvis:0.3720.3740.3690.3620.3520.3300.2810.1900.0750.0000.304CR13
Rvis:0.2810.2760.2750.2780.2900.3140.3670.4840.7051.0000.345CR13
Rbvis:0.2840.2790.2770.2800.2920.3160.3690.4860.7051.0000.347CR13
CR13
Tsol:0.2890.2910.2870.2810.2740.2570.2210.1530.0640.0000.238CR13
Rsol:0.4420.4370.4360.4380.4470.4640.5020.5890.7571.0000.485CR13
Rbsol:0.4330.4290.4280.4300.4390.4570.4950.5830.7541.0000.478CR13
CR13
Abs1:0.0140.0150.0150.0150.0160.0170.0180.0190.0200.0000.017CR13
Abs2:0.2520.2550.2600.2620.2610.2580.2560.2360.1570.0000.248CR13
Abs3:0.0030.0030.0030.0030.0030.0030.0030.0020.0010.0000.003CR13
CR13
SHGCc:0.4340.4370.4360.4320.4240.4060.3690.2900.1570.0000.381CR13
CR13
```

Abbildung 48: Datensatz für ein luftgefülltes dreilagiges ETFE Kissen mit dem Aufbau „ETFE_klar“ – „Luft“ – „ETFE-Sch-sp“ – „Luft“ – „ETFE klar“, in Sonnenschutz Konfiguration, mit Beschichtung „Sonnenschutz Spezial“.

Die Berechnungen wurden nach ISO15099 mit Window v.7.7.16.0 des Lawrence Berkeley National Laboratory, bei CEN Umweltbedingungen bei einer Außentemperatur von $T_{out}=0^{\circ}\text{C}$ und Innentemperatur von $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$ durchgeführt. Die errechneten Werte für die verschiedenen Beschichtungen (Sonnenschutz-Standard (SschStd), Sonnenschutz-Spezial (SschSp), Sonnenschutz mit doppelter Lackschicht (Sschx2L) und Wärmeschutz (Wsch)) wurden den Werten für Kissenkonfigurationen aus reinen transparenten ETFE Folienlagen gegenübergestellt.

Im Rahmen der Untersuchungen hat sich zunächst an Berechnungen zu unbeschichteten Kissenkonfigurationen herausgestellt, dass der Abstand der Folienlagen sowohl bei horizontaler als auch bei vertikaler Ausrichtung keinen nennenswerten Einfluss auf den Wärmedurchgang und Energiedurchlassgrad hat. Ebenso konnte gezeigt werden, dass die Einbaulage (horizontal bzw. vertikal) in der Berechnung des Wärmedurchgangs und des Energiedurchlassgrades keinen nennenswerten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Bei der Variation der Anzahl der Folienlagen hingegen hat sich, sowohl bei vertikaler als auch bei horizontaler Ausrichtung, ein deutlicher Einfluss auf den Wärmedurchgang sowie den Energiedurchlass gezeigt. Sowohl der Wärmedurchgang als auch der Energiedurchlass sinkt mit ansteigender Folienanzahl. Die Ergebnisse der entsprechenden Berechnungen zu den Eigenschaften (Wärmedurchgang (U-wert) bzw. Energiedurchlassgrad (g-wert)) unbeschichteter ETFE Kissen in horizontal Einbaulage als Beispiel graphisch Abbildung 49 und Abbildung 50 dargestellt.

Die Untersuchungen von Kissenkonfigurationen mit beschichteten Folien, in den verschiedenen Ausführungen (Sonnenschutz-Standard (SschStd), Sonnenschutz-Spezial (SschSp), Sonnenschutz mit doppelter Lackschicht (Sschx2L) und Wärmeschutz (Wsch)), weisen qualitativ die gleichen Zusammenhänge zwischen Wärmedurchgang, Energiedurchlass und Folienabstand bzw. Folienanzahl auf.

Die berechneten Werte für die Wärmedurchgang und Energiedurchlass (U- und g-Werte jeweils) sind in den Tabelle 17 und Tabelle 19 für eine Berechnung bis zu 4 Folienschichten und einem Schichtabstand von 30 cm für verschiedene Beschichtungen ersichtlich und erlauben einen Vergleich zum unbeschichteten ETFE. Quantitativ liegen die errechneten Werte für Wärmedurchgang und Energiedurchlass durchwegs erkennbar niedriger als bei Kissenkonfigurationen aus unbeschichteter ETFE-Folie. So liegt beispielsweise der Wärmedurchgangskoeffizient für dreilagige Kissen mit Beschichtung bei Werten zwischen 1,56 und 1,67 W/m²K und damit bei etwa 65% bzw. 70% des Wertes von unbeschichteten dreilagigen ETFE Kissen von etwa 2,318 W/m²K.

Der errechneten Werte lassen einerseits sowohl deutlich den oben ausformulierten Einfluss der Anzahl der Folienlagen auf den Wärmedurchgang erkennen als auch den Einfluss der Beschichtung. Der Einfluss der Beschichtung zeigt sich in einer deutlichen Verringerung des Wärmedurchgangs im Vergleich zu einer Kissenkonfiguration aus unbeschichteten ETFE-Folien. Die Position der Beschichtung wirkt sich in der Berechnung ebenfalls auf den Wärmedurchgang aus (siehe Abbildung 51). Die Position der Beschichtung ist anhand der in der Legende aufgeführten Markierungen identifiziert. Die Bezeichnung folgt der üblichen Konvention der aufsteigenden Nummerierung der Oberflächen von außen nach innen.

Der errechneten Werte für den Energiedurchlass zeigen weiterhin einen moderaten Einfluss der Anzahl der Folienlagen auf den Energiedurchlass und einen nennenswerten Einfluss durch die Beschichtung im Vergleich zu einer Kissenkonfiguration aus unbeschichteten ETFE-Folien (siehe Abbildung 52). Der Einfluss der Position der Beschichtung auf den Energiedurchlass weist eine hohe Streuung im Bereich von etwa 10% auf.

Aus den Berechnungen geht hervor, dass die wirksamste Beschichtungslage für die Sonnenschutz-Beschichtungen auf der Innenseite der Oberfolie liegt. Der Grund dafür ist, dass sie hier den größten Einfluss auf den g-Wert hat und zudem im Kissen eingeschlossen ist.

Die effektivste Stelle (mit dem besten U-Wert) für die Wärmeschutz-Beschichtung befindet sich auf der mittleren Folie im Kissen.

Die Demonstrationskissen wurden dementsprechend zusammengebaut.

FKZ 03EN1032

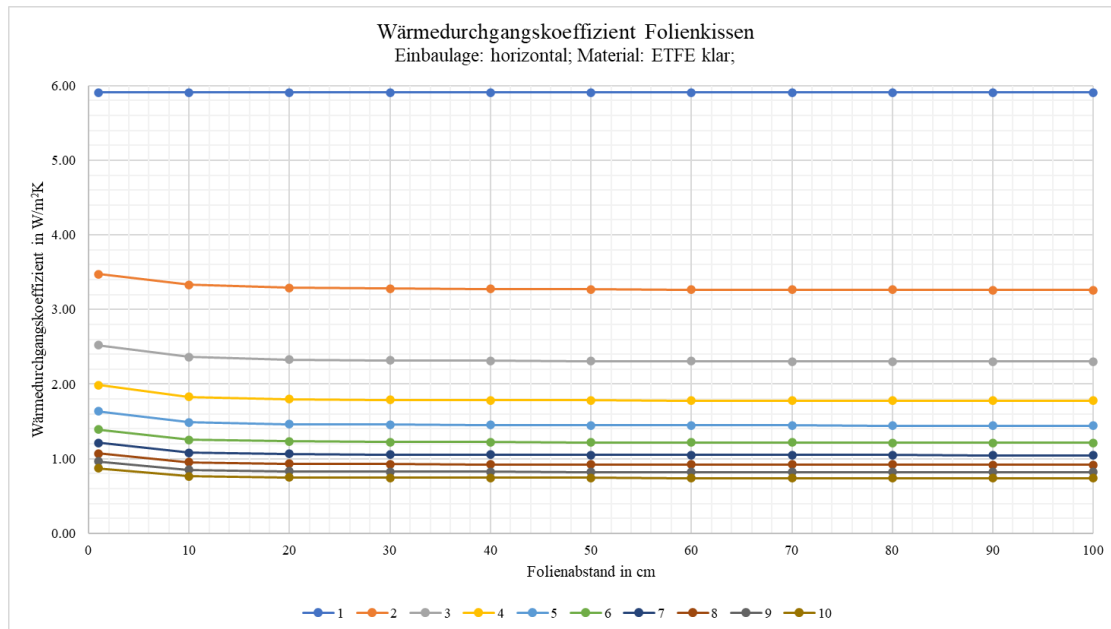


Abbildung 49: Abhängigkeit des Wärmedurchgangs von Einbaulage in horizontal Bauanlage und Anzahl der Folienlagen unbeschichteter ETFE-Kissen.

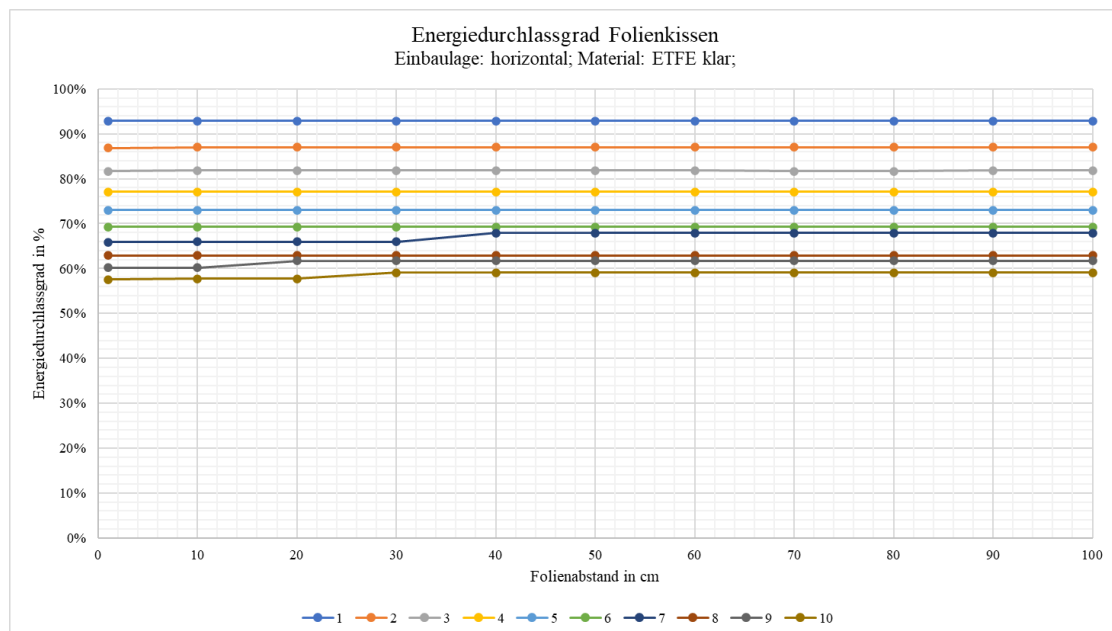


Abbildung 50: Abhängigkeit des Energiedurchlassgrades (g-Wert) von Einbaulage in horizontal Bauanlage und Anzahl der Folienlagen unbeschichteter ETFE-Kissen.

FKZ 03EN1032

Tabelle 17: Die berechneten Werte für die Wärmedurchgang (U-Werte) für ETFE-Kissen in horizontaler Anordnung mit bis zu 4 Folienschichten und einem Folienabstand von 30 cm für verschiedene Beschichtungen ermöglichen einen Vergleich mit dem unbeschichteten ETFE.

U-Wert in W/m^2K (horizontal Einbaulage)								
Folienlagen	Beschichtung:	Wärmeschutz		Folienabstand in cm:		30		
	Beschichtungslage							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,901	5,901						
2	2,186	3,094	3,057	2,216				
3	1,669	2,216	1,654	1,682	2,190	1,657		
4	1,366	1,727	1,343	1,375	1,349	1,343	1,710	1,351
U-Wert in W/m^2K (horizontal Einbaulage)								
Folienlagen	Beschichtung:	Sonnenschutz-spezial		Folienabstand in cm:		30		
	Beschichtungslage							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,901	5,901						
2	2,154	3,081	3,045	2,186				
3	1,649	2,209	1,633	1,662	2,183	1,637		
4	1,352	1,722	1,329	1,362	1,335	1,328	1,705	1,337
U-Wert in W/m^2K (horizontal Einbaulage)								
Folienlagen	Beschichtung:	Sonnenschutz-standard		Folienabstand in cm:		30		
	Beschichtungslage							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,901	5,901						
2	2,025	3,083	3,047	2,063				
3	1,564	2,210	1,560	1,593	2,184	1,553		
4	1,292	1,723	1,275	1,313	1,283	1,275	1,706	1,277
U-Wert in W/m^2K (horizontal Einbaulage)								
Folienlagen	Beschichtung:	Sonnenschutz-standard (dicke Lack)		Folienabstand in cm:		30		
	Beschichtungslage							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	5,901	5,901						
2	2,107	3,077	3,041	2,141				
3	1,618	2,207	1,606	1,636	2,181	1,606		
4	1,330	1,721	1,309	1,343	1,315	1,309	1,704	1,315

Folienlagen	U-Wert in W/m ² K
unbeschichtet	
ETFE	
1	5,910
2	3,280
3	2,318
4	1,790

FKZ 03EN1032

Tabelle 18: Die berechneten Werte für den Energiedurchlass (g-Werte) für ETFE-Kissen in horizontaler Anordnung mit bis zu 4 Folienschichten und einem Folie Abstand von 30 cm für verschiedene Beschichtungen ermöglichen einen Vergleich mit dem unbeschichteten ETFE.

g-Wert in % (horizontal Einbaulage)								
Folienlagen	Beschichtung:		Wärmeschutz		Folienabstand in cm:		30	
	Beschichtungslage							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,541	0,564						
2	0,508	0,525	0,539	0,589				
3	0,478	0,490	0,511	0,551	0,523	0,566		
4	0,452	0,461	0,481	0,516	0,500	0,532	0,507	0,543
g-Wert in % (horizontal Einbaulage)								
Folienlagen	Beschichtung:		Sönneschutz-spezial		Folienabstand in cm:		30	
	Beschichtungslage							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,389	0,423						
2	0,364	0,388	0,411	0,485				
3	0,342	0,359	0,391	0,449	0,411	0,474		
4	0,322	0,335	0,366	0,417	0,395	0,443	0,406	0,461
g-Wert in % (horizontal Einbaulage)								
Folienlagen	Beschichtung:		Sönneschutz-standard		Folienabstand in cm:		30	
	Beschichtungslage							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,319	0,339						
2	0,296	0,313	0,337	0,390				
3	0,279	0,291	0,316	0,363	0,338	0,381		
4	0,265	0,274	0,297	0,339	0,320	0,357	0,335	0,371
g-Wert in % (horizontal Einbaulage)								
Folienlagen	Beschichtung:		Sönneschutz-standard (dicke Lack)		Folienabstand in cm:		30	
	Beschichtungslage							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,312	0,332						
2	0,292	0,306	0,332	0,380				
3	0,274	0,284	0,314	0,354	0,333	0,373		
4	0,260	0,267	0,294	0,329	0,318	0,349	0,330	0,363

Folienlagen	
unbeschichtet	
ETFE	
g-Wert in %	
1	0,929
2	0,870
3	0,818
4	0,771

FKZ 03EN1032

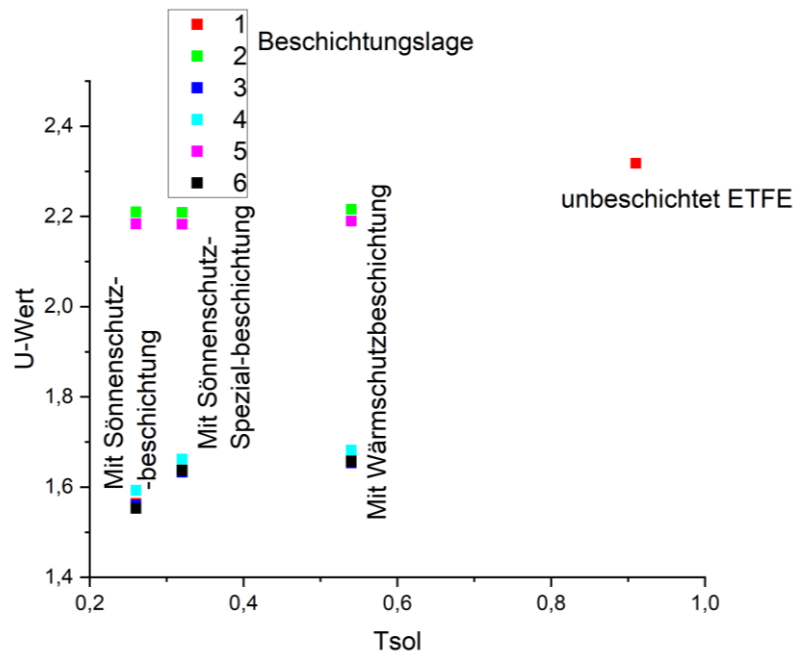


Abbildung 51: Grafische Darstellung der U-Werte als Funktion des solaren Transmissionsgrads (Tsol) für ETFE-Kissen in horizontaler Anordnung mit 3 Folienschichten und einem Schichtabstand von 30 cm für verschiedene Beschichtungen und ermöglicht einen Vergleich mit dem unbeschichteten ETFE. Die Punkte zeigen die Ergebnisse der verschiedenen Beschichtungslage.

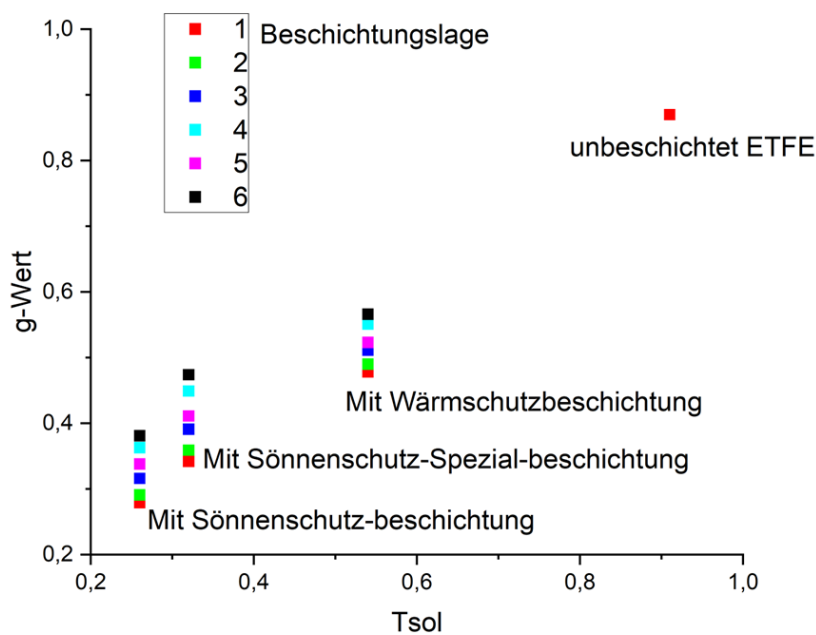


Abbildung 52: Grafische Darstellung der g-Werte als Funktion des solaren Transmissionsgrads (Tsol) für ETFE-Kissen in horizontaler Anordnung mit 3 Folienschichten und einem Schichtabstand von 30 cm für verschiedene Beschichtungen und ermöglicht einen Vergleich mit dem unbeschichteten ETFE. Die Punkte zeigen die Ergebnisse der verschiedenen Beschichtungslage.

Abschließend darf nicht unerwähnt bleiben, dass die vorgenommenen softwaregestützten Berechnungen auf Berechnungsroutinen beruhen, die den gängigen Berechnungsvorschriften für reguläre Mehrscheibenverglasungselemente folgen. Das bedeutet, dass diese Berechnungsvorschriften mitunter Annahmen und Voraussetzungen beinhalten, welche von pneumatisch gestützten Membranelementen nicht erfüllt werden. Dazu gehört einerseits die Annahme planparalleler Oberflächen im Lagenaufbau und damit die Annahme eines konstanten Abstands der Lagen, sowie andererseits die Vernachlässigung der Modellierung von konvektiven Effekten im „Scheibenzwischenraum“. Diese beiden Annahmen sind bei pneumatisch gestützten Folienkissen, zum einen auf Grund der Wölbung der Folienlagen und zum anderen auf Grund des vergleichsweise großen Abstandes zwischen den Folienlagen, nicht erfüllt. Die Aussagekraft der Ergebnisse und die Vergleichbarkeit mit errechneten Werten von konventioneller Mehrscheibenverglasungselementen ist daher beschränkt. Allerdings wurde durch die Ergebnisse von Untersuchungen des Fraunhofer Instituts für Bauphysik durch Kersken et al. (2019) nahegelegt, dass die Abweichungen der Berechnungen im Vergleich zu Messwerten im Fall von Membrankonstruktionen gering genug sind, sodass eine Berechnung nach den gängigen Berechnungsvorschriften vertretbar erscheint, zumal alternative, etablierte und besser geeignete Rechenvorschriften fehlen. Die hier errechneten Werte sind daher nur bedingt als vergleichbare, belastbare Quantifizierung zu interpretieren.

AP 4.2 Entwicklung des doppelten Low-e Beschichtungssystems

Um eine noch höhere Selektivität der Sonnenschutzschichten zu erzielen, wurden Doppelsilberschichten untersucht. Diese führen zu einem schmaleren Transmissionsspektralbereich und haben damit eine hohe visuelle Transmission bei einer niedrigen solaren Transmission zur Folge.

Die Ziele waren dann

- eine hohe Selektivität T_{vis}/T_{sol}
- ein möglichst dünnes Schichtsystem (um die Sputterabscheidung in der Produktionslinie zu erleichtern); *farbneutralerer Low-E-Doppelschichten*
- *einen niedrigen sichtbaren Reflexionsgrad*

Nach mehrfacher Simulation mit dem Programm RAT des Fraunhofer ISE und der Optimierung und Charakterisierung der hergestellten Schichten wurden die gewünschten Parameter erreicht und zwei Beschichtungen für die ETFE-Beschichtung ausgewählt.

Die erste Beschichtung hat einen T_{sol} -Wert von 40 %, aber eine hohe Transmission im sichtbaren Bereich, eine ausgezeichnete Farbe und einen niedrigen Reflexionsgrad von 5 % im sichtbaren Bereich.

Die zweite Beschichtung hat einen T_{sol} -Wert von 20 % und eine hohe Selektivität, was zu einem Transmissionsgrad im Sichtbaren von 48 % führt. Der Farbeindruck in Transmission war gut, der Reflexionsgrad im Sichtbaren war mit 20 % etwas höher.

Beide Schichtsysteme sind von den spektralen Eigenschaften her vielversprechend. Beide enthalten eine mittlere Barrierschicht von >70 nm.

Die Doppel-Low-E-Beschichtungen wurden auf ETFE hergestellt und wurden ebenfalls in der Klimakammer (10 Tagen: 85° C: 85 % relative Feuchtigkeit) getestet und an 2Construct für Schweißtests geschickt.

Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

FKZ 03EN1032

Tabelle 19: Spektrale Parameter von doppelten Low-E-Beschichtungen bevor und nach 10 Tagen in Klimakammer (85° C: 85 % relative Feuchtigkeit), die auf ETFE aufgebracht wurden. Die obere Reihe zeigt das Schichtsystem und die Farbverschiebung vor und nach der Klimakammer. Die zweite Reihe zeigt die optischen Parameter vor und nach der Klimakammer und die dritte Reihe zeigt die Transmissions- und Reflexionsspektren für lackierte und unlackierte Proben sowie vor und nach der Klimakammer.

B1	20
H1	5
Ag	12
H1	5
B1	70
H1	5
Ag	15
H1	5
B1	40

Bevor

M3: T, TSH, 9999, A4, ETFE, lac, ASC

Nach

B1	38
H1	5
Ag	20
H1	5
B1	73
H1	5
Ag	25
H1	5
B1	30

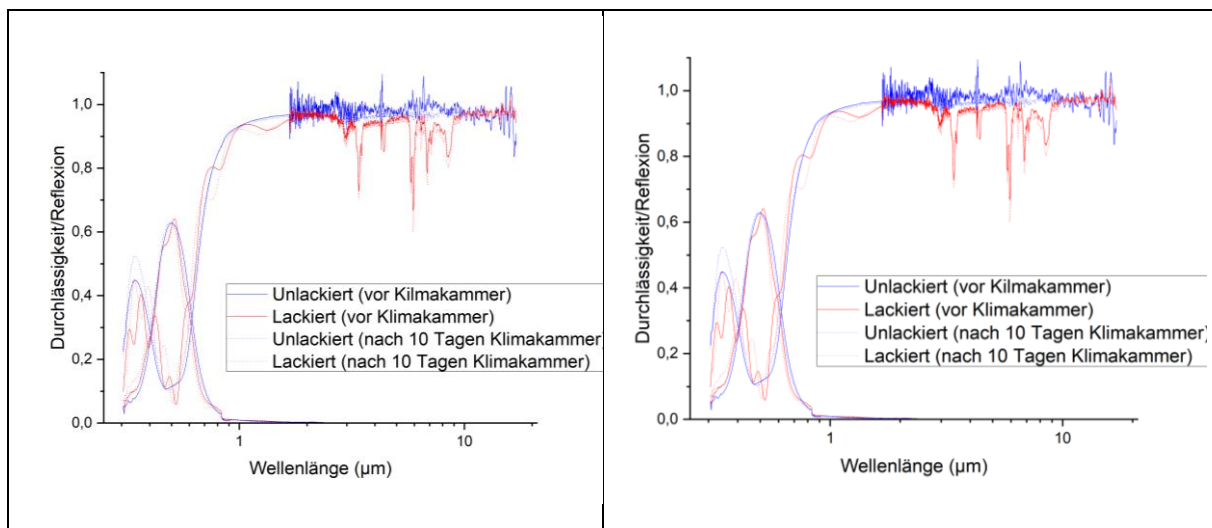
Bevor

M1: T, TSH, 10001, A4, ETFE, lac, ASC

Nach

ETFE (mit Lack):		
	Bevor	Nach 10 Tagen Klimakammer
Tsol	0,35	0,34
Tvis	0,68	0,66
L *	86,15	85,09
a *	-9,50	-10,79
b *	7,48	7,89
Rsol	0,43	0,44
Rvis	0,11	0,11
L *	38,31	38,99
a *	25,07	28,00
b *	-9,96	-16,60
IR	0,06	0,06

ETFE (mit Lack):		
	Bevor	Nach 10 Tagen Klimakammer
Tsol	0,21	0,20
Tvis	0,50	0,47
L *	76,97	75,25
a *	-23,79	-24,81
b *	0,61	-4,24
Rsol	0,59	0,61
Rvis	0,19	0,22
L *	49,37	52,39
a *	27,69	30,31
b *	7,87	10,23
IR	0,04	0,03



Vom ISE wurden zwei Doppelsilberschichten mit Gesamtschichtdicken $DL-1 = 177 \text{ nm}$ und $DL-2 = 206 \text{ nm}$ für eine Aufskalierung bei ROWO vorgestellt. Diese Schichtstapel wurden bei ROWO in eigenen RAT-Simulationen abgebildet und die Auswirkungen geringer Schichtdickenänderungen bei den Einzelschichten im Gesamtstack untersucht. In den Simulationen können zwar in Transmission nahezu farbneutrale Schichtsysteme mit dicken Barrierschichten ($70 \text{ nm} = \text{Abstandsschicht}$) erzeugt werden, die aber schon bei geringen Schichtdickenabweichungen deutliche Farbänderungen nach sich ziehen würden. Im bisher eingesetzten Galileo Rollcoater kann die erforderliche Genauigkeit bei der Abscheidung der Einzelschichten für die Herstellung der Doppelsilberschichten auf den ETFE-Folienrollen von NOWOFOL, wie die bisherigen Beschichtungen gezeigt hatten, nicht umgesetzt werden.

Die Schichten mit der Sonnenschutz-Spezialbeschichtung.

Die Schichten mit der Spezialbeschichtung werden auf der Fraunhofer-Pilotanlage abgeschieden und ebenfalls in der Klimakammer (10 Tagen: 85°C : 85 % relative Feuchtigkeit) getestet.

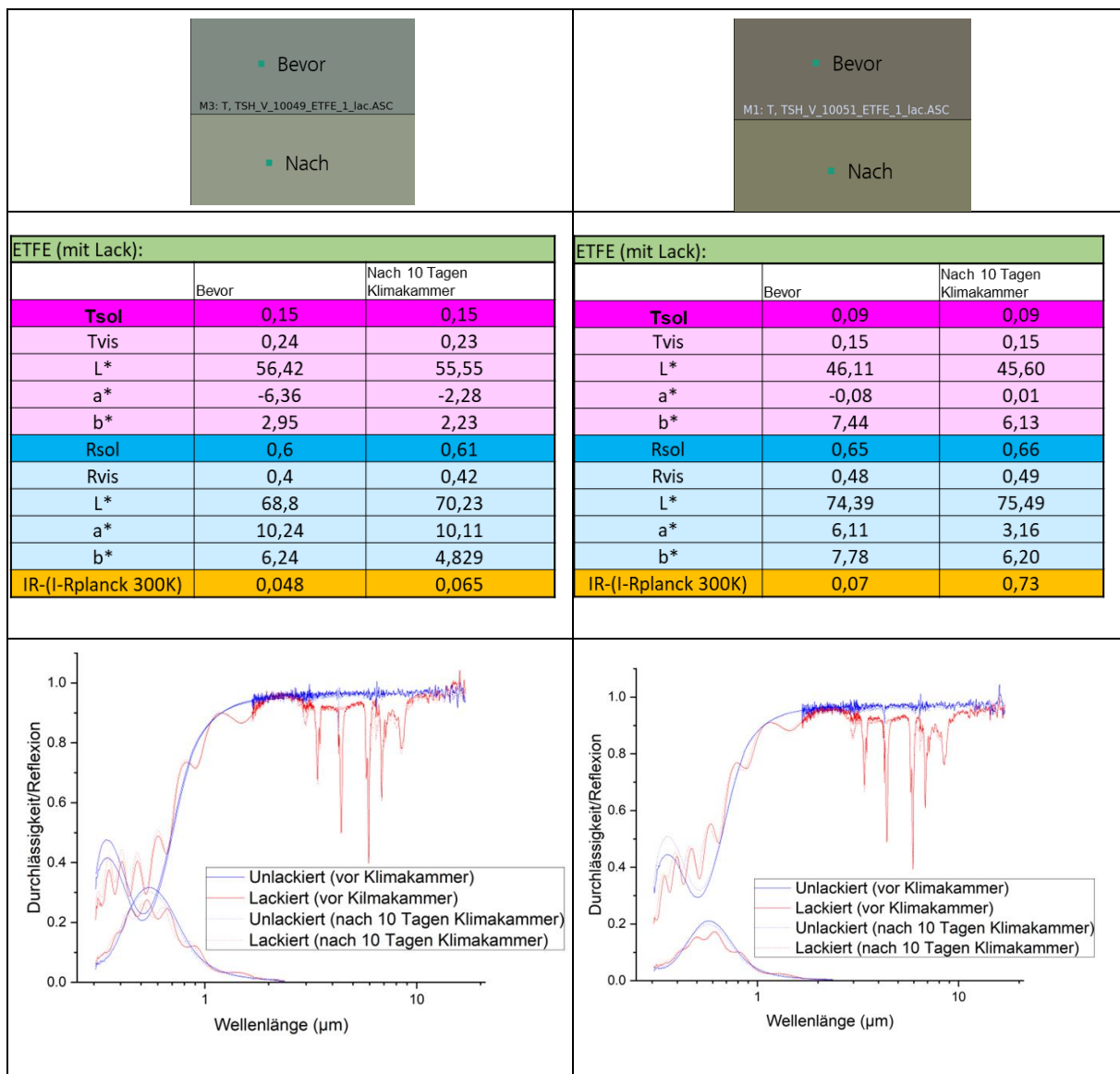
Ein interessantes Produkt sind Sonnenschutzprodukte mit niedrigem T_{vis} und möglichst geringem T_{sol} . Für die Herstellung von Sonnenschutzschichten mit niedrigem T_{vis} (15-25 %) wurden die dicken Sonnenschutz-Spezial-Schichtsysteme verwendet (da sich diese in den Prototyp-Kissen als so robust erwiesen hatten).

Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Tabelle zusammengefasst.

Die Beschichtungen waren in der Klimakammer robust, hatten eine Selektivität von mehr als 2 und eine niedrige T_{vis} wie vorgeschrieben.

FKZ 03EN1032

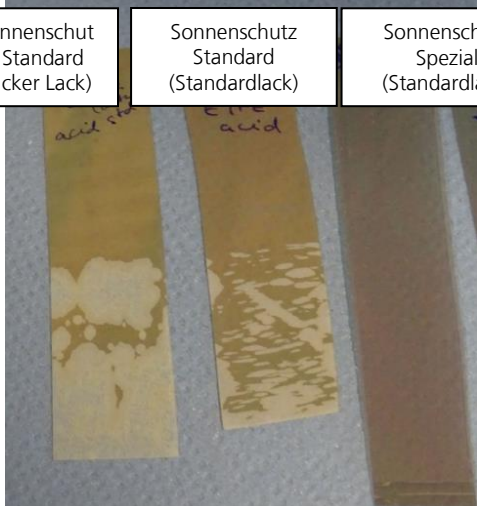
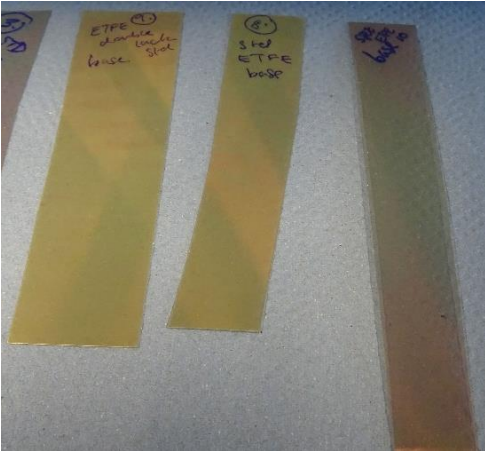
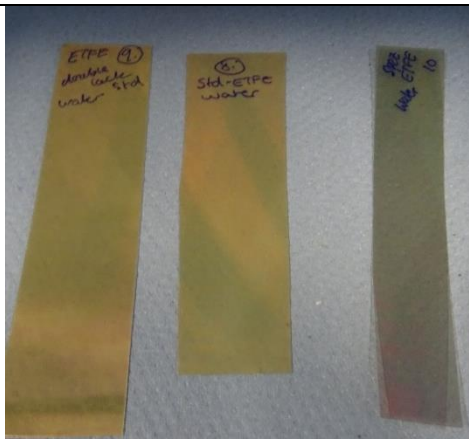
Tabelle 20: Spektrale Parameter von Sonnen-Schutz-Spezial-Beschichtungen bevor und nach 10 Tagen in Klimakammer (85° C: 85 % relative Feuchtigkeit), die auf ETFE aufgebracht wurden. Die obere Reihe zeigt die Farbverschiebung vor und nach der Klimakammer. Die zweite Reihe zeigt die optischen Parameter vor und nach der Klimakammer und die dritte Reihe zeigt die Transmissions- und Reflexionsspektren für lackierte und unlackierte Proben sowie vor und nach der Klimakammer. Die verschiedenen Farben und optischen Parameter werden durch eine Variation der Schichtdicken des Schichtsystems gesteuert. Die rechte Seite zeigt ein Schichtsystem, das aus dickeren Schichten aufgebaut ist.



Es wurde ein Vergleich der chemischen Stabilität von Sonnenschutz Standard, der einen Standardlack und einen dickeren Lack hat, mit Sonnenschutz Spezial durchgeführt. Die lackierten Prototyp-Proben wurden 10 Tage lang in Bäder gelegt, die aus (a.) HCl(aq) pH=2 (b.) NaOH(aq) PH=12 (c.) de-ionisiertem Wasser bestanden. Die Ergebnisse der Proben nach 10 Tagen in den Bädern sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

FKZ 03EN1032

Tabelle 21: Die folgende Tabelle zeigt die Fotos der lackierten Prototypen auf ETFE Substraten beschichtet mit Sonnenschutz Standard mit dicker Lack, Sonnenschutz Standard normal Lack und Sonnenschutz-Special nach 10 Tagen in den Bädern.

Test (10 Tagen)	Foto Sonnenschutz Variante Beschichtungen nach Test
HCl(aq) pH=2	Sonnenschutz z Standard (dicker Lack) Sonnenschutz Standard (Standardlack) Sonnenschutz Spezial (Standardlack) 
NaOH(aq) pH=12	
D.I Wasser	

- Das Sonnenschutz Spezial Schichtsystem ist im Säurebad deutlich stabiler als das Sonnenschutz Standardsystem. Dies ist auf dem Foto in Tabelle 21 deutlich zu sehen.
- Die Laugen- und Wasserbäder verursachten keine nennenswerten Schäden an den Beschichtungen.

Am Fraunhofer ISE wurden erfolgreich Doppel-Low-E-Folien für Beschichtungen entwickelt, die das gesetzte Kriterium erfüllen.

Es wurden auch dunklere Sonnenschutz Spezial mit niedrigem T_{sol} hergestellt und getestet. Der Sonnenschutz Spezial ist selbst in einem HCl-Bad von $PH=2$ für 10 Tage extrem stabil. Im Vergleich zum Sonnenschutz Standard ist er sehr haltbar. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen WP3 bei Frei Bewitterung der Prototypen, dass der Sonnenschutz Spezial eine hochbeständige Beschichtung ist.

AP 4.2 Entwicklung Sonnenschutzschichten (Sonnenschutz-Spezial)

Für die Herstellung von Sonnenschutzschichten kann die Transmissionsamplitude prinzipiell durch eine dickere Silberschicht reduziert werden, dies erhöht jedoch auch das Reflexionsvermögen. Die Reflexion kann entweder durch den Einsatz einer dunklere Funktionsschicht (wie mit Sonnenschutz Spezial durchgeführt) herabgesenkt werden (=Variante 1) oder alternativ durch eine absorbierende Haftschrift (=Variante 2). Erste orientierende Versuche dazu wurden im follow-e2 Projekt durchgeführt. Die Variante 1 wurde auf dem Galileo Rollcoater aufskaliert, Variante 2 auf dem neuen Sputterrollcoater. Da aktuell für die neue Anlage kein Rohrtarget für die Abscheidung der Spezial-Schicht zur Verfügung steht, wurde zur Realisierung der geringen solaren Transmission ($T_{sol}= 30\%$) eine geeignete absorbierende Haftschrift für das Schichtsystem ausgewählt und getestet.

AP 4.3.1 Galileo Rollcoater: Schwerpunkt: Sonnenschutz-Spezial

Bei ROWO wurden vergleichende Korrosionsbelastungen an den Spezial-Schichten als solche sowie an den Schichtsystemen und den lackierten Schichtsystemen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten (siehe nachfolgende Abbildung 53), dass die Spezialschicht selber gegenüber Feuchtebelastung schon deutlich beständiger ist im Vergleich zur Ag-Schicht, aber ohne zusätzlichen Schutz durch die Oxid- und Lackschichten nicht ausreichend lange korrosionsbeständig und vor allem nicht abriebbeständig ist. Entsprechend dem geänderten Arbeitsplan konzentrierte sich ROWO auf die Sonnenschutz-Spezial Schichtsysteme für die Optimierung der neuen PFA freien Lacksysteme von Dunmore.

FKZ 03EN1032

<i>Ag-Schicht (Dicke: 25 nm);</i>	<i>Ag-Schicht nach Kondensationsbelastung (Dauer: 500 h); Ag-Schicht stark degradiert; deutliche Zunahme im Flächenwiderstand R/sq</i>
<i>Spezial-Schicht (Dicke: 25 nm)</i>	<i>Spezial-Schicht nach Kondensationsbelastung (Dauer: 500 h); Schicht ist relativ gut erhalten; der Flächenwiderstand verändert sich kaum.</i>

Abbildung 53: Ag-Schicht (oben) und Spezial Schicht (unten); Vergleich der ungeschützten Metallschichten vor und nach Kondensationsbelastung im Exsikkator: Die Spezialschichten sind auch ohne Schutzschicht schon relativ beständig. Auf Schutzschichten kann allerdings im Hinblick auf eine sehr lange Lebensdauer (sehr hohe Beständigkeit sowie gute Abriebfestigkeit) nicht komplett verzichtet werden *Maßstab: 1cm = 50 µm.*

FKZ 03EN1032

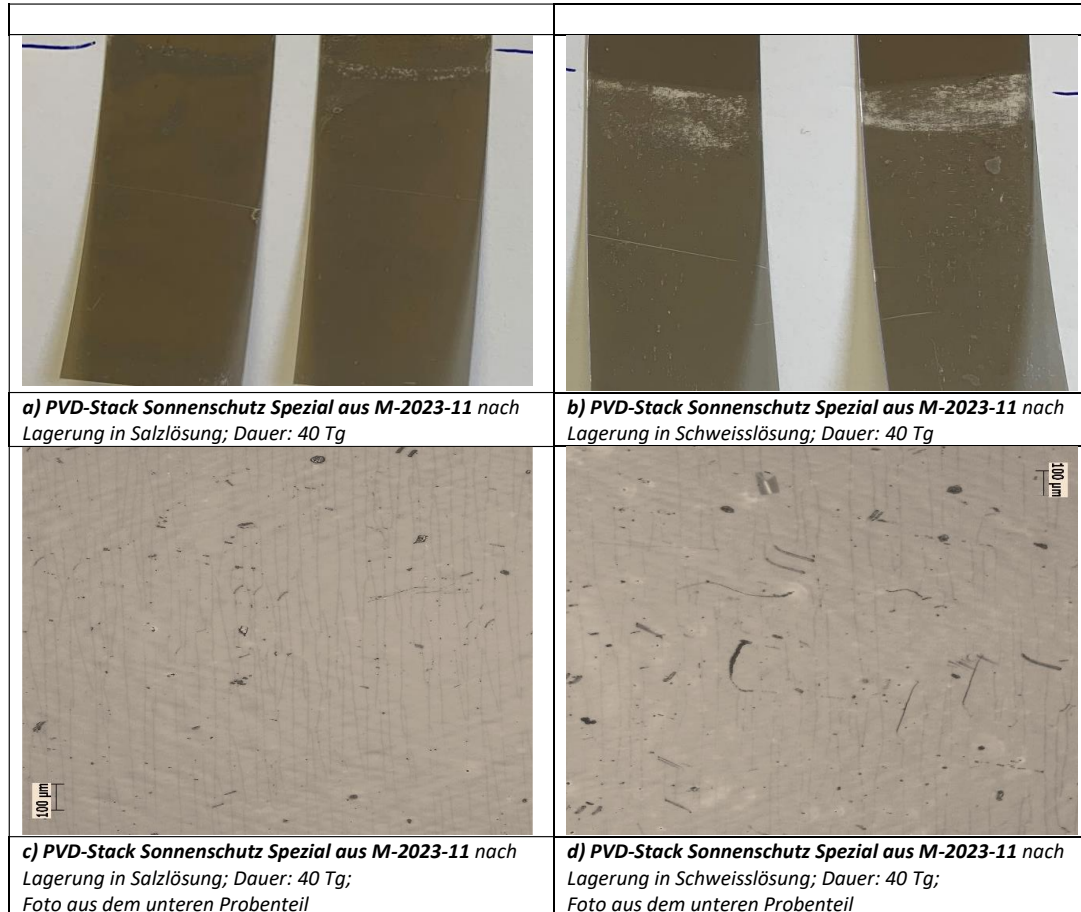


Abbildung 54: Sonnenschutz Spezial Schichten nach Korrosionsuntersuchungen: oben eingetauchte Folienstreifen, unten Lichtmikroskop Aufnahmen an den belasteten Stellen.

FKZ 03EN1032

Für einen direkten Vergleich der Korrosionseigenschaften von den neuen PFA freien Lackschichten mit den bisherigen PFA basierten stellte ROWO entsprechende Schichtsysteme aus AP 2.1 Sonnenschutz-Spezial Schichtsysteme mit niedriger solarer Transmission ($T_{sol} = 30\%$) auf ETFE Folienrollen her. Diese wurden wiederum in mehreren Beschichtungsläufen auf dem Galileo Rollcoater appliziert. Dazu wurden geeignete Referenzspektren zu definierten Maschinenparametern (Sputterleistungen, Schichtmaterial, Bahngeschwindigkeit, etc.) und den eingesetzten Substratfolien zusammengestellt, mittels denen im Allgemeinen eine Schichtkontrolle für jeden Beschichtungslauf auf dem Galileo-Rollcoater möglich wird (siehe nachfolgende Übersicht der entsprechenden Spektren). Im Bereich von Foliendefekten ist dieses allerdings nur eingeschränkt möglich.

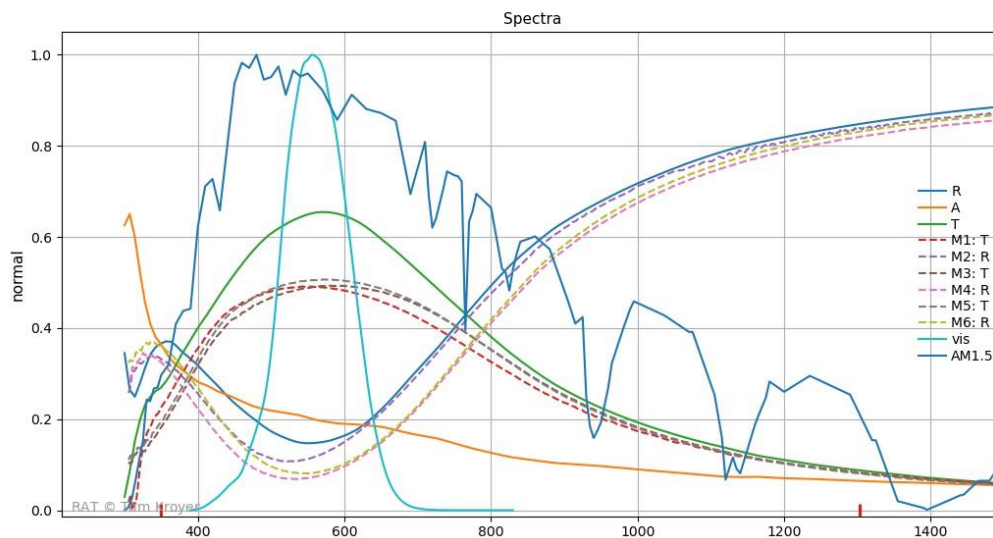


Abbildung 55: Optische Zielspektren normiert von Sonnenschutz Spezial- Stacks mit $T_{sol} = 0,30$ auf drei verschiedenen Folien – vom ISE besputtert - sowie simulierte Spektren (durchgezogene Linien) mit einem Ag-basierten Stack im NIR-Spektrum. Die ISE-Muster wurden auch Offline mit Shimadzu UV 2600 bei ROWO vermessen:

M1: Transmissionsspektrum der PET-Folie, M2: der ETFE_2; M3 der ETFE-ISE;
M4: Reflexionsspektrum der ETFE-ISE, M5: der PET-Folie, M6: der ETFE_2

FKZ 03EN1032

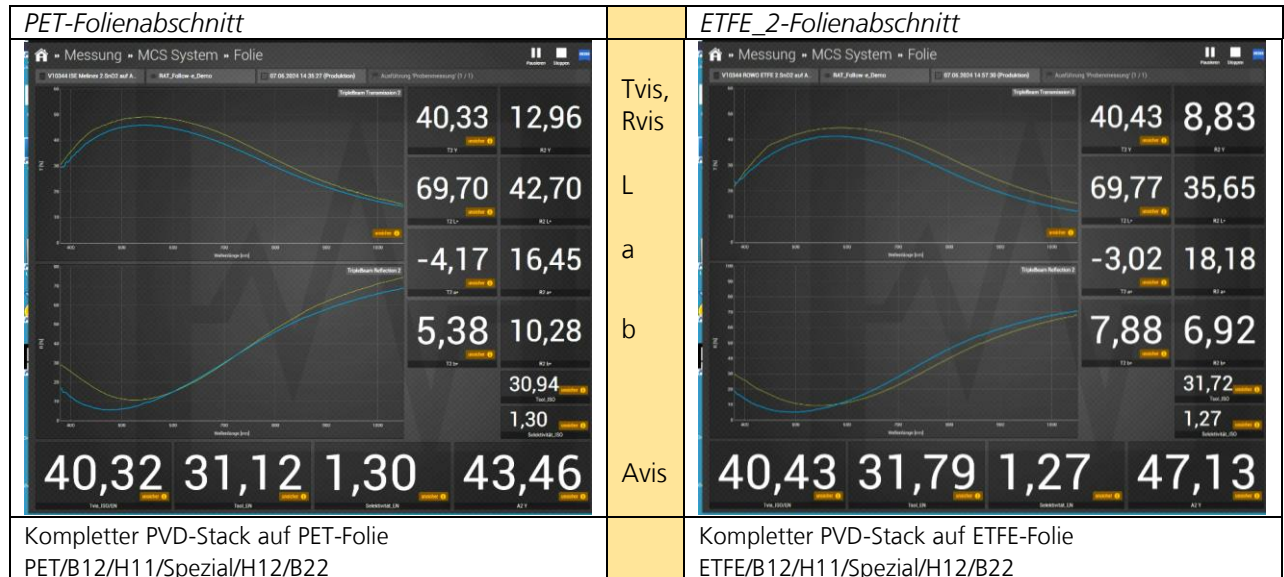


Abbildung 56: Inline-Spektren aus dem letzten Maschinenversuch auf dem Galileo RollcoaterM(G)_2024_06: Bilder aus dem Inline-Monitoring während der letzten Rollenbeschichtung aus Folienabschnitt: PET-Vorlauf / ETFE_2-Folienabschnitt nach dem letzten Beschichtungslauf bei dieser Versuchsrolle. Im linken Bild sind die optischen Daten der beschichteten PET-Folie und im rechten Bild die der beschichteten ETFE_2-Folie.

Tabelle 22: Ausgewertete normierte Spektren vom ISE (Referenz) und von ROWO M-2023-11 u. ROWO M-2024-06

Charge	Tvis	Tsol	Rvis	Rsol
V010344 (ISE)	0,483	0,32	0,086	0,39
ROWO M-2023-11_1	0,41	0,32	0,069	0,29
ROWO M-2024-06_1	0,427	0,341	0,076	0,34
ROWO M-2024-06_2	0,402	0,311	0,104	0,38

Bei Dunmore wurden neben den PVD-Schichten vom ISE auch Muster von ROWO aus den letzten beiden Maschinenversuchen für die Bewertung der neuen Korrosionsschutzlacke getestet. Diese hatten alle nach der Feuchtebelastung und UV-Tests bei Dunmore eine gute Beständigkeit gezeigt. Insbesondere waren die Änderungen bei den Farbwerten (b-Wert) deutlich geringer als noch zu Projektbeginn. Alle Schichten lagen innerhalb eines $\Delta E < 3$. ROWO führte neben den Korrosionsbelastungen wie bisher an den lackierten Mustern auch vergleichende Abriebbelastungen mit einem Taber Abraser durch, die allerdings zeigten, dass die PFA-basierten Lackschichten tendenziell doch noch abriebbeständiger als die neuen Lackssysteme sind.

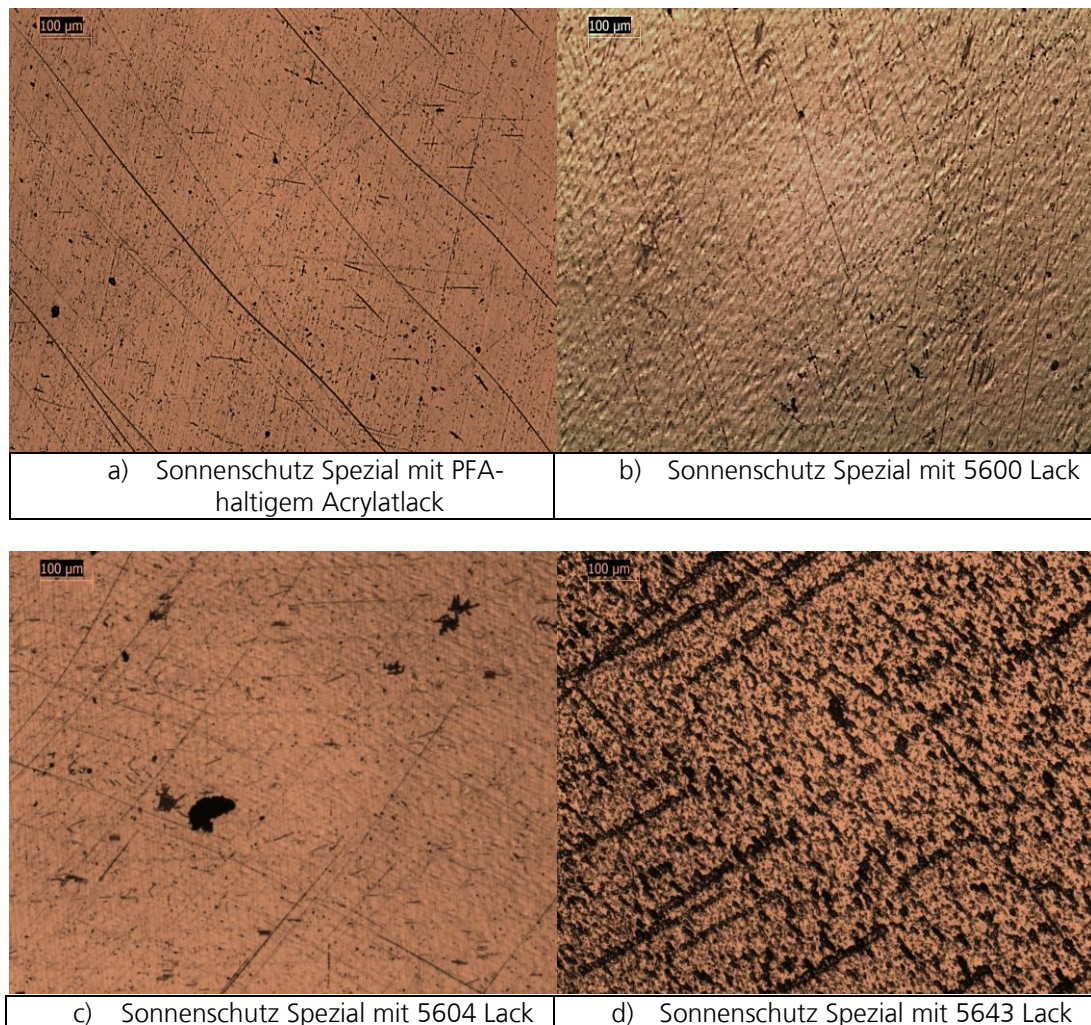


Abbildung 57: Ergebnis nach Abriebbelastungen mit einem Taber Abraser in Anlehnung an DIN 52347 (CS-5-Filz) an Proben mit verschiedenen Korrosionsschutzlacken. Anzahl der Umdrehungen: 1000 U/min. Am besten schneidet die PFA-haltige Lackoberfläche ab, gefolgt von 5600 und 5604. Relativ schlecht ist die 5643, da dieser weich ist.

Mit dem 2K-Acrylat-Hybridssystem (LA5600/2) und dem Polyester-Harz (LA5604/V1-V4) wurden Muster auf vom ISE bereitgestellten ETFE-Mustern mit Wärmeschutzschicht für weitere Belastungstests sowohl bei Dunmore als auch dem ISE hergestellt. Die Ergebnisse der Belastungstests (PC-Test, DH-Test, UVA-Test) bei Dunmore waren bei beiden Systemen ausreichend positiv bezüglich Lackhaftung und Korrosion. Je nach Test traten inakzeptable Farbtonverschiebungen mit einem ΔE -Wert von > 3 auf. Die besten Ergebnisse, auch hinsichtlich der Lösungsmittelbeständigkeit gegen Ethylacetat, zeigten diesbezüglich die Varianten LA

5600/2 und LA5604/2. Nach Festlegung auf das Acrylat-Hybrid-System in Absprache mit ROWO und dem ISE wurde abschließend der LA5643 mit 250 µm ETFE (Sonnenschutz Spezial) von ROWO mit einem Auftragsgewicht von 3 g/m² durchgeführt. Das Lacksystem entspricht weitestgehend der Variante LA5600/2-UV, modifiziert wurde die UV-Stabilisierung und aus Kostengründen der Vernetzer. Im Hinblick auf den anstehenden Lackierversuch bei Dunmore mit den neuen erfolgreich getesteten PFA-freien Lacken wurde auch auf Wunsch der Projektpartner auf dem Galileo Rollcoater ein Maschinenversuch mit einer längeren ETFE-Folienrolle durchgeführt. So bestünde die Option, nach erfolgreicher Lackierung Membranfolien-kissen herzustellen und als Demonstratoren vorzugsweise bei öffentlichen Gebäuden testen zu können. Eine Versuchsrolle bestehend aus Acrylat freier, nicht verblockender PET-Folie (= Vor- / Nachlaufolie) und der ETFE-Folie wurde vorbereitet. In diesem Maschinenversuch erfolgten nochmals Optimierungen der B1-Oxidschichten zur weiteren Reduzierung des Gelbwertes und der Sonnenschutz Spezialschichten mit Tsol 30% (25%). Die Bahnspannung wurde, soweit es die Folienqualität erlaubte, reduziert. Rissbildung in der PVD-Schicht konnte auch bei moderater Bahnspannung nicht vermieden werden. Risse lassen sich jedoch – wie mittlerweile viele Lackversuche im Projekt gezeigt haben - gut durch die Korrosionsschutzlacke von Dunmore abdecken. Nach der Sputterbeschichtung wurde die Rolle bei Dunmore für den geplanten Lackierversuch vorbereitet. Alle Bindestellen wurden gegen Stoß-an-Stoß Bindestellen ausgetauscht. In diese Rolle wurde auch von ROWO ein Rollenabschnitt aus dem Maschinenversuch Nov. 2023 eingefügt. Gleichzeitig wurden PVD-Musterabschnitte aus den Folienübergängen PET / ETFE für ROWO entnommen. Die Offline-Charakterisierung und Belastungstests wurden von ROWO an diesen Mustern durchgeführt. Der Lackierversuch wurde wie geplant bei Dunmore gestartet, musste jedoch wegen fehlender Restaushärtung des neuen Lackes und damit einhergehend zu geringer mechanischer Belastbarkeit gestoppt werden (siehe Bericht von Dunmore). Die Folienrolle wurde unversehrt an ROWO zurückgeliefert.

AP 4.3.2 Neuer Sputterrollcoater: Schwerpunkt: Prüfen der Sputterbeschichtung auf ETFE-Folienrolle im neuen Sputterrollcoater (Wickelbarkeit von ETFE-Folie und Herstellung der Sonnenschutzschichten in einem Beschichtungslauf)

Parallel zu den Arbeiten in AP 4.3.1 wurde nach der Arbeitsplanänderung auf dem neuen Sputterrollcoater untersucht, inwieweit die bisher realisierten Sonnenschutz- bzw. Wärmeschutzschichten auf kommerziell erhältlichen ETFE-Folienrollen von NOWOFOL in einem einzigen Beschichtungslauf -anstatt der bisher auf der Galileo notwendigen Mehrfachbeschichtungsläufe- herstellbar sind. Für die Beschichtung stehen 5 Kompartments mit Doppelrohrtargets und diese mit 5 Segmenten für eine homogene Gasverteilung zur Verfügung. Die Plasmageneratoren wurden für metallische Schichtabscheidung im DC und für oxidische im Bipolar Modus betrieben. Im neuen Sputterrollcoater erfolgt die optische Charakterisierung der gesputterten Schichten mit einem über die Folienbreite scannenden Spektrometer Messkopf mit Ulbrichkugel. Der Wellenlängenbereich ist mit 380-1600 nm wesentlich größer als auf der Galileo und ermöglicht damit auch Messungen im nahen NIR-Bereich. Die Flächenwiderstandsmessung erfolgt wie auf der Galileo mittels Wirbelstrommessung. Die Anforderungen im Hinblick auf die Sauberkeit der Substratfolien sind im neuen Sputtercoater um ein Vielfaches höher als im alten, da auf dieser Anlage auch sehr hochwertige partikelfreie Schichtsysteme für den Displaybereich oder auch Elektroden-schichten hergestellt werden. Während im alten Rollcoater standardmäßig Bindestellen mit überlappenden Folienflächen zum Einsatz kommen, dürfen im neuen Sputtercoater aufgrund der schmalen Spalte zwischen den Kompartments die Folienabschnitte nur mittels Stoß-an-Stoß Bindestellen verbunden werden. Eine kurze ETFE-Folienrolle (Dicke: 250 µm) in einer Breite von 1550 mm wurde im Reinraum über Stoß-an-Stoß Bindestellen mit Vor- und Nachlauffolien vorbereitet. Zunächst erfolgten mit dieser Versuchsrolle Wickelversuche, bevor mit der Beschichtung gestartet wurde.

Die Sputterleistungen der Rohrkathoden im Vergleich zu den Planartargets auf der Galileo wurden so eingestellt, dass mit einer ca. Faktor 5 geringeren Bahngeschwindigkeit die Zielschichtdicke(n) abgeschieden werden konnte(n). Die Anlagenparameter (Wickelparameter, Temperatur der Beschichtungswalze, Gasflüsse der Gassegmente, etc) wurden sukzessive angepasst. Als Barrierschicht wurde in diesem Sputterrollcoater eine neue Oxidschicht von einem substöchiometrisch eingestellten keramischen Rohrtarget eingefahren, die bereits am ISE in diesem Projekt mit Planartargets (siehe AP 5.1-Ansatz 2) umfangreich getestet wurde. Der Brechungsindex ist ähnlich zu dem der bisher eingesetzten Barrierschichten. Für die Herstellung von Sonnenschutzschichten kann - wie oben bereits in AP 4.2 erläutert wurde - die Transmissionsamplitude prinzipiell durch eine dickere Silberschicht reduziert werden, dies erhöht jedoch auch das Reflexionsvermögen. Alternativ kann man eine absorbierende Haftschrift (=Variante 2) einsetzen. Erste orientierende Versuche wurden dazu im follow-e2 Projekt vom ISE durchgeführt. Für die Realisierung der geringen solaren Transmission ($T_{AM1.5} = 30\%$) wurde eine geeignete absorbierende Haftschrift für das Schichtsystem ausgewählt und getestet. Als Testschichtsystem wurde der Schichtstapel Oxid/Haft 1/Ag/Haft2/Top-Oxid in der RAT-Simulation untersucht und die notwendigen Schichtdicken der Einzelschichten entsprechend den optischen Zielwerten von $T_{vis} = 40\%$ und $T_{AM1.5} = 30\%$ für das Schichtsystem eingestellt. Die Plasmavorbereitung und die Einzelschichten wurden auf einer PET-Folienrolle eingefahren. Das Schichtsystem wurde entsprechend der zuvor durchgeführten Simulationen iterativ realisiert (Abbildung 58).

Offline-Kontrollmessungen wurden jeweils durchgeführt und das Schichtsystem nachfolgend im Sputterrollcoater auf der Polyesterfolie iterativ optimiert. Das Feintuning bei den Schichtdickenanpassungen erfolgte im Folienvorlauf entsprechend der simulierten Zielkurve und nachfolgend die Abscheidung des Schichtstapels. Die Schichtstapel für die verschiedenen Funktionsschichten (Wärme- oder Sonnenschutz) können so entsprechend realisiert werden. Zwei Stackvarianten wurden eingestellt. Die Zielspektralkurven dazu wurden ähnlich wie im Galileo Rollcoater im Monitoring des Sputterrollcoaters hinterlegt. Nach den Optimierungen des Schichtstapels auf der Polyesterfolie folgten nochmals Wickelversuche mit einer ETFE-Folienrolle, bevor die eigentliche Versuchsrolle mit dem ETFE-Folienabschnitt auf die Anlage genommen wurde. Das Einsputtern der Schichten und die Herstellung des Schichtsystems funktionierte auf der glatten PET-Folie bis auf kleine Abweichungen fast wie erwartet.

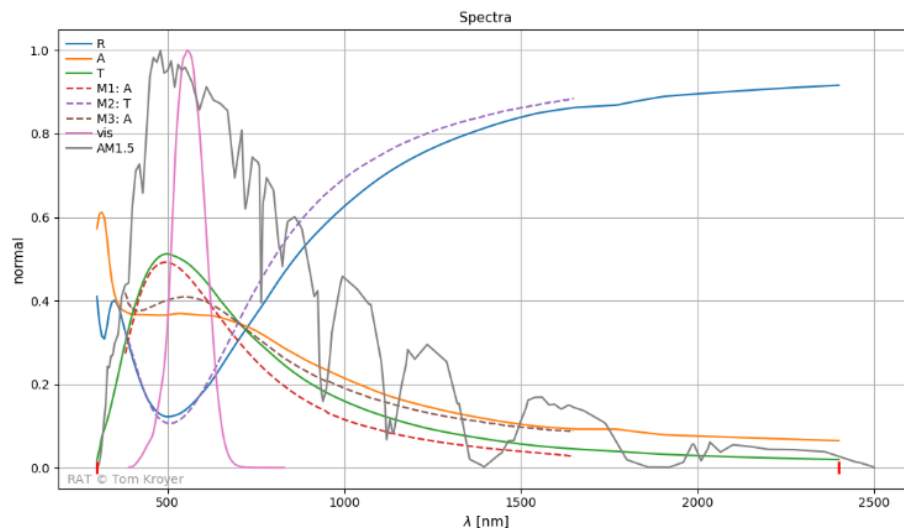


Abbildung 58: Die Sonnenschutzschicht auf PET-Folie simuliert und abgeschieden auf dem neuen Sputterrollcoater in einem Beschichtungslauf. Auf dieser PET-Folie konnte in der Kürze der Zeit schon eine gute Anpassung des hergestellten an das simulierte Schichtsystem erreicht werden.

Simulation (durchgezogene Linien):	Tvis: 0,4766; Tsol: 0,2982; Rvis: 0,1548; Rsol: 0,4133; Avis: 0,3666;
auf PET hergestellt (gestrichelte Linien)	Tvis: 0,4400; Tsol: 0,2834; Rvis: 0,1347; Rsol: 0,4149; Avis: 0,4253

FKZ 03EN1032

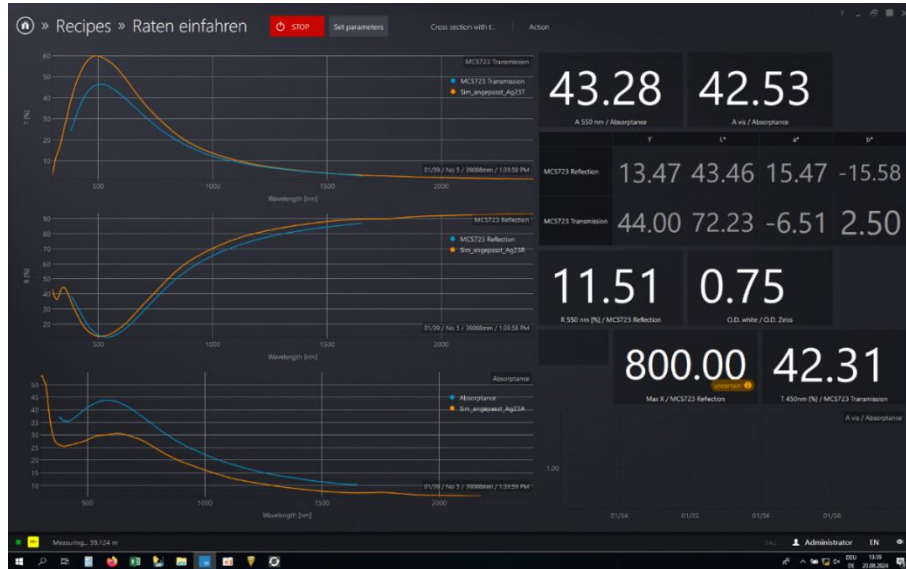


Abbildung 59: PET-Folie mit Sonnenschutzbeschichtung: Inline-Monitoring der Spektren zu Abbildung 58 aufgenommen mit Fotospektrometer. Die orangefarbenen Kurven stellen die simulierten Spektren dar, die blauen die der beschichteten Folie mit $T_{vis}=44,00\%$, $R_{vis}=13,47\%$ und $A_{vis}=42,53\%$. Die Reflexionskurven zeigen eine gute Übereinstimmung mit der simulierten Kurve. Zur Erzielung einer höheren Transmission könnte die Haftschrift minimal dünner eingestellt werden.

Bei der ETFE-Folie waren die Abweichungen von den Referenzkurven aber höher (s. **Abbildung 60**), da die ETFE-Folie wie bereits unter AP2.1 beschrieben auch trüb und texturiert sein kann.

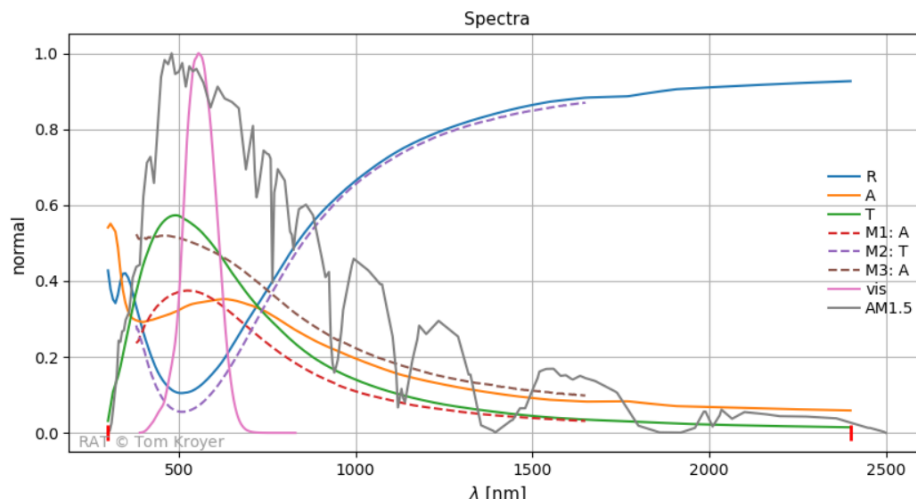


Abbildung 60: Die Sonnenschutzschicht auf ETFE-Folie simuliert und abgeschieden auf dem neuen Sputterrollcoater in einem Beschichtungslauf nach Offline Auswertung. Auf der ETFE-Folie wurden etwas dunklere Schichten als erwartet abgeschieden. Es bedürfte noch einer weiteren Reduzierung der absorbierenden Haftschrift:
Simulation (durchgezogene Linien): T_{vis} : 0,5241; T_{sol} : 0,3156; R_{vis} : 0,1355; R_{sol} : 0,4201; A_{vis} : 0,34;
auf ETFE-Folie hergestellt (gestrichelte Linien): T_{vis} : 0,3611; T_{sol} : 0,2374; R_{vis} : 0,0866 R_{sol} : 0,359; A_{vis} : 0,4913



Abbildung 61: ETFE-Folie mit Sonnenschutzbeschichtung: Inline-Monitoring der Spektren zu Abbildung 60 aufgenommen mit Fotospektrometer: Die orangefarbenen Kurven stellen die simulierten Spektren dar, die blauen die der beschichteten ETFE-Folie mit $T_{vis}=37,98\%$, $R_{vis}=10,34\%$, $A_{vis}=51,69\%$. Da die ETFE-Folie leicht trüb ist (siehe Abbildung unten), fällt die Transmission geringer aus als im Vergleich zur Simulation. Die visuelle Absorption liegt bei der besputterten ETFE-Folie mit 51,70% fast 10% höher als bei der PET-Folie.

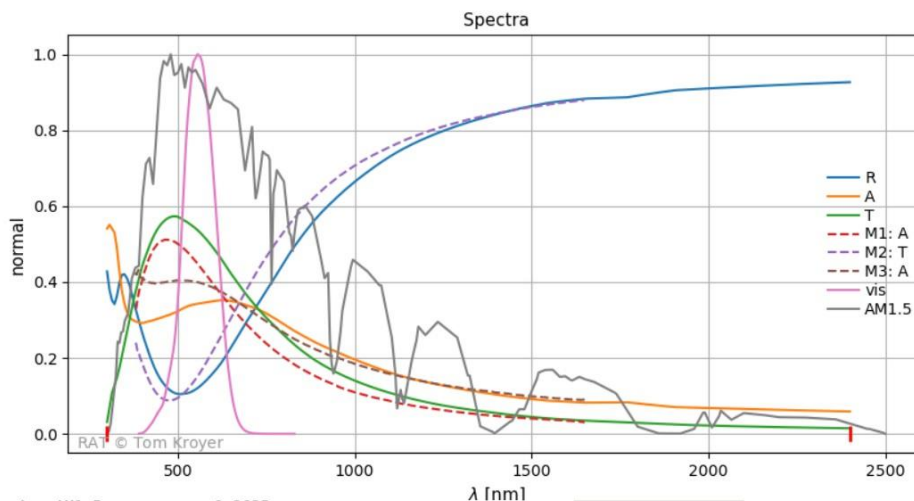


Abbildung 62: ETFE-Folie mit Sonnenschutzbeschichtung nach Reduzierung der absorbierenden Haftschrift: Inline-Spektren aufgenommen mit Fotospektrometer: Die durchgezogenen Kurven stellen die simulierten Spektren (T_{vis} , R_{vis} , A_{vis}) dar, die gestrichelten die der beschichteten ETFE-Folie. Nach Offline-Auswertung der gestrichelten Spektren: Simulation (durchgezogene Linien): T_{vis} : 0,5241; T_{sol} : 0,3156; R_{vis} : 0,1355; R_{sol} : 0,4201; A_{vis} : 0,34; Beschichtung (gestrichelte Linien): T_{vis} : 0,4391; T_{sol} : 0,2818; R_{vis} : 0,1663; R_{sol} : 0,4239; A_{vis} : 0,3942

Auf dem ETFE-Folienabschnitt mit guter Planlage waren vereinzelt flache kleine Wellen auf der Beschichtungs-walze infolge der thermischen Belastung erkennbar, aber in Größe und Intensität deutlich geringer ausgeprägt als im alten Rollcoater. Die PET- und ETFE-Folienrolle konnten komplett glatt aufgewickelt werden (**Abbildung 63**). Bei doppelter Bahngeschwindigkeit blieb die ETFE-Folie vollkommen glatt. Nur auf einem faltigen Folienabschnitt zum Rollenende traten stärkere Wellen und an ihnen Kratzer auf so dass die Bahngeschwindigkeit erhöht werden musste. Alternativ wurden die Walzenkühlung und Bahnspannung noch weiter angepasst.

Nach Fertigstellung der Versuchsrolle wurden Muster entnommen. Untersuchungen mit dem Lichtmikroskop bestätigten, dass die Defektdichte (Kratzer, Risse, Partikel) auf dieser Folienrolle nun deutlich geringer ausgefallen war als auf dem Galileo Rollcoater. Abweichungen bei den optischen Spektren traten folienbedingt - infolge der Trübung und Textur der ETFE-Folie - wie bisher insbesondere bei den Transmissionsspektren auf. Gitterschnitt-Tests zeigten keine Ablösung des Schichtsystems.

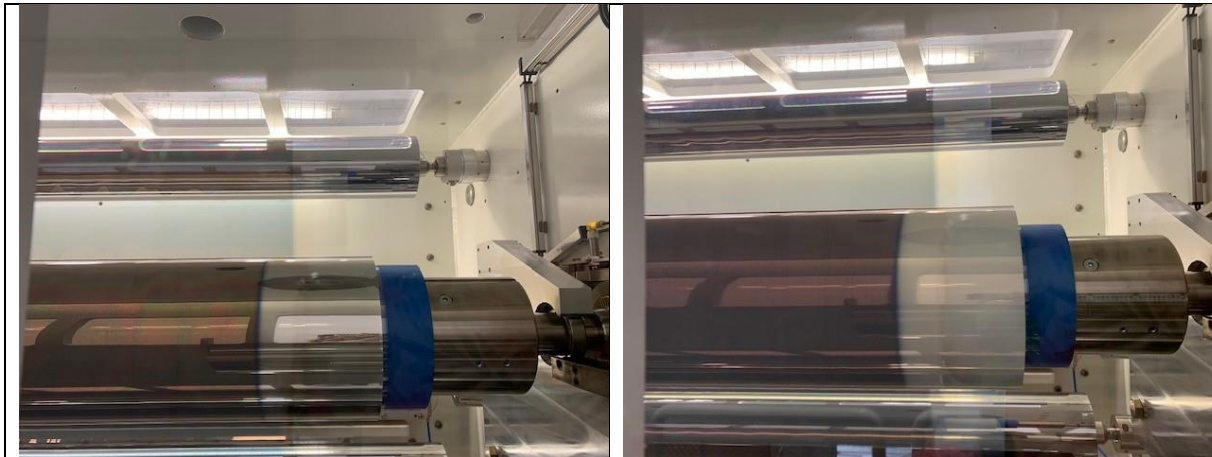


Abbildung 63: PET-Folienrolle (Foto links) und ETFE-Folienrolle (Foto rechts) am Aufwickler nach der Beschichtung mit Sonnenschutz-Stack in nur einem Beschichtungslauf. Die Folienrolle wird auf eine blaue Kunststoffhülle (-> partikelfreier als eine Papphülle) aufgewickelt.



Abbildung 64: Lichtmikroskopische Aufnahme an besputteten ETFE-Folienmustern, die in den zwei Produktionsrollcoater beschichtet wurden.

2.1.5 AP 5 Kontrolle und Auswahl der farbstabilen Beschichtungen und der optimalen Lackdicke

(ISE, ROWO, HFT, Dunmore)

AP5.1 wurde erfolgreich mit dem ursprünglichen Ziel, ein farbstabiles Beschichtungssystem zu entwickeln und zu testen, durchgeführt.

AP5.2 wurde angepasst, da ein ursprünglich geplantes Upgrade eines Fotospektrometers keine wesentliche Verbesserung in der optischen Inline Kontrolle gebracht hätte. Entsprechende Abklärungsarbeiten dazu wurden mit dem ISE durchgeführt. Stattdessen wurde zur Verbesserung der Inline Kontrolle der abgeschiedenen Schichten das Monitoring durch den direkten Vergleich von hinterlegten Referenzspektren zu den insitu gemessenen Spektren eingerichtet.

AP5.3 wurde um ein intensives Arbeitspaket zum geänderten Projektantrag 2023 erweitert. Das Ziel war dann die erneute Erforschung, Entwicklung und Prüfung (gemäß WP6) von PFA-freiem Lack. Die wichtigsten Ergebnisse werden hier von Dunmore zusammengefasst.

Ergebnis / Meilenstein Nr.	Erzieltes Ergebnis	Erreicht am	Kommentar zur Einhaltung des Zeitplans
M6: Farbstabiles Schichtsystem nach Beständigkeitstests	Ein farbstabiles Foliensystem wurde entwickelt und Beständigkeitstests wurden durchgeführt. Die Erhöhung des Sauerstoffgehalts in der Sperrschicht B1 während der Sputterabscheidung oder die Verwendung einer Sperrschicht B2	(M30)	Meilenstein pünktlich erreicht

	erhöhte die Farbstabilität nach der Klimakammer.		
M5 Aktualisiertes Inline-Monitoring-system bei ROWO eingerichtet	Inline Monitoring mittels Referenzspektrum für manuelles Steuerungssystem bei ROWO eingerichtet	(M10)	

AP 5.1 Simulation und Herstellung von Sputterbeschichtungen mit spezifizierten und stabilen optischen Eigenschaften

Unser Standard-Schichtsystem, das im Projekt follow-e 2 als B1-H1-Ag-H1-B1 definiert wurde, lässt sich gut auf ETFE abscheiden und hat sich als stabil erwiesen. Die Barrierschicht B1 ist unterstöchiometrisch und oxidiert bei Klimakammerbelastung weiter. Dies führt zu einer Farbdifferenz in Transmission und Reflexion der Beschichtung. Dieser Farbdifferenz ist messbar und lässt sich über die Parameter $L^*a^*b^*$ quantifizieren. Zur Quantifizierung der Farbdifferenz verwenden wir einen Leistungsindex, definiert als:

$$\text{Farbdifferenz} = \sqrt{(a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

Dabei sind a_1^* und b_1^* die Farbparameter vor der Klimakammerexposition und a_2^* und b_2^* die Farbparameter nach der Klimakammer.

In diesem Arbeitspaket liegt der Schwerpunkt auf dem Versuch, diese Farbdifferenz zu minimieren. Wir haben einen zweifachen Ansatz:

- 1.) Weitere Oxidation der Barrierschicht während der Abscheidung. Dies geschieht, indem wir mehr Sauerstoff in die Sputterkammer einbringen. Das Problem bei diesem Ansatz ist, dass zu viel Sauerstoff eine negative Auswirkung auf das Silber haben kann und zu weniger stabilen Schichten führt.
- 2.) Wechseln des Materialsystems, in dem Wissen, dass viele "Standard"-Low-e-Beschichtungen mit ETFE nicht kompatibel sind.

Ansatz 1: Erhöhung des Sauerstoffgehalts während der Abscheidung der Standardbarrierschichten

Zunächst wurde nur die B1- Barrierschicht (als Einzelschicht) untersucht und Schichten mit einer Reihe von Sauerstoffdurchflüssen von 85 bis 105 sccm hergestellt. Bei der B1- Barrierschicht ist die Farbdifferenz sowohl bei Hitze (150 °C) als auch bei feuchter Hitze (85 °C: 85 % relative Luftfeuchtigkeit) deutlich erkennbar, bei feuchter Hitze ist sie jedoch größer. Sie nimmt auch mit zunehmendem Sauerstoffdurchfluss ab. Dies ist in Abbildung 65 dargestellt.

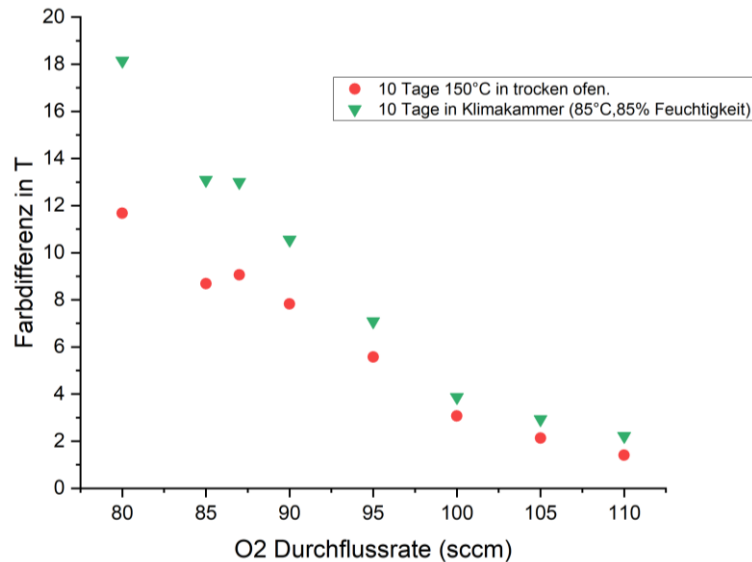


Abbildung 65: Farbdifferenz für B1 Einzelschichten in Abhängigkeit des Sauerstoffdurchfluss während der Abscheidung der Barrierschicht.

Es wurden zahlreiche Proben mit dem Schichtsystem B1-H1-Ag-H1-B1 hergestellt und gemessen.

Die erste Versuchsreihe konzentrierte sich auf die Variation des Sauerstoffdurchflusses, wobei die Auswirkungen sowohl auf "Low-E"-Beschichtungen ($T_{vis} = 75-80\%$) als auch auf "Sonnenschutz"-Beschichtungen ($T_{vis} = 45\%$) untersucht wurden. Es wurden lackierte und unlackierte Proben hergestellt und gemessen.

Bei der zweiten Charge wurden ebenfalls "Low-E"- und "Sonnenschutz"-Beschichtungen berücksichtigt, jedoch mit zwei festgelegten Sauerstoffdurchflüssen (90 sccm und 100 sccm). In diesem Versuch wurde die Dicke der H1-Haftschrift variiert. Die Hypothese war, dass die H1-Schicht während der Abscheidung der B1-Schicht als Sauerstoff-Barrierschicht fungiert, somit das Ag bei höheren Sauerstoffflüssen während der Abscheidung schützt.

Die folgenden Kommentare fassen die Schlussfolgerungen aus beiden Experimenten zusammen:

- 1.) Das auf dem 100 μm ETFE hergestellte Low-E-Foliensystem zeigte:
 - eine Abnahme der Farbdifferenz während der Klimakammer-Exposition bei Proben, die mit einem steigenden Sauerstofffluss während der Abscheidung der Barrierschicht hergestellt wurden (dies galt für lackierte und unlackierte Proben).
 - Bei unlackierten Proben wurde während der Klimakammer-Exposition ein Anstieg des Emissionsgrads (der auf eine Degradation des Silbers hinweist) bei Proben festgestellt, die während der Abscheidung der Barrierschicht mit einem zunehmenden Sauerstoffdurchfluss hergestellt wurden (dies galt für beide Chargen).
 - Bei lackierten Proben gab es bei allen Proben auch nach 30 Tagen in der Klimakammer nur eine geringe oder gar keine Verschiebung des Emissionsgrades.
 - Alle Foliensysteme (lackiert und unlackiert) zeigten in einem Klebebandtest nach der Klimakammer-Exposition eine gute Adhäsion

2.) Das auf 250 µm ETFE hergestellte Sonnenschutzfoliensystem zeigte

- Eine Abnahme der Farbverschiebung während der Klimakammer-Exposition bei Proben, die mit steigendem Sauerstofffluss während der Abscheidung der Barrierschicht hergestellt wurden. Diese erreichte ein Minimum der Farbverschiebung bei 100 sccm (dies galt sowohl für lackierte als auch für unlackierte Proben).
- Bei den unlackierten Proben blieb die Emissivität während der 10-tägigen Exposition in der Klimakammer konstant (was darauf hindeutet, dass keine Silberdegradation stattfand) und war nicht vom Sauerstofffluss abhängig. Allerdings wiesen alle unlackierten Proben in dieser Charge nach der Klimakammer eine schlechte Haftung auf (dies war bei beiden Chargen zu beobachten).
- Bei den lackierten Proben blieb die Emissivität während der 30-tägigen Exposition in der Klimakammer konstant (was darauf hindeutet, dass keine Silberdegradation stattfand), und zwar unabhängig vom Sauerstoffdurchfluss. Die Haftung aller lackierten Proben war nach der Klimakammer gut.

Bei den dickeren gesputterten Folien war die Haltbarkeit im unlackierten Zustand - d. h. bei den Sonnenschutzfolien im Vergleich zu den Low-E-Folien - besser. Dies könnte auf eine besser funktionierende Barrierschicht aufgrund der zusätzlichen Dicken zurückzuführen sein. Allerdings war die Haftung schlechter, was darauf zurückzuführen sein könnte, dass die dickeren Folien eine höhere Schichtspannung verursachen.

3.) Für alle Proben (sowohl Low-E als auch Sonnenschutz)

- Alle in der zweiten Charge hergestellten Muster waren viel "blauer" und weniger "gelb" in der Farbe.
- Alle in der zweiten Charge hergestellten Proben wiesen wesentlich geringere Farbdifferenzen auf als die der ersten Charge.

Zwischen den Chargen lag ein Zeitraum von 3 bis 4 Monaten (Schwankungen des Basisdrucks und der Luftfeuchtigkeit), und auch die Position des Targets wurde geändert. Dies bedeutete, dass bei gleichem Sauerstofffluss das B1 in der zweiten Charge tatsächlich stärker oxidiert war, so dass die Farbdifferenzen weniger ausgeprägt und die Schichtsysteme farbstabiler waren.

- Eine Erhöhung der Dicke der Adhäsionsschicht H1 hatte auch bei höheren Sauerstoffdurchflüssen der Barrierschicht keine konsistenten Auswirkungen auf die Beständigkeit der Schichtsysteme.

Die Schlussfolgerung ist, dass bei dem B1-H1-Ag-H1-B1-System ein ausreichend hoher Sauerstoff verwendet werden muss (100 sccm) und dann eine Farbdifferenz von weniger als 3 erreicht werden kann. Die unlackierten Proben sind dann in der Klimakammer mit dem höheren Sauerstoffdurchfluss weniger beständig, die lackierten Proben jedoch gut.

Farbschwankungen zwischen den Chargen weist auf Probleme bei der Reproduzierbarkeit der Farbe zwischen den Chargen hin.

Ansatz 2: Änderung des Materials der Barrierschicht

Aufgrund dieser Farbempfindlichkeit gegenüber dem Sauerstoffdurchfluss der Barrierschicht B1 wurde ein alternatives Material B2 für die Barrierschicht getestet.

Die Barrierschicht B2 wurde als Einzelschicht in der Klimakammer für verschiedene Proben mit unterschiedlichen Sauerstoffdurchflüssen getestet. Bei 95 sccm und mehr war die Farbe nach 10 Tagen in der Klimakammer sehr stabil und zeigte eine Farbverschiebung unter 1. Die Ergebnisse sind in Abbildung 66 zu sehen.

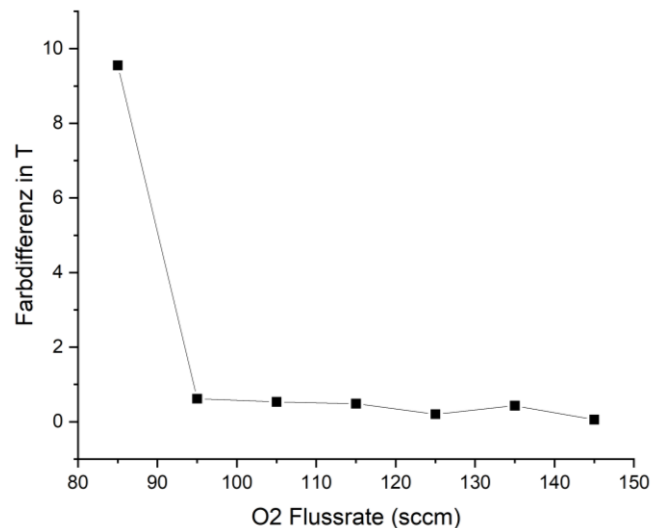


Abbildung 66: Farbdifferenz für B2 Einzelschichten in Abhängigkeit von der Sauerstoffdurchflussrate während der Abscheidung der Barrierschicht.

Aufgrund dieser interessanten Ergebnisse wurden Proben für Sonnenschutzbeschichtungen hergestellt. Die Transmissionsfarbe des Endprodukts war immer blau. Die Proben waren mit und ohne Lack bei Sauerstoffdurchflüssen unter 125 sccm während der Abscheidung der Barrierschicht 30 Tage lang in der Klimakammer beständig. Sie zeigten auch eine gute Haftung. Die Farbverschiebung bei den Proben mit einem Sauerstoffdurchsatz von über 105 sccm während der Barrierschichtabscheidung lag im Allgemeinen unter 2 (die Probe, die mit einem Sauerstoffdurchsatz von 115 sccm hergestellt wurde, zeigte eine höhere Verschiebung um 3,5). Das Ergebnis für diese Reihe von lackierten Proben ist in den Abbildung 67 grafisch dargestellt.

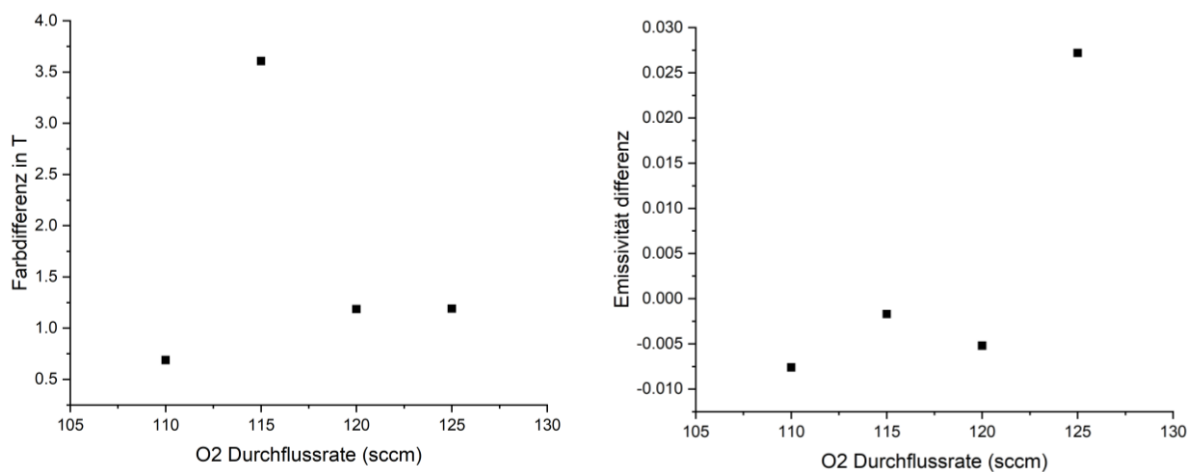


Abbildung 67: Farbdifferenz und Emissivität für B2-H1-Ag-H1-B2 lackiert Sonnenschutz Proben in Abhängigkeit von der Sauerstoffdurchflussrate während der Abscheidung der Barrierschicht.

AP 5.2 Einrichten eines aufgerüsteten Online-Monitorings an der Rolle-zu-Rolle-Sputteranlage

Der Arbeitsplan in AP 5.2 wurde angepasst, da ein ursprünglich geplantes Upgrade eines Fotospektrometers keine wesentliche Verbesserung in der optischen Inline Kontrolle gebracht hätte. Im Hinblick auf eine genauere Inline-Kontrolle für die optischen Messungen plante ROWO ursprünglich, ein Upgrade eines vorhandenen Spektrometers im NIR-Wellenlängenbereich von 1050 nm auf 2150 nm. Die damit verbundene Investition sowie der Umrüstaufwand an der Produktionsanlage wurde im ersten Projektjahr 2021 nochmals überprüft. Vergleichende Simulationen wurden sowohl am ISE als auch bei ROWO mit den Gewichtungen im Spektrometerbereich des vorhandenen Fotospektrometers T(390–1050 nm, und T(390–2150 nm) durchgeführt. Mit dem Infrarot-Spektrometer vom ISE gemessene Spektren zeigten jedoch nur eine geringe Abweichung, die eine größere Investition gekoppelt mit einem einhergehend zeitintensiven Umbau des Messsystems nicht gerechtfertigt hätte. Stattdessen wurde für die Steuerung der Abscheidungsprozesse und Einstellung der Einzelschichten das Inline Monitoring der optischen Spektren durch hinterlegte Referenzspektren als Kontrollelement erweitert, um die zuvor definierten Schichten im Zielkorridor herstellen zu können.

Dieses Ziel kann nur durch Hinterlegen von spezifizierten Referenzspektren zu den Inline-Spektrometer Messkurven gelingen. Diese Referenzspektren (T, R, A) stammen entweder von geeigneten Referenzmustern vom ISE, die allerdings im ersten Hj 2022 auch noch eine leichte Gelbfärbung zeigten, oder aus eigenen Simulationen mit dem RAT-Simulationsprogramm. Von den Referenzmustern wurden im Rollcoater mit den vorhandenen Spektrometern die Transmissions- und Reflexionsspektren der oxidischen Einzelschichten und Schichtsysteme aufgenommen und im Monitoring hinterlegt, um die Abweichungen effektiver erkennen und reduzieren zu können. In jedem Beschichtungslauf wurde für jeden Folienabschnitt (PET/ETFE) ein zuvor eingerichtetes Monitoringfenster geladen. Je dünner die Oxidschicht ist, desto anspruchsvoller ist aber auch eine definierte Schichtabscheidung bei "unruhigem Folienlauf" der bei den ETFE-Folien fast immer vorliegt. Im letzten Lauf sollten die simulierten Sonnen- und Wärmeschutz-Spektren der kompletten Stacks und die abgeschiedenen Schichten im Zielkorridor liegen. Größere Abweichungen treten allerdings auf, wenn die Folienoberfläche rauer ist oder der Folienabstand sich relativ zum Messsystem ändert, wie dieses in ausgeprägten Kolbenringen der Fall wäre. Die Auswertungen an auf glatten Polyesterfolien abgeschiedenen Schichten korrelieren mit den Simulationen recht gut, an rauen ETFE-Folien, insbesondere auch in Kolbenringen, treten jedoch Abweichungen bei R_{vis} um bis zu 10 % auf. Damit wird die Schichtdickenermittlung entsprechend ungenauer. Nach dem Einrichten des verbesserten Monitorings wurden zwei Maschinenversuche durchgeführt und daraus Muster für Lackoptimierungen an Dunmore zur Verfügung gestellt.

AP 5.3 Recherche und Auswahl von fluorfreien Lacken

(Dunmore)

Das bislang eingesetzte 2K-System (Fluor-Oligomere) und vergleichbare Systeme sind aus ökologischen Gründen massiv unter Druck geraten, des Weiteren sind Restriktionen durch die ECHA eingeleitet worden (biologisch faktisch nicht abbaubar). Der Hersteller des bisherigen Standard-Lacksystems hat deshalb dieses Produkt aus seinem Portfolio genommen.

Die Einstellung des bislang eingesetzten Lacksystems machte umfangreiche Recherchen zu neuen fluorfreien Lacksystemen und nachfolgende Beschichtungen im Labormaßstab sowie umfangreiche Beständigkeitstest als Vorprüfung notwendig.

Nach Genehmigung des Projektänderungsantrags wurden hinsichtlich der Materialeigenschaften (Witterungs- und Lösemittelbeständigkeit) zwei Polyesterharze, zwei Polycarbonat-basierende

FKZ 03EN1032

Polyurethandispersionen, ein Acrylat-basierendes Hybridpolymer sowie zwei Polyester- und zwei Polycarbonatdiole in das Screening aufgenommen.

Die Polyester- und Polycarbonatdiole schieden wegen mangelnder Prozessfähigkeit aus, diese hätten bei Temperaturen >50° C vorgelöst werden müssen, was bei Dunmore technisch nicht umsetzbar war.

Es wurden 11 fluorfreie 2K-Systeme mit einem Pressure-Cooker-Test (40 h/105 ° C) vorab geprüft, davon schieden 9 Varianten auf Grund starker Korrosion der Sputterschicht und/oder mangelnder Haftung des Schutzlackes während oder nach den Belastungstests bei Dunmore aus.

Tabelle 23 Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der ersten Reihe der Vorversuche nach 40 h Pressure-Cooker-Test bei 105 °C.

Laborversuch (Lack)	5593/1A	5593/2A	5593/2B	5593/2C	5593/3A	5593/3B	5593/3C	5598/1	5598/2	5598/3	5600/1
Basis	PET 1				PET 2			PUD 1		PUD 2	Acrylat-Hybrid
Vernetzer	IDPI	IDPI	TDI	HDI-Trimer	IDPI	TDI	HDI-Trimer	aliph.	polyfunkt.	aliph.	HDI-Trimer
Auftragsgewicht	2,0 g/m²	1,8 - 1,9 g/m²			1,8 - 1,9 g/m²			2,0 - 2,2 g/m²			2,0
Lackhaftung 4104	100%	100%			100%			100%			100%
Verblockungstest	i.O				i.O			i.O.			leicht
PCT	10 h	10 h	40 h		30h	40 h		10 h			40 h
visuell	trüb-matt	Glanzverlust	Glanzverlust		fleckig	Glanzverlust /Orangenhaut		fleckig, trüb	Orangenhaut	fleckig	keine
Korrosion	leicht	leicht	punktuell	stark	sehr stark	stark	punktuell -stark	stark	Haarrisse	punktuell	keine
Lackhaftung 4104	0%	70%	100%	70 - 80%	70%	80 - 95%	100%	vollständiger Lacktransfer			100%

Die Varianten LA5593/2B, LA5593/3C und LA5600/1 zeigten die besten Ergebnisse. Wegen mangelnder UV-Beständigkeit des aromatischen Vernetzers und der daraus resultierenden potenziellen Vergilbung und Versprödung der Lackschicht wurde die Variante LA5593/2B nicht weiterverfolgt.

In den folgenden Laboraufträgen LA5600/2 und LA5604/V1-V4 kamen verschiedene Oberflächenadditive und Vernetzer zum Einsatz. Mit dem 2K-Acrylat-Hybridsystem (LA5600/2) und dem Polyester-Harz (LA5604/V1-V4) wurden Muster auf vom ISE bereitgestellten ETFE-Mustern mit Wärmeschutzschicht für weitere Belastungstests sowohl bei Dunmore als auch dem ISE hergestellt. Die Ergebnisse der Belastungstests (PC-Test, DH-Test, UVA-Test) bei Dunmore waren bei beiden Systemen ausreichend positiv bezüglich Lackhaftung und Korrosion. Je nach Test traten inakzeptable Farbtonverschiebungen mit einem ΔE -Wert von >3 auf. Die besten Ergebnisse, auch hinsichtlich der Lösungsmittelbeständigkeit gegen Ethylacetat, zeigten diesbezüglich die Varianten LA 5600/2 und LA5604/2.

Tabelle 24: Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe und Bilder vor und nach 40 h Pressure-Cooker-Test bei 105 °C.

Tabelle Vorversuche alternative Lacke für Follow-E demo					
Lack	5600/2	5604/1	5604/2	5604/3	5604/4
Basis	Acrylat-Hybrid	PET 1		PET 2	
Vernetzer	HDI-Trimer	HDI	HDI-Trimer	HDI	HDI-Trimer
alle Varianten mit Oberflächenadditiv					
Auftragsgewicht	2,0 g/m²	1,8 - 1,9 g/m²		1,8 - 1,9 g/m²	
Lackhaftung 4104	100%	100%		100%	
Verblockungstest	i.O.	i.O.		i.O.	
LM-Beständigkeit (EtAc)	+++	+/-	++	---	---
PCT	40 h	40 h	40 h	40 h	40 h
visuell	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
Korrosion	leicht	minimal	leicht	leicht	leicht
Lackhaftung 4104	100%	100%	100%	100%	100%

Bilder DE vor PCT					
Bilder DE nach PCT					
	Haarrisse	Kringel	Haarrisse	Staubpartikel / Fusel	
Bilder DE nach PCT					
		Kristallisation in der Sputterschicht ?	Gelteilchen im Lack	Gelteilchen im Lack / Kringel	Kringel

In Abstimmung mit dem Fraunhofer ISE erfolgte für Folgeversuche die Festlegung auf die Varianten LA5600/2 und LA5604/2. Beide Varianten wurden zusätzlich UV-stabilisiert.

2.1.6 AP 6 Prüfung der neu entwickelten Beschichtungen

Bestimmung der Stabilität der in AP4 und AP5 entwickelten Beschichtungen durch eine realistische Testkampagne.

(2Construct, ISE)

Diesem Arbeitspaket sind keine Meilensteine zugeordnet.

Die folgenden, in den **Tabelle 25** und **Tabelle 26** dargestellten Anforderungsmatrizen wurden im vorangegangenen Projekt ermittelt und in den beiden vorangegangenen Arbeitspaketen verwendet, um die entwickelten neuen Beschichtungen zu testen.

Die Ergebnisse sind auch in den Arbeitspaketen 4 und 5 zu finden.

Tabelle 25: Anforderungsmatrix 1 für die Beständigkeit der Folien während der Verarbeitungskette ab Lieferung des beschichteten Rollen-Materials bis zur Inbetriebnahme des fertigen Gebäudes mit Identifizierung repräsentativer Probeschädigungen

Anforderung	Schweißnaht	Knick entstanden durch Zusammenlegen der Kissen, Transport und wieder Öffnen	Schlagen der Folien gegen Stahlträger während Installation	über Tisch ziehen der Folie bei Kissenfertigung
Probeschädigung	reale Schweißnaht	realer Knick	Messer quer über Folie gezogen	Taber Abraser/ Sandpapier

Tabelle 26: Anforderungsmatrix 2 für die Beständigkeit der Folien im Einsatz im Kissen mit Identifizierung geeigneter Belastungstests

Anforderung	feuchte Luft während Morgenstunden/ plötzlichem Temperaturabfall, hohe Temperatur durch Absorption Solarstrahlung	Kondensation während Morgenstunden/ plötzlichem Temperaturabfall	Dehnung der Kissen bei Installation, zusätzlich Wind	Spülen der Kissen mit ungereinigter Luft
Test	85°C/85% rel. Feuchte (10d, 30d)	Kondensation (10d, 30d)	Dehnung mit 85°C/85% rel. Feuchte (10d, 30d)	Nassbadtests in Säure, Base, Wasser und Ammoniumlösung

(Dunmore)

Es wurden ETFE-Muster in 250 μm mit unterschiedlichen Schichtsystemen (Sonnenschutz, Sonnenschutz spezial und Wärmeschutz) von ROWO und vom Fraunhofer ISE analog den Laboraufträgen LA5600/2 und LA 5604/2 im Labormaßstab mit einem Auftragsgewicht von 2,0 g/m^2 in den Laboraufträgen LA5600/2-WH (= Wiederholung) und LA5604/2-WH beschichtet. Die UV-stabilisierten Lackvarianten (LA5600/2-UV und LA 5604/2-UV) wurden mit einem höheren Auftragsgewicht von ca. 2,8-3,0 g/m^2 appliziert.

Muster aus den beschichteten Teilversuchen wurden bei DUNMORE in die Belastungstests (40 h PC-Test, 1000 h DH-Test und 1000 h UVA-Test) gegeben. Vor, während und nach den Tests wurde die Lackhaftung geprüft, der Farbort (CIELab/schwarzer Untergrund) gemessen und die Korrosion der Sputterschichten visuell beurteilt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle Beschichtungsvarianten die Belastungstest in Bezug auf Lackhaftung und Korrosion bei DUNMORE positiv bestanden haben.

Die große Differenz bei den Gelbwerten der ROWO- und ISE-Muster nach 1000 h UVA-Test lässt den Schluss zu, dass die Sputterschichten vom ISE eine wesentlich geringere UV-Beständigkeit aufweisen.

Eine mikroskopische Evaluierung der Sputter- und Lackschichten erfolgte vor, während und nach den Tests (PC- und teilweise DH-Test) sowie an gesputterten, nicht schutzlackierten ETFE-Folien.

Dabei zeigten insbesondere die Varianten mit dem höheren Auftragsgewicht (LA 5600/2-UV, LA5604/2-UV) bezüglich der Rissbildung eine signifikant bessere Schutzwirkung gegenüber den Mustern mit einem niedrigen Auftragsgewicht. Muster für Schweißversuche wurden den Projektpartnern 2Construct und Novum Membranes zur Verfügung gestellt.

Im Pressure-Cooker-Test (40 h/105 ° C/ 100 % RH) zeigte LA5600/2-WH auf den ISE-Mustern eine leichte Farbtonverschiebung ins Rötliche (a^* -Wert) und eine stärkere Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert) sowie eine leichte Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert), der ΔE -Wert mit ca. 1,8 war gut. Die UV-stabilisierte Variante LA5600/2-UV zeigte die gleiche Tendenz mit geringerer Ausprägung, so dass ein deutlich besserer ΔE -Wert von 1,1 erreicht wurde. Die Muster LA5600/2-WH von ROWO zeigten im PC-Test eine inhomogene Verschiebung im a^* -Wert und eine deutlich stärkere Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert), die Farbdichte nahm bei beiden Mustern ab. Die ΔE -Werte waren mit 2,3-2,6 noch akzeptabel.

Im DH-Test (1000 h/85 ° C/ 85 % RH) zeigten alle Varianten des LA5600/2-WH und LA5600/2-UV eine geringe, über die Testdauer relativ konstante, Farbtonverschiebung ins Rötliche (a^* -Wert) und eine leichte Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert) sowie bei den ROWO-Mustern eine starke Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert). Daraus resultierte für die ROWO-Muster mit ca. 2,8-3,2 ein doppelt so hoher ΔE -Wert wie bei

dem ISE-Muster. Die Variante LA5600/2-UV (ISE) zeigte eine konstante, nur sehr geringe Farbtonverschiebung ins Rötliche (a^* -Wert) und eine leichte Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert) sowie eine mittlere Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert). Der ΔE -Wert lag bei 1,8.

Im UVA-Test (1000 h) zeigten die Varianten vom ISE eine geringe Farbtonverschiebung ins Grünliche ($-a^*$ -Wert), aber eine starke Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert) und eine starke Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert). Der daraus resultierende ΔE -Wert lag bei 3,5 und war somit nicht mehr akzeptabel. Die UV-stabilisierte Variante (ISE) zeigte eine leichte Farbtonverschiebung ins Rötliche (a^* -Wert) und eine sehr starke Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert) sowie eine starke Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert). Der daraus resultierende ΔE -Wert lag bei 3,8 und war somit ebenfalls nicht mehr akzeptabel. Die Varianten von ROWO mit LA5600/2-WH lieferten sehr homogene Ergebnisse, eine über die Testdauer nur geringe Farbtonverschiebung ins Rötliche (a^* -Wert) und Gelbliche (b^* -Wert) sowie eine geringe Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert), woraus ΔE -Werte < 1 resultierten.

Im Pressure-Cooker-Test (40 h/105 ° C/ 100 % RH) zeigte LA5604/2-WH auf den ISE-Mustern eine leichte Farbtonverschiebung ins Grünliche ($-a^*$ -Wert) und eine stärkere Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert) sowie eine leichte Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert), der ΔE -Wert von ca. 1,9 war gut. Die UV-stabilisierte Variante LA5604/2-UV zeigte die gleiche Tendenz mit geringerer Ausprägung, so dass ein etwas besserer ΔE -Wert von ca. 1,7 erreicht wurde. Die Muster LA5604/2-WH von ROWO zeigten im PC-Test eine geringe Inhomogenität der Verschiebung im a^* -Wert und eine deutlich stärkere Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert), die Farbdichte nahm bei beiden Mustern deutlich ab. Der ΔE -Wert war mit ca. 2,6 noch akzeptabel. Im DH-Test (1000 h/85 ° C/ 85 % RH) zeigten alle Varianten des LA5600/2-WH und LA5600/2-UV eine geringe, über die Testdauer relativ konstante, Farbtonverschiebung ins Rötliche (a^* -Wert) und eine leichte Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert) sowie eine leichte Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert). Bei den ROWO-Mustern waren diese Delta-Werte signifikant höher. Daraus resultierte für die ISE-Muster ein ΔE -Wert von 1,7-1,8 und für die ROWO-Muster entsprechend höhere ΔE -Werte von 2,4-2,6.

Im UVA-Test (1000 h) zeigte LA5604/2-WH auf den ISE-Mustern eine leichte Farbtonverschiebung ins Rötliche (a^* -Wert) und ins Gelbliche (b^* -Wert) sowie eine starke Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert). Der daraus resultierende ΔE -Wert von 3,9 war nicht akzeptabel. Die UV-stabilisierte Variante (ISE) zeigte eine deutlich geringere Farbtonverschiebung ins Rötliche (a^* -Wert) und auch eine geringere Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert) sowie eine stärkere Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert). Der daraus resultierende ΔE -Wert lag bei 3,3 und war somit ebenfalls nicht mehr akzeptabel. Die Varianten von ROWO mit LA5604/2-WH lieferten sehr homogene Ergebnisse, eine anfängliche nur marginale Farbtonverschiebung ins Rötliche (a^* -Wert), die nach 500 h Testdauer leicht ins Grünliche ($-a^*$ -Wert) abdriftete, und eine leichte Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert) sowie eine marginale Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert), woraus ΔE -Werte von ca. 1,3 resultierten.

Nach Festlegung auf das Acrylat-Hybrid-System in Absprache mit ROWO und dem ISE wurde abschließend der LA5643 mit 250 μm ETFE (Sonnenschutz spezial) von ROWO mit einem Auftragsgewicht von 3 g/m^2 durchgeführt. Das Lacksystem entspricht weitestgehend der Variante LA5600/2-UV, modifiziert wurde die UV-Stabilisierung und aus Kostengründen der Vernetzer.

Im Pressure-Cooker-Test (40 h/105 ° C/ 100 % RH) zeigte LA5643 eine leichte Farbtonverschiebung ins Rötliche (a^* -Wert), wobei diese Farbtonverschiebung über die Testdauer abnahm. Die Verschiebung ins Gelbliche (b^* -Wert) zeigte über die Testdauer eine leichte Zunahme, ebenso die Abnahme der Farbdichte (L^* -Wert). Daraus resultierte ein ΔE -Wert von ca. 2,5.

Abschließend sollte im Rahmen des Maschinenversuchs MV2896 mit dem Lack aus LA5643 ausreichend Mustermaterial für nichtgeförderte Pilotprojekte hergestellt werden. Das Versuchsziel wurde nicht erreicht, ein erfolgreicher Transfer von Labor- auf Produktionsmaßstab war nicht möglich.

Die anfänglich eingesetzte Rasterwalze lieferte ein zu hohes Auftragsgewicht von 4,5-4,8 g/m², die Vorgabe lag bei 2,7-3,0 g/m². Eine ausreichende Trocknung bzw. Vernetzung des Lackes KTMV2896 fand nicht statt, Abdrücke von Falten an Klebestellen des Vorlaufs waren durch mehrere Folienlagen sichtbar.

Eine Reduzierung des Auftragsgewichtes auf ca. 2,0 g/m² durch Einsatz einer Rasterwalze mit geringerem Schöpfvolumen und geänderte Prozessparameter, wie z.B. Erhöhung der Trocknertemperaturen um 25 ° C auf 148 ° C und Reduzierung der Maschinengeschwindigkeit, brachten keinen Erfolg. Abschließend wurde ein neuer Ansatz mit geänderter Lösemittelzusammensetzung eingesetzt, auch hier war keine Verbesserung erkennbar.

Der Maschinenversuch wurde abgebrochen, die mit den beiden Produktionsansätzen im Labor durchgeführten Kontrolllackierungen zeigten diese Defekte nicht.

Die mangelhafte Trocknung und Vernetzung kann mehrere Ursachen haben, die im Nachhinein nicht oder nur mit enormem Zeit- und Geldaufwand untersucht oder nachgestellt werden können.

Mögliche und wahrscheinlichste Ursache war eine zu niedrige Substrattemperatur, dazu müsste dem MV identische Rollenware in einem weiteren Maschinenversuch beschichtet und dabei die erreichte Substrattemperatur bei unterschiedlichen Trocknertemperaturen bestimmt werden.

Resultierend aus diesen Ergebnissen könnte durch Modifikationen am Lacksystem, z.B. die Zugabe von geeigneten Katalysatoren, eine bessere, schnellere und blockfreie Trocknung erreicht werden.

In einer Versuchsreihe mit den entsprechenden Belastungstests müsste geprüft werden, ob solch ein Modifikation die Schutzeigenschaften des Lackes beeinträchtigt.

2.1.7 AP 7 Potentialabschätzung zur Anwendungsverbreiterung

(HFT)

Im Rahmen von AP7 wurden Untersuchungen zur Potentialabschätzung und Anwendungsverbreiterung der beschichteten ETFE-Folien unternommen. Hierzu werden vor allem Nichtwohngebäude und Anwendungen berücksichtigt, bei denen der Einsatz von ETFE-Folien bisher unüblich ist.

Diesem Arbeitspaket sind keine Meilensteine zugeordnet.

Für die Untersuchungen im Rahmen von AP7 wurde zunächst ein Überblick über vorhandene Projekte aus dem Membranbau erarbeitet, bei denen ETFE Folien zum Einsatz kommen. Zum anderen wurden vergleichbare Projekte mit transparenten Gebäudehüllenelementen auf mögliche Anwendungsfälle für ETFE Elemente sondiert. Aus der Vielzahl der möglichen Anwendungsfälle werden einige vorgestellt und auf Ihre Eignung für den Einsatz von beschichteten ETFE Folienelementen beurteilt. Bei den verschiedenen Anwendungsfällen werden unterschiedliche Anforderungen an die Gebäudehüllenelemente gestellt, die in der Beurteilung Berücksichtigung finden müssen.

Bei der Sichtung der verschiedenen bisher umgesetzten Projekte mit ETFE Gebäudehüllenelementen tritt zunächst die Vielfalt in den Anwendungsfällen und Umsetzungen zu Tage. Die Anwendungsfälle erstrecken sich von Überdachungen von Atrien bzw. Passagen über großflächige Gebäudeöffnungen bis zu vollständigen Gebäudehüllen bzw. Einhausungen. Die Umsetzung variiert dabei in dem eingesetzten Material von unbehandelt bzw. klarem ETFE über funktionale Teilbedruckung mit schaltbarer Verschattung, über Bedruckung als primär ästhetischem Element bis zur Kombination mit Beleuchtungselementen bzw. Elementen zur Energieerzeugung mittels Photovoltaik.

Im Folgenden werden einige Umsetzungen von ETFE Elementen in verschiedenen Formen von Gebäudehüllen vorgestellt und hinsichtlich der Anwendbarkeit von beschichteten Folien besprochen. Aus

den vielfältigen Anwendungsfällen wurden einige prominente Projekte ausgesucht und nach dem Schwerpunkt ihrer Funktion in drei Kategorien unterteilt. Die Darstellung erhebt dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern dient der Beleuchtung der Eignung hinsichtlich des Einsatzes von ETFE Folien mit low-e Beschichtung.

Die potenziellen Anwendungsfälle die betrachtet den Einsatz

- in Gewächshäusern im urbanen und ruralen Kontext
- als Vorhangfassade bzw. vollständige Einhausung
- in großflächigen Überdachungen von Biosphären bzw. Botanischen Gärten
- als allgemeine Überdachung von Außenbereichen, Atrien bzw. Passagen

Der Einsatz von ETFE Folien in landwirtschaftlichen Anwendungen, insbesondere als Hülle von Gewächshäusern, ist auf Grund der hohen Transparenz, der Widerstandsfähigkeit gegen UV-Strahlung und der damit verbundenen hohen Lebensdauer im Vergleich zu PE und anderen eingesetzten Polymeren, zunächst naheliegend. Der niedrige Preis von PE bzw. bisher eingesetzten Polymeren im Vergleich zu ETFE bedeutet allerdings einen erheblichen Wettbewerbsnachteil. Der Ausgleich dieses Wettbewerbsnachteils durch längere Standzeiten bzw. erhöhten Ertrag ist nicht offensichtlich. Die zusätzliche Beschichtung kann unter Umständen, über eine Reduktion der Betriebskosten zur Klimatisierung, einen weiteren Aspekt zum Ausgleich dieses Wettbewerbsnachteils beitragen. Bei einem Anwendungsfall in der Agrarkultur als Hülle von Gewächshäusern ist darauf zu achten, die spektralen Eigenschaften der Beschichtung auf die spektralen Eigenschaften der photosynthetisch aktiven Strahlung (engl.: photosynthetically active radiation, kurz PAR oder PhAR) der anzubauenden Pflanzen abzustimmen.

Die Absorptionsspektren verschiedener an den Photosyntheseprozessen beteiligter Farbstoffe und ein daraus abgeleitetes PAR-Spektrum sind in **Abbildung 68** dargestellt¹.

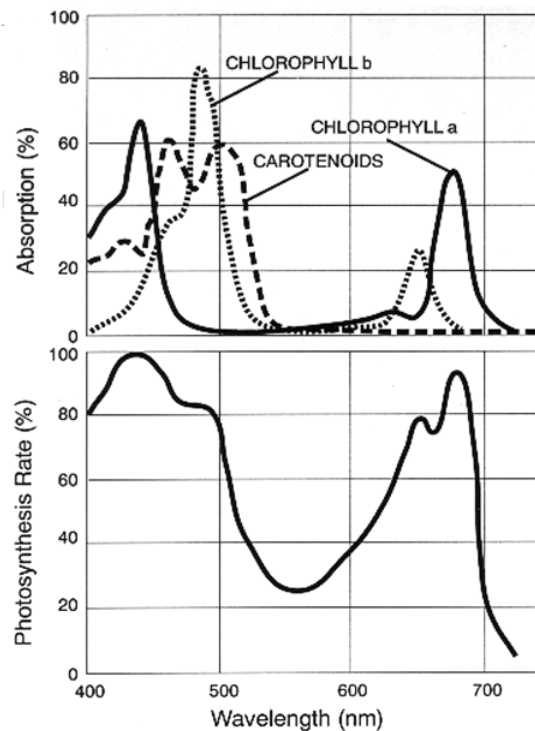


Abbildung 68: Absorptionsspektren der bei der Photosynthese aktiv beteiligten Pflanzenfarbstoffe Chlorophyll a und b sowie Karotinoide (oben). PAR-Spektrum der Wellenlängenabhängigkeit der Photosynthese (unten).

Eine vergleichbare Anwendung ergibt sich im Kontext, der in jüngerer Vergangenheit erstarkten Bewegung der urbanen Agrarkultur, in Verbindung mit der Aufstockung bzw. Erweiterung von Gebäuden um Einheiten zum lokalen verbrauchernahen Anbau von Nutzpflanzen. In diesem Zusammenhang kommt die Überlegenheit des Membranbaus hinsichtlich des Gewichts als Alternative zu Glas zum Tragen. Auch bietet die Langlebigkeit von ETFE Elementen im Vergleich zu anderen Folien Lösungen eine hohe Vereinbarkeit mit den üblichen Anforderungen an die Lebensdauer von Bauwerken.

Als beispielhaft umgesetzte Projekte dieses Konzeptes kann das Dachgewächshaus „Altmarktgarten Oberhausen“ verwirklicht vom Fraunhofer UMSICHT Institut als Kombination von Glas und ETFE genannt werden und die internationalen Prototypengebäude des EU Projektverbundes GROOF aufgeführt werden. Wobei der transparente Teil der Gebäudehülle beim Teilprojekt in Bürstadt von der EBF GmbH vollständig aus mehrlagigen ETFE Elementen in Kombination mit Photovoltaikelementen realisiert wurde.

Die Dachgewächshäuser der Projekte „Altmarktgarten Oberhausen“ und der Teilvorhaben aus dem EU Verbundprojekt GROOF sind in **Abbildung 69** und **Abbildung 70** illustriert.

¹ Bildnachweis: https://de.wikipedia.org/wiki/Photosynthetisch_aktive_Strahlung; Kurve nach John Whitmarsh, Govindjee: The photosynthetic process; aus „Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis“, Edited by GS Singhal, G Renger, SK Sopory, K-D Irrgang and Govindjee, Narosa Publishers/New Delhi; and Kluwer Academic/Dordrecht, Seiten 11–51. | G.S. Singhal: Concepts in Photobiology. Springer Science & Business Media, 2012, ISBN 978-94-011-4832-0



Abbildung 69: Altmarktgarten Oberhausen vom Fraunhofer UMSICHT. Dachgewächshaus mit Kombination aus Glas und ETFE. (<https://altmarktgarten-oberhausen.de/>)



Abbildung 70: Verschiedene Gebäudeprototypen von Dachgewächshäusern aus EU Verbundprojekt GROOF.
<https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/groof/>

Die Einsatzmöglichkeit von ETFE als Vorhangfassade bzw. Einhausung von Gebäuden ist eine Nischenanwendung, die wohl auf Einzelprojekte beschränkt bleibt. Der wärmetechnische Vorteil, der hier durch eine zusätzliche Beschichtung erreicht wird, steigert die Attraktivität der Umsetzung. Projekte mit ETFE Elementen als Vorhangfassaden wurden bereits in verschiedenen Vorhaben im Experimentmaßstab umgesetzt. Beispielfhaft kann hier der Beitrag zum Solar Decathlon China 2021 erwähnt werden. Auch hier wurde die transparente Außenhülle in Verbindung mit innenliegenden Begrünungselementen eingesetzt. Eine detaillierte Beschreibung ist auf der Projektseite unter <https://www.studiotjoa.com/y-house-double-skin-facade> aufgeführt. In einem solchen Einsatzfall, in Verbindung mit innenliegenden Begrünungselementen, die nicht in erster Linie der Erzeugung von Nutzpflanzen zur Nahrungsversorgung dienen, fällt der Einfluss der Beschichtung auf die Dämpfung der Einstrahlung im Bereich der PAR und eine damit verbundene Reduzierung des Ernteertrags auch entsprechend weniger ins Gewicht. Hier bilden die Vorteile in Bezug auf die wärmetechnischen Eigenschaften, und damit auf die Energiebilanz des Gebäudes, ein stärkeres Argument zur Implementierung.

Die komplette Einhausung von Gebäuden stellt eine Nischenanwendung dar, die noch keine weitverbreitete Anwendung findet und in der Umsetzung bisher mit Glaselementen realisiert wurde. Der Einsatz von mehrlagigen ETFE-Elementen mit low-e Beschichtung würde, entsprechend dem Gewichtsvorteil von Folie im Vergleich zu Glas, eine filigranere Tragwerksstruktur und individuellere Hüllformen ermöglichen, bei gleichzeitig vergleichbaren wärmetechnischen Eigenschaften. Als kritische Einflussgröße muss hier jedoch der Farbeindruck auf die Anforderungen des Anwendungsfalls berücksichtigt werden. Eine Illustration eines Anwendungsfalles der Einhausung eines Wohngebäudes mit Glaselementen ist in **Abbildung 71** gezeigt.

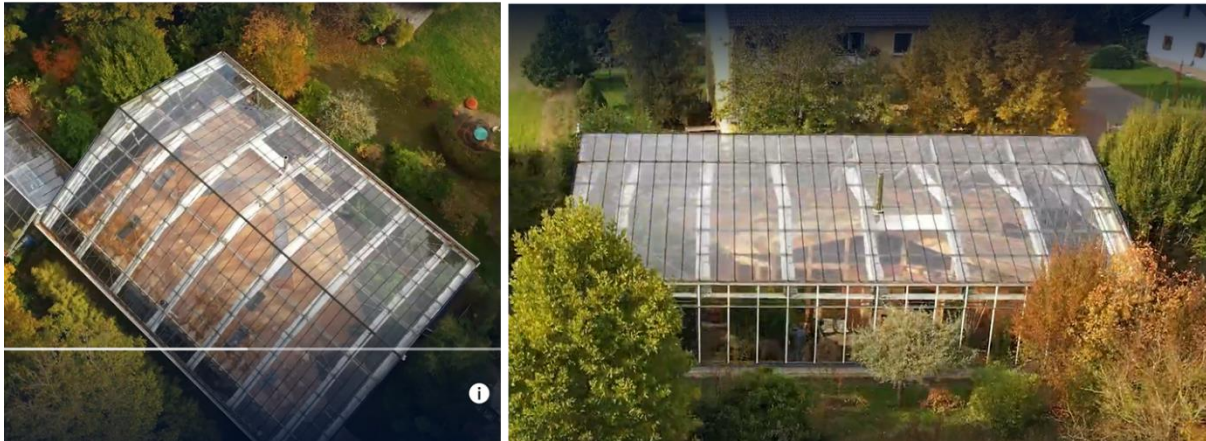


Abbildung 71: Einhausung eines Wohngebäudes in Lehmbauweise in zusätzlicher Glashülle. <https://www.swr.de/room-tour/juergen-wohnt-in-einem-gewaechshaus-100.html>

Ein anderer, aufgrund der Verbreitung und der verbauten Flächen, verhältnismäßig vielversprechender Anwendungsfall ist die „Überdachung“ von botanischen Gärten und Biosphären. Hier sind als bereits realisierte Projekte beispielsweise das Eden Projekt in Cornwall (UK), das Global Flora Conservatory als botanische Sammlung des Wellesley College in Massachusetts (USA), das Gewächshaus im botanischen Garten von Århus (DK) oder das LEAF des Assiniboine Park Conservatory in Winnipeg (CA). In all den genannten kommen ETFE Elemente in der Gebäudehülle zum Einsatz. Der Einsatz von beschichteter Folie kann bei vergleichbaren Anwendungen eine Erhöhung des Komforts für den Besucherverkehr bei gleichzeitiger Reduktion der Betriebskosten bewirken. Die erwähnten Projekte sind in **Abbildung 72** bis **Abbildung 75** gezeigt.



Abbildung 72: Kuppeln aus mehrlagigen ETFE Elementen des Projekt EDEN in Cornwall (UK). https://en.wikipedia.org/wiki/Eden_Project



Abbildung 73: Gewächshaus im botanischen Garten von Århus (DK) mit Gebäudehülle aus mehrlagigen ETFE Elementen.
<https://www.form-tl.de/project/gewaechshaus-arhus/>



Abbildung 74: Gebäudehülle aus ETFE Elementen des Global Flora Conservatory, botanische Sammlung des Wellesley College in Massachusetts (USA). <https://www.architektur-online.com/projekte/global-flora-conservatory>



Abbildung 75: Gebäudehülle aus mehrlagigen bedruckten und unbedruckten ETFE Elementen und Seiltragwerk des LEAF im Assiniboine Park Conservatory in Winnipeg (CA). <https://www.archpaper.com/2023/11/kpmb-the-leaf-feature-etfe-roof/>

Neben terrestrischen Anwendungen wurde der Einsatz von ETFE Folien auch für die Gestaltung von extraterrestrischen Einsatzbereichen in Betracht gezogen. So beinhaltete beispielsweise der erstplatzierte

Entwurf im Rahmen des NASA's Mars Habitat Wettbewerbs Elemente aus ETFE als Fensterelemente und Druck sowie Temperatur regulierbare Hülle (<https://www.archdaily.com/774654/clouds-ao-and-search-wins-nasa-backed-competition-with-3d-printed-ice-house-for-mars>)

Insgesamt kann festgestellt werden, dass der Membranbau insgesamt durch eine hohe Individualisierung der umgesetzten Projekte geprägt ist und die Einzelprojekte eine individuelle Beurteilung erfordern. Daher sind allgemeingültige Aussagen zur Eignung und dem Anwendungspotential von beschichteten ETFE Folien schwierig. Die allgemeinen Vorteile von ETFE, wie etwa die Gewichtsreduktion im Vergleich zu Glas und die damit verbundene filigrane Tragwerksstruktur, kommen auch bei ETFE Folie mit low-e Beschichtung weiterhin zum Tragen. Die Verbesserung der wärmetechnischen Eigenschaften, wie dem Wärmedurchgangskoeffizienten und dem Energiedurchlassgrad, machen ETFE Elemente zwar in diesem Aspekt in nennenswerter Weise konkurrenzfähig zu gewöhnlichen Verglasungselementen, allerdings muss im Konkreten Anwendungsfall die Eignung hinsichtlich der Anforderungen an Farbeindruck und der spektralen Dämpfung der durchgelassenen Einstrahlung sorgfältig betrachtet werden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der zahlenmäßige Nachweis erfolgt separat über die zentrale Verwaltung jedes einzelnen Projektpartners. Im Folgenden werden die wichtigsten Positionen dargelegt:

Für die Herstellung der Membranfolienkissen hat ROWO Coating die dafür notwendigen Materialbeschaffungen getätigt. Darunter fallen die teuren Sputtertargets für die Schichtherstellung sowie ETFE-Folienrollen in 100 µm und 250 µm Dicke und in ausreichenden Rollenlängen. Nach der Demonstratorfertigung wurden diese Materialien für die weitere Entwicklung und Optimierung der geplanten Sonnenschutzschichten eingesetzt.

Für die Entwicklung der Beschichtungen hat das Fraunhofer ISE ein neues Target zur Spezialbeschichtung angeschafft, auch Rollen aus ETFE.

Die HFT benötigte die Anschaffung der Überwachungssensoren und des Aufbaus.

Novum Membranes und 2Construct budgetierten die Kosten für den Membranbau.

Dunmore übernahm die erforderlichen Kosten einschließlich der Lieferung und Durchführung der Lackierung.

2.3 Notwendigkeit der Arbeit

Die angesetzten Materialkosten und verwendeten personellen Ressourcen waren notwendig und für die Zielerreichung angemessen. Mit der Projektarbeit und dem Schritt zu einem Feldtest konnte die Praxistauglichkeit der neuartigen Beschichtung unter realen Umweltbedingungen nachgewiesen und messtechnisch begleitet werden. Damit konnte ein weiterer Entwicklungsschritt für diese neuartige Umsetzung von spektralselektiver Beschichtung im Membranbau erbracht werden. Die durchgeführten Arbeiten entsprachen inhaltlich und umfänglich den in der Vorhabensbeschreibung dargestellten Arbeitspaketen und geplanten Ressourcen. Durch verschiedene Verwicklungen, wie beispielsweise die angespannte personelle Situation, Entwicklungen in der europäischen Gesetzgebung hinsichtlich der Verwendung von Fluorpolymeren, sowie Entwicklungen in der Erarbeitung des Monitoringsystems, kam es im Projektverlauf zu kleineren Anpassungen in der Umsetzung im Vergleich zur Planung.

Die wichtigsten im Rahmen des Projekts erreichten Ziele sind fett gedruckt. Darunter befindet sich eine kurze Zusammenfassung der notwendigen Arbeiten, die zur Erreichung jedes Ziels erforderlich waren.

Vervollständigung und Bewertung der Beschichtung von Prototyp-ETFE-Kissen im betrieblichen Umfeld (TRL 7/8 erreicht)

- ✓ **Sonnenschutz Spezial-Beschichtungen waren als sehr beständig bewertet**
- ✓ **Wärmeschutz-Beschichtungen auf der Mittellage waren als vielversprechend und beständig bewertet**

Dies wurde durch die Herstellung, Konstruktion und Überwachung der ETFE-Kissen mit den verschiedenen Beschichtungen erreicht. Dieses Ziel wurde mit Beiträgen aller Projektpartner verwirklicht. ROWO übernahm die Herstellung der PVD-Beschichtung. Dunmore die Lackbeschichtung. Novum und 2Construct montierten die Kissen. Novum, 2Construct und HFT waren für die Überwachung zuständig. Das Fraunhofer ISE unterstützte die Beschichtung und half bei der Charakterisierung vor und nach dem Outdoor-Test.

- **Qualifizierung des g-Wertes des ETFE-beschichteten Produktes**

Dies war notwendig, um einen besseren Zugang zu den gemessenen Eigenschaften der fertigen Membrankissen und dem Einfluss der Beschichtung zu erhalten.

- **Besseres Verständnis der Farbstabilität in Abhängigkeit von der Barriere Schicht und den Beschichtungsbedingungen**

Dies war notwendig, um ein besseres Verständnis des Produkts und eine bessere Kontrolle über die wahrgenommene Farbe des beschichteten Systems zu erlangen und um die Farbstabilität bei Alterung zu verbessern. Es wurde eine breitere Palette von vielversprechenden Sonnenschutzprodukten hergestellt, was als dringend notwendig erachtet wird, um das Problem der Überhitzung an sonnigen Tagen in Membran-Kissen-Konstruktionen zu lösen.

- **Identifizierung von möglichen PFA-freien Ersatzlacken**

Dies war notwendig, da die Produktion des ursprünglichen Lacks (der PFA enthielt) eingestellt wurde. PFA-freie Lacke sind aufgrund der Beschränkungen für PFA-Produkte von großem Interesse.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Jeder Projektpartner wird einen eigenen Erfolgskontrollbericht vorlegen, der separat eingereicht wird. Hier finden Sie eine Zusammenfassung der Bewertung der einzelnen an dem Projekt beteiligten Unternehmen:

Teilprojekt A Fkz: 03EN1032A ROWO Coating GmbH

Teilprojekt B Fkz: 03EN1032B Dunmore Europe GmbH

Teilprojekt C Fkz: 03EN1032C 2Construct GmbH & Co KG

Teilprojekt D Fkz: 03EN1032D Novum Membranes GmbH

Teilprojekt E Fkz: 03EN1032E Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Teilprojekt F Fkz: 03EN1032F Hochschule für Technik Stuttgart (HFT)

Im Rahmen dieses Verbundprojektes haben alle Verbundpartner sehr vertrauensvoll die geplanten Entwicklungsschritte möglichst industrienah und aufeinander abgestimmt durchgeführt.

Jeder Projektpartner im Verbund konnte seine Kernkompetenzen für die Veredelung von ETFE-Folien weiter ausbauen.

ROWO Coating GmbH

ROWO hatte zusammen mit dem ISE neue Schichtsysteme zunächst auf dem Galileo Rollcoater schrittweise erarbeiten sowie auch das Inline Monitoring auf dieser Anlage deutlich verbessern können. Allerdings ist der Gesamtprozess auf dem Galileo Rollcoater für die Herstellung der geplanten Funktionsschichten mit den Mehrfachbeschichtungsläufen gerade auch im Hinblick auf größere Mengen zu schwerfällig und aus diesem Grunde langfristig auch zu teuer. Daher war der nächste Schritt, die Aufskalierbarkeit von Sonnenschutzschichten auf ETFE-Folienrollen in dem neuen Sputterrollcoater bei ROWO zu prüfen, der entsprechend dem aktuellen Stand der Technik über moderne Sputterprozesse auf der Basis von Doppelrohrkathoden mit den entsprechenden Plasmageneratoren verfügt. Es konnten erste Sonnenschutzschichten, bei denen neue Oxidschichten als Barriere verwendet wurden, simuliert und auch erfolgreich auf ETFE-Folienrollen abgeschieden werden. Diese erfolgreichen Arbeiten sollen nach Projektende in die industrielle Verwertung von selektiven Sonnenschutzschichten (Sonnenschutz-Spezial) einfließen. Diesbezüglich werden die Industriepartner Novum Membranes, 2Construct und ROWO die Zusammenarbeit nach Projektende fortsetzen.

Weitere Verwertungsmöglichkeiten sieht ROWO in neuartige gesputterte Funktionsschichten auf ETFE-Folienrollen für Applikationen auch außerhalb des Sonnenschutzbereiches.

Dunmore

Innerhalb der Projektlaufzeit konnte mit nichtfluorierten Lacksystemen kein marktreifes Produkt entwickelt werden - der Übertrag vom Labor- auf den Produktionsmaßstab war nicht erfolgreich, somit gibt es keine Erfahrung hinsichtlich einer Verwendung des Lackes unter realen Bedingungen mit Demonstratoren. Deswegen sind ursprünglich angedachte Pilotprojekte im Anschluss an das Projekt nicht oder nur schwer realisierbar. Jedoch könnten die innerhalb der Projektlaufzeit, insbesondere die durch die intensiv durchgeführten Recherchen nach Wegfall des qualifizierten Lacksystems, gewonnenen Erkenntnisse mit witterungsbeständigen Lacksystemen auch nutzbringend für andere Produkte und Märkte sein. Das Wissen im Hinblick auf die Formulierung von Lacken wurde durch die notwendige Reaktion auf die während des Projekts geänderten Gegebenheiten noch weiter ausgebaut als erwartet. Die Entwicklung eines fluorfreien Lackes für die Außenanwendung ist gerade im Hinblick auf die Debatte um Beschränkung oder Verbot von Per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) zukunftsträchtig und könnte für verschiedene Anwendungen weitergeführt werden.

Ein Übertrag der letzten Laborergebnisse auf die Produktionsanlage bei Dunmore war innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr möglich. Um den Lack für ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten zugänglich zu machen, muss weitere Entwicklungsarbeit sowohl in das angedachte Lacksystem als auch ggf. in die Konzipierung der Beschichtungsanlage investiert werden, wobei letzteres nur langfristig umsetzbar wäre. Die bisherigen Ergebnisse bieten allerdings eine gute Grundlage für eine wissenschaftliche sowie wirtschaftliche Anschlussfähigkeit, wobei ein Zeitrahmen bei Dunmore bislang nicht abgeschätzt werden kann.

Novum Membranes

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Schichtsysteme können das Anwendungsspektrum von ETFE-Folien im Bauwesen deutlich erweitern und zu Energieeinsparungen im Betrieb führen. Knackpunkt ist die Haltbarkeit der Beschichtungen.

Die hierfür im Projekt erarbeiteten Lösungen für Schutzlack und Filtersystem sind wegweisend für die industrielle Anwendung, da sie die Machbarkeit belegen. Das Projekt hat zwar mit dem kommerziellen Verschwinden des in der Langzeiterprobung genutzten Schutzlackes einen Rückschlag hinnehmen müssen. Dennoch ist Novum Membranes zuversichtlich, dass hier eine neue technische Lösung gefunden werden kann. Hierfür arbeiten ROWO, 2Construct und Novum Membranes als Industriepartner zusammen. Eine konkrete Bewertung von Zeithorizont und Umsätzen ist jedoch aufgrund der noch notwendigen industriellen Forschung nicht möglich. Letztlich hat die hier und in den Vorläuferprojekten entwickelte Technik aber das Potential die Hälfte des Marktes für Gebäudehüllen aus ETFE-Folien zu erobern.

2Construct GmbH & Co KG

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

- Die ausreichende chemische und strahlungstechnische Beständigkeit der „Wärmeschutzfolie“ und der „Folie Sonnenschutz Spezial“, zur Verwendung im Innenbereich eines ETFE-Kissens, auch mehrlagig, wurde nachgewiesen. Die Beständigkeit im Konfektions- und Montageprozesses sind ausreichend. Eine Verwendung als Bauprodukt in ersten ausgesuchten Projekten 2025 wäre möglich. Aufgrund der anhaltenden PFA-Diskussion hat der Hersteller die Produktion des verwendeten Schutzlackes eingestellt. Es ist somit davon auszugehen, dass die Folien auf unbestimmte Zeit nicht zur Verfügung stehen.
- Ein alternativer Schutzlack wurde zwar sofort gesucht und getestet, konnte aber in der Kürze der verbleibenden Projektlaufzeit nicht verifiziert werden. Der Projektpartner DUNMORE steht nach Projektende auch nicht für weitere, industriefinanzierte, Untersuchungen zur Verfügung.
- Nach Projektende steht direkt noch kein fertiges Folienprodukt zur Verfügung, das auf den im Projekt entwickelten Funktionsschichten basiert. Daher sind die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten aus Sicht von 2Construct auf die nächsten Jahre nicht belastbar zu beziffern.
- Die wichtigen Erkenntnisse im Bereich der Luftfiltertechnik für ETFE-Kissen können verwendet und wirtschaftlich verwertet werden. Jedoch sind die aktuellen marktüblichen Anforderungen an die Stützluftkonditionierung noch niedrig. Wir gehen davon aus, dass erst mit einem marktfähigen Folienprodukt ein wirtschaftlich relevanter Absatz generiert werden kann.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Anforderungen an die Verwendung von ETFE- Membranen oder Kissen sind stark gestiegen und werden im nächsten Jahrzehnt weiterwachsen. Der jetzige Stand der Technik ist hier bereits seit längerem an der Machbarkeitsgrenze. Die untersuchten Beschichtungen und Kombinationen sind unseres Erachtens Schlüsseltechniken, welche den Einsatz von ETFE-Folien in der Architektur zukünftig weiter möglich machen und den Verwendungsbereich noch erweitern.

Der erfolgte Nachweis, dass die untersuchten und beweterten Folienbeschichtungen ausreichend für einen praktischen Einsatz beständig sind, ist gelungen. Da diese Beschichtungen, in der getesteten Form nicht mehr hergestellt werden können, bleibt die technische Grundlage unklar. Leider hat sich die Fa. Dunmore nach Projektende aus diesem Entwicklungsthema zurückgezogen. Die Fa. ROWO, Novum und 2Construct sind übereingekommen die Forschung weiter zu verfolgen und im ersten Schritt einen neuen Partner für die Lackbeschichtung zu finden und nochmals in die Beständigkeitsprüfung zu gehen. Ein zeitlicher Ausblick kann im Augenblick noch nicht geben werden. Ob hier eine reine industriegeförderte Finanzierung erreicht werden kann, ist nicht gesichert. Eine weitere mögliche geförderte Projektfinanzierung könnte der Schlüssel sein.

Das Projekt hat deutlich geänderte Anforderungen an die Stützluftversorgung in Bezug auf Luftreinheit und auf eine kammergestützte Versorgungssteuerung für die beschichteten Folien ergeben. Die Anforderungen in Bezug auf die Luftreinheit war Projektbestandteil konnte im Projektverlauf gelöst werden.

Bzgl. der Steuerung entwickelt 2Construct eine eigene, neuartige Einzelkammersteuerung. Dazu gehören auch umfängliche automatische Überwachungsfunktionen. Wir erachten diese auch als zukünftige Anforderung an die Verwendbarkeit der Folien. Die Entwicklung ist zu 80% abgeschlossen und wird in den nächsten 2 Jahren zur Marktreife gebracht.

HFT

Die im Rahmen des Projektes umgesetzten Arbeiten und erreichten Erkenntnisse werden im weiteren Verlauf dazu beitragen, die Expertise der HFT Stuttgart auf dem Bereich des Membranbaus weiter zu stärken. Dabei werden die Erkenntnisse sowohl in die Lehre und die Möglichkeit zur Anfertigung von Abschlussarbeiten einfließen als auch in weiteren Forschungsprojekte von Nutzen sein und Anwendung finden. Die Aufbereitung der Messdaten und der numerischen Ergebnisse in Veröffentlichungen wird dazu beitragen die Sichtbarkeit der HFT in der wissenschaftlichen Gemeinde zu erhöhen. Die gewonnene Erfahrung in der Umsetzung des Monitoringsystems kann in Lehre und Forschung einfließen. Die verwendete Messtechnik geht in den Bestand der HFT über und kann zukünftig in der Lehre und Forschung nutzbringend eingesetzt werden.

Fraunhofer ISE

Das Fraunhofer ISE hat im Rahmen der Follow-e-demo Projekte wertvolle Erfahrungen gesammelt, die zur Durchführung weiterer Forschungsarbeiten und zur Akquise neuer Förderprojekte beitragen. Ein Industrieauftrag zur Entwicklung einer Low-E-Beschichtung auf PET für ein PVT-System sowie Erkenntnisse wurden erfolgreich umgesetzt. Die Erkenntnisse über PFA-freie Beschichtungen waren für andere Anwendungen von großem Interesse.

Das Sonnenschutz-Spezialsystem zeigte Stabilität und kommerziellen Wert, auch ohne Lackierung. Doppel-Low-E-Beschichtungen für flexible Substrate wurden untersucht, jedoch, als weniger vorteilhaft für ETFE-Kissen erachtet. Die Farbstabilität mit alternativen Barrierschichten wurde erfolgreich erforscht und an ROWO weitergegeben. Erkenntnisse aus dem Ätzen von ETFE werden auf andere Anwendungen übertragen. Das Fraunhofer ISE wird eine Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage anschaffen, die zum Teil auf das in diesem Projekt erworbene Wissen und die Erfahrung bei der Beschichtung flexibler Substrate zurückgeht. Zudem wurde das Wissen über die Korrosionsstabilität von Dünnschichtsilberschichten für verschiedene Anwendungen verbessert.

2.5 Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Auf dem Markt bleibt immer noch die Konkurrenztechnologie wie die gedruckten Beschichtungen auf Silberbasis bestehen. Diese sind in Abbildung 1 im Vergleich dargestellt. Es handelt sich weder um eine hochselektive (ein Abfall des T_{vis} ist proportional zu T_{sol}) noch um eine Low-e Beschichtung, und daher bleibt das im Follow-e2-Projekt entwickelte Ag-gesputterte Foliensystem so interessant.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

- Improving the Colour Stability for Low-E and Solar Control Coatings for ETFE Membrane Cushions
Masterthesis

Deena Anna Alias

Supervisor: Prof. Dr. rer. nat. Johannes Gulden und Dr. Sophie Gledhill

Juli 2022, Hochschule Stralsund, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik

- "Energy Efficient Technologies for Building Envelopes" - online Fraunhofer FEP- Sophie Gledhill in Zusammenhang mit ROWO und 2Construct - November 25-27 2020

- Mögliche Poster oder Vorträge auf der V2025 International Conference & Exhibition 13. bis 16. Oktober 2025 | Dresden, Deutschland

3. Anlagen

3.1 Erfolgskontrollbericht

Jeder Projektpartner wird einen separaten Erfolgskontrollbericht vorlegen, der separat eingereicht wird.

3.2 Berichtsblatt

Zur Ergänzung des Berichts wurde ein gemeinsames Berichtsblatt erstellt.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Follow-e-demo Energiesparende funktionelle Beschichtungen von ETFE für die Folienarchitektur: Monitoring eines Prototyps unter Betriebsbedingungen und Weiterentwicklung der Schichtsysteme	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Gledhill, Sophie; Kindle-Hasse, Brunhilde; Siefert, Wolfgang; Hildebrandt, Christina; Liebhart, Haiko; Cremers, Jan; Pfannkuchen, Nina; Konetznick, Ulrich; Zabel, Hansjörg; Grüneisen, Albrecht; Noatzsch, Mathias	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.07.2024
	6. Veröffentlichungsdatum Noch nicht bekannt
	7. Form der Publikation TIB
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) ROWO Coating GmbH, Allmendstr.7, 79336 Herbolzheim DUNMORE Europe GmbH, Hausener Weg 1, 79111 Freiburg 2Construct GmbH & Co KG, Sebalweg 20, 89079 Ulm Novum Membranes GmbH Im Voigtstedter Feld 6, 06528 Edersleben Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstrasse 24, 70174 Stuttgart	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03EN1032A-F
	11. Seitenzahl 106
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 26
	15. Abbildungen 75
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Im Vorhaben Follow-e-demo waren ETFE-Folienkissen mit transparenter Sonnenschutz- sowie Wärmeschutzbeschichtung in relevanter Größe hergestellt, aufgebaut und über einen Zeitraum von 2 Jahren unter realen Betriebsbedingungen betrieben und überwacht worden. Die hierfür im Projekt erarbeiteten Lösungen für Schutzlack und Filtersysteme sind wegweisend für die industrielle Anwendung. Dazu wurden 5 große ETFE-Folienkissen (3x3 m²) und 9 kleine ETFE-Folienkissen (1x1 m²) mit verschiedenen Varianten bei Novum Membranes aufgebaut. Die besputterten und nachfolgend schutzlackierten ETFE-Folien waren teilweise gezielt mit Defekten versehen, diese wiederum teilweise mit Reparaturlack behandelt, um somit drei Varianten - Defekte, reparierte Defekte und makellose Folie - über die Zeit beobachten zu können. Nach 1 und 2 Jahren waren aus den großen Demonstratoren Proben entnommen und jeweils ein kleiner Demonstrator je Variante geöffnet worden. Die beschichteten Folien wurden auf Schäden untersucht und die Beständigkeit der Folien positiv bewertet. Im Projektverlauf war daher TRL 7-8 erreicht worden. Die Demonstratoren waren mit einem Lack auf Basis eines fluorierten Polyacrylat-Harzes beschichtet worden, der aber ab der Mitte des Verbundprojektes am Markt nicht mehr verfügbar war. Diese Lackproduktion wurde eingestellt, weil ein von der Europäischen Kommission angedrohtes teilweises Verbot bestimmter PFA-Materialien zur Folge hatte, dass die Entwicklung von Verwendungsmöglichkeiten von fluorierten Lacken nicht mehr so attraktiv war. Im Projekt wurde vereinbart, die restlichen Projektmittel für die Recherche von PFA-freien Lacken zu verwenden. Sonnenschutzbeschichtungen wurden mit ausgewählten PFA-freien Lacken ausgerüstet und daran Stabilitätstests durchgeführt, um eine Vorqualifizierung zu erreichen. Der zweite Schwerpunkt im Verbundvorhaben war die Weiterentwicklung der funktionalen Sonnenschutzschichten hinsichtlich ihrer Selektivität. In einem weiteren Arbeitspaket wurde der Einfluss der Schichtdicken auf Farbe und Farbstabilität genauer untersucht. Die Sonnenschutz Spezial Beschichtung erwies sich in den 2-Jahres-Feldtests als sehr stabil, ebenso wie die Wärmeschutzbeschichtung in der mittleren Lage der ETFE-Kissen.	
19. Schlagwörter Low-e, Wärmeschutz, Sonnenschutz, solar control, Beschichtung, Dünnschicht, Sputtern, selektiv, Membrankissen, ETFE, Folienarchitektur	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Report		
3. title Follow-e-demo Energy-saving Functional Coatings of ETFE for Membrane Architecture: Monitoring of Prototypes under Operating Conditions and further Development of the Functional Coating			
4. author(s) (family name, first name(s)) Gledhill, Sophie; Kindle-Hasse, Brunhilde; Siefert, Wolfgang; Hildebrandt, Christina; Liebhart, Haiko; Cremers, Jan; Pfannkuchen, Nina; Konetznick, Ulrich; Zabel, Hansjörg; Grüneisen, Albrecht; Noatzsch, Mathias		5. end of project 31.07.2024	
		6. publication date Not yet known	
		7. form of publication TIB	
8. performing organization(s) (name, address) ROWO Coating GmbH, Allmendstr.7, 79336 Herbolzheim DUNMORE Europe GmbH, Hausener Weg 1, 79111 Freiburg 2Construct GmbH & Co KG, Sebalweg 20, 89079 Ulm Novum Membranes GmbH Im Voigtstedter Feld 6, 06528 Edersleben Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg Hochschule für Technik Stuttgart, Schellingstrasse 24, 70174 Stuttgart		9. originator's report no. 03EN1032A-F	
		10. reference no.	
		11. no. of pages 106	
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn		13. no. of references	
		14. no. of tables 26	
		15. no. of figures 75	
16. supplementary notes			
17. presented at (title, place, date)			
18. abstract The project report describes how ETFE cushions with solar-shade and thermal insulation coatings were manufactured, installed, operated and monitored under real operating conditions over a period of 2 years. For this purpose, 5 large ETFE cushions (3x3 m²) and 9 small ETFE cushions (1x1 m²) with four different coatings were set up at Novum Membranes. Some of the coated films were specifically provided with defects, which in turn were partially treated with repair lacquer to be able to observe three variants - defects, repaired defects and flawless coatings - over time. After 1 and 2 years, samples were taken from the large demonstrators and one small demonstrator of each variant was opened. The coated films were examined for damage and the durability of the films was assessed as positive. The coated ETFE membrane cushions achieved a TRL 7-8 during the project. The demonstrators were coated with a polyacrylate-based lacquer with fluoropolymer additives. In the middle of the project, the production of this lacquer was discontinued. The more fundamental problem associated with this was the partial ban on certain PFA materials threatened by the European Commission, which meant that the development of possible uses for fluorinated lacquers was no longer as attractive. It was agreed that the remaining project funds would be used for research into fluorine-free lacquer-coatings. Coatings and stability tests were carried out with suitable PFA-free lacquers and in laboratory testing the coatings with the PFA-free lacquers were shown to be durable. The second focus of the project was to further develop the functional solar-shade coatings regarding their selectivity. The influence of coating colour and colour stability was investigated in more detail in a further work package. The solar shade special coating product proved to be very stable in the 2-year field tests, as well as the thermal insulation coatings which were used on the middle layer of the 3-layer ETFE cushions.			
19. keywords low-e, low-emissivity, coatings, thin films, sputtering spectrally-selective, membrane-cushions, ETFE, Membrane-architecture, solar-control, thermal insulation, PFA-free, lacquer			
20. publisher			21. price