

Entwicklung und Analyse einer selbstkühlenden und
substratunabhängigen Beschichtung für technische
Textilien unter Nutzung der energiefreien
Strahlungskühlung

Development and analysis of a self-cooling and
substrate-independent coating for technical textiles
using energy-free radiative cooling

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Lea Zimmermann

aus Düren

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Götz Theodor Gresser

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Günter Tovar

Tag der mündlichen Prüfung: 09.10.2024

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF)
in Zusammenarbeit mit dem Institut für Textil- und Fasertechnologien (ITFT)
der Universität Stuttgart

2024

Vorwort und Danksagung

Diese Dissertation ist im Rahmen des Promotionsstipendiums der Ingeborg-Gross Stiftung an den Deutschen Instituten für Textil- und Faserforschung (DITF) in Denkendorf entstanden. An dieser Stelle möchte ich mich bei all den Menschen, die diese Arbeit möglich und zu einer unvergesslichen Erfahrung gemacht haben, herzlich bedanken.

Zuallererst möchte ich meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Götz T. Gresser für seine kontinuierliche Unterstützung und Anleitung während meiner Arbeit danken.

Der Stiftung und Schill & Seilacher GmbH, speziell Herrn Dr. Friedrich Wirbeleit sowie Herrn Dr. Robert Vogt, danke ich herzlich für die finanzielle und ideelle Förderung, die ich während der Zeit meiner Promotion erhalten habe, sowie die gemeinsam geführten fachlichen Diskussionen, die immer wieder zu neuen Denkanstößen geführt haben.

Mein aufrichtiger Dank geht an meinen Co-Betreuer PD Dr. Thomas Stegmaier für seine systematische Anleitung während unserer wertvollen Treffen und die stets motivierende und beratende Begleitung auf meinem Weg.

Ich danke meinen Kollegen Cigdem Kaya, Andreas Kunze, Helmar Abele, und allen Kollegen im Kompetenzzentrum Textilchemie, Umwelt & Energie sowie der mechanischen und elektronischen Werkstatt für die Unterstützung im Labor, bei dem Prüfaufbau und die hilfreichen Diskussionen und Anregungen.

Ich möchte mich bei Dr. Ablimit Aili für die große Hilfestellung, Zeit und den angenehmen und intelligenten Austausch zum Thema Strahlungskühlung bedanken. Danke, dass Du dich meinen vielen Fragen immer angenommen hast.

Ich danke meiner Familie, insbesondere meinen Eltern und meinem Bruder Lukas, für ihre liebevolle Unterstützung, den Austausch und die hilfreichen und motivierenden Worte.

Nicht zuletzt möchte ich meinem Freund, Dominik, meine tiefe Dankbarkeit aussprechen für seine endlose Unterstützung, Liebe, Geduld und ständige Ermutigung während der letzten Jahre. Danke für die Begleitung und Dein Verständnis in allen Lebenslagen.

Stuttgart, März 2024
Lea Zimmermann

Kurzfassung

Aufgrund des Klimawandels, des Bevölkerungswachstums und des städtischen Wärmeinseleffekts (UHI) ist der Bedarf an Kühlenergie insbesondere in städtischen Gebieten gestiegen und wird voraussichtlich auch in Zukunft weiter zunehmen. Bisherige konventionelle Kühlsysteme für Gebäude wie Klimaanlage basieren auf thermodynamischen Kreisläufen, die einen großen Teil des Strombedarfs ausmachen und gleichzeitig Abwärme und Kohlendioxid (CO₂) an die Umwelt abgeben.

Technologien wie die Strahlungskühlung bieten eine nachhaltige und energiefreie Lösung, indem sie die Wellenlängenbereiche der Atmosphäre, die für elektromagnetische Strahlung transparent sind, das so genannte atmosphärische Fenster (8–13 µm), nutzen, um Wärmestrahlung in den kälteren (3 K) Weltraum abzugeben. Durch die Entwicklung von Beschichtungen, die selektiv Wärme durch die Atmosphäre abstrahlen und weniger Sonnenwärme absorbieren, ist eine Abkühlung unter die Umgebungstemperatur auch tagsüber möglich. Während sich bisherige Veröffentlichungen im Bereich der textilen Gebäudekühlung auf spezifische Faserstrukturen und textile Trägermaterialien sowie komplexe Mehrschichtaufbauten konzentrierten, was den Einsatz für hochskalierte Außenanwendungen einschränkt, zielt diese Arbeit auf die Entwicklung einer neuartigen, substratunabhängigen Beschichtung mit spektral selektiven Strahlungseigenschaften hin.

Durch die detaillierte Abstimmung von Beschichtungsparametern wie der Partikelkonzentration, -verteilung und -größe in Kombination mit niedrig emittierenden und solarreflektierenden Partikeln sowie einem stark im mittleren Infrarot emittierenden Matrixmaterial, wird eine substratunabhängige Kühlung unter die Umgebungstemperatur erreicht, gezeigt am Beispiel von drei für den Membran- und Zeltbau typischen Gewebetypen. Darüber hinaus ist die Beschichtung so konzipiert, dass sie einfach auf verschiedene textile Materialien appliziert werden kann und gleichzeitig eine geringe Dicke aufweist, um hohe Flexibilität und Skalierbarkeit zu gewährleisten. Um die Funktionsweise des entwickelten Beschichtungssystems weiter zu validieren, wurden Tests im Freien mit einem konzipierten Messaufbau durchgeführt, um Temperaturunterschiede und Kühlleistungen unter realen Wetterbedingungen zu messen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Temperatur der Beschichtung (zwischen 7–19 Uhr) an einem heißen Sommertag um durchschnittlich 2 °C unter der Umgebungstemperatur liegt. Darüber hinaus wird ein thermisches Modell an textile Materialien angepasst und validiert, um die Kühlleistung für verschiedene Wetterszenarien zu simulieren und zu berechnen.

Damit leistet diese Arbeit einen Beitrag zur Weiterentwicklung nachhaltiger textilbasierter Kühltechnologien und bietet eine vielversprechende Lösung für den wachsenden Bedarf an energieeffizienter Kühlung in städtischen Umgebungen.

Abstract

Due to climate change, population increase and the urban heat island effect (UHI) the demand for cooling energy especially in urban areas has been on the rise and is expected to further increase in the future. Previous conventional cooling systems for buildings like air conditioners are based on thermodynamic cycles that account for a large share of electricity demand while dissipating waste heat and carbon dioxide (CO₂) into the environment.

Technologies such as radiative cooling offer a sustainable and energy-free solution by using the wavelength ranges of the atmosphere that are transparent to electromagnetic radiation, the so-called atmospheric window (8–13 μm), to emit thermal radiation into the colder (3 K) outer space. By designing coatings that selectively emit heat through the atmosphere while absorbing less solar heat, cooling below ambient temperatures even during the day is possible.

While previous publications in the field of textile building cooling have focused on specific fiber structures and textile substrate materials as well as complex multi-layer constructions, which restricts the use for highly scaled outdoor applications, this thesis aims to develop a novel substrate-independent coating with spectrally selective radiative properties.

Through the detailed adjustment of coating parameters such as particle concentration, distribution, and size, combined with low-emitting and solar-reflective particles, along with a matrix material emitting strongly in the mid-infrared range (MIR), substrate-independent cooling below ambient temperature is achieved, as demonstrated using three types of fabric typical for membrane and tent construction. Moreover, the coating is designed to be easily applicable, with a low thickness to ensure high flexibility and scalability.

To validate the viability of the developed coating system, outdoor testing is conducted using a tailored measurement setup to measure temperature differences and cooling power under real weather conditions. The results show a median daytime temperature reduction (7 a.m.–7 p.m.) of 2 °C below ambient temperature on a hot summer day. Additionally, a thermal model for textiles is adapted and validated to simulate and calculate the cooling power for different weather scenarios.

This thesis contributes to the advancement of sustainable textile-based cooling technologies, offering a promising solution to address the growing demand for energy-efficient cooling in urban environments.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
Nomenklatur	XIII
1. Einleitung und Motivation.....	1
2. Stand der Wissenschaft und Technik	7
2.1 Kühlung	7
2.2 Funktionsprinzip Strahlungskühlung	9
2.2.1 Atmosphärisches Fenster.....	11
2.2.2 Absorption atmosphärischer Strahlung	12
2.2.3 Absorption solarer Strahlung	13
2.2.4 Abstrahlung der textilen Oberfläche	14
2.2.5 Wärmeübertragung durch Konvektion/Konduktion.....	17
2.3 Materialentwicklung.....	19
2.3.1 Textile Strukturen und Beschichtungen	23
2.3.2 Substratunabhängige Materialsysteme	26
2.4 Fazit zum Stand der Forschung	32
3. Zielsetzung, Hypothesen und Lösungsweg.....	35
4. Materialien, Prozesse und Methoden	39
4.1 Materialien.....	39
4.1.1 Substratmaterialien.....	39
4.1.2 Matrixmaterialien	40
4.1.3 Partikel	42
4.2 Prozesse	43
4.2.1 Herstellung der Beschichtungspaste.....	43
4.2.2 Beschichtungsauftrag	45
4.3 Methoden.....	46
4.3.1 Partikelgrößenverteilung	46
4.3.2 Spektroskopie	47

4.3.3	Materialphysiologische Untersuchung mit Messung der Schichtdicke	49
4.3.4	Wärmeleitfähigkeit	50
4.3.5	Rheologie	50
4.3.6	Berechnung der Kühlleistung	51
5.	Entwicklung der Beschichtungssysteme	53
5.1	Materialauswahl	54
5.1.1	Einfluss der Substratmaterialien	54
5.1.2	Analysen zum Matrixmaterial	55
5.1.3	Analysen zu den Weißpigmenten	58
5.1.4	Niedrig emittierende Partikel (Low-e)	63
5.2	Einfluss und Wirkungsgrad niedrig emittierender Partikel (Aluminium) im einlagigen Beschichtungssystem	64
5.2.1	Einfluss der Partikelgröße	65
5.2.2	Einfluss der Partikelverteilung	66
5.2.3	Einfluss der Partikelkonzentration	70
5.2.4	Einfluss der Schichtdicke	74
5.3	Einfluss und Wirkungsgrad niedrig emittierender Partikel (Aluminium) im Zusammenhang mit TiO ₂ im einlagigen Beschichtungssystem	76
5.3.1	Einfluss der Partikelkonzentration	76
5.3.2	Einfluss der Schichtdicke	80
5.4	Einfluss und Wirkungsgrad niedrig emittierender Partikel (Aluminium) im Zusammenhang mit TiO ₂ im zweilagigen Beschichtungssystem	81
5.4.1	Einfluss der Partikelkonzentration	81
5.4.2	Einfluss der Schichtdicke	83
5.5	Fazit zur Beschichtungsapplikation	88
6.	Prüfmethode zum Nachweis der Kühlleistung unter realen Wetterbedingungen	91
6.1	Entwicklung, Konstruktion und Bau eines geeigneten Prüfaufbaus	91
6.1.1	Konzeption und Aufbau zur reinen Temperaturmessung	91
6.1.2	Konzeption und Aufbau zur Messung der Kühlleistung mittels einem Heizplattensystem	94
6.2	Auswertung und Analyse der Prüfergebnisse unter realem Wettereinfluss	96
6.2.1	Vergleich der Kühlwirkung in Celsius (°C)	97
6.2.2	Kühlleistung in W/m ²	100

7. Numerisches Vorhersagemodell zur Berechnung der Kühlleistung für verschiedene Wetterszenarien.....	107
7.1 Vergleichbarkeit von halbtransparenten und nicht transparenten textilen Proben auf einem opaken Hintergrund.....	107
7.2 Vorhersagemodell für die Berechnung der Kühlleistung textiler Proben	112
7.3 Anpassung und Verifizierung des Vorhersagemodells	115
8. Zusammenfassung	119
9. Ausblick.....	123
Formelverzeichnis.....	XVII
Abbildungsverzeichnis.....	XIX
Tabellenverzeichnis	XXIII
Quellen- und Literaturverzeichnis	XXV
Anhang.....	XXXVII

Abkürzungsverzeichnis

Al.....	Aluminium
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
AlPO ₄	Aluminiumphosphat
BaSO ₄	Bariumsulfat
CaCO ₃	Calciumcarbonat
CMC.....	Carboxymethylchitosan
High-e	engl.: high-emissivity (hoch emittierend)
ITO.....	Indiumzinnoxid
Low-e	engl.: low-emissivity (niedrig emittierend)
MIR.....	Mittleres Infrarot
NIR.....	Nahes Infrarot
PA6.6	Polyamid 6.6
PDMS.....	Polydimethylsiloxan
PE.....	Polyethylen
PEO.....	Polyethylenoxid
PES.....	Polyester
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PVK	kritische Partikelvolumenkonzentration
SiO ₂	Siliciumdioxid
Si ₃ N ₄	Siliciumnitrid
TiO ₂	Titandioxid
TPX.....	Polymethylpenten
Vis	engl.: visible (sichtbarer Wellenlängenbereich)

Nomenklatur

Symbol	Einheit	Beschreibung
A	$\text{m}^2, \text{cm}^2, \text{mm}^2$	Fläche
A_{base}	cm^2	Fläche des Untergrundmaterial (Metallplatte)
A_{surf}	cm^2	Fläche der Probe (Textil)
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
$c_{p,base}$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Spezifische Wärmeleitfähigkeit des Untergrundmaterials
$c_{p,surf}$	$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Spezifische Wärmeleitfähigkeit der Probe
d	cm, mm	Dicke
d_{50}	μm	50% Quantile der Partikelgröße
f_{cloud}	%	Wolkendichte
h	J/s	Planck'sche Wirkungskonstante
h_{air}	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	Wärmeübergangskoeffizient
$h_{surf\rightarrow amb}$	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	Wärmeübergangskoeffizient zwischen Textil und Umgebung
I_{BB}	W/m^2	Spektrale Strahlung eines schwarzen Körpers
I_{solar}	$\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}$	Solare Bestrahlungsstärke
k	J/K	Boltzmann Konstante
k_{surf}	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	Wärmeleitfähigkeit des Textils
m_{base}	g	Masse des Untergrundmaterials
m_{surf}	g	Masse der textilen Probe
$n(\vec{r})$	-	Brechungsindex
P	W/m^2	Emissionsleistung
p_{amb}	mbar	Umgebungsdruck
P_{cool}	$^\circ\text{C}, \text{W}/\text{m}^2$	Kühlleistung
P_{heater}	W/m^2	Heizleistung
$\bar{q}$	W/m^2	Wärmestromdichte
q_{atm}	W/m^2	Leistung der atmosphärischen Strahlung, die von einer Oberfläche absorbiert wird
$q_{atm\rightarrow surf, rad}$	W/m^2	Leistung der atmosphärischen Strahlung, die vom Textil absorbiert wird
$q_{atm\rightarrow surf, rad, clear}$	W/m^2	Leistung der atmosphärischen Strahlung, die vom Textil absorbiert wird bei klarem Himmel

$q_{atm \rightarrow surf, rad, cloud}$	W/m ²	Leistung der atmosphärischen Strahlung, die vom Textil absorbiert wird bei bewölktem Himmel
$q_{cooling}$	W/m ²	Netto – Kühlleistung
$q_{conv, amb \rightarrow surf}$	W/m ²	Leistung der konvektiven Wärmeübertragung zwischen Textil und Umgebung
q_{nonrad}	W/m ²	Leistung der konvektiven und konduktiven Wärmeübertragung
q_{rad}	W/m ²	Leistung der thermischen Strahlung einer Oberfläche
q_{solar}	W/m ²	Leistung der von einer Oberfläche absorbierten Sonnenstrahlung
$q_{solar \rightarrow surf}$	W/m ²	Leistung der vom Textil absorbierten Sonnenstrahlung
$q_{surf \rightarrow atm, rad}$	W/m ²	Leistung der thermischen Strahlung des Textils
$q_{surf, net cooling}$	W/m ²	Netto – Kühlleistung der textilen Probe
R	%	Spektrale Reflexion
RH	%	Relative Luftfeuchtigkeit
r_{base}	-	Reflexion des Untergrundmaterials
R_{gh}	-	Hemisphärisch gerichtete Reflexion
$\tilde{r}_{solar}$	-	Gesamtreflexionsgrad über das Sonnenspektrum (Textil-Basis System)
r_{surf}	-	Reflexion des Textils
T	%	Spektrale Transmission
T_{amb}	°C, K	Umgebungstemperatur
T_{base}	°C, K	Temperatur des Untergrundmaterials
T_{cloud}	°C, K	Wolkentemperatur
T_{gh}	-	Hemisphärische gerichtete Transmission
T_s	°C, K	Temperatur der Probe
T_{surf}	°C, K	Temperatur des Textils
ΔT	K	Temperaturdifferenz
ΔT_0	K	Referenztemperaturdifferenz der Wolken
V_{wind}	m/s	Windgeschwindigkeit
z_{base}	mm	Dicke des Untergrundmaterials
z_{surf}	mm	Dicke der textilen Probe
α	-	spektrale Absorption
α_{base}	-	Absorption des Untergrundmaterials
α_{surf}	-	Absorption der textilen Probe

γ	1/s	Scherrate
ε	-	spektrale Emission
ε_{atm}	-	Emissionsgrad der Atmosphäre
ε_r	-	Emissionsgrad der OF
ε_{surf}	-	Emissionsgrad des Textils
η	mPa·s	Viskosität
θ	°	Zenitwinkel
λ	μm, nm	Wellenlänge
$\dot{\lambda}$	W/m ² ·K	Wärmeleitfähigkeit
σ	W/m ² ·K	Stefan Boltzmann Konstante
τ	Pa	Schubspannung
τ_{base}	-	Transmission des Untergrundmaterials
τ_{surf}	-	Transmission der textilen Probe

1. Einleitung und Motivation

Temperaturen nehmen weltweit zu. Laut dem IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Sixth Assessment Report 2023 lag die weltweite Durchschnittstemperatur im Jahr 2020 $1,2 \pm 1$ °C über der Basislinie von 1850–1900, die als Annäherung an das vorindustrielle Niveau verwendet wird. [1, 2]

Steigende Temperaturen und das vermehrte Auftreten von Hitzeextremen führen zu erheblichen Gesundheitsrisiken. Von 1980 bis 2020 waren Hitzewellen für 77.000–129.000 Todesfälle in den EEA-Mitgliedsländern (European Economic Area) verantwortlich. [3]

Neben gesundheitlichen Risiken steigt gleichzeitig der Energiebedarf für Kühlung stark an. Aufgrund der Bevölkerungsalterung und der zunehmenden Verstädterung ist der Kühlenergiebedarf in Städten zwischen 1970 und 2010 um 23 % gestiegen. [1]

Durch den Urban-Heat-Island (UHI) Effekt wird ein zusätzlicher Energiebedarf auf ca. 0,74 kWh/m²/°C geschätzt. Studien kommen zu dem Schluss, dass in den nächsten 30 Jahren der Kühlenergiebedarf den entsprechenden Heizbedarf stark übersteigt. Gleichzeitig nimmt die Anzahl der großen Städte durch Bevölkerungswachstum und einer verstärkten Land-Stadt-Flucht zu. Für jedes Grad Temperaturerhöhung steigt der Stromverbrauch um ca. 21 W pro Person. [4]

Höhere städtische Umgebungstemperaturen haben schwerwiegende Auswirkungen auf das Leben und die allgemeine Umweltqualität der Städte. Bisherige konventionelle Systeme, wie Klimaanlage basieren auf thermodynamischen Kreisläufen, die durch den Verbrauch von nicht erneuerbaren Ressourcen erzeugt werden und gleichzeitig Abwärme in die Umgebung ableiten. Konventionelle Kühlsysteme verbrauchen 20 % des weltweiten Energiebedarfs und verursachen 10 % der weltweiten Treibhausgasemissionen. [5]

Durch den Einsatz von Klimaanlage, die den Kühlbedarf decken, entsteht ein hoher Stromverbrauch, zusätzliche Kosten und die Überhitzung der Städte nimmt weiter zu [6].

Steigende Temperaturen aufgrund des Klimawandels und die damit verbundene Überhitzung des menschlichen Körpers erfordern neue Materialien und Technologien, um die Temperaturen erträglich zu halten.

Alternativen zu traditionellen, strombetriebenen Kälteanlagen können passive Kühlmethoden darstellen. Diese verbrauchen nur sehr wenig bis gar keine Energie. Zu passiven Kühlmethoden für die Gebäudekühlung zählen z.B. Sonnen- und Hitzeschutz. Dazu gehören reine Verschattungssysteme, die Verwendung von Wasserbecken zur Isolierung und Verdunstungskühlung auf Gebäudedächern sowie natürliche Kühl-Wege durch Vegetation auf und an Gebäudeflächen. [7]

Zusätzlich gibt es Entwicklungen mit PCM-Kapseln (Phase-Change-Materials), die beispielsweise der Wandfarbe beigelegt werden und eine vorübergehende Kühlung bewirken sowie Systeme, die auf natürlicher Ventilation basieren [8].

Im textilen Membranbau werden Lösungsansätze für kühlende Membrandächer mit erhöhten solaren Reflexionswerten (durchschnittlich 65 % mit Reflexionspeaks von bis zu maximal 85 % [9]) oder sogenannte niedrig emittierende (Low-e) Beschichtungen diskutiert [10]. Diese Ansätze sind jedoch nicht gezielt auf eine Kühlung unter Umgebungstemperatur ausgerichtet und bieten nur marginale Vorteile. Zum Teil werden umfangreiche Renovierungsmaßnahmen für Bestandsbauten gefordert, sodass diese Ansätze wirtschaftlich nur für Neubauten sinnvoll sind.

Zur Erzielung niedrigerer Temperaturen sind immer noch elektrisch betriebene Kühltssysteme erforderlich [11].

Gerade in dicht besiedelten oder urbanen Regionen ist eine Umgestaltung zur Erzielung eines energetisch nachhaltigen Gebäudedesigns zur Kühlung flächendeckend und kostengünstig nicht realisierbar. Gerade hier werden alternative Lösungen zur energiefreien und nachhaltigen Kühlung gesucht.

Eine energetisch hochinteressante Alternative bietet das Prinzip der Strahlungskühlung.

Technologien wie die Strahlungskühlung bieten eine nachhaltige und energiefreie Lösung, indem sie die Wellenlängenbereiche der Atmosphäre, die für elektromagnetische Strahlung durchlässig sind, das so genannte atmosphärische Fenster (8–13 μm), nutzen, um Wärmestrahlung in den kälteren (3 K) Außenraum abzugeben [2].

Durch Anpassung der Spektralkurve über die Entwicklung einer adaptiven und ressourcenschonenden Kühlbeschichtung für technische Textilien, so dass mehr Wärme abgegeben als aufgenommen wird, ist eine Abkühlung unter die Umgebungstemperaturen auch tagsüber möglich.

Die Strahlungskühlung ist ein allgegenwärtiger Prozess, bei dem eine Oberfläche durch Wärmestrahlung Wärme verliert. Die Oberflächentemperatur der Erde beträgt ca. 300 Kelvin (K), während der kosmische Mikrowellenhintergrund des Universums ein thermisches Schwarzkörper-Spektrum mit einer Temperatur von 2,7 K aufweist. Die Temperaturdifferenz kann genutzt werden, indem gezielt thermische Infrarotstrahlung durch die Atmosphäre an das Universum abgegeben wird. [12]

Bereits 400 v. Chr. wurde die Strahlungskühlung genutzt. In sogenannten „Yakhchāl“ persische Eishäuser wurde bei Umgebungstemperaturen oberhalb des Gefrierpunktes Eis erzeugt. Aufgrund von Strahlungs- und Verdunstungskälte, gefror das Wasser in der Nacht trotz Temperaturen über 0 °C. [13]

Kühlung bei Tag wurde dagegen erst in den letzten Jahren näher untersucht. Raman *et. al* zeigt in dem Paper „Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight“ *Nature* 2014 zum ersten Mal die erfolgreiche Kühlung am Tag unter direkter Sonneneinstrahlung. [14]

Gerade am Tag unter Sonneneinstrahlung ist eine Kühlleistung erwünscht. Um auch bei Tag eine Kühlung zu erreichen sind zwei Grundvoraussetzungen notwendig. Zum einen muss das Material einen niedrigen Emissionsgrad nahe Null (hochreflektierend) im Sonnenspektrum (0,3–2,5 μm) und gleichzeitig einen hohen Emissionsgrad im atmosphärischen Fenster zwischen 8–13 μm erzielen. Die Tageskühlung wird dann erreicht, wenn die abgestrahlte Wärme durch das atmosphärische Fenster größer ist, als die durch Sonnenlicht und atmosphärische Strahlung absorbierte Wärme. [12]

In bisherigen Veröffentlichungen zu textilen Systemen liegt der Schwerpunkt im Bereich des persönlichen Wärmemanagements, der Bekleidung. Die Anwendung spielt bei der Materialauswahl und dem Design eine wichtige Rolle. Um den Körper direkt zu kühlen sind andere materialphysiologische Anforderungen erforderlich, wie wenn durch ein technisches Textil ein Raum oder eine Oberfläche gekühlt werden soll.

Der Mensch gibt Wärme auf drei verschiedenen Wegen an die direkte Umgebung ab. Über Verdunstungskühlung, Konvektion und Strahlungskühlung. Die Strahlungskühlung nimmt mit ca. 60 % den größten Anteil der drei Übertragungswege ein. [15]

Entwicklungen, die sich ausschließlich mit Anwendungen für die direkte Körperkühlung durch Bekleidung beschäftigen, forschen mit thermisch transparenten Materialien, wobei der Körper als emittierende Komponente eingesetzt wird. Die Haut selbst gilt als sehr guter Emitter im mittleren Infrarot (MIR), sodass ein großer Anteil der Körperwärme direkt über die Hautoberfläche an die Umgebung abgegeben wird. [16]

Durch Infrarot-transparente (IR) Kleidung kann die körpereigene Wärmestrahlung schneller an die Umgebungsluft abgegeben werden. Indem zusätzlich im sichtbaren und nahen Infrarot (NIR) reflektierende Materialien, durch beispielsweise Partikel, wie Zinkoxid [17] eingesetzt werden, wird die Solarstrahlung reflektiert und der Körper nicht zusätzlich erhitzt. Bisherige Materialentwicklungen basieren größtenteils auf nanoporösen Polyethylen (PE) [17–19], dass als IR-transparentes Material eingesetzt werden kann. Darüber hinaus gibt es Entwicklungen zu natürlichen Alternativen, wie Chitosan [20].

Eine Temperaturreduktion im Vergleich zum unbehandelten Textil von bis zu 5 °C wurde gemessen [17, 21, 22].

Bisherige Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Gebäudekühlung mit textilen Werkstoffen konzentrieren sich auf spezifische Faserstrukturen [23–26] und textile Trägermaterialien [21, 22] sowie komplexe Mehrschichtaufbauten [26, 27]. Dadurch wird

der Einsatz für hochskalierte industriell hergestellte Außenanwendungen im textilen Bereich stark eingeschränkt bzw. unmöglich. Um möglichst flexibel in der Anwendung zu sein, gilt es eine substratunabhängige Beschichtung für eine Selbstkühlung zu realisieren. Dabei kann unter einer substratunabhängigen Kühlung eine Kühlleistung verstanden werden, die unabhängig von den strahlungsoptischen Eigenschaften des applizierten Substrats ist. Das Substrat nimmt eine untergeordnete Rolle ein und hat keinen funktionalen Einfluss auf die strahlungsbasierte Kühlung. Die strahlungsfunktionalen Eigenschaften werden ausschließlich durch die Beschichtungs- oder Materialkomponenten im Aufbau bestimmt.

Zur Erzielung einer substratunabhängigen Applikation werden bisher hohe Schichtdicken zwischen 400–1000 μm eingesetzt [28, 29] oder zusätzliche Metallschichten [30] in den Materialaufbau integriert. Hohe Schichtaufträge sind für textile Anwendungen im Bereich von Membrandächern oder Zelten nur bedingt einsetzbar. Die Flexibilität nimmt deutlich ab, was sich negativ auf die Faltbarkeit im Membranbau auswirken kann. Zudem führt ein hoher Schichtauftrag zu einem signifikanten Gewichtsanstieg, was insbesondere für Leichtbauteile aus textilen Stoffen nachteilig ist. Darüber hinaus können die erhöhten Materialaufträge zu zusätzlichen Kosten führen. Die Integration eines Metallfilms als zusätzliche Schicht weist wesentliche Nachteile auf: eine reduzierte Haftbarkeit zwischen den Schichtaufträgen, sodass zusätzliche Haftvermittler eingesetzt werden müssen [14], eine Anfälligkeit zur Oxidation, sodass die Reflexionsleistung minimiert wird und zusätzliche Schutzschichten erforderlich werden [31] und die Notwendigkeit komplexer Herstellungsverfahren wie dem Vakuumverdampfen [32], die zeit- und kostenintensiv sind.

Bisher liegt keine ausreichende wissenschaftliche Analyse in Bezug auf substratunabhängige Beschichtungsaufträge auf textilen Materialien vor.

Eine Lösung, die eine flexible Anwendung für verschiedene Szenarien im textilen Bereich, eine einfache Applikation, kostengünstige Herstellung und hohe Skalierbarkeit vereint, ist bisher nicht ausreichend erforscht. Ein Nachweis einer substratunabhängigen Kühlleistung durch die gezielte Untersuchung der Beschichtungskomponenten auf unterschiedlichen Substraten wurde bisher in der Literatur nicht gefunden.

Genau hier setzt das Ziel dieser Arbeit an: Auf Grundlage der im Stand der Forschung beschriebenen und bereits untersuchten Materialsysteme wird ein neuartiges Beschichtungssystem mit spektral selektiven Strahlungseigenschaften auf Basis von niedrig emittierenden und hoch reflektierenden Partikeln zur Erzeugung eines Selbstkühlungseffektes auf textilen Materialien für technische Anwendungsszenarien, wie z.B. für die Gebäudekühlung, entwickelt. Dabei werden Anforderungen, wie eine einfache Applikation, eine hohe Skalierbarkeit und eine substratunabhängige Kühlleistung gestellt und bei der Beschichtungszusammensetzung berücksichtigt.

Zusätzlich werden die Beschichtungskomponenten mit dem Ziel ausgewählt und untersucht, potenzielle Einflüsse des Substrats auf die Strahlungskühlleistung zu minimieren, sodass die Kühlleistung primär von den eingesetzten Beschichtungskomponenten bestimmt und durch deren gezielte Anpassung beeinflusst wird. Darüber hinaus gilt es weitere Faktoren, wie eine hydrophobierende Wirkung sowie Wetter- und UV-Stabilität zu erreichen, um ein möglichst breites Anwendungsszenarium im Außenbereich erschließen zu können.

Die Arbeit entwickelt einen Lösungsansatz für ein selbstkühlendes Textil, dass substratunabhängig ist und damit auf verschiedenen textilen Materialien appliziert und vielfältig eingesetzt werden kann, ohne dabei grundlegende Anforderungen an textiltechnische Systeme zu vernachlässigen. Die Anwendungsbereiche umfassen textile Werkstoffe für Membrandächer, Fassadenelemente, Markisen, Sonnenschirme oder Zeltbau. Weitere Nutzungsmöglichkeiten sind z.B. ein Gletscherschutz, der bisher nur abschirmt und nicht passiv kühlt [33].

2. Stand der Wissenschaft und Technik

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über das Funktionsprinzip der Strahlungskühlung, mögliche Einflussfaktoren auf die Kühlleistung und die bisherigen Materialentwicklungen. Zunächst wird der Begriff der „Kühlung“ allgemein definiert und erläutert. Anschließend wird ein kurzer Überblick über die Wege der Wärmeübertragung mit dem Fokus auf der Wärmestrahlung gegeben. Die physikalischen Grundlagen und das Funktionsprinzip der Strahlungskühlung werden ab Kapitel 2.2 behandelt. Die beschriebenen Formeln zur Berechnung der Kühlleistung und die Prüfmethoden dienen als Grundlage für die Anpassung und Validierung eines Vorhersagemodells und für den Prüfaufbau, der in dieser Arbeit konzipiert wird.

Anschließend werden bisherige Materialentwicklungen im Bereich der Strahlungskühlung analysiert. Zunächst werden kurz die allgemeinen Materialaufbauten und entsprechende Einflussfaktoren auf die Strahlungsleistung beschrieben. Nachfolgend werden strukturabhängige textile Beschichtungssysteme sowie substratunabhängige Aufbauten betrachtet und die Nachteile der bisherigen Entwicklung mit dem Fokus auf textiltechnische Anwendungen herausgearbeitet.

2.1 Kühlung

Kühlung entsteht durch den Entzug von Wärme und kann als „Entwärmung“ bezeichnet werden. Die Temperaturänderung eines Stoffes erfolgt durch den Energieaustausch mit der Umgebung. Dabei erfolgt die Wärmeübertragung durch die thermodynamischen Gesetze begrenzt, immer von dem Stoff mit einer höheren Temperatur zu dem Stoff mit geringerer Temperatur, bis ein thermisches Gleichgewicht eingestellt ist. Dieser Prozess ist ohne zusätzliche Aufwendung von Arbeit nicht umkehrbar. [34]

Es gibt drei unterschiedliche Wege der Wärmeübertragung, die in der Thermodynamik beschrieben und unterschieden werden:

- Wärmeleitung
- konvektiver Wärmeübergang (Wärmeströmung)
- Wärmestrahlung

Die Wärmeleitung findet zwischen zwei direkt benachbarten Teilchen statt. Das können Festkörper oder unbewegte Flüssigkeiten und Gase sein. Dabei wird die Wärme durch schwingende Atome transportiert. Die schwingenden Atome regen benachbarte Atome an und versetzen diese ebenfalls in Schwingung, sodass eine direkte Übertragung stattfindet. Die Konvektion beschreibt die Wärmeübertragung zwischen strömenden Flüssigkeits- oder

Gasteilchen. Die Wärmenergie wird durch die vorbeiströmenden Teilchen mittransportiert. [35]

Bei der Wärmestrahlung erfolgt der Energietransport über elektromagnetische Strahlung. Ein großer Unterschied zu den vorher beschriebenen Arten der Wärmeübertragung besteht darin, dass bei der Wärmestrahlung kein direktes Übertragungsmedium erforderlich ist. Die Wärmestrahlung ist von dem ausgehenden Körper und dessen Temperatur abhängig. [35]

Nachfolgend wird auf die Wärmestrahlung näher eingegangen:

Wärmestrahlung kann im Wesentlichen durch Energieniveauübergänge in der Materie beschrieben werden. Die Energieübertragung erfolgt durch Energieabgabe in Form von elektromagnetischen Wellen, die wiederum aus Energiequanten, den Photonen bestehen. Die temperaturabhängige Emission bzw. Wärmeabgabe kann durch das Planck'sche Gesetz der Schwarzkörperstrahlung beschrieben werden [36]:

$$I_{BB}(T, \lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.1)$$

Darin beschreibt h die Planck'sche Wirkungskonstante ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J/s}$), c die Lichtgeschwindigkeit ($2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$), k die Boltzmann Konstante ($1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$), T die Temperatur in Kelvin und λ die Wellenlänge.

Jeder Körper oder jedes Objekt strahlt Wärme in Abhängigkeit der Temperatur ab. Aufgrund des Planck'schen Gesetztes kann die Strahlungsintensität in Abhängigkeit der Wellenlänge und Temperatur abgebildet werden. Durch die Integration der spektralen Bestrahlungsstärke $I_{BB}(T, \lambda)$ über die Fläche und den gesamten Wellenlängenbereich in Abhängigkeit der Temperatur kann die gesamte Emissionsleistung P , beschrieben durch das Stefan-Boltzmann Gesetz, berechnet werden:

$$P = \varepsilon A \sigma T^4 \quad (2.2)$$

Dabei beschreibt A die Oberfläche des emittierenden Objekts, σ die Stefan Boltzmann Konstante ($5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$) und ε die durchschnittliche Emission des Objekts. ε ist dabei Winkel (θ)- und Spektralabhängig (λ) und kann durch folgende Formel wiedergegeben werden:

$$\varepsilon = \int_0^\infty d\lambda I_{BB} \int_0^{\pi/2} d(\sin^2 \theta) \varepsilon(\theta, \lambda) / \int_0^\infty d\lambda I_{BB} \quad (2.3)$$

Die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers ist damit proportional zur vierten Potenz seiner absoluten Temperatur. Der Schwarzkörper ist ein idealer Körper, der

temperaturabhängig im Gleichgewicht steht und unabhängig der Wellenlänge und des Einfallswinkels die gesamte einfallende Strahlung in Abhängigkeit der Temperatur absorbiert oder emittiert. Kein physikalisches Objekt emittiert oder absorbiert mehr Energie. Bei einem idealen Schwarzkörperstrahler beträgt $\varepsilon = 1$ für alle Winkel und Wellenlängen. Die kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung des Universums kann als ein solcher Schwarzkörper beschrieben werden. [36]

Der schwarze Körper dient im allgemeinen als Referenz. Auf dieser Grundlage beschreibt das Kirchhoff'sche Strahlungsgesetz, dass das Absorptions- und Emissionsvermögen stets proportional zueinander ist. Das bedeutet, dass in einem thermischen Gleichgewicht und für dieselben Frequenzen und Richtungen, der gerichtete spektrale Absorptionsgrad (α'_ν) und der gerichtete spektrale Emissionsgrad (ε'_ν) gleich sind:

$$\alpha'_\nu = \varepsilon'_\nu \quad (2.4)$$

2.2 Funktionsprinzip Strahlungskühlung

Wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, entsteht Kühlung durch den Entzug von Wärme und eine Wärmeübertragung erfolgt vom wärmeren zum kälteren Raum. An der terrestrischen Oberfläche dient die direkte Umgebung als primäre Kältequelle. Die Strahlungskühlung beruht auf dem Prinzip, dass die Wärmeübertragung durch Wärmestrahlung nicht gezielt mit der Umgebung, sondern mit dem deutlich kälteren Weltraum stattfindet und dieser als primäres Kältereservoir genutzt wird.

Dabei spielen die direkte äußere Umgebung und die Atmosphäre eine entscheidende Rolle. Für ein besseres Verständnis werden in der Abb. 2.1 die Strahlungsströme an der terrestrischen Oberfläche schematisch wiedergegeben. Dabei wird die Wechselwirkung zwischen der Umweltstrahlung (Solarstrahlung und von der Erde emittierte Infrarotstrahlung) und der Erdoberfläche aufgezeigt.

Die Umgebungstemperatur auf der Erdoberfläche wird durch die Wechselwirkung zwischen der Sonneneinstrahlung und die von der Erdoberfläche emittierte Infrarotstrahlung mit der Erdatmosphäre bestimmt. [12]

Die auf die Erdoberfläche einfallende kurzwellige Solarstrahlung (0,3–2,5 μm) wird durch Luftmoleküle oder Wolken in der Atmosphäre sowie der Erdoberfläche emittiert, absorbiert, gestreut oder reflektiert. Das gleiche gilt für ausgehende und abgestrahlte Wärmestrahlung im mittleren Infrarotbereich (2,5–20 μm).

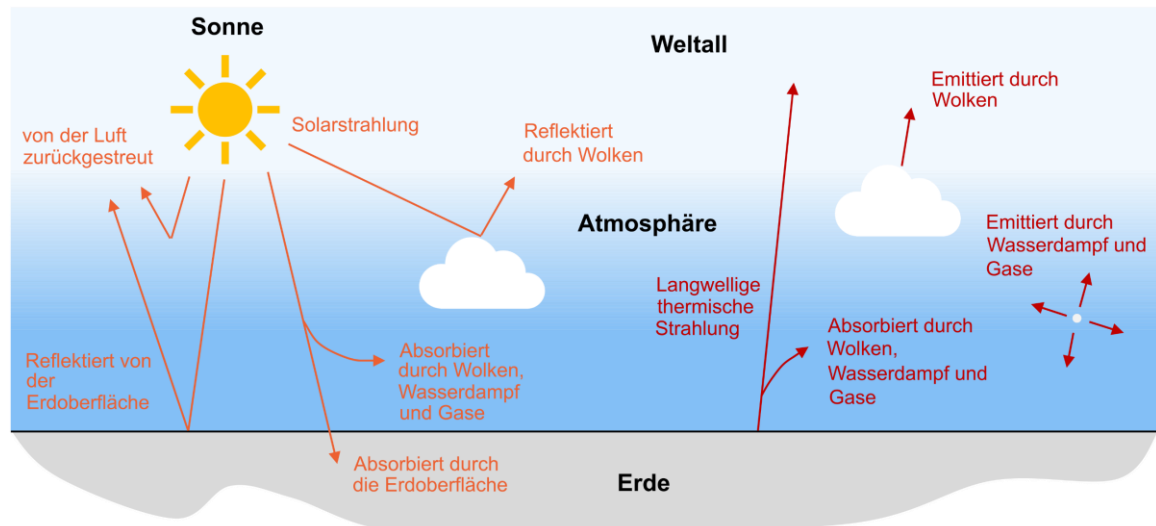


Abb. 2.1 Schematische Darstellung der Strahlungsströme an der terrestrischen Oberfläche.
 Unterteilt in eintreffende Solarstrahlung zw. 0,3–2,5 µm (orange) und ausgehender Wärmestrahlung zw. 2,5–20 µm (rot) (In Anlehnung an [12])

Die Tab. 2.1 definiert die in dieser Arbeit häufig verwendeten Strahlungsbegriffe und gibt die spezifischen Wellenlängenbereiche wieder, die in den folgenden Kapiteln dieser Arbeit bei Analysen und Beschreibungen eine wichtige Rolle spielen.

Tab. 2.1 Definitionen und Wellenlängenbereiche der Strahlungsbegriffe.

Begriffe	Definition	Wellenlängenbereich
UV-Bereich (UV)	Ultraviolette Strahlung (Anteil eintreffender Solarstrahlung ca. 3–5 %)	0,3–0,4 µm
Sichtbarer Bereich (Vis)	Bereich, der für das menschliche Auge sichtbar ist (Anteil eintreffender Solarstrahlung ca. 42–43 %)	0,4–0,9 µm
Nahes Infrarot (NIR)	Thermische Strahlung im kurzwelligen Infrarot (Anteil eintreffender Solarstrahlung ca. 52–55 %)	1,0–2,5 µm
Mittleres Infrarot (MIR)	Thermische Strahlung im langwelligen Infrarot	2,5–20 µm
Atmosphärisches Fenster	Bereich in der Atmosphäre, der transparenter für langwellige Strahlung ist	8–13 µm
Solare Reflexion (Rsolar)	Reflexion der eintreffenden Solarstrahlung	0,3–2,5 µm
Reflexion	Von einer Oberfläche reflektierte Strahlung	-
Transmission	Von einer Oberfläche durchgelassene, transmittierte Strahlung	-
Absorption	Von einer Oberfläche absorbierte Strahlung	-
Emission	Von der Oberfläche emittierte Strahlung	-

Die Strahlungskühlleistung eines Materials, das der Atmosphäre ausgesetzt ist, wird maßgeblich durch die beschriebenen Einflussfaktoren der Umgebungsbedingungen, der Solareinstrahlstärke und der Emissionsleistung des Materials beeinflusst.

Die Kühlleistung $q_{cooling}$ in W/m² kann in einer Netto-Strahlungsbilanzierung (2.5), wie folgt wiedergegeben werden [12, 37]:

$$q_{cooling} = q_{rad} - q_{solar} - q_{atm} - q_{nonrad} \quad (2.5)$$

Dabei beschreibt q_{rad} die thermische Infrarotstrahlung des Strahlungskühlmaterials, q_{solar} die Absorption der Solarstrahlung, q_{atm} die Absorption der abwärts gerichteten atmosphärischen Wärmestrahlung und q_{nonrad} die Absorption von Wärme durch Konvektion oder Konduktion.

Die einzelnen Parameter werden in den folgenden Unterkapiteln näher erläutert.

2.2.1 Atmosphärisches Fenster

Die atmosphärische Strahlung setzt sich aus den einzelnen Absorptionsspektren der in der Atmosphäre befindlichen Gase und Moleküle, wie Stickstoff (N_2), Sauerstoff (O_2), Wasser (H_2O), Kohlenstoffdioxid (CO_2) und Ozon (O_3) zusammen. Diese Moleküle absorbieren und emittieren Strahlungsenergie der Sonne oder der von der Umgebung und Erdoberfläche abgestrahlten Strahlung und beeinflussen damit das Gesamtaborptionsspektrum der Atmosphäre. Einige Gase, wie H_2O oder CO_2 weisen dominante Emissions- bzw. Absorptionseigenschaften auf und absorbieren Strahlung in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen. [12]

Im mittleren Infrarot zwischen 8–13 μm liegt das sogenannte atmosphärische Fenster. In diesem Bereich wird emittierte Strahlung kaum durch in der Atmosphäre befindliche Moleküle und Gase gestreut, absorbiert oder reflektiert. Der Wärmeaustausch findet weitgehend ungehindert mit dem kalten Weltraum statt, da hier die Atmosphäre hohe Transmissionswerte aufzeigt. [38]

Gleichzeitig liegt der Peak des Emissionsspektrums eines schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 300 K, die der Umgebungstemperatur an der terrestrischen Oberfläche entspricht, im Bereich des atmosphärischen Fensters (vgl. Abb. 2.2). Das Maximum der Wärmeabgabe liegt also bei $T = 300\text{ K}$ zwischen 8–13 μm .

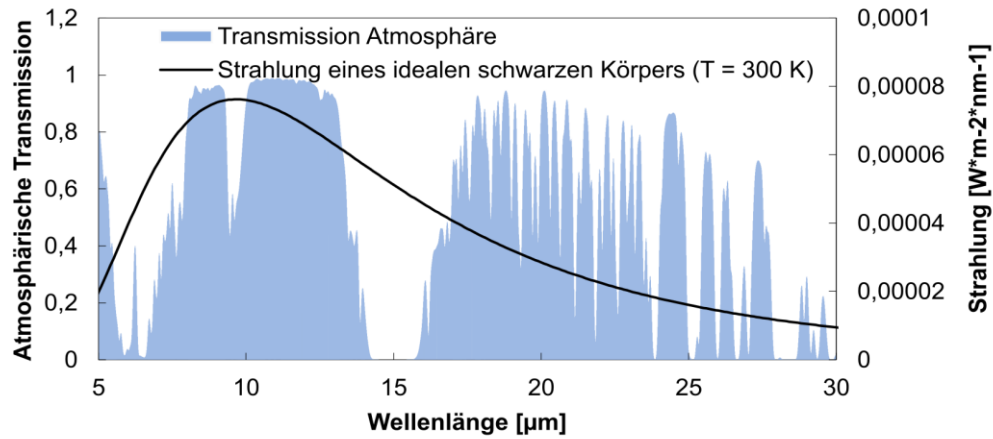


Abb. 2.2 Atmosphärisches Transmissionsspektrum und Schwarzkörperstrahlung eines Objekts bei T = 300 K.

Der Wellenlängenbereich zwischen 8–13 μm wird aufgrund des hohen Transmissionsgrades als atmosphärisches Fenster bezeichnet. Das Spektrum stimmt gut mit der Kurve der Schwarzkörperstrahlung bei einer Temperatur von 300 K überein. Ein sekundäres, atmosphärisches Transmissionsfenster liegt zwischen 16–25 μm .

(Atmosphärisches Transmissionsspektrum: Luftmasse: 1,0; Wasserdampfsäule: 1,0 mm; Mauna Kea Sky Transmission [39])

2.2.2 Absorption atmosphärischer Strahlung

Die von einer bodennahen Oberfläche absorbierte atmosphärische Gegenstrahlung kann durch die Integration der spektralen Strahlungsdichte über das gesamte Spektrum und die Hemisphäre durch die folgende Gleichung (2.6) ausgedrückt werden:

$$q_{atm}(T_{amb}) = \int \cos\theta d\Omega \int_0^\infty I_{BB}(T_{amb}, \lambda) \varepsilon_r(\lambda, \Omega) \varepsilon_{atm}(\lambda, \Omega) d\lambda \quad (2.6)$$

Wobei $d\Omega = \int_0^{\pi/2} d\theta \sin\theta \int_0^{2\pi} d\phi$ die Integration des Raumwinkels über die Hemisphäre beschreibt, $I_{BB}(T_{amb}, \lambda)$ die Plank'sche Schwarzkörperstrahlung bei einer Temperatur T_{amb} (vgl. Formel (2.1)) wiedergibt, $\varepsilon_r(\lambda, \theta)$ der Emissionsgrad der Oberfläche in Abhängigkeit von Winkel und Wellenlänge ist und $\varepsilon_{atm}(\lambda, \Omega)$ den Emissionsgrad der Atmosphäre in Abhängigkeit von Richtung und Wellenlänge beschreibt. T_{amb} ist hier die absolute Lufttemperatur in Bodennähe und wird zur Charakterisierung der atmosphärischen Strahlung verwendet. [12]

Der Emissionsgrad der Atmosphäre ε_{atm} wird durch weitere Faktoren, wie dem Zenitwinkel [40, 41], der Luftfeuchtigkeit [42], der Wolkendichte [43], des Breitengrades [44], der Aerosole [45] und der saisonalen Veränderung [46] beeinflusst. Um den Emissionsgrad möglichst exakt bestimmen zu können, kann ein Modell zur näheren Beschreibung der Einflussfaktoren eingesetzt werden. Eine Möglichkeit bietet die auf dem

Transmissionsgrad basierende Cosinusnäherung, die erstmals durch Granqvist und Hjortsberg beschrieben wurde [47].

Hier wird der atmosphärische Emissionsgrad als Funktion des Zenitwinkels ausgedrückt [48, 49]. Unter der Annahme, dass die optische Tiefe der Atmosphäre mit dem Zenitwinkel θ im Verhältnis $1/\cos\theta$ zunimmt, kann $\varepsilon_{atm}(\lambda, \theta)$ für jeden Zenitwinkel durch $\varepsilon_{atm}(\lambda, \theta) = 1 - (1 - \varepsilon_{atm}(\lambda, 0))^{1/\cos\theta}$ beschrieben werden [47].

Bei kleinen Zenitwinkeln zeigt der Emissionsgrad keine großen Unterschiede auf, bei großen Zenitwinkeln liegt dieser nahe Eins [12].

Ein weiterer Faktor, der den Emissionsgrad der Atmosphäre und damit die Kühlleistung stark beeinflusst, ist die Luftfeuchtigkeit, ausgedrückt durch PW (engl. = precipitable water (ausfällbares Wasser)) in Millimeter. Bei steigender Luftfeuchtigkeit nimmt der atmosphärische Emissionsgrad zu und verringert damit die Strahlungskühlleistung. [50]

Untersuchungen an verschiedenen Orten zeigen den Einfluss der Luftfeuchtigkeit und die starke Abhängigkeit der Kühlleistung von klimatischen Umgebungsbedingungen und geographischer Lage [42, 48, 50, 51]. Der Emissionsgrad der Atmosphäre wird in Abhängigkeit der Wellenlänge, des Zenitwinkels und PW angegeben durch $\varepsilon_{atm}(\lambda, \theta, PW)$.

Um die spektrale, atmosphärische Emission in Abhängigkeit der genannten Umgebungsbedingungen und für einen bestimmten Standort annähernd zu beschreiben, kann diese entweder durch Strahlungsmessungen ermittelt oder mittels Wettermodellen berechnet werden, wie LOWTRAN [52], MODTRAN [53, 54] oder ATRAN [39] sie nutzen, die auf bodennahen meteorologischen Daten basieren und in der Literatur primär Anwendung finden.

2.2.3 Absorption solarer Strahlung

Am Tag beeinflusst die Solareinstrahlstärke die Kühlleistung maßgeblich. Eine zu starke Absorption der Solarstrahlung durch das Kühlmaterial vermindert die Kühlung deutlich.

Die Spektralverteilung der Sonne oberhalb der Atmosphäre entspricht der eines schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 5800 K. Auf dem Weg durch die Atmosphäre zur Erdoberfläche wird das Sonnenspektrum durch die Streuung und Absorption der in der Atmosphäre befindlichen Teilchen (vgl. Abb. 2.1) ungleichmäßig abgeschwächt, sodass sich die spektrale solare Bestrahlungsstärke $I_{solar}(\lambda, T)$ stark von dem eines Schwarzkörperspektrums unterscheidet. Die Abschwächung und damit die Abweichung ist umso größer, je mehr Atmosphäre das Sonnenlicht durchquert. $I_{solar}(\lambda, T)$ berücksichtigt die relative optische Weglänge durch die Atmosphäre und kann durch ein Modell unter Verwendung eines spezifischen Luftmassenkoeffizienten (AM) berechnet werden. [55]

Dieser wird als Verhältnis zur Weglänge senkrecht nach oben, also zum Zenit, ausgedrückt, sodass das Sonnenspektrum nach dem Durchgang durch die Atmosphäre charakterisiert werden kann. AM 1.5 steht für den solaren Zenitwinkel (θ) = 48.2° und repräsentiert damit die durchschnittliche Atmosphäre in mittleren Breitengraden, wozu auch Europa zählt. [12]

Die von der Materialoberfläche absorbierte Solarstrahlung wird damit berechnet durch [12]:

$$q_{solar} = \cos\theta \int_0^{\infty} \varepsilon_r(\theta, \lambda) I_{solar}(\lambda, T) d\lambda \quad (2.7)$$

Wobei θ den Winkel zwischen der Einfallsrichtung der Solarstrahlung und der Normalenrichtung der Oberfläche, ε_r den Emissionsgrad der Oberfläche in Abhängigkeit von Winkel und Wellenlänge und I_{solar} die direkte spektrale solare Bestrahlungsstärke, abgeleitet vom Sonnenspektrum AM 1.5 (ASTM G173-03) (vgl. Abb. 2.3), beschreibt.

Um eine ausreichende Kühlung auch am Tag zu erreichen, muss es das Ziel sein, eine spektralselektive Oberfläche zu entwickeln, die im Sonnenspektrum ($\lambda = 0,3\text{--}2,5 \mu\text{m}$) einen niedrigen Emissionsgrad nahe Null (hochreflektierend) und gleichzeitig einen hohen Emissionsgrad im mittleren Infrarotbereich aufweist.

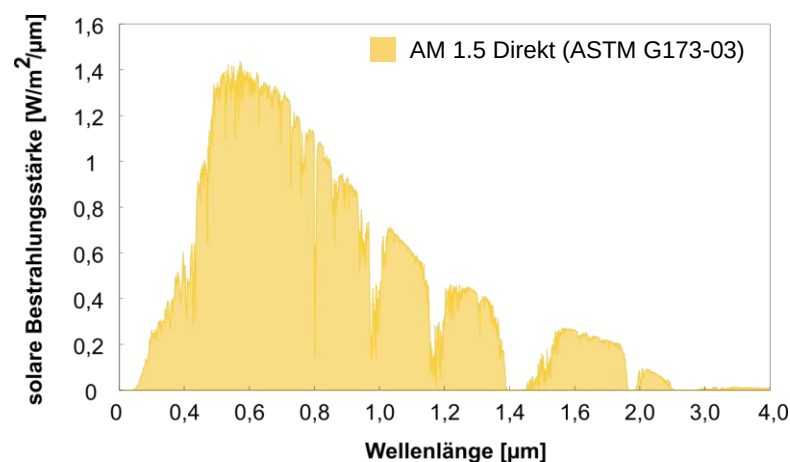


Abb. 2.3 Solare spektrale Bestrahlungsstärke bei Luftmasse AM 1.5 (Direkt) [56].

Die Solarstrahlung wird bei dem Durchgang durch die Atmosphäre durch Streuung und Absorption an atmosphärischen Bestandteilen beeinflusst. Das Spektrum liegt konzentriert im kurzwelligen Bereich (0,3–2,5 μm) mit einem Peak bei ca. 0,5 μm .

2.2.4 Abstrahlung der textilen Oberfläche

Bei einer Temperatur T kann die Abstrahlung textiler Oberflächen durch das Integrieren der thermischen Emission über alle Wellenlängen und Richtungen berechnet werden [12]:

$$q_{rad} = \int \cos \int_0^\infty \epsilon_r(\lambda, \Omega) I_{BB}(\lambda, T_r) d\lambda \quad (2.8)$$

Hier beschreibt Ω den Winkel zwischen der Strahlungsrichtung und der Normalen zur Oberfläche, ϵ_r ist der Emissionsgrad der Oberfläche in Abhängigkeit der Wellenlänge und Richtung und I_{BB} beschreibt die Schwarzkörperstrahlung in Abhängigkeit der Wellenlänge und Temperatur (vgl. Formel (2.1)).

Der Emissionsgrad der Oberfläche ist die Variable, die durch materialphysiologische Veränderungen beeinflusst werden kann. In der Literatur und aus den oben genannten zu berücksichtigenden Einflussfaktoren können zwei ideale Spektralverläufe beschrieben und unterschieden werden, die es gilt annähernd zu erzielen.

Unterschieden wird in den spektral selektiven und den Breitband Verlauf. Der Unterschied bezieht sich auf die Absorptions- bzw. Emissionsleistung der Materialoberfläche vor allem im mittleren Infrarotbereich (MIR). Ein selektiver Strahlungskühler weist eine hohe Emissionsleistung (nahe 1) lediglich im atmosphärischen Fenster (zwischen 8–13 μm) auf. In allen anderen Wellenlängenbereichen liegt die ideale Absorption nahe Null. Bei einem breitbandigen Strahlungskühler liegt die Absorption im solaren Bereich auch nahe Null. Im gesamten mittleren Infrarot (zwischen 2,5–20 μm) ist sie dagegen nahe 1.

In der Abb. 2.4 werden beide Idealverläufe des kühlenden Materials schematisch dargestellt.

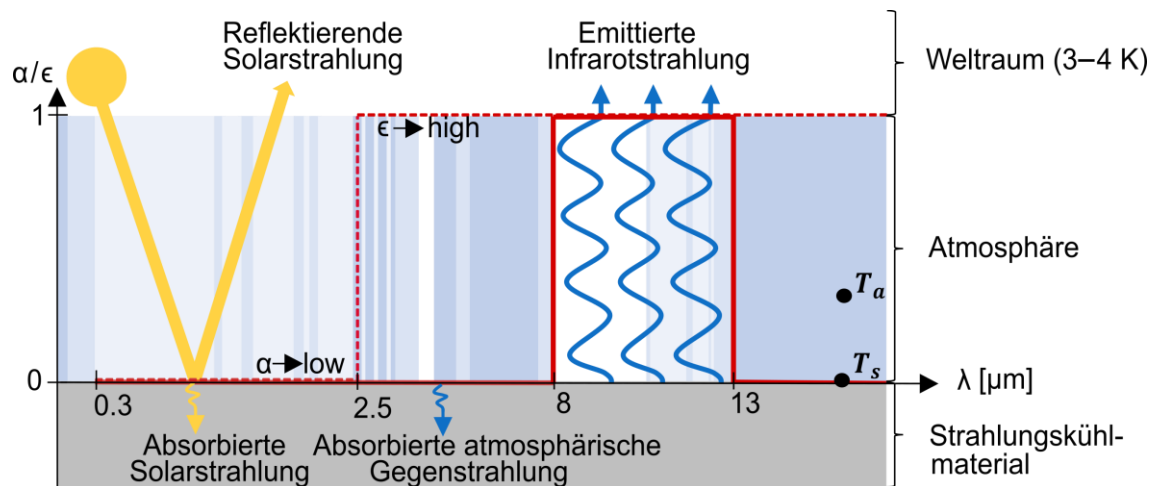


Abb. 2.4 Schematische Darstellung idealer Spektralverläufe eines Strahlungskühlmaterials in Abhängigkeit der Wellenlänge.

Das Kühlmaterial weist die Temperatur T_s und die Umgebung die Temperatur T_{amb} auf. Die Atmosphäre besteht aus Bereichen mit hoher Transparenz (hellblaue Bereiche) und mit niedriger Transparenz (dunkelblaue Bereiche). Die roten Linien zeigen die spektrale Absorption/Emission idealisierter Strahlungskühlungsmaterialien (gestrichelt rot = breitbandiger Verlauf; durchgehend rot = selektiver Verlauf). (In Anlehnung an [57])

Nach dem Kirchhoff'schen Gesetz gilt, dass der spektrale Emissionsgrad dem spektralen Absorptionsgrad bei thermischem Gleichgewicht entspricht. Das führt dazu, dass bei einem Breitbandstrahler Strahlung aus der direkten Umgebung und ein Anteil der atmosphärischen Gegenstrahlung absorbiert werden, was zu einer Reduzierung der Kühlleistung führt. Um den Strahlungsfluss zu vermindern, kann der Spektralverlauf selektiv gestaltet werden, sodass eine hohe Emission lediglich im atmosphärischen Fenster stattfindet. Im Vergleich der Temperatur- und Kühlleistung beider Idealverläufe kann festgestellt werden, dass mit einem selektiven Material eine größere Temperaturreduktion unterhalb der Umgebungstemperatur erzielt werden kann, also bei $T_s - T_{amb} \leq 0$. Die Nettokühlleistung bei $T_s - T_{amb} \geq 0$ ist dagegen für einen Breitbandstrahler größer, was auf die höhere Gesamtemissionsleistung zurückzuführen ist. Damit erreicht ein Breitbandstrahler bei Temperaturen nahe der Umgebungstemperatur höhere Kühlleistungen, als ein selektiver Strahler. Welcher Verlauf bei der Materialherstellung berücksichtigt werden sollte, hängt von dem jeweiligen Anwendungsszenarium ab. [12, 47]

Für die meiste Zeit kann mit einem Breitbandstrahler eine hohe Kühlleistung aufgrund der hohen Effizienz durch die größere Gesamtemissionsleistung erzielt werden. Als Breitbandstrahler können struktur- und materialabhängig auch Textilien bezeichnet werden.

Textile Materialien stellen bei der Berechnung der Kühlleistung eine weitere Herausforderung dar. In Abhängigkeit des strukturellen Aufbaus und des Materialdesigns können unbeschichtete Textilien als teiltransparente Materialien definiert werden.

Auf Grundlage der spektralen Untersuchung wird die spektrale Absorption $\alpha(\lambda)$ aus der spektralen Transmission $T(\lambda)$ und der spektralen Reflexion $R(\lambda)$ durch $R(\lambda) + T(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1$ berechnet. Der Emissionsgrad der Oberfläche ε_r kann basierend auf dem Kirchhoff'schen Gesetz durch $\varepsilon_r(\lambda) = \alpha(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda)$ ermittelt werden. Basierend auf dieser Berechnung weisen Materialien mit hohen Transmissionswerten eine vergleichbare Kühlleistung wie Materialien mit hohen Reflexionswerten auf. Insbesondere Materialien mit einem moderaten Reflexions- und Transmissionsgrad im Solarbereich, zu denen teiltransparente Textilien zählen, absorbieren nur wenig Sonnenstrahlung, was zu einer hohen theoretischen Kühlleistung führen kann.

Im Anwendungskontext von z.B. Gebäudehüllen, Autoabdeckungen oder Zelten führt das allerdings zu keiner signifikanten Temperaturreduktion (vgl. Abb. 2.5). Ein Teil der Solarstrahlung transmittiert, was dazu führt, dass der Hintergrund die Gesamtkühlleistung erheblich beeinflussen kann und der Raum unterhalb des Textils am Tag erwärmt wird.

Im Extremfall eines schwarzen Untergrundes, der einem schwarzen Körper entspricht und damit die solare Strahlung am Tag stark absorbiert, darf die solare Transmission des drüber

liegenden Kühlmaterials nicht größer als 0,2 sein, sonst ist eine Strahlungskühlung nicht möglich. [58]

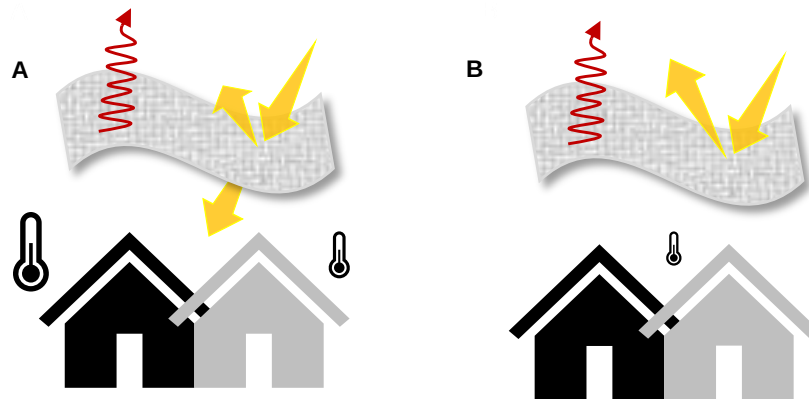


Abb. 2.5 Schematische Darstellung der Unterschiede zwischen teiltransparenten und opaken Materialien.

A Die Solarstrahlung transmittiert am Tag durch ein teiltransparentes Textil. Das darunter liegende Gebäude wird in Abhängigkeit des Untergrundes unterschiedlich stark erwärmt;
B Die Solarstrahlung kann bei opaken Proben nicht transmittieren, sodass die Kühlleistung unabhängig vom Untergrund ist.

Für opake Proben gilt $T(\lambda) = 0$, sodass $\varepsilon_r(\lambda)$ durch $\varepsilon_r(\lambda) = 1 - R(\lambda)$ berechnet werden kann. [59, 60]

2.2.5 Wärmeübertragung durch Konvektion/Konduktion

Zusätzlich zu der Strahlungskühlleistung üben weitere Wärmeübertragungswege, wie die Konvektion und Konduktion einen Einfluss auf die gesamte Strahlungskühlleistung des Materials aus. Der Wärmeverlust durch Konvektion und Konduktion wird durch die folgende Formel wiedergegeben:

$$q_{nonrad} = h_{nonrad}(T_{amb} - T_s) \quad (2.9)$$

h_{nonrad} beschreibt den Gesamtwärmeübergangskoeffizienten der Konduktion- und Konvektionswärmeübertragung zwischen der Umgebung (T_{amb}) und des Strahlungskühlmaterials (T_s). h_{nonrad} kann experimentell oder mathematisch ermittelt werden. Der Koeffizient wird nicht von Wetterbedingungen beeinflusst. [61]

Generell kann durch das Design des Prüfaufbaus zur Messung der tatsächlichen Kühlleistung die zu vermessene Probe vor äußeren Wärmeeinflüssen und parasitären Wärmeübertragungen durch Konvektion und Konduktion geschützt werden, sodass die Kühlung alleine auf das Prinzip der Strahlungskühlung zurückzuführen ist.

In der Literatur können verschiedene Aufbauten gefunden werden. Es gibt Untersuchungen mit vakuumbasierten Systemen [62, 63] oder zusätzlichen Konvektionsschildern [64]. Durch den idealisierten Aufbau können extreme Temperaturreduktionen von bis zu 42 °C [63] unterhalb Umgebungstemperatur gemessen werden, allerdings entspricht das keiner realistischen Darstellung in Bezug auf die Endanwendung.

In den meisten Forschungsarbeiten wird daher auf Systeme mit Vakuum verzichtet. Um dennoch die Strahlungskühlleistung ohne konduktive oder konvektive Wärmeverluste messen zu können, werden die Messsysteme isoliert und je nach Anwendungsfall durch die zusätzliche Applikation eines Konvektionsschildes aus z.B. einer dünnen Polyethylen Folie (PE) vor Wind geschützt [65].

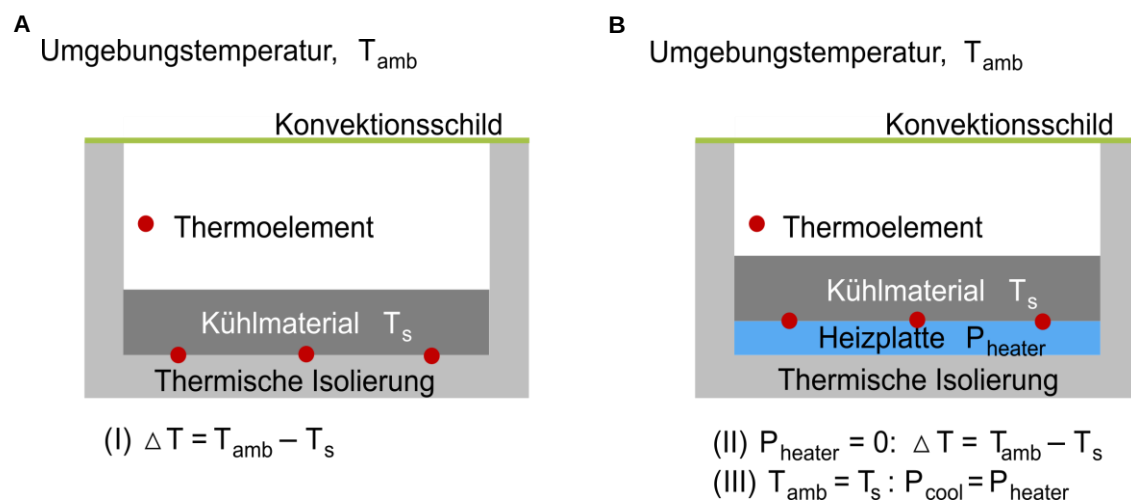


Abb. 2.6 Schematische Darstellung der Prüfaufbauten und Messmethoden zur Ermittlung der Kühlleistung in °C und W/m² (in Anlehnung an [66]).

A Messung der Temperaturreduktion (ΔT) der Kühlprobe (T_s) im Vergleich zur Umgebungstemperatur (T_{amb}); **B** Messung der Kühlleistung P_{cool} in °C ($P_{heater} = 0, \Delta T = T_{amb} - T_s$) und in W/m² ($T_{amb} = T_s, P_{cool} = P_{heater}$)

In der Abb. 2.6 sind schematisch zwei verschiedene Messaufbauten dargestellt, die in der Literatur beschrieben werden. Die Probe ist zum Himmel ausgerichtet. Durch die Isolation der Probe von der Seite und zum Boden spielen konduktive Strahlungsströme und die Abstrahlung von der direkten Umgebung eine verminderte Rolle, das Windcover schützt vor zusätzlicher Konvektion.

Die Kühlleistung kann durch verschiedene Methodiken ermittelt werden. Bei der ersten Methode (I) wird die Temperatur der Kühlprobe und die der Lufttemperatur gemessen, um die Kühlleistung in Bezug auf die Umgebungstemperatur in Grad Celsius darzustellen.

Durch das Implementieren einer Heizplatte kann die Heizleistung dynamisch, schrittweise an die Temperatur der Umgebung angepasst werden. [14]

In der Methode (II) wird die Heizleistung P_{heater} auf Null gesetzt, sodass die maximale Temperaturreduktion der Probe gemessen werden kann ($\Delta T = T_{\text{amb}} - T_s$). Zur Messung der Kühlleistung in W/m^2 wird in der Methode (III) die Temperatur des Kühlmaterials durch ein Rückkopplungssystem auf dem konstanten Niveau der Umgebungstemperatur gehalten ($T_{\text{amb}} = T_s$), sodass die Nettokühlleistung (P_{cool}) durch die initiierte Heizleistung ermittelt ($P_{\text{cool}} = P_{\text{heater}}$) werden kann. [66]

Da die Kühlleistung und Temperaturreduktion stark von Umgebungsbedingungen abhängig sind, gibt es keine standardisierte Prüftechnik, um die Funktionalität verschiedener Materialien vergleichen zu können. Die einzige Möglichkeit des Vergleichs, besteht darin mehrere Messaufbauten zu konzipieren, sodass unter den identischen Wetterverhältnissen verschiedene Materialien parallel vermessen werden können.

2.3 Materialentwicklung

Um eine effektive Kühlung zu erzielen, müssen die Materialien ein Emissionsspektrum $\varepsilon(\theta, \lambda)$ aufweisen, dass den idealen Spezifikationen, die im vorigen Abschnitt 2.2 beschrieben wurden, entsprechen.

Seit der Veröffentlichung des Papers „Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight“ von Raman *et al.* (2014) und dem damit zusammenhängenden Nachweis, dass das Funktionsprinzip der Strahlungskühlung auch am Tag trotz Solarstrahlung funktionieren kann, hat sich die Forschung und damit die Materialentwicklung stetig weiterentwickelt. Abb. 2.7 zeigt am Beispiel der Veröffentlichungen, die in der Datenbank PubMed gelistet sind, die stetige Zunahme von Publikationen unter dem Begriff engl.: „radiative cooling“ (Strahlungskühlung) speziell ab dem Jahr 2014.

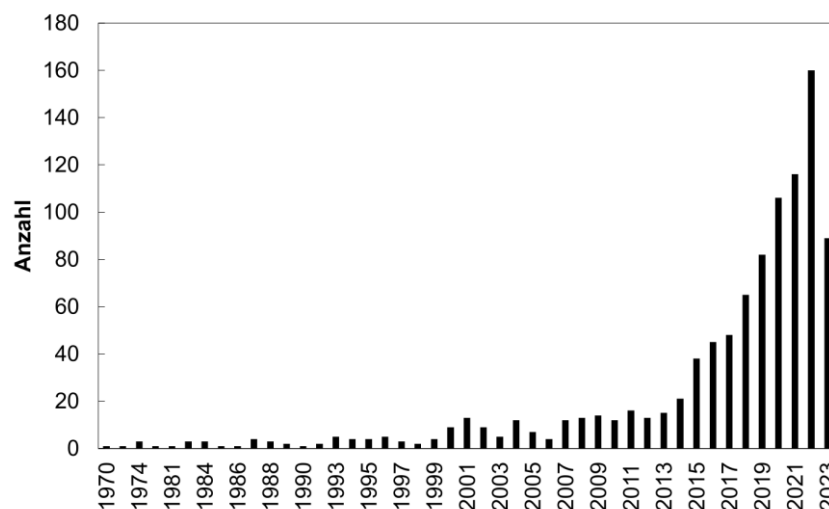


Abb. 2.7 Anzahl der Publikationen veröffentlicht zwischen 1970–2023.

Unter dem Suchbegriff „radiative cooling“. Daten aus [67] bis einschließlich Juni 2023.

Die Abbildung zeigt auch auf, dass das Thema der energiefreien Kühlung durch das Prinzip der Strahlungskühlung in der Forschung einen immer wichtigeren Stellenwert einnimmt. In dieser Arbeit werden Publikationen bis einschließlich Juni 2023 berücksichtigt.

Bis heute gibt es unterschiedliche materialtechnische Herangehensweisen, um eine energiefreie Strahlungskühlung zu realisieren. Bisherige, im Stand der Forschung beschriebene Materialentwicklungen, lassen sich in die folgenden vier Kategorien einteilen:

- (1) 1D photonische Strukturen
- (2) 2D/3D photonische Strukturen
- (3) Poröse Materialien
- (4) Partikelintegration

(1 und 2) Photonische Strukturen

Photonische Strukturen, ob eindimensional oder mehrdimensional, können als photonische Kristalle beschrieben werden. Als photonische Kristalle werden periodische Strukturen aus Materialien mit unterschiedlichen Brechungsindizes $n(\vec{r})$ definiert. Je nach Anzahl der Raumrichtungen in die der Brechungsindex moduliert, werden photonische Kristalle in 1D-, 2D- und 3D-Kristalle unterteilt. [68]

Der Brechungsindex ist stets positiv und variiert räumlich periodisch, sodass ein eindimensionaler Sperrbereich, die sogenannte Bandlücke entsteht. Die Bandlücke ist ein Frequenzbereich von elektromagnetischer Strahlung, die nicht durch das Medium propagieren kann. Damit werden auftreffende, elektromagnetische Wellen aufgrund der Brechungsindexvariation gezielt gestreut. [69]

Die Dicke der Schichten und der Einfallswinkel der Strahlung spielen eine entscheidende Rolle. Die Schichten und Strukturen weisen Dicken im Nanometerbereich bis zu wenigen Mikrometern auf [14, 37, 70–72]. Trifft ein Photon auf den photonischen Film und entspricht die Energie des Photons dem erlaubten Band, kann das Photon ungehindert propagieren. Es wird ein optischer Filter erzeugt. [68]

Photonische Strukturen sind stark winkelabhängig und benötigen hoch präzise Herstellungsverfahren wie z.B. die Fotolithographie oder Plasmaätzung und plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung. [37, 70, 72]

Bisher gibt es keine textile Lösung, die auf photonischen Strukturen basiert. Textilien und textile Substrate weisen eine durch die Faserablagerung bedingte spezielle strukturelle Oberfläche auf. Ein stark winkelabhängiger Schichtauftrag mit Schichtdicken von wenigen Nanometern durch präzise Herstellverfahren, wie die Hochpräzisionslithographie ist mit

hohen Kosten und Aufwand verbunden und lässt sich auf großen Flächen kostengünstig und damit wirtschaftlich nicht umsetzen. Damit wird ein Einsatz im großen Maßstab eingeschränkt. Einfachere Prozessmethoden sind erforderlich.

(3) Poröse Materialien

Wenn Strahlung auf ein Medium trifft, wird diese entweder absorbiert, transmittiert, gestreut oder an der Grenzfläche reflektiert. Die Stärke der Lichtstreuung hängt von Brechungsindexunterschieden der Materialien und den Porengrößen ab.

Durch Lufteinschlüsse in z.B. einer Polymermatrix treten Brechungsindexunterschiede zwischen Luft und dem umgebenden Material auf. Transmittiert der Lichtstrahl durch ein Material mit einem optisch dichteren Medium und trifft auf ein Material mit einem optisch dünneren Medium wird der Strahl gebrochen oder reflektiert. In Abhängigkeit des Einfallswinkels des eintreffenden Lichtstrahls kann eine Totalreflexion auftreten. Der Lichtstrahl wird beim Auftreffen auf ein optisch dünneres Medium im gesamten reflektiert. Je größer der Unterschied der optischen Dichten der Materialien bzw. der Brechungsindizes, desto größer der Winkelbereich für eine Totalreflexion. [73]

Durch die Materialauswahl des Matrixmaterials und der Porengrößeneinstellung kann Einfluss auf das zu reflektierende Licht genommen werden. Entspricht die Porengrößenverteilung der Wellenlängenverteilung des Sonnenspektrums ($\lambda = 0,25\text{--}2,5\ \mu\text{m}$), tritt Mie-Streuung auf. Eine breite Porengrößenverteilung kann zu einer verstärkten Streuung des einfallenden Lichts führen, was wiederum die Absorption der Sonnenstrahlung durch die Beschichtung minimiert und damit die Kühlleistung verstärkt. [74]

Poröse Systeme werden bisher in der Forschung hauptsächlich im Zusammenhang mit polymeren Beschichtungssystemen beschrieben. Dafür werden verschiedene Herstellmethoden, wie die Phasenseparation genutzt, die auf der Verdampfung von Lösemittel und Wasser basiert. [64, 75]

Im textilen Bereich werden poröse Strukturen u.a. durch die wirre Faserablagerung bei der Spinnvliesherstellung durch z.B. Nassvliesspinnen oder dem Elektrospinnen erzeugt. [22, 24–26, 60, 76, 77]

Auch poröse Fasern können durch das Elektrospinnen gewonnen werden, sodass die Streupunkte nicht nur auf der Gewebestruktur selbst basieren. [24]

(4) Partikelintegration

Der Streumechanismus durch die Partikelintegration basiert auf dem gleichen Prinzip, wie das der porösen Systeme. Die Lufteinschlüsse werden hier durch Partikel ersetzt. Auch hier

spielt der Brechungsindexunterschied zwischen Partikel- und Matrixmaterial eine Rolle. Über die Partikelgrößenverteilung kann Einfluss auf die wellenlängenabhängige Reflexion genommen werden. Mie-Streuung tritt auf, wenn die Partikelgröße bzw. Streuzentren der Größenordnung von λ entsprechen oder darüber liegen. Ist die Größe der Streuzentren kleiner als λ tritt die sogenannte Rayleigh-Streuung auf. [78]

Über weitere Einflussfaktoren, wie die Partikelverteilung, Partikelkonzentration oder die spezifische Materialauswahl, kann die Streueffizienz und damit die solare Reflexion weiter erhöht und wellenlängenabhängig angepasst werden. [79]

Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten liegt im Bereich von Farben und Filmen, die entsprechend hohe Partikelkonzentrationen aufweisen. [28, 59, 80]

Zu den untersuchten Partikelsystemen gehören Bariumsulfat (BaSO_4) [28], Siliziumdioxid (SiO_2) [59, 81, 82], Titandioxid (TiO_2) [59, 83–86], Aluminiumoxid (Al_2O_3) [76, 87] oder Calciumcarbonat (CaCO_3) [88].

TiO_2 weist den höchsten Brechungsindex unter diesen Materialien auf, sodass bei gleicher Konzentration eine höhere Streueffizienz gegenüber anderer Partikelsystemen erzielt werden kann. Damit sind geringere Schichtdicken bei gleichzeitig hoher Opazität erreichbar. [30]

Als Matrixmaterial werden verschiedene Polymersysteme eingesetzt. Viele Polymere, wie Polytetrafluorethylen (PTFE) [89, 90], Polydimethylsiloxan (PDMS) [83, 85, 90, 91], Polyvinylidenfluorid (PVDF) [92] oder Polymethylmethacrylat (PMMA) [65] weisen eine breite intrinsische Selektivität im infraroten Bereich auf.

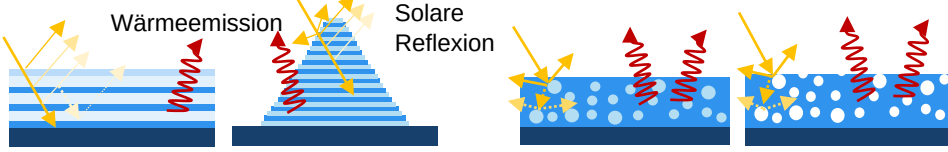
Grundlage dafür ist der sogenannte „Fingerabdruck“ der Polymere, der basierend auf den funktionellen Gruppen, wie C-O-C, oder Si-O-Si, im atmosphärischen Fenster liegt. [93]

Dadurch können auf Basis dieser Materialien hohe Emissionswerte nahe eins zwischen $\lambda = 8\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$ erzielt werden.

Poröse Systeme und die Partikelintegration gewinnen immer mehr an Bedeutung aufgrund der Vorteile einer einfachen und kostengünstigen Herstellung, einer damit verbundenen Skalierbarkeit und einer zuverlässigen sowie wirtschaftlichen Produzierbarkeit (vgl. Tab. 2.2).

Tab. 2.2 Übersicht der Materialentwicklungen in der Strahlungskühlung unterteilt in vier Kategorien.

Bewertet hinsichtlich einer einfachen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit für den industriellen Transfer auf der Grundlage von Herstellungsprozessen und Skalierbarkeit.

		
	1-3D photonische Filme und Strukturen	Partikelsysteme poröse Systeme
Herstellprozesse	Physikalische und chemische Gasphasenabscheidung, Fotolithographie	Rakeln, Sprühauftrag, Tauchziehverfahren, Heißpressen, Phasenseparation, Elektrosponnen
Skalierbarkeit	Niedrig	Hoch

Bei textilen Systemen wird eine optische Doppelfunktionalität durch die Kombination von Partikeln und der ungeordneten porösen Struktur von Polymerfasern, bzw. Fasersystemen im Allgemeinen erzielt. Durch wirre Faserablagerung auf Basis von Spinnvliesen und dem Elektrosponnen können hybride Partikel/Faser-Systeme hergestellt werden, die im folgenden Kapitel beschrieben werden.

2.3.1 Textile Strukturen und Beschichtungen

Im textiltechnischen Bereich liegt das Ziel darin, einen Raum, ein Zelt oder ein Gebäude vor Wärmeeinwirkung durch die Sonne am Tag zu schützen und Wärme im atmosphärischen Fenster gezielt zu emittieren, sodass eine energiefreie Kühlwirkung entsteht.

Durch die Kombination von partikelintegrierten Beschichtungen oder Sprühaufträgen und der ungeordneten porösen Struktur von Fasern werden strahlungsoptische Eigenschaften für eine Kühlung erzielt.

Untersucht werden Polymerfasern aus z.B. PVDF [19], PEO [94], [54] oder PE [17, 18, 22] und natürliche Materialarten, wie Cellulose [25, 26], [95] oder Seide [23].

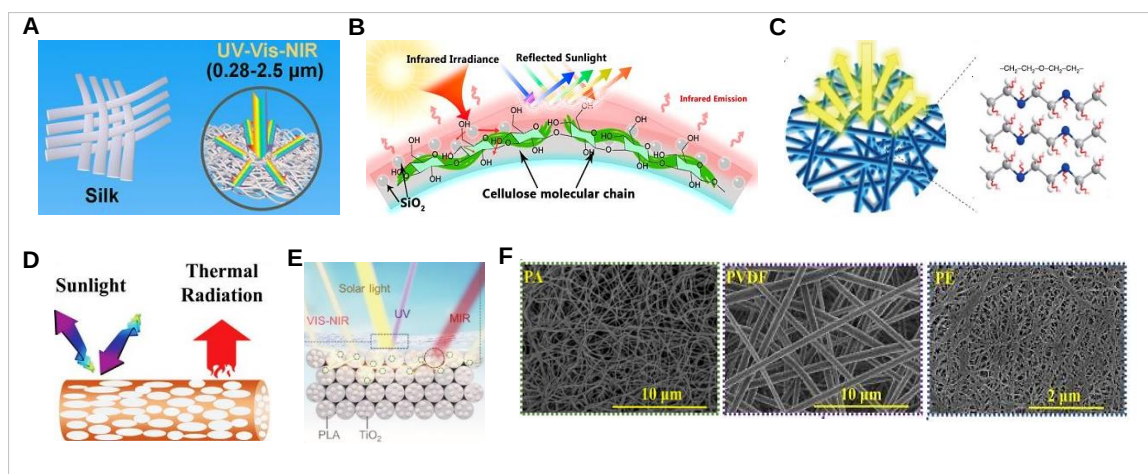


Abb. 2.8 Materialbeispiele und verschiedene strukturelle Aufbauten und Beschichtungen in der textilen Strahlungskühlung.

A Die zufällige Stapelung von Seidenfasern kann maßgeblich zur Reflexionserhöhung beitragen [23]; **B** Cellulose wirkt als photonischer Solarreflektor und Wärmeemitter basierend auf funktionellen Gruppen wie C-H und OH [95]; **C** PEO Fasern erhöhen die selektive Emissionsleistung im MIR, die wirre Faserablagerung durch Elektrosplennen trägt zur Lichtstreuung und damit solaren Reflexion bei [94]; **D** Spezifische poröse Faserstruktur aus PE erhöht die solare Reflexion aufgrund des Streufaktors innerhalb der Faser [24]; **E** PLA Fasern erzielen basierend auf Funktionellen Gruppen, wie C=O, -CH₃ oder C-O eine spezifische Emissionsleistung [27]; **F** Eine drei lagige Struktur aus Nylon (PA), PVDF und PE tragen aufgrund unterschiedlicher Fasergröße und -ablagerung zur Lichtstreuung und erhöhten Emission bei [22]

In den bisherigen Veröffentlichungen über textile Materialentwicklungen werden unterschiedliche strukturelle Aufbauten und Fasermaterialien untersucht. Die strukturabhängigen Materialaufbauten werden durch das wirre Ablegen von Fasern (Abb. 2.8A–C, E), durch die Herstellung poröser Fasern (Abb. 2.8D) und die Kombination verschiedener Fasergrößen und -materialien in mehrlagigen Geweben (Abb. 2.8F) erzielt.

Yang und Zhang [23] untersuchen schmelzgesponnene PP-Fasern mit einem definierten Faserdurchmesser, die wirr abgelegt werden. Es kann eine solare Reflexion von >90 % erzielt werden, allerdings keine ausreichende Emission im atmosphärischen Fenster. Um dieses Problem zu beheben, wird eine zusätzliche Schicht aus Polydimethylsiloxan (PDMS) mit einer Dicke von 100 µm auf die PP-Faserstruktur aufgetragen, deren Schichtdicke 600 µm beträgt. Eine Temperaturreduktion unter Umgebungstemperatur von 5 °C am Tag und 4 °C in der Nacht kann erzielt werden. Der Trocknungsprozess nach dem Schichtauftrag von PDMS auf die fertige Flächenstruktur dauert ca. sechs Stunden bei Raumtemperatur.

Tian *et al.* [25] verwenden Cellulosefasern mit einem Durchmesser von 20–50 µm, um eine solare Reflexion von 89 % und eine Emission im IR von 0,92 zu erzielen. Durch die Integration von Polytetrafluorethylen (PTFE) Partikeln, die durch den Sprühauftrag und gleichzeitiges Verdampfen des Lösemittels (Ethanol) appliziert werden, wird eine

wasserabweisende Schicht erzeugt. Die Partikel liegen in den Zwischenräumen und Poren der Cellulosefasern, was die solare Reflexion auf 93 % erhöht. Der Schichtauftrag beträgt ca. 30 μm . Es wurde eine Kühlung von 5 °C unter Umgebungstemperatur bei einer Solarstrahlung von 834 W/m^2 gemessen.

Song *et al.* [24] untersuchen poröse schmelzgesponnene Faserstrukturen hergestellt aus Polyethylen (PE) und Polyethylenoxid (PEO). Durch die spezifische Struktur wird eine hohe IR-Emission (90,97 %) und solare Reflexion (93,77 %) erzielt. Die poröse Faserstruktur der PE-Fasern wird durch das Entfernen von PEO generiert. Es kann eine Temperaturreduktion von 20,3 °C gegenüber einem transparenten Vergleichsmodell gemessen werden. Der Trocknungsprozess nach der Spinnherstellung und dem Auswaschen von PEO beträgt vier Stunden bei 60 °C.

Li *et al.* [94] entwickeln eine Folie auf Basis von elektrogesponnenen Polymer-Nanofasern. Es kann eine selektive Emission (78 %) und effektive Solarreflexion (96,3 %) erzielt werden. Grundlage dafür sind die funktionellen Gruppen (C-O-C und C-OH) der verwendeten PEO-Fasern und der strukturelle Aufbau der Nanofasern. Es wurde eine Kühlung von 5 °C unter Umgebungstemperatur und eine Kühlleistung von 110 W/m^2 erzielt.

Zeng *et al.* [27] beschreiben ein mehrlagiges Verbundgewebe aus TiO_2 -Partikeln und Polymilchsäure mit einer zusätzlichen Schutzschicht aus PTFE. Die TiO_2 -Partikel werden in den Verbund integriert und können aufgrund des hohen Brechungsindex und auftretender Mie-Streuung einen hohen Anteil des eintreffenden solaren Lichtes reflektieren (92,4 %). Mit einer Materialdicke von insgesamt ca. 500 μm wird eine Emission von 94,5 % im MIR erzielt. Es wurde eine Temperaturreduktion von 2 °C unter Umgebungstemperatur zu Mittagszeiten gemessen.

Ein Beispiel für einen einlagigen Aufbau wird in Chen *et al.* [95] beschrieben. Das Paper untersucht delignifizierte Cellulose in Kombination mit Siliziumdioxid-Partikeln (SiO_2) in einem einlagigen System. Durch thermisches Pressen entsteht ein strukturiertes Material mit einer Dicke von drei Millimetern. Damit wird eine Reflexionsleistung von 94 % im solaren Bereich und eine Emissionsleistung von 0,9 im mittleren Infrarotbereich (MIR) erzielt. Die Kühlleistung beträgt 65,3 W/m^2 am Tag und 38,7 W/m^2 in der Nacht. Das entwickelte Material weist aufgrund der hohen Dicke wenig Flexibilität auf. Der gesamte Herstellungsprozess, einschließlich der Delignifizierung der Cellulose und des Heißpressens bei 100 °C dauert mehr als 48 Stunden.

Einen ähnlichen Aufbau jedoch ohne zusätzliche Beschichtungsapplikation wird in Li *et al.* [26] beschrieben. Dabei wird kein klassisches Textil hergestellt. Das Material kann für Gebäude eingesetzt werden. Die Dicke beträgt 200 mm. Auf Grundlage der Delignifizierung von Holz wird durch Pressen ein Kühlmaterial hergestellt, dass aus

Cellulose Nanofasern besteht. Durch die Faserstruktur entsteht ein ungeordnetes Streuelement, sodass eine intensive breitbandige solare Reflexion erzielt wird. Basierend auf den molekularen Schwingungen der Cellulose wird eine hohe Emission im Infrarotbereich erzielt. Die gemessene Kühlleistung beträgt 63 und 16 W/m² in der Nacht und am Tag (zwischen 11–14 Uhr) und es wird eine durchschnittliche Temperaturreduktion unterhalb Umgebungstemperatur von >4 °C erzielt.

Die beschriebenen Systeme erzielen zum Teil sehr gute Kühlwerte, allerdings werden dabei hohe Schichtdicken eingesetzt, aufwendige Prozesse mit langen Prozesszeiten oder der Einsatz von Lösemitteln und strukturabhängige Materialaufbauten genutzt. Durch die strukturelle und materialspezifische Abhängigkeit übernimmt das Textil selbst eine entscheidende Rolle für die Kühleigenschaft. Hinsichtlich flexibler Anwendungsszenarien und einer möglichst breiten wirtschaftlichen Umsetzbarkeit ist neben einem einfachen Applikationsprozess und einer ausreichenden Kühlleistung eine substratunabhängige Applikation das Ziel dieser Arbeit.

2.3.2 Substratunabhängige Materialsysteme

Zu substratunabhängigen Systemen zählen Materialaufbauten, die appliziert auf verschiedenen Substraten und Untergründen die gleiche Kühlleistung erzielen. Die strahlungsoptischen Eigenschaften werden ausschließlich durch die Beschichtungs- bzw. Auftragskomponenten definiert, während das Substrat eine untergeordnete Rolle hinsichtlich der Kühlleistung spielt. Als Substratmaterial wird in dieser Arbeit das Textil definiert. Wird die Kühlleistung primär von den eingesetzten Beschichtungskomponenten bestimmt, durch deren gezielte Anpassung beeinflusst und weisen die textile Struktur und das textile Material selbst keine entscheidende strahlungsoptische Funktion auf, wird der Materialverbund als Substratunabhängig bezeichnet.

In der Textiltechnik gibt es nur wenige Beispiele, die einen Materialaufbau beschreiben, bei dem das textile Material nicht explizit zur Erreichung einer Kühlleistung beiträgt. Eine Zusammenfassung der bisherigen Veröffentlichungen und dem entsprechenden Materialaufbau wird in der folgenden Abb. 2.9 wiedergegeben.

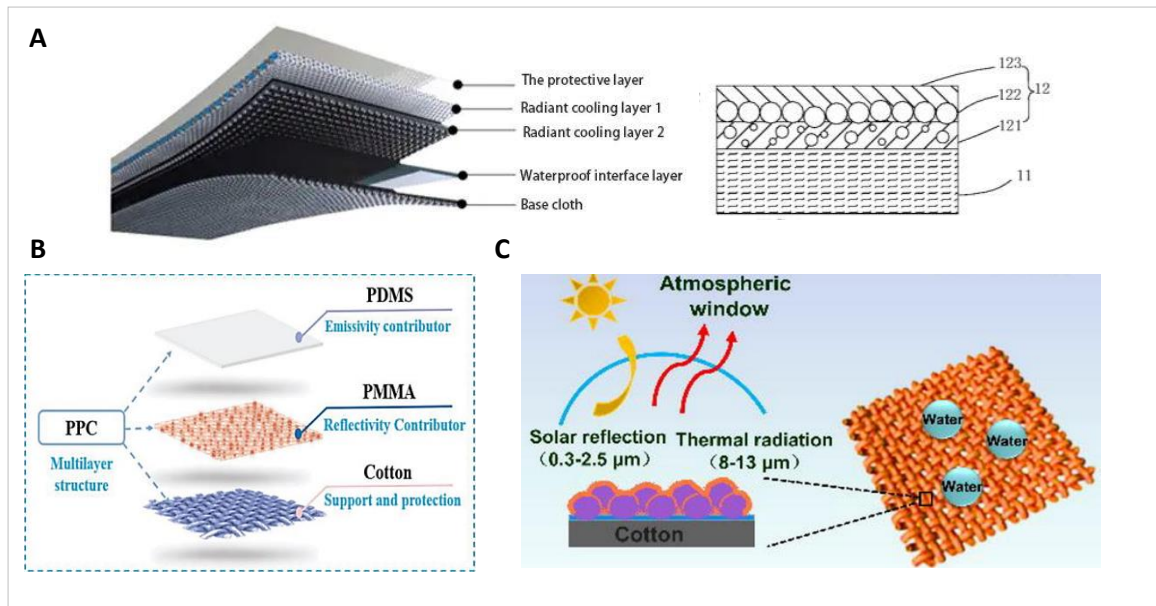


Abb. 2.9 Materialsysteme für eine textilsubstratunabhängige Strahlungskühlung.

A Mehrschichtiger Beschichtungsauftrag basierend auf einem polymeren Matrixmaterial mit zusätzlichen Funktionsschichten – verschiedene Partikelarten und Größenverteilungen führen zu einer erhöhten solaren Reflexions- und Emissionsleistung [96, 97]; **B** Zweischichtiger Auftrag aus PDMS und PMMA – das Textil trägt nicht explizit zur Strahlungskühlfunktion [98]; **C** Einlagige strahlungsfunktionelle Schicht mit zusätzlicher hydrophobierender PDMS-Schicht [21]

Zhong *et al.* [21] beschreiben die Modifikation eines Baumwollgewebes mit Aluminiumphosphat-Partikeln (AlPO_4), die durch O-Carboxymethylchitosan (CMC) an die Fasern gebunden werden. Dafür wird zunächst das Gewebe in der CMC-Lösung eingetaucht und die Partikel über einen Sprühauftrag nach der Trocknung appliziert. Anschließend wird eine zusätzliche hydrophobierende Schicht aus PDMS durch das Eintauchverfahren aufgetragen. Es wird eine maximale Reflexionsleistung im solaren Bereich von 97 % und eine Emission von 90 % gemessen. Dadurch entsteht ein Temperaturunterschied von 5,4 °C am Tag zwischen einem unbeschichteten und einem beschichteten Baumwollgewebe. Die Cellulose dient dabei lediglich als Trägersubstrat und nicht zur Erhöhung der Emissions- oder Reflexionsleistung. Ein Vergleich mit einem anderen Gewebe wird nicht aufgezeigt oder untersucht, ebenso findet kein Vergleich der Kühlleistung zur Umgebungstemperatur statt. Aufgrund des notwendigen Benetzens des Textils mit CMC, dem anschließenden Trocknungsprozess und der vorherigen Präparation der AlPO_4 -Partikel beträgt die Gesamtprozesszeit mehr als 25 Stunden.

Ji *et al.* [98] beschreibt den Einfluss von PDMA und PMMA in einer zweilagigen Beschichtung auf Baumwollgewebe. Das Baumwollgewebe dient dabei lediglich dem Schutz der darüber liegenden PMMA-Schicht. Die Schichtdicke des PDMS-Films beträgt 1,5 mm (PDMS) und der PMMA-Schicht 3,5 mm. PMMA wird in Ethylacetat gelöst und anschließend durch Besprühen auf das Baumwollgewebe aufgebracht. Der PDMS-Film

wird separat hergestellt und der Verbund anschließend damit bedeckt. Zur Messung der Temperaturreduktion wird jeweils ein Temperatursensor unter einer Glasplatte in einer isolierten Box platziert, wobei auf einer der Glasplatten zusätzlich die Kühlprobe aufliegt. Eine Temperaturreduktion von 7,8 °C wird gemessen. Aufgrund des Messaufbaus lässt sich jedoch nicht eindeutig feststellen, ob die Temperaturreduktion aufgrund der strahlungsfunktionellen Eigenschaften erfolgt oder ob eine Kühlung durch einfache Verschattung vorliegt. Die Schichtdicke von PMMA und PDMS ist sehr hoch, was die Flexibilität des Verbundes einschränken kann. Zudem wird ein zusätzliches Lösungsmittel genutzt, und die PDMS-Folie wird lediglich auf den darunter liegenden Verbund aus PMMA und Baumwollgewebe aufgelegt, sodass kein funktionales Produkt entsteht.

Bisher wird nur in einer Patentanmeldung von Ningbo Radi-Cool Advanced Energy Technologies Co., Ltd. und Ningbo Ruiling Advanced Energy Materials Institute Co., Ltd. ein substratunabhängiges funktionales textiles Strahlungskühlmaterial beschrieben, dass Schichtdicken von <250 µm aufweist. Die Beschichtung besteht aus ein bis drei strahlungsfunktionellen Lagen, einer wasserabweisenden und einer wetterstabilen Schicht. Dabei werden verschiedene Polymere, wie Polyesterharz, Polyurethanharz, Acrylharz, Polyvinylchlorid oder Silikonharz für das Matrixmaterial aufgelistet. Als Pigmentzusätze, die sowohl die Reflexion als auch die Emission steigern sollen, werden unter anderem Indiumzinnoxid (ITO), TiO₂, CaCO₃, BaSO₄ oder Siliciumnitrid (Si₃N₄) aufgelistet. Es werden verschiedene Partikelarten und Größenverteilungen in einer Kühlfunktionsschicht miteinander kombiniert. Als textiles Gewebe wird in dem Patent Nylon, Polyester und Baumwolle gelistet. Ein direkter Vergleich der Substratmaterialien findet nicht statt. Für jedes Substratmaterial wird ein anderer Beschichtungsaufbau beschrieben. Die Schichtdicke variiert zwischen 100–200 µm. Es werden Versuche mit höheren Schichtaufträgen (0,3–2 mm) durchgeführt, die Kühlleistung nimmt durch steigende Reflexionswerte zwar zu, allerdings nimmt gleichzeitig die Knickstabilität und damit die Flexibilität des Verbundes ab. Ein Kühlleistungswert wird nicht angegeben. Die Reflexions- sowie Emissionswerte liegen bei ≥80 %. Aus den Graphiken die im Patent dargestellt werden, lässt sich entnehmen, dass eine Temperaturreduktion gegenüber einem unbeschichteten Vergleichsgewebe stattfindet, die Umgebungstemperatur über den Tagesverlauf aber nicht unterschritten wird. Die Applikation einer wetterschützenden und wasserabweisenden Schicht erfordert weitere Schichtaufträge und Trocknungsprozesse, die kosten- und zeitintensiv sind. [96, 99]

Eine wissenschaftliche Untersuchung über Einflussfaktoren durch das textile Substratmaterial oder den Untergrund auf die Kühlleistung wurden bisher nicht durchgeführt.

Allgemein kann eine Substratunabhängigkeit durch die Anpassung der Schichtdicke, der Partikel- bzw. Porenkonzentration, -größe und -verteilung basierend auf ein- und

mehrschichtigen Beschichtungssystemen realisiert werden. In der Forschung werden primär substratunabhängige Farbsysteme beschrieben. Durch die Erhöhung des Schichtauftrages und damit einhergehend der Partikelkonzentration wird die Transmission im gesamten Wellenlängenbereich minimiert, sodass das darunter liegende Substrat keinen Einfluss nimmt. Gleichzeitig kann die Schichtdickenerhöhung eine positive Auswirkung auf die solare Reflexionsleistung haben und diese steigern.

Mandal *et al.* [64] beschreiben, dass die poröse Beschichtung basierend auf Polytetrafluorethylen (PTFE) eine Mindestschichtdicke von 300 µm benötigt, um als substratunabhängig bezeichnet zu werden. Die Beschichtung wird auf verschiedenen Untergründen, wie Holz, Metall oder Plastik aufgebracht. Ein Vergleich der Strahlungskühlleistung oder der Spektralverläufe auf den verschiedenen Substraten wird nicht aufgezeigt oder diskutiert.

Li *et al.* [28] beschreibt eine einlagige Farbbeschichtung mit BaSO₄ Partikeln. Ab einer Schichtdicke von 400 µm wird kein Einfluss des darunter liegenden Substrates festgestellt. Untersuchte Substrate sind Glas und Silikon sowie ein transparentes Polyethylenterephthalat (PET). Bei Schichtdicken zwischen 200–280 µm wird ein Einfluss des transparenten PET im mittleren Infrarotbereich gemessen.

Mandal *et al.* [29] vergleicht in seinem Paper „Paints as scalable and effective radiative cooling technology for buildings“ verschiedene Farbsysteme mit unterschiedlichen Partikelarten. Die Schichtdicke hier beträgt einen Millimeter und die Partikelkonzentrationen liegen zwischen 80 bis zu 96 Ma-%. Um ausreichende Reflexionswerte im solaren Bereich (>90 %) zu erzielen, werden entsprechend hohe Schichtdicken und Partikelkonzentrationen eingesetzt.

Neben einschichtigen Farbsystemen werden Zweischichtsysteme beschrieben.

Bao *et al.* [59] beschreibt ein zweilagiges Farbsystem aus TiO₂ und SiO₂ bzw. Siliciumcarbid (SiC) Partikeln. In einer ersten Schicht werden SiO₂ bzw. SiC Partikel zur Emission über ein Sprühsystem appliziert. TiO₂ Partikel werden in einer zweiten Schicht zur Reflexion der Solarstrahlung eingesetzt. Um die Funktionalität des Beschichtungssystems auf unterschiedlichen Substraten nachzuweisen, wird eine Aluminiumfolie und eine schwarz beschichtete Aluminiumfolie als Untergrund ausgewählt. Die Spektralanalyse zeigt einen Substrateinfluss bei der Kombination mit TiO₂ und SiO₂ Partikeln. In der Partikelzusammensetzung aus TiO₂ und SiC scheint das darunter liegende Substrat keinen signifikanten Einfluss zu haben. Eine Temperaturreduktion unterhalb Umgebungstemperatur am Tag wird allerdings mit beiden Systemen nicht erzielt. Die Schichtdicke wird mit >10 µm angegeben, eine genaue Definition oder Schichtdicke findet nicht statt.

Huang *et al.* [86] bettet in einer ersten Acrylharzschicht Ruß-Partikel (Carbon Black) zur Emissionserhöhung und in einer zweiten Schicht TiO₂ zur Reflexionserhöhung ein. Diese Kombination wird nur modelliert und Einflussfaktoren in verschiedenen Simulationen untersucht. Eine reale Applikation findet nicht statt. Die Schichtdicke beträgt 500 µm.

Ein Nachteil von hohen Schichtdicken liegt in einem höheren Materialverbrauch, weniger Flexibilität und erhöhtem Flächengewicht. In der textilen Anwendung, ob Membran- oder Zeltbau, ist eine gewisse Flexibilität nicht nur erwünscht, sondern gefordert.

Eine Alternative, um dünnsschichtige Aufträge zu realisieren, bieten metallisierende Folien aus Silber- oder Aluminium, die zwischen Substrat und strahlungsfunktioneller Schicht appliziert werden. Diese Kombination wurde bereits in den frühen Anfängen der Forschung zur Strahlungskühlung untersucht [100].

Die Schichtdicke der Metallfolien liegen im Nano- [60, 80, 87, 101] bis Mikrometerbereich [102]. In Kombination mit einer hoch emittierenden Schicht, beispielsweise einem Polymer, wie PDMS [101, 102], Polymethylpenten (TPX) [80], oder PTFE [60], kann eine wirksame Strahlungskühlung erzeugt werden.

Dabei wird in den meisten Fällen Silber (Ag) [60, 80, 87, 101, 103] oder Aluminium (Al) [100, 102, 104] als Substrat eingesetzt. Kupfer [30] oder Gold [105] wurden ebenfalls vereinzelt verwendet.

Die Metallschicht verhindert die Transmission von Sonnenstrahlung durch hohe solare Reflexionswerte im sichtbaren und nahen Infrarot.

Materialien, wie Aluminium und Silber, zählen zu den sogenannten niedrig emittierenden Materialien (in engl.: low-emissivity; Low-e) und weisen im gesamten Spektrum von $\lambda = 0,3\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ Emissionswerte von $<5\text{ }\%$ auf [106].

„Low-e“ und „High-e“ Materialien können anhand der Vorschrift DIN EN 15976:2011-07 klassifiziert und eingeteilt werden. Hier wird die Kalibriernormale der Materialien wie folgt definiert: ϵ_L -Werte (Low-e) gelten $0,01 < \epsilon_L < 0,02$ und für hochemittierende Oberflächen (High-e) $\epsilon_h > 0,94$. Liegen die durchschnittlich gemessenen Emissionswerte für Low-e insbesondere zwischen $0,3\text{--}2,5\text{ }\mu\text{m}$ und High-e (in engl.: high-emissivity) zwischen $8\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$ nahe der Kalibriernormalen ($(0,01 < \epsilon_L < 0,02; \epsilon_h > 0,94)$) kann von Low-e bzw. High-e Materialien gesprochen werden.

In der Textiltechnik werden Metalltextilien für Dekorative als auch funktionelle Zwecke vor allem in der Architektur unter dem Begriff „Low-e“ eingesetzt [10]. Dabei können metallisierte Materialien in Form von Folien oder Partikeln auf textile Flächen appliziert werden oder das Textil selbst wird durch verschiedene Prozesse metallisiert [32].

Low-e Textilien dienen vor allem dem Zweck Innentemperaturen auf einem konstanten Niveau zu halten um damit Energie einzusparen. Im Gebäudemanagement können

Membrantextilien ausgerüstet mit einer Low-e Schicht die Wärmestrahlung in den Innenraum zurück reflektieren, gleichzeitig wird keine von der Sonne absorbierte Strahlung emittiert, sodass der Raum nicht zusätzlich von außen erwärmt wird. [107]

Im persönlichen Wärmemanagement sorgen Low-e Materialien dafür, dass die Körperwärme nicht nach außen geleitet wird, die Schicht wirkt isolierend [108–110]. In der textilen Strahlungskühlung werden Low-e Schichten, wie in Hsu *et al.* beschrieben, primär für ein multifunktionales Textil eingesetzt [18].

Durch einen Mehrschichtaufbau wird eine kühlende Seite mit einer hohen thermischen Emission und eine wärmende Seite mit einer niedrigen Emission (Low-e) erzeugt [18, 111].

Um metallisierende Folien oder Schichten in der Strahlungskühlung zu nutzen, muss eine Kombination mit einem hoch emittierenden Material stattfinden.

Bisher wurde diese Kombination allerdings noch nicht auf einem textilen Substratmaterial untersucht. Gründe dafür liegen unter anderem in der Herstellungsart und der Haftschwierigkeit zwischen den Schichten. Metallfolien können durch physikalische Abscheidungsverfahren, wie das Aufdampfen, das Sputtern (Kathodenzerstäubung) oder Verkleben auf Textilien oder andere Substrate aufgebracht werden. Dabei handelt es sich um technisch anspruchsvolle Prozesse, bei denen unter anderem Vakuum eingesetzt wird. Darüber hinaus besteht eine vergleichsweise geringe Langlebigkeit der Folien in Abhängigkeit des Herstellprozesses aufgrund verminderter Abriebstabilität und der Anfälligkeit für Oxidationsprozesse. [31, 32]

Eine weitere Applikation von polymeren Materialien auf der glatten Oberfläche der Metallfolie kann zu geringerer Haftung und damit verringerter Langlebigkeit führen. Zusätzliche Haftvermittler müssen eingesetzt werden, die strahlungsoptisch im gesamten Spektralverlauf keinen Einfluss haben dürfen.

Neben Metallfilmen können Metallpigmente einer Polymermatrix zugefügt werden. Der Prozessauftrag kann durch Rakel- oder Sprühaufräge auf flexiblen Substraten, wie Textilien, appliziert werden. Bisher wird die direkte Integration von Low-e Partikeln, wie Aluminium, zur Minimierung der Gesamtemissionsleistung genutzt. [112, 113]

In der Kombination von Low-e und High-e Materialien wird bisher entweder keine Strahlungskühlfunktion erzielt oder die Schichten werden funktional getrennt eingesetzt.

Eine systematische Analyse und direkte Integration von Low-e Partikeln im Zusammenhang mit der Technologie der Strahlungskühlung zur substratunabhängigen Applikation wurde bisher nicht untersucht.

2.4 Fazit zum Stand der Forschung

In den vergangenen Jahren wurden diverse Materialkomponenten und -aufbauten im Bereich der Strahlungskühlung intensiv erforscht. Die Abb. 2.10 fasst die bisherige Materialentwicklung schematisch zusammen.

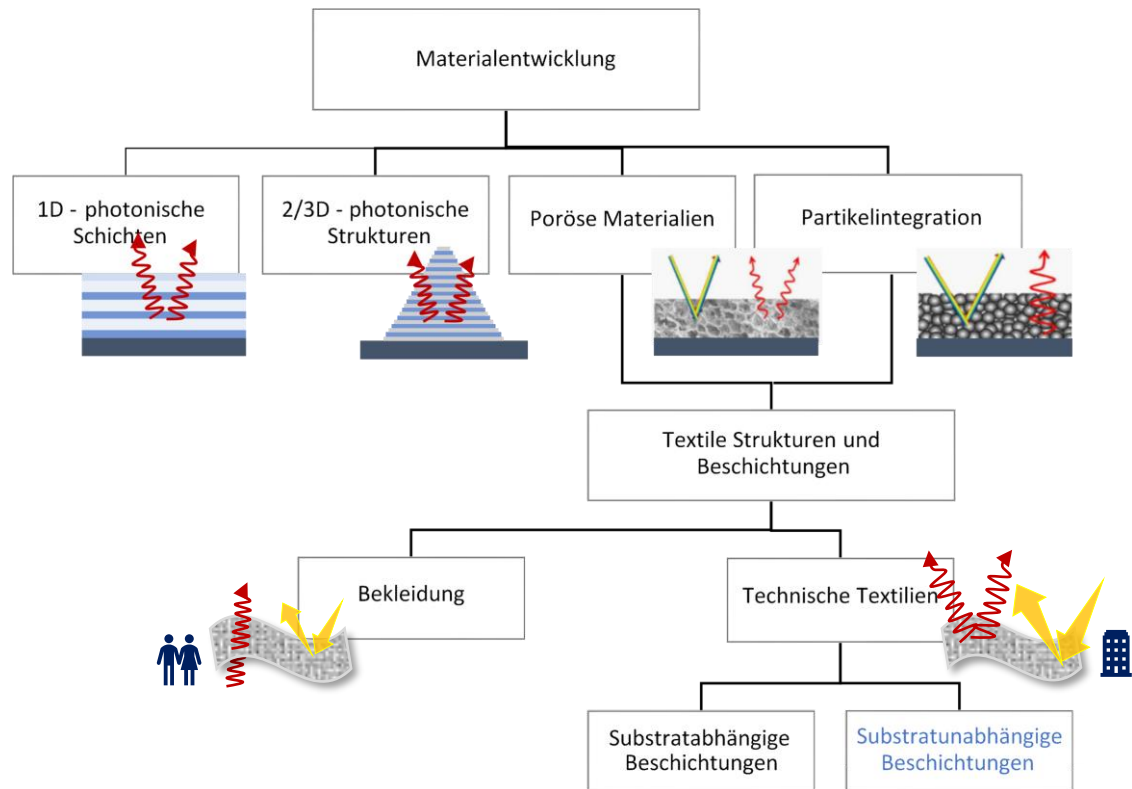


Abb. 2.10 Schematische Darstellung der Materialentwicklung im Bereich Strahlungskühlung.

Zusammenfassung und Einteilung der in der Forschung beschriebenen Materialsysteme mit dem Fokus auf die textile Materialentwicklung. Die blau eingefärbte Schrift markiert den Bereich, der bisher in der Forschung am wenigsten berücksichtigt wurde, wodurch hier der größte Bedarf für neue Lösungsansätze besteht.

Der Fokus der aktuellen Forschung liegt neben der Erzielung einer ausreichenden Kühlleistung auf der wirtschaftlichen Umsetzbarkeit. Aus diesem Grund werden vermehrt partikelintegrierte und poröse Systeme untersucht. Gerade in der textilen Materialentwicklung werden durch Herstellprozesse, wie die Rakelbeschichtung, der Sprühauftrag, das Elektrosponnen oder Heißpressen eine hohe Skalierbarkeit in der industriellen Umsetzung erreicht.

Poröse Systeme haben den Nachteil, dass zum Teil Lösemittel für die Herstellung benötigt werden und gerade im Außenbereich das Ablagern von Staubpartikeln in den Porenzwischenräumen zu einer Verminderung der solaren Reflexionsleistung und damit der Kühlleistung führen kann. [25]

In der textilen Materialentwicklung liegt der Fokus vor allem auf der Verbesserung des persönlichen Körperwärmemanagements. In der Textiltechnik basieren bisherige textile Entwicklungen zu einem großen Teil auf substratabhängigen Materialsystemen, das heißt die textile Struktur und das textile Fasermaterial selbst tragen zur Strahlungskühlung bei. Das führt zu einer Material- und Strukturabhängigkeit und damit zu einer limitierenden Flexibilität hinsichtlich verschiedener Anwendungsszenarien.

Um eine Abhängigkeit der textilen Struktur und damit des Substratmaterials zu vermeiden, muss die Beschichtung eine substratunabhängige Kühlleistung erzielen.

Der Fokus der bisherigen Forschung zu substratunabhängigen Systemen liegt auf partikelintegrierten Systemen. Um eine substratunabhängige Applikation zu gewährleisten, werden hohe Schichtdicken eingesetzt. Das führt zu einer verringerten Flexibilität gerade hinsichtlich textiler Anwendungsszenarien im Zelt- oder Membranbau. Durch einen metallisierenden Film kann auf hohe Schichtaufträge verzichtet werden, allerdings müssen dafür zusätzliche zum Teil aufwendige Prozesse und kostenintensive Materialien, wie Silber, eingesetzt werden, die eine wirtschaftliche Hochskalierung im textiltechnischen Bereich verhindern.

In der textilen Anwendung wird in nur wenigen Beispielen eine substratunabhängige Applikation beschrieben. Zum Teil wird keine Kühlung unterhalb der Umgebungstemperatur erzielt oder der Materialaufbau ist nicht für eine hochskalierte Anwendung geeignet. Eine Übersicht bietet die Abb. 2.11.

Bei bisherigen textilen Entwicklungen, die unabhängig vom Substratmaterial eine gleiche Kühlleistung erzielen und aufgrund niedriger Transmissionswerte im relevanten Spektralbereich auf verschiedene Materialien appliziert werden können, erfolgten bisher keine systematischen Untersuchungen. Basierend auf dem bisherigen Forschungsstand lassen sich folgende Forschungslücken erkennen, die die Basis für diese Arbeit bilden.

- Substratunabhängigkeit
- Kühlung unter Umgebungstemperatur bei geringer Schichtdicke ($\leq 300 \mu\text{m}$)
- Adaptivität bezüglich der Beschichtungsrezeptur - Ein- bzw. zweistufige Herstellprozesse
- Entwicklung von Beschichtungen für technische Textilien – Außenanwendungen, wie Membran- oder Zeltbau

Neben der Materialentwicklung gilt es die Kühlleistung der Beschichtung zu analysieren, zu messen und zu simulieren. Für den direkten Vergleich zwischen unbeschichteten und beschichteten Materialien fehlt bisher ein theoretischer Ansatz, der den Einfluss des Substrates bzw. des Hintergrundmaterials berücksichtigt.

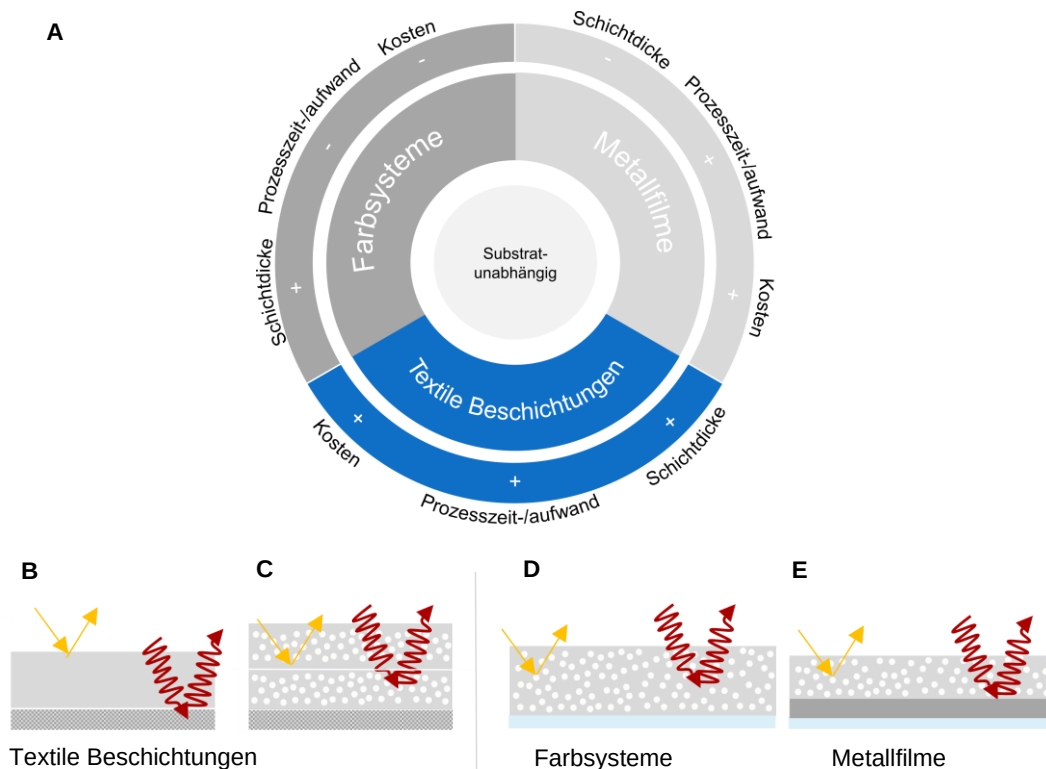


Abb. 2.11 Schematische Zusammenfassung bisheriger substratunabhängiger Systeme und Beschichtungsaufbauten mit Partikelintegration.

A Zusammenfassung substratunabhängiger Systeme, eingeteilt in drei Kategorien, wobei nur in dem blau markierten Feld ein Textil als Substratmaterial verwendet wurde (+ = hoch; - = niedrig); **B** Textil als emittierende/reflektierende Komponente (poröse Vliesstrukturen durch wirre Faserablagerungen) [22–25, 27]; **C** Mehrschichtiger textilsubstratunabhängiger Beschichtungsauftrag – Partikel und Einbettungsharz [21, 96, 98, 99]; **D** Ein-mehrschichtige Farbsysteme mit Partikelintegration auf verschiedenen glatten und festen Substraten (Schichtdicke >400 µm) [29, 81]; **E** Metallisierende Schicht oder Substrat (z.B. Ag/Al) zur solaren Reflexion und Verminderung der Transmission [85, 102]

3. Zielsetzung, Hypothesen und Lösungsweg

Ausgehend von dem im Abschnitt 2.3 beschriebenen Stand der Forschung zu Strahlungskühlungsmaterialien wird deutlich, dass gerade für technische Anwendungen, wie der Gebäudekühlung bisher nur sehr wenige Veröffentlichungen gefunden werden. Ein Großteil dieser Arbeiten untersucht Materialien mit optischer Doppelfunktionalität, wobei der Fokus auf ein- bis mehrschichtigen Materialaufbauten liegt, die die textile Struktur und das Fasermaterial für die Strahlungskühlung nutzen. Dies führt zu einer begrenzten Flexibilität und Adaptivität für verschiedene Anwendungsszenarien.

Substratunabhängige Beschichtungssysteme wurden bisher hauptsächlich in Verbindung mit flachen, starren und planaren Substraten beschrieben. Im textilen Bereich mangelt es an Lösungsvorschlägen für substratunabhängige, flexible Strahlungskühlsysteme. Ein direkter Nachweis einer Substratunabhängigkeit durch die Beschichtungsapplikation auf verschiedenen textilen Substraten wird bisher nicht erbracht.

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit besteht deshalb darin, eine geeignete Beschichtungsrezeptur zu entwickeln, die auf verschiedenen textilen Substraten appliziert werden kann und gleichzeitig aufgrund von optimierten strahlungsfunktionellen Eigenschaften einen selbst kühlenden Effekt basierend auf dem Prinzip der Strahlungskühlung erzielt. Die weitere Verifizierung der Beschichtungsapplikation hinsichtlich des kühlenden Effektes soll durch ein angepasstes Vorhersagemodell zur Berechnung der Kühlleistung erfolgen.

Basierend auf den identifizierten Forschungslücken werden folgende Hypothesen für diese Arbeit aufgestellt:

- (1) Die Integration von niedrig emittierenden Partikeln in eine Beschichtung für Textilien, basierend auf dem Prinzip der Strahlungskühlung, erzielt eine substratunabhängige Applikation.
- (2) Eine substratunabhängige Selbstkühlung kann mit maximal zwei funktionellen Schichten und einer Gesamtschichtdicke von weniger als 300 µm erzielt werden.
- (3) Durch ein Vorhersagemodell angepasst an textiltechnische Anforderungen kann die Kühlleistung und Temperaturreduktion wetterabhängig berechnet und simuliert werden.

Zur Überprüfung der Hypothesen wird die Arbeit in zwei Hauptteile unterteilt. Im ersten Teil (Kapitel 5) werden zunächst Materialien basierend auf dem Stand der Forschung ausgewählt, strahlungsoptisch charakterisiert (vgl. Abschnitt 5.1) und die Beschichtungszusammensetzung erarbeitet (vgl. Abschnitte 5.2-5.4).

Die Arbeit knüpft an den Stand der Forschung zu metallisierenden Folien und Schichten an. Durch die Integration dieser Schichten wird die Transmission im gesamten relevanten Spektralbereich minimiert was den strahlungsfunktionellen Einfluss des darunter liegenden Substrates minimiert und gleichzeitig eine positive Beeinflussung der solaren Reflexion bewirkt.

Um zeitaufwendige und kostenintensive Prozessschritte zu minimieren und gleichzeitig eine hohe Haftung sowie Flexibilität der Beschichtung zu gewährleisten, sowie das Ziel der direkten und einfachen Beschichtungsapplikation auf verschiedene textile Substrate zu realisieren, verfolgt diese Arbeit den Ansatz, metallisierende Partikel direkt in das Beschichtungssystem zu integrieren.

Am Beispiel von Aluminium als niedrig emittierendes Material wird der Nutzen der direkten Integration der Partikel in drei verschiedenen Schichtaufbauten untersucht. Das Ziel ist es, einen idealisierten breitbandigen Emissionsverlauf zu erzielen, der basierend auf den Beschichtungskomponenten erreicht wird und unabhängig von den strahlungsoptischen Eigenschaften des darunter liegenden Substrats ist, sodass eine gleichbleibende Kühlleistung gewährleistet wird. Die spektrale Reaktion kann durch die Wahl des richtigen Materials (Matrixmaterial, Partikel), die Anpassung der Partikelgrößenverteilung, -konzentration, -art, -größe und der Schichtdicke verändert und angepasst werden. Ein Überblick der zu untersuchenden Beschichtungsvariablen bietet die schematische Abb. 3.1. Das Modell wird zur Charakterisierung der Beschichtungsrezeptur genutzt.

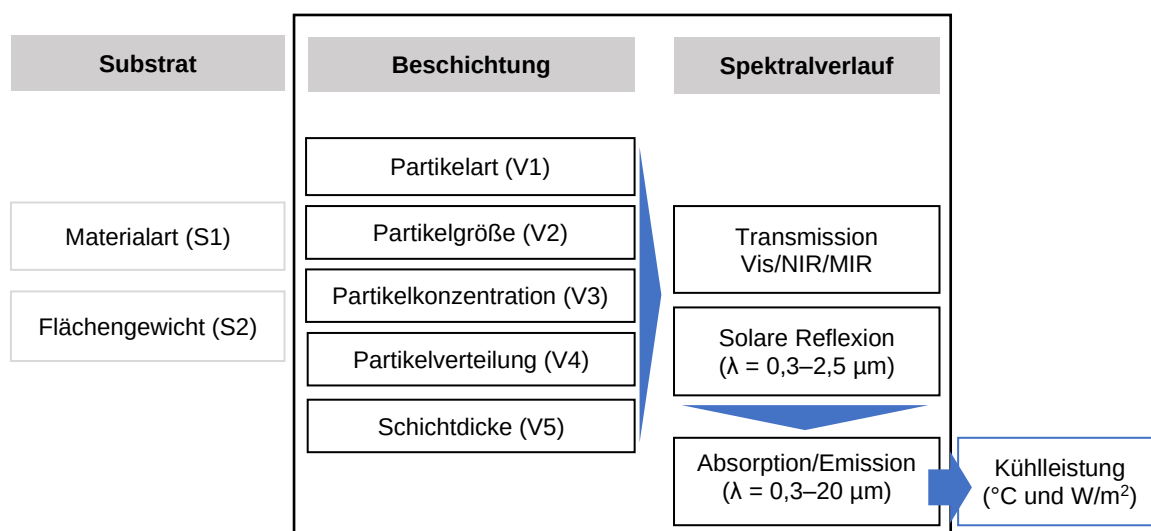


Abb. 3.1 Schematisches Modell zur Charakterisierung der Beschichtungsrezeptur.
Einfluss der Beschichtungsvariablen (V) auf den Spektralverlauf und damit der Kühlleistung
am Beispiel unterschiedlicher textiler Substrate (S).

Zunächst werden die Beschichtungsparameter für die niedrig emittierenden Partikel in einem einlagigen System (Beschichtungssystem 1: B1) eingestellt und untersucht (vgl. Abschnitt 5.2). Durch die direkte Zugabe von Weißpigmenten kann die solare Reflexion vor allem im sichtbaren Bereich erhöht und damit verbessert werden. Der Effekt wird zunächst in Kombination mit Low-e Partikeln in einer einzigen funktionellen Schicht (Beschichtungssystem 2: B2) untersucht (vgl. Abschnitt 5.3). Anschließend werden zwei funktionelle Schichten aufgetragen (Beschichtungssystem 3: B3) und die Beschichtungskomponenten eingestellt, sodass ein idealisierter breitbandiger Spektralverlauf erzielt werden kann (vgl. Abschnitt 5.4).

Um den Substrateinfluss zu untersuchen, wird die Beschichtung auf mindestens zwei verschiedenen textilen Materialien appliziert, die im Flächengewicht (S2) und in der Faserart (S1) und damit im Gesamtspektralverlauf voneinander abweichen.

Der zweite Teil der Arbeit dient zur weiteren Bewertung der in Kapitel 1 entwickelten Beschichtungsrezepturen hinsichtlich einer substratunabhängigen positiven Kühlleistung.

Um die reale Funktionsweise der Beschichtung zu überprüfen, wird auf Grundlage bisheriger Messverfahren (beschrieben in Abschnitt 2.2.5) ein geeigneter Prüfaufbau konzipiert (vgl. Kapitel 6). Wetterabhängig kann damit die Kühlleistung und Temperaturreduktion gemessen und die Kühlwirkung ermittelt werden.

Basierend auf der in Kapitel 2.1 und 2.2 erläuterten allgemeinen thermodynamischen Grundlagen zur Strahlungskühlung und dem Berechnungsmodell beschrieben in [14, 49, 52, 117, 118] wird ein Vorhersagemodell zur Berechnung und Simulation der theoretischen Kühlleistung und Temperaturreduktion der Beschichtungsentwicklung an textile Anforderungen angepasst und validiert (vgl. Kapitel 7). Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann die Strahlungskühlung der beschichteten und unbeschichteten textilen Materialien unter verschiedenen Wetterszenarien und Hintergründen bestimmt und miteinander verglichen werden.

4. Materialien, Prozesse und Methoden

Im folgenden Kapitel werden die ausgewählten Materialien für diese Arbeit vorgestellt und charakterisiert. Prozesse und Prüfmethoden werden beschrieben und erläutert.

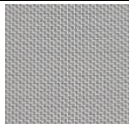
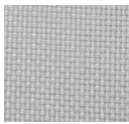
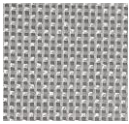
4.1 Materialien

Unterschieden wird in Substratmaterialien (textile Flächen), Matrixmaterialien (Einbettungsmaterial für Partikel) und Partikel.

4.1.1 Substratmaterialien

Die folgende Tab. 4.1 zeigt die Substratmaterialien auf, die in dieser Arbeit spektralanalytisch untersucht und für die Beschichtungsversuche ausgewählt wurden.

Tab. 4.1 Physikalische Eigenschaften der eingesetzten textilen Materialien.
Kennung innerhalb dieser Arbeit, Eigenschaften und Herstellerangaben.

Fasermaterial	Gewebetyp	Flächengewicht [g/m ²]	Wärmeleitfähigkeit [W/m ² K]	Hersteller	Kennung
100% PA6.6	 Leinwand ^{1/1}	150	28,63±0,12	UTT (Artikelnr.: 36059)	PA6.6 150
100% PA6.6	 Leinwand ^{1/1}	50	11,97±0,05	UTT (Artikelnr.: 37887)	PA6.6 50
100% PES	 Leinwand ^{1/1}	140	13,31±0,04	UTT (Artikelnr.: R8812)	PES 140
100% PES	 Leinwand ^{1/1}	65	10,89±0,08	UTT (Artikelnr.: 38945)	PES 65
100% E-Glas	 Köper ^{2/2}	163	43,00±0,25	HP-Textiles (Artikelnr.: HP-T163EF)	Glas 163
100% E-Glas	 Leinwand ^{1/1}	49	11,73±0,06	HP-Textiles (Artikelnr.: HP-P49EF)	Glas 49

Diese textilen Materialien wurden auf Grundlage der Materialart und des Flächengewichtes ausgewählt.

Glasgewebe, Polyester und Polyamid gehören zu den Materialien, die neben ETFE im Membran- und Zeltbau typischerweise eingesetzt werden. [107] Einlagige Gewebetypen werden darüber hinaus aufgrund ihrer mechanischen Festigkeiten gegenüber Vliesstoffen oder Gestriken vorzugsweise in großflächigen Anwendungen eingesetzt.

Für das Flächengewicht wurde ein vergleichsweise sehr leichtes (zw. 49–65 g/m²) und ein deutlich schwereres (zw. 140–163 g/m²) Gewebe ausgewählt, die in dieser Zusammenstellung die große Spannweite der Festigkeitsklassen im Membran- und Zeltbau abbilden. Die Substratauswahl ermöglicht eine Untersuchung der Substratunabhängigkeit im relevanten Kontext der angestrebten Endanwendungen.

4.1.2 Matrixmaterialien

An das Matrixmaterial der Beschichtung werden unterschiedliche Anforderungen gestellt. Zum einen dient das Matrixmaterial der Emissionserhöhung und damit der substratunabhängigen Emissionsleistung im mittleren Infrarot speziell zwischen 8–13 µm. Zum anderen wird es als Matrix für die integrierten Partikelsysteme genutzt. Dafür muss eine hohe Transmissionsleistung im solaren Bereich gegeben sein – in diesem Wellenlängenbereich befindet sich der Wirkungsgrad der Partikel, insbesondere der Weißpigmente.

Um im Hinblick auf eine mögliche Anwendung im Außenbereich auf zusätzliche wetterschützende Schichtapplikationen verzichten zu können und damit das Gesamtbeschichtungssystem zu vereinfachen, müssen weitere Anforderungen wie eine ausreichende Hydrophobie, UV-Beständigkeit und Wetterstabilität erfüllt werden.

Die Anforderungen an das Matrixmaterial können wie folgt zusammengefasst werden:

- Transparenz: >85 % zwischen 0,3–2,5 µm
- Wetterfest: Wasserabweisend und UV-Beständig
- Emissionsleistung: >90 % zwischen 8–13 µm
- Für textile Rakelbeschichtungen geeignet
- Geringe Vernetzungszeiten (1–3 Minuten)

In Kapitel 2.3 wurden bereits verschiedene Matrixsysteme beschrieben und untersucht. Polydimethylsiloxan gehört zu den wenigen Materialien, die bereits im Zusammenhang mit Textilien für eine erhöhte Emissionsleistung im MIR [23] und eine hydrophobierende Wirkung [21] untersucht wurden. Polydimethylsiloxan wird in der Literatur häufig als Überbegriff für verschiedene Silikontypen verwendet.

Auf Basis der Ergebnisse und der gestellten Anforderungen liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit auf Silikonkautschuk als bevorzugtes Matrixmaterial.

Silikonkautschuk gehört zu den polymeren Werkstoffen, die funktionelle Gruppen wie Si-O-Si, C=O oder O-H aufweisen, was zu spezifischen Schwingungsfrequenzen und Vibrationsbanden und damit zu Absorptions- bzw. Emissionsspitzen speziell im atmosphärischen Fenster zwischen 8–13 μm führen. [116]

Für diese Arbeit wurden zwei Silikonsysteme untersucht und sind in der folgenden Tab. 4.2 aufgelistet. Für den Silikontyp LR6250F wird ein zusätzlicher Vernetzer 525 eingesetzt der ebenfalls in der folgenden Tabelle aufgelistet ist.

Tab. 4.2 Matrixsysteme.

Kennung innerhalb dieser Arbeit, Eigenschaften und Herstellerangaben.

Material	Dichte [g/cm ³]	Optische Eigenschaften/ Brechungsindex n _{D25} (589 nm; Temp. = 25°C)	Viskosität (1 s ⁻¹) [mPa·s]	Hersteller	Kennung
ELASTOSIL® LR 6250 F TRANSPARENT Flüssigsilikonkautschuk (LSR)	1,07	hochtransparent	100000	Wacker Chemie AG	LR oder LR6250F
LUMISIL® LR 7601/60 A/B Flüssigsilikonkautschuk (LSR)	1,04	hochtransparent / 1,41	49000	Wacker Chemie AG	LUMISIL
ELASTOSIL® Vernetzer 525	0,94–0,98	klar, farblos	300–500	Wacker Chemie AG	Vernetzer 525

Der Silikontyp LR6250F wird bereits für textile Beschichtungsanwendungen im Außenbereich wie dem Membranbau eingesetzt. Er zeichnet sich durch eine hohe Witterungs- und Alterungsbeständigkeit sowie Transluzenz aus und ist schmutz- und wasserabweisend. [117]

LUMISIL wird als Vergleichsmaterial herangezogen. Das Produkt weist eine hohe optische Transparenz auf, die die von Polycarbonat oder Polymethylmethacrylat übersteigt und ist ebenfalls für die Anwendung im Außenbereich (gemäß UL 746C) geeignet. Der Unterschied der beiden Silikontypen liegt in den verwendeten Füllstoffen, LR6250F enthält Füllstoffe auf Basis von Silica. LUMISIL 7601/60 enthält Füllstoffe auf Basis von Siliconharzen und ist daher hochtransparent. [118]

Beide Silikontypen sind zwei Komponenten Werkstoffe und additionsvernetzend, was bedeutet, dass ein zusätzlicher Vernetzer eingesetzt werden muss. Die Vernetzung basiert auf einer platinkatalysierten Hydrosilylierung. Die Vernetzungszeit ist abhängig von der eingesetzten Temperatur. Bei 150 °C wird eine Vernetzung nach etwa fünf Minuten gemäß den Herstellerangaben erreicht. Für LR6250F wird der Vernetzer ELASTOSIL 525 verwendet. LUMISIL besteht aus den Komponenten A und B.

4.1.3 Partikel

Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, werden verschiedene Materialien für Partikel als niedrig emittierend (Low-e) definiert und eingesetzt, wobei der Schwerpunkt aufgrund der sehr guten strahlungsoptischen Eigenschaften auf Silber und Aluminium liegt. Unter Berücksichtigung der gestellten Anforderung einer wirtschaftlichen Umsetzbarkeit und damit zusammenhängend kostengünstigeren Herstellung, wird in dieser Arbeit der Nutzen von niedrig emittierenden Partikeln am Beispiel von Aluminium untersucht und herausgestellt.

Die Auflistung der in dieser Arbeit untersuchten Partikelsysteme für Low-e wird in der Tab. 4.3 wiedergegeben.

Tab. 4.3 Partikelsysteme Low-e

Kennung innerhalb dieser Arbeit, Eigenschaften und Herstellerangaben.

Produktbezeichnung	Partikelgröße d50 [µm]	Dichte [g/cm³]	Hersteller	Kennung
IReflex 5000 white	44,0–54,0	-	ECKART GmbH Art.Nr.: 000216ZZ2	IReflex
STANDART PCR 214 Aluminiumpulver	28,0–34,0	2,5	ECKART GmbH Art.Nr.: 000240ZZ2	Al214
STANDART PCR 212 Aluminiumpulver	45,0–51,0	2,5	ECKART GmbH Art.Nr.: 000239ZZ2	Al212

Bei den ausgewählten Metallpartikeln handelt es sich um Non-Leafing-Silverdollar-Aluminiumpigmente. Silverdollar-Pigmente weisen aufgrund der glatteren und weniger rauen Oberfläche eine höhere Brillanz und eine größere spiegelnde, gerichtete Reflexionsfähigkeit gegenüber Non-Leafing-Cornflake-Aluminiumpigmenten auf. Non-Leafing bedeutet, dass sich die Aluminiumpartikel gleichmäßig im Beschichtungssystem verteilen und nicht, wie bei einem Leafing-Pigment, an der Beschichtungsoberfläche absetzen. Der Vorteil liegt in einer höheren Abriebstabilität. [119]

Um den Größeneinfluss der Aluminiumpartikel im Beschichtungssystem untersuchen zu können, werden zwei verschiedene Größenverteilungen (Al214 und Al212) in dieser Arbeit näher betrachtet. Basierend auf den Ergebnissen von Yuan *et al.* [120] werden Aluminiumpartikel mit einer Partikelgröße >23 µm untersucht.

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, werden Weißpigmente zur Erzielung hoher solarer Reflexionswerte eingesetzt.

Das Produkt IReflex 500 white ist ein weißes IR-reflektierendes Aluminiumpigment mit einer ähnlichen Partikelgröße gegenüber Al212. In die Silikathülle wurde ein weißer Füllstoff eingearbeitet, sodass eine höhere solare Reflexionsleistung erzielt werden kann. Dieses Produkt wird als Vergleichspigment für das Standard PCR Aluminiumpulver herangezogen.

Titandioxid hat in der Rutil-Modifikation unter allen verfügbaren Weißpigmenten im sichtbaren Bereich den größten Brechungsindex mit ca. 2,75 [121] und damit zusammenhängend einen starken Streufaktor (1.9), sodass eine vergleichsweise hohe Opazität bei geringeren Partikelkonzentrationen und Schichtdicken erzielt werden kann. [122]

In der Literatur wird neben TiO_2 auch BaSO_4 zur Erzielung hoher solarer Reflexionswerte in Farbsystemen eingesetzt. BaSO_4 wird deshalb als Vergleichsmaterial herangezogen.

Die Weißpigmente integriert in das Silikonsystem werden in dieser Arbeit zum einen als Referenzprobe gegenüber dem System mit integrierten Aluminiumpartikeln eingesetzt (vgl. Abschnitt 5.2) und zum anderen zur Erhöhung der Gesamtreflexionsleistung im einlagigen (vgl. Abschnitt 5.3) und zweilagigen (vgl. Abschnitt 5.4) Beschichtungssystem (B2, B3) untersucht.

Die ausgewählten Weißpigmente und ihre Kennung sind in Tab. 4.4 gelistet.

Tab. 4.4 Partikelsysteme Weißpigment.

Kennung innerhalb dieser Arbeit, Eigenschaften und Herstellerangaben

Produktbezeichnung	Partikelgröße d50 [μm]	Color CIE L*	Dichte [g/cm ³]	Hersteller	Kennung
Ti-Pure R-900 Titanium Dioxide	0,41	99,8	4,0	Chemours	TiO ₂ R900
Ti-Pure TS-6200 Titanium Dioxide	-	99,4	4,0	Chemours	TiO ₂ TS6200
Ti-Pure TS-6300 Titanium Dioxide	0,53	100	3,7	Chemours	TiO ₂ TS6300
Bianco Fisso M 0,7 FLASH	0,7	min. 98	-	Harke Chemicals	BaSO ₄ 0,7

Um den Einfluss der Partikelgrößen im Zusammenhang mit dem Silikonsystem zu charakterisieren, werden drei Größenverteilungen (TiO₂ R900, TiO₂ TS6200 und TiO₂ TS6300) untersucht, deren mittlere Größen im Bereich der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes liegen.

4.2 Prozesse

Sowohl die Herstellung der Beschichtungspasten als auch die Applikation der Pasten auf das textile Substrat werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.2.1 Herstellung der Beschichtungspaste

Die Herstellung der Beschichtungspaste erfolgt in zwei Schritten: Zunächst werden die Siliconmasse und das Vernetzungsmittel dosiert und durch Rühren vermischt. Diese Paste beinhaltet das reine Matrixmaterial ohne Partikelintegration und wird für den Auftrag eines Grundstriches und für Vergleichsmessungen herangezogen. In einem zweiten Schritt wird

der verrührten Silikonpaste die entsprechende Partikelkonzentration zugeführt. Die genaue Vorgehensweise wird im Detail im folgenden Abschnitt erläutert.

Zuerst wird das Matrixmaterial Silikon in eine Kruke (Behälter des Unguator Systems, gako unguator PRO (Gako Deutschland GmbH)) eingefüllt. Die Menge ist dabei abhängig von der später aufzutragenden Fläche und Schichtdicke. Für eine Mustergröße von 20 cm² und einer Schichtdicke von 100 µm wird eine Gesamtmenge von ca. 20 ml angesetzt.

Das Silikon LR6250F (Wacker Chemie AG) ist ein Zweikomponentensilikon und besteht aus der Silikonkomponente LR6250F und einem Vernetzer 525 (Wacker Chemie AG). Das Mischverhältnis zwischen LR6250F und dem Vernetzer 525 basiert auf den Herstellerangaben von Wacker Chemie AG und beträgt 100:3. Der Silikontype LUMISIL (Wacker Chemie AG) besteht aus der Komponente LUMISIL A und LUMISIL B und wird in einem Mischverhältnis 1:1 angerührt. Die genaue Menge des Silikons, sowie des Vernetzers wird mit einer Kern-Waage ($d = 0,01$ g; Kern & Sohn GmbH) bestimmt. Auf Grundlage der Gesamtmenge des Matrixmaterials (Silikon) und des Vernetzers wird die erforderliche Partikelkonzentration in Masseprozent (Ma-%) berechnet. Die Partikel werden mit einer Feinwaage Mettler AE 200 ($d = 0,001$ g; Mettler Waagen GmbH) abgewogen und der Silikonmasse zugefügt.

Um eine gleichmäßige Vermischung der Silikonkomponenten und der Partikel in der Paste zu gewährleisten und um eine Agglomerat Bildung zu vermeiden, wird die Paste mittels des Unguator für drei Minuten und bei 800 U/min dispergiert. Die Einstellung gewährleistet dabei ein schonendes Verteilen der Partikel. Damit werden Lufteinschlüsse reduziert und eine Partikelschädigung bei hohen Scherkräften vermieden. Die Rührzeit und -geschwindigkeit sind ausreichend gewählt, um eine gleichmäßige Verteilung der Komponenten und Pigmente in dem Silikonsystem zu erzielen (vgl. Abb. 4.1).



Abb. 4.1 Fertig gerührte Beschichtungspaste.

Gleichmäßige Verteilung der Partikel in der Silikonmatrix (am Beispiel von 20 Ma-% TiO₂ in LR6250F)

Die maximale Krukengröße, die in dieser Arbeit zum Anrühren der Paste verwendet wurde, beträgt 500 ml. Für den Ansatz von größeren Mengen kann eine erneute Anpassung der Rührgeschwindigkeit und -zeit sinnvoll sein.

In der Abb. 4.2 werden die einzelnen Schritte kurz schematisch zusammengefasst dargestellt.

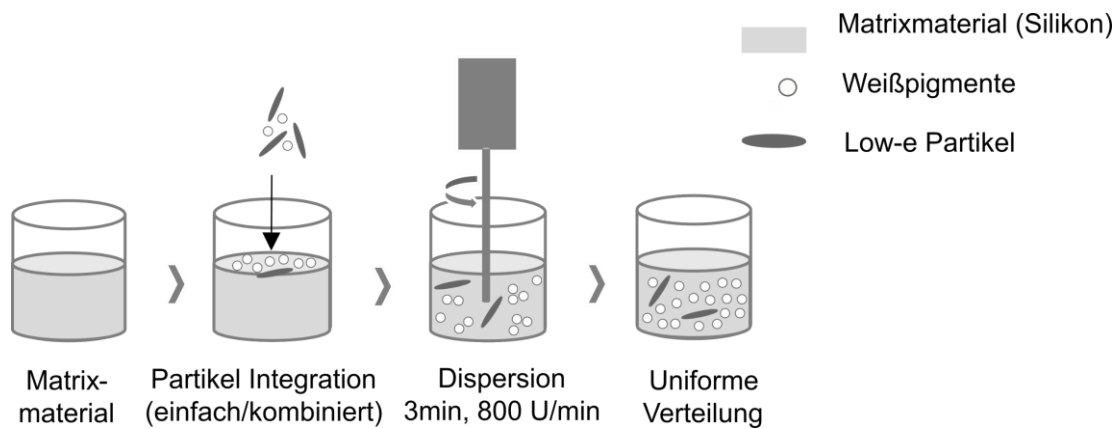


Abb. 4.2 Schematische Darstellung der Pastenherstellung.

4.2.2 Beschichtungsauftrag

Die vorbereitete Beschichtungspaste wird anschließend mit dem Mathis Labcoater (Werner Mathis AG, Typ-Nr. LTE-S M 68404) auf unterschiedliche textile Substrate appliziert. Das Rakelverfahren gehört zu den etablierten Prozessmethoden in der Textilindustrie, um Beschichtungspasten auf einen textilen Träger aufzutragen. Damit wird sichergestellt, dass eine spätere Skalierbarkeit sowie wirtschaftliche Produzierbarkeit möglich ist.

Um einen gleichmäßigen Auftrag und eine definierte Schichtdicke der Beschichtung zu erzielen, wird ein Walzenrakel eingesetzt. Die textile Probe wird in einem Nadelspannrahmen an zwei gegenüberliegenden Seiten eingespannt und zwischen die Gegenwalze und das Rakel eingesetzt. Die Schichtdicke wird über die Streichdicke bestimmt. Diese wird am Mathis Labcoater über Messuhren mit einer Einstellgenauigkeit von 0,01 mm eingestellt. Die Beschichtung wird mit einem Rundrakel aufgetragen. Vor jedem neuen Beschichtungsauftrag wird die Schichtdicke mittels eines Messschiebers überprüft und gegebenenfalls angepasst. Die exakte Schichtdicke wird mit einem Rasterelektronenmikroskop bestimmt (vgl. Abschnitt 4.3.3).

Nach dem Beschichtungsauftrag wird die textile Probe im Mathis Labdryer (Werner Mathis AG, Typ-Nr. LTE-S M 68404) getrocknet. Basierend auf den Angaben des Silikonherstellers sowie Voruntersuchungen wird der Beschichtungsauftrag für 100 °C und drei Minuten getrocknet, anschließend wird die Temperatur auf 150 °C erhöht und die Probe für drei Minuten vernetzt.

Durch eine geringere Temperatur und damit schonendere Trocknung kann die Luft entweichen bevor die Masse fest wird. Dadurch ist ein deutlich gleichmäßiger Beschichtungsauftrag möglich (vgl. Abb. 4.3).

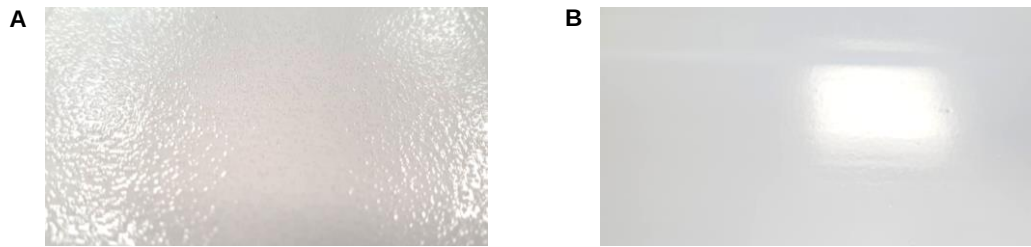


Abb. 4.3 Vergleich der vernetzten Beschichtung auf einem textilen Substrat bei unterschiedlichen Vernetzungszeiten und Temperaturen.

A Trocknung und Vernetzung bei 150 °C für drei Minuten; **B** Trocknung und Vernetzung in zwei Schritten: 100 °C und drei Minuten und 150 °C und drei Minuten. (am Beispiel 30 Ma-% TiO₂ in LR auf PES 65 g/m²)

Der Prozess des Beschichtungsauftrags wird in der folgenden Abb. 4.4 schematisch dargestellt.

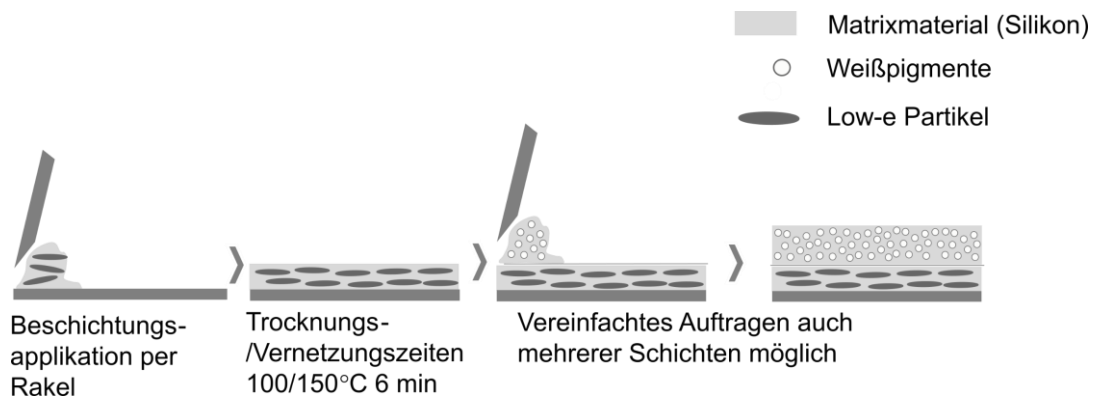


Abb. 4.4 Schematische Darstellung des Beschichtungsauftrags.

Beschichtungsapplikation auf textile Substratmaterialien über das Rakelverfahren ein- oder mehrschichtig.

4.3 Methoden

4.3.1 Partikelgrößenverteilung

Die Untersuchung der Partikelgrößenverteilung dient zum einen zur Überprüfung der Herstellerangaben und zum anderen zur exakten Bestimmung der in dieser Arbeit verwendeten Partikelgrößenverteilungen. Die kumulierte Partikelgrößenverteilung ($Q(x_i)$) gibt für eine bestimmte Dispersitätsgröße (x) die Menge des Partikelkollektivs an, die aus Partikeln kleiner gleich der Größe (x_i) besteht [123]:

$$Q(x) = \frac{\text{Anzahl der Partikel mit } x \leq x_i}{\text{Gesamtanzahl der Partikel}} \quad (4.1)$$

Für die kumulative Verteilungskurve müssen die größten und kleinsten Partikeldurchmesser x_{min} und x_{max} bekannt sein, um den Größenbereich zu

charakterisieren, in dem sich die Partikel befinden. Daraus folgen die Normierungsbedingungen $Q(x_{min}) = 0$ und $Q(x_{max}) = 1$. [123]

Die Größenverteilung, wird mit einem Partikelgrößenanalysator (LA-300, HORIBA, Japan) gemessen. Die Partikel werden in destilliertem Wasser dispergiert und dem Gerät zugeführt. Die Messung wird nach dem Laserlichtstreuungsprinzip (nach DIN/ISO 13320) $n = 3$ durchgeführt. Die Größenverteilung wird mit dem Perzentil d50 angegeben.

4.3.2 Spektroskopie

Um einzelne Einflussfaktoren der Beschichtungskomponenten hinsichtlich strahlungsoptischer Eigenschaften untersuchen zu können, werden die Proben spektralanalytisch vermessen. Die Daten der Spektralmessungen dienen neben der Charakterisierung des Beschichtungsauftrages weiter als Grundlage für die theoretische Berechnung der Temperaturreduktion und Kühlleistung (vgl. Kapitel 7).

Für den Wellenlängenbereich von 0,3–2,5 μm wird das UV-Vis-NIR Spektrometer Lamda 1050+ (Perkin Elmer) verwendet. Dabei handelt es sich um ein Zweistrahl-Spektrometer mit Doppelmonochromator. Für den Wellenlängenbereich im mittleren Infrarot von 2,5–20 μm wird ein Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometer (FTIR) Vertex 80 (Bruker) verwendet.

Zur Bestimmung des gerichtet-hemisphärischen spektralen Reflexionsgrades R_{gh} und des gerichtet-hemisphärischen spektralen Transmissionsgrades T_{gh} wird für beide Wellenlängenbereiche eine Ulbrichtkugel eingesetzt. Die Innenfläche der Ulbrichtkugel besteht aus einer reflektierenden Beschichtung. Im Spektrometer Lamda 1050+ wird eine 150 mm Integrationskugel mit einem InGaAs (Indium-Gallium-Arsenid) Detektor mit einer Innenbeschichtung aus Spectralon® verwendet. In der Vertex 80 wird eine goldbeschichtete Integrationskugel mit einem DLaTgs-Detektor (Deuteriertes L-Alanin dotiertes Triglycinsulfat) eingesetzt.

Die Messung der Proben findet bei Raumtemperatur statt. Für beide Geräte wird eine Probengröße von 5x5 cm eingesetzt. Die Messung erfolgt in Anlehnung an ASTM- E- 903:2020 (Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres) [124].

In der folgenden Abb. 4.5 wird die Messeinrichtung für die Spektralmessung der Reflexion und Transmission für das Lamda 1050+ schematisch dargestellt.

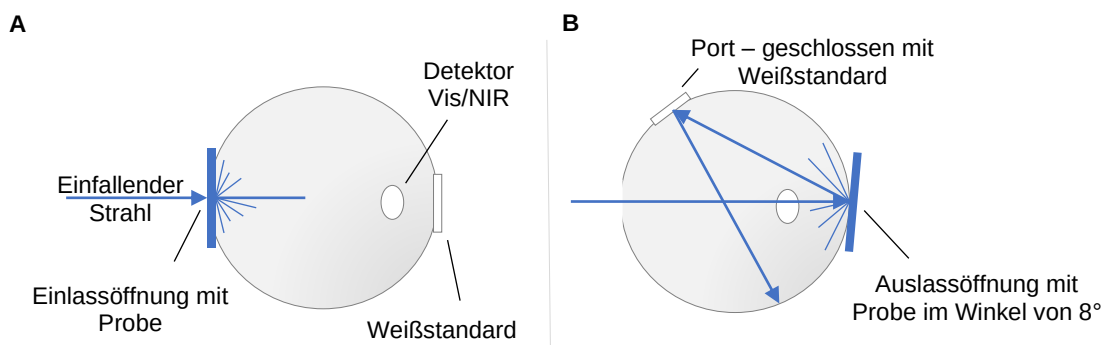


Abb. 4.5 Schematische Darstellung der Messeinrichtung für die Spektralmessung mit dem Lambda 1050+ (Perkin Elmer, U.S.A.).

A Messung der totalen Transmission; **B** Messung der totalen Reflexion

Die totale Transmission wird gemessen, indem die Probe im Perkin Elmer vor die Einlassöffnung geklemmt wird. Vor die Auslassöffnung wird ein Reflexionsstandard aus Spectralon® der Firma Labsphere angebracht. Dieser Standard entspricht der Innenbeschichtung der Ulbrichtkugel und wird auch zur Kalibration der Messung verwendet.

Für die Messung der totalen Reflexion wird die Probe in den Probenhalter vor die Auslassöffnung gelegt. Der Lichtstrahl tritt durch die Einlassöffnung in die Kugel und wird gerichtet auf die Probe gelenkt, sodass die Einstrahlung normal zur Probenoberfläche erfolgt. Die Probe wird in einem Winkel von 8° zum Einstrahlwinkel angebracht. Dadurch wird verhindert, dass Strahlung durch spiegelnde Reflexion an der Probenoberfläche durch die Einlassöffnung entweichen kann und damit nicht durch den Detektor erfasst wird. Zur Messung der totalen Reflexion wird der zweite Port mit einem Weißstandard (Spectralon®, Labsphere) geschlossen.

Vor jeder neuen Messreihe wird eine Nulllinie $T\% = 100$ mit dem Kalibrierstandard Spectralon® (Labsphere) ermittelt.

Die Messeinrichtung für die Spektralmessung der Reflexion und Transmission im mittleren Infrarotbereich mit dem Vertex 80 (Bruker) wird in der folgenden Abb. 4.6 schematisch dargestellt.

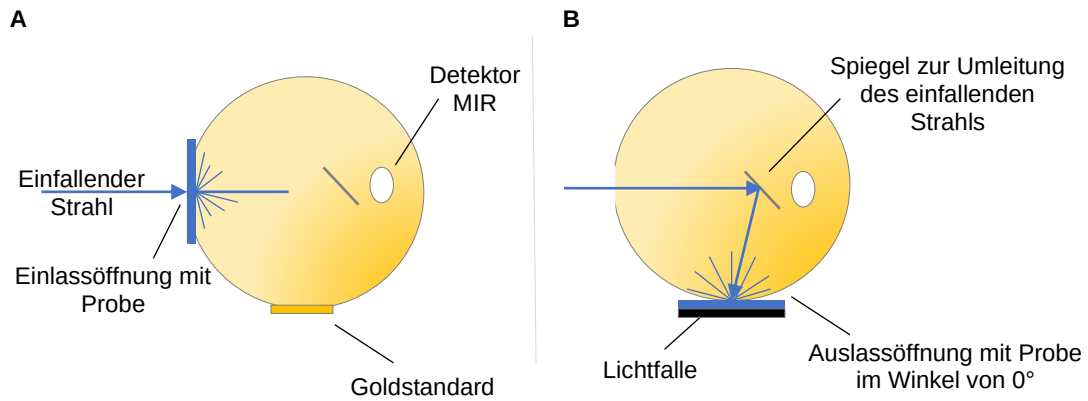


Abb. 4.6 Schematische Darstellung der Messeinrichtung für die Spektralmessung mit dem Vertex 80 (Bruker, U.S.A).

A Messung der Transmission; **B** Messung der Reflexion

Für die Messung der Transmission wird die Probe vor die Einlassöffnung geklemmt. Vor die Auslassöffnung wird ein Goldstandard angebracht, der dem Innenraum der Kugel entspricht. Für die Reflexion wird die Probe an der Unterseite der Ulbrichtkugel und in einem Messwinkel von 0° angebracht. Unterhalb der Probe wird eine Lichtfalle eingesetzt. Vor jeder neuen Messreihe wird eine Hintergrundmessung mit dem Goldstandard ohne Probe ausgeführt.

4.3.3 Materialphysiologische Untersuchung mit Messung der Schichtdicke

Zur Abbildung des Beschichtungsaufbaus, der Partikelverteilung in der Beschichtung und der Messung der Beschichtungsdicke wird der Querschnitt der Probe mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) (Hitachi TM1000) abgebildet und analysiert.

Die Schichtdicke ergibt sich aus dem Abstand von Materialgrenzlinien im aufgenommenen Materialprofil, sodass auch bei mehrlagigen Aufträgen für jede Schicht die Dicke exakt bestimmt werden kann.

Dafür wird ein Probenstück der Größe 5x5 mm aus dem Prüfling mit einem Skalpell entnommen. Eine Vorrichtung ermöglicht es, die Proben in einem Winkel von 90° zum Probenhalter auf ein Kohlenstoffband anzubringen (vgl. Abb. 4.7), sodass der Elektronenstrahl senkrecht auf die zu untersuchende Probe trifft und der Querschnitt bei gleichem Winkel aufgenommen und analysiert werden kann.



Abb. 4.7 Vorrichtung zur visuellen Untersuchung des Beschichtungsquerschnitts und Messung der Schichtdicke.

Von jeder Musterprobe werden zwei Probenstücke an unterschiedlichen Stellen entnommen. Pro Abschnitt wird die Schichtdicke $n = 5$ vermessen, sodass der Mittelwert für $n = 10$ angegeben wird. Die Proben werden bei Bedarf zusätzlich besputtert, um eine Probenaufladung zu vermeiden.

4.3.4 Wärmeleitfähigkeit

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit dient zur weiteren Charakterisierung der Proben und wird für die Berechnung der Kühlleistung in Kapitel 7 als Kennwert verwendet. Die Durchführung zur Messung der Wärmeleitfähigkeit für flächige Proben erfolgt in Anlehnung an DIN 52616 [125]. Die textile Probe mit einer Fläche von 20x20 cm wird einem Temperaturgradienten zwischen zwei Messplatten ausgesetzt. Gemessen werden die Temperatur, die Temperaturdifferenz, die Wärmestromdichte und die Probendicke. Die Messdauer beträgt ca. 30 Minuten. Nach Erreichen der stationären Temperatur wird die Wärmeleitfähigkeit (λ) über den Zeitraum von 30 Minuten berechnet und gemittelt basierend auf:

$$\lambda = \frac{\bar{q} \cdot d \cdot 10^3}{T_{Probe_oben} - T_{Probe_unten}} \quad (4.2)$$

Wobei d die Dicke des Materials, T_{Probe} die Probentemperatur und $\bar{q}$ die Wärmestromdichte wiedergeben. $\bar{q}$ wird durch die Addition der Wärmestromdichte der oberen Platte (q_w) mit der Wärmestromdichte der unteren Platte (q_k) geteilt durch zwei berechnet ($\frac{q_w + q_k}{2}$).

4.3.5 Rheologie

Die Messung der Viskosität dient der Evaluierung der rheologischen Eigenschaften von Beschichtungspasten in Abhängigkeit von ihrer Partikelkonzentration. Mit zunehmendem Feststoffanteil steigt die Viskosität, was sich auf die Orientierung der Partikel und die Applikation der Beschichtung auswirken kann. Zur Bestimmung der Viskosität wird ein Rotationsrheometer vom Typ MCR301 (Anton Paar GmbH) mit einem Platte-Platte-Messsystem verwendet. Die Paste wird auf die untere Platte appliziert. Die Messung erfolgt

bei Raumtemperatur ($25 \pm 0,2$ °C). Die dynamische Viskosität η , angegeben in mPa·s, wird als Quotient aus der gemessenen Schubspannung τ [Pa] und der Scherrate $\dot{\gamma}$ [1/s] berechnet.

4.3.6 Berechnung der Kühlleistung

Zur numerischen Berechnung und Simulation der Kühlwirkung und -leistung in Celsius und W/m^2 wird das Software-Programm MATLAB R2022a (The MathWorks, Inc.) verwendet.

5. Entwicklung der Beschichtungssysteme

Ein Ziel dieser Arbeit besteht darin, dass das eingesetzte Substratmaterial keinen Einfluss auf die strahlungsoptischen Eigenschaften des Gesamtverbundes haben. Die Beschichtung soll eine substratunabhängige Kühlleistung und Temperaturreduktion erzielen. Um mögliche Einflüsse der Substratmaterialien auf die zu untersuchenden Beschichtungsmerkmale ausschließen zu können, werden deshalb verschiedene textile Materialien spektralanalytisch untersucht und anhand der Ergebnisse drei von sechs Substraten ausgewählt, die für weiterführende Versuche und Analysen verwendet werden (vgl. 5.1.1).

Die Verwendung des Begriffs „solar“ oder „solarer Bereich“, wenn nicht anders definiert, bezieht sich in dieser Arbeit auf den Wellenlängenbereich zwischen 0,3–2,5 μm .

Die Beschichtungsvariablen (V) spielen eine entscheidende Rolle zur Erreichung einer substratunabhängigen und selbstkühlenden Funktion des Textils.

Die Abb. 5.1 gibt eine schematische Übersicht über die Vorgehensweise in Kapitel 5 wieder.

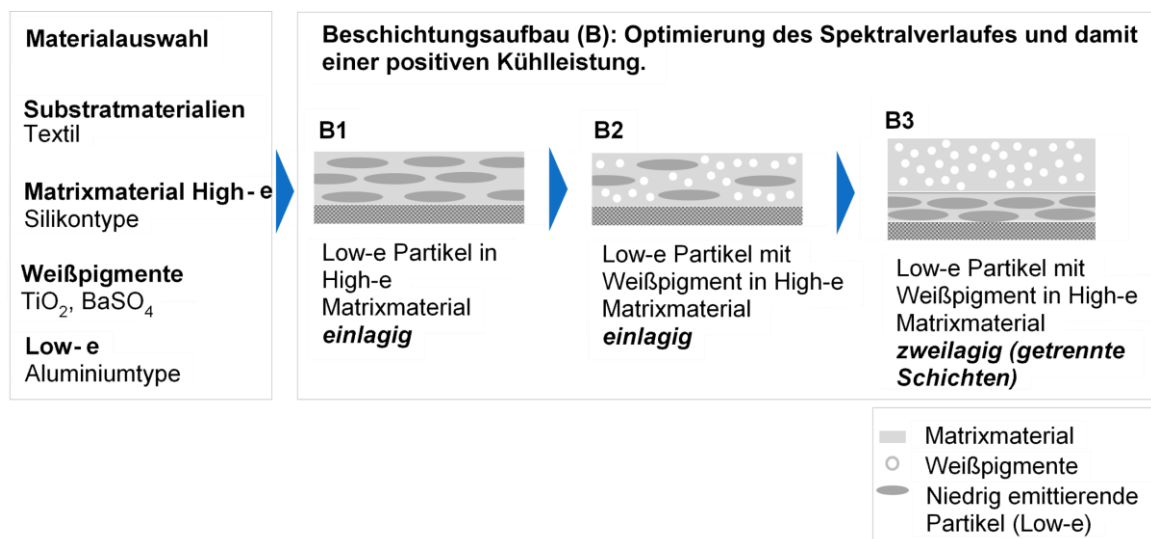


Abb. 5.1 Übersichtschart zur Entwicklung der Beschichtungssysteme mit dem Ziel einer substratunabhängigen und positiven Kühlleistung.

Die spezifische Materialauswahl für das Matrixmaterial Silikon und die integrierten Partikelsysteme werden im Kapitel 5.1 charakterisiert und herausgearbeitet. In Kapitel 5.2 wird der Einfluss der niedrig emittierenden Partikel hinsichtlich einer substratunabhängigen Applikation untersucht. Dabei werden die Grundlagen erarbeitet und die Parameter der Low-e Partikel bezüglich ihrer Art, Größe, Verteilung in der Beschichtung, Konzentration und Schichtdicke anhand eines einlagigen Beschichtungssystems (B1) charakterisiert. Die Ergebnisse und Analysen dienen der

Überprüfung der in Kapitel 3 aufgestellten Hypothese (1). Auf Grundlage der Ergebnisse aus dem Kapitel 5.2 wird das Beschichtungsdesign (Kapitel 5.3. und 5.4) weiter optimiert. Durch die Kombination eines zusätzlichen Weißpigmentes werden die Spektralverläufe hinsichtlich einer positiven Kühlleistung im einlagigen (B2) und zweilagigen (B3) Beschichtungssystem angepasst. Jedes Kapitel dient der weiteren Optimierung und Einstellung der Beschichtungsvariablen, um das Ziel einer substratunabhängigen kühlenden Beschichtung für technische Textilien zu erreichen. Dabei werden die genannten Anforderungen (vgl. Abschnitt 2.3 und Kapitel 3) überprüft. Eine Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse bildet der Abschnitt 5.5.

5.1 Materialauswahl

Die Materialauswahl der Substrate als auch der Bestandteile der Beschichtung wird anhand von strahlungsspezifischen Eigenschaften, der solaren Reflexion, der Transmission und der Emissionsleistung im mittleren Infrarotbereich getroffen. Zusätzlich wird die Funktionalität und Wirtschaftlichkeit der Materialien berücksichtigt, einschließlich ihrer Eignung für textile Applikationen und ihre Verwendbarkeit in ein- und mehrschichtigen Beschichtungssystemen.

5.1.1 Einfluss der Substratmaterialien

Es werden unterschiedliche Fasertypen (PES, PA6.6, E-Glas) mit einer ähnlichen Flächenstruktur (Leinwand und Köperbindung) und vergleichbaren Flächengewichten (vgl. Abschnitt 4.1.1) spektralanalytisch untersucht (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Textilien weisen in Abhängigkeit des Fasermaterials und des Flächengewichtes einen individuellen Spektralverlauf sowohl im solaren ($0,3\text{--}2,5\text{ }\mu\text{m}$) als auch im mittleren Infrarotbereich ($2,5\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$) auf. Die einzelnen Spektralmessungen der solaren Reflexion und der Emission im mittleren Infrarot der im Abschnitt 4.1.1 gelisteten textilen Materialien können der Abb. 9.1 im Anhang entnommen werden, die vergleichend dargestellten Spektren der Abb. 5.2. Die prozentuale Abweichung des Spektralverlaufes im solaren Bereich zwischen Glas 163 g/m^2 und PES 65 g/m^2 beträgt über den Wellenlängenbereich von $0,3\text{--}2,5\text{ }\mu\text{m}$ durchschnittlich 47 %. Im mittleren Infrarotbereich ($2,5\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$) 20,9 %. Der Reflexionsverlauf von PA6.6 150 g/m^2 liegt, wie der Abb. 5.2A zu entnehmen ist, im solaren Bereich genau zwischen PES und Glas. Im mittleren Infrarotbereich beträgt die durchschnittliche prozentuale Abweichung zwischen $2,5\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ von PA6.6 zu PES 32,2 %.

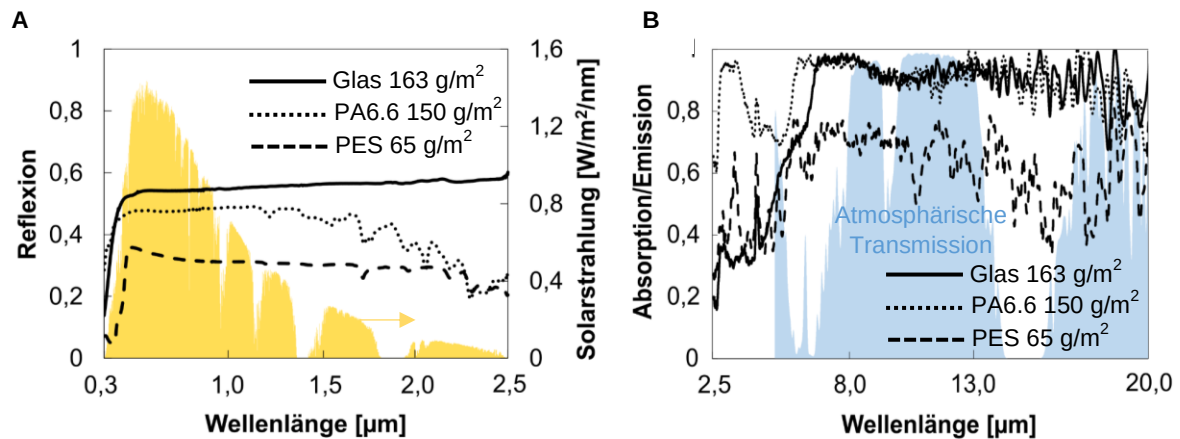


Abb. 5.2 Spektralverlauf der in dieser Arbeit verwendeten textilen Substratmaterialien.

A Solarer Spektralverlauf mit der solaren Bestrahlungsstärke AM1.5 (gelb);
B Emissionsverlauf im mittleren Infrarot mit dem atmosphärischen Transmissionspektrum (hellblau).

Die Spektralverläufe dieser drei Gewebetypen mit unterschiedlichen Fasermaterialien und Flächengewichten sind somit signifikant verschieden. Um die große Spannweite der Festigkeitsklassen abzubilden und den Einfluss des textilen Substrates auf die Gesamtkühlleistung zu untersuchen, wird in den folgenden Versuchsreihen die Beschichtung auf diese drei Substratmaterialien appliziert und spektralanalytisch untersucht. Die Unterschiede in Bezug auf die solare Reflexion und Emission im MIR gilt es zu minimieren, sodass keine Substratunterschiede erkennbar sind und eine Substratunabhängigkeit in Bezug auf den textiltechnischen Anwendungskontext des Membran- und Zeltbaus durch die Beschichtungsapplikation nachgewiesen werden kann.

5.1.2 Analysen zum Matrixmaterial

Die Silikontypen werden, wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, angerührt. Der Typ LR6250F wird mit dem Vernetzungsmittel 525 in einem Verhältnis von 100:3 vermischt. Der Type LUMISIL A wird mit dem Vernetzungsmittel LUMISIL B in einem Verhältnis von 1:1 angesetzt. Anschließend werden beide Systeme im gako unguator PRO (Gako Deutschland GmbH) für drei Minuten bei 800 U/min verrührt. Um die Silikontypen zunächst ohne textilen Einfluss untersuchen zu können, wird die Paste wie in 4.2.2 beschrieben mit dem Labcoater auf eine Teflonfolie mit einem Rundraket aufgetragen. Anschließend werden die Silikonfilme je nach Herstellerangaben für drei Minuten und 150 °C im Labdryer getrocknet und vernetzt.

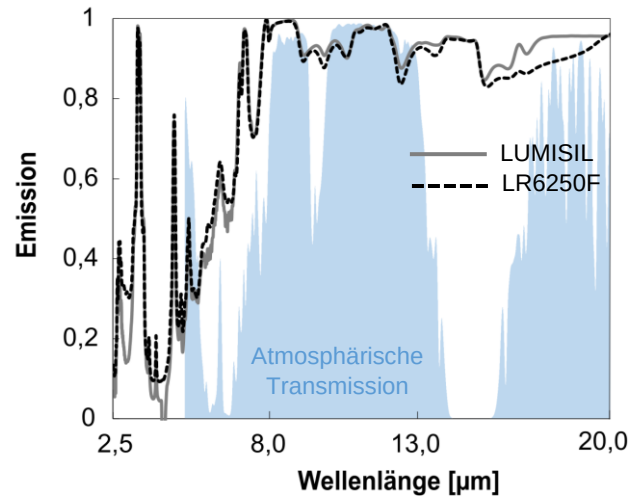


Abb. 5.3 Emissionsspektrum der Silikonfilme des Type LR6250F und Type LUMISIL im mittleren Infrarot.

Schichtdicke LR6250F: $84,62 \pm 1,75 \mu\text{m}$, LUMISIL: $90,51 \pm 3,26 \mu\text{m}$ ($n=10$).

Die Schichtdicke beträgt für beide Filme $90 \pm 10 \mu\text{m}$. Die vernetzten Silikonfilme werden von der Teflonfolie abgezogen und im Spektrometer vermessen.

Die Emissionsleistung steigt, wie der Abb. 5.3 zu entnehmen ist, im Bereich des atmosphärischen Fensters (8–13 μm) an und liegt für beide Silikontypen mit 94 % für LR6250F und 95 % für LUMISIL bei $>90 \%$.

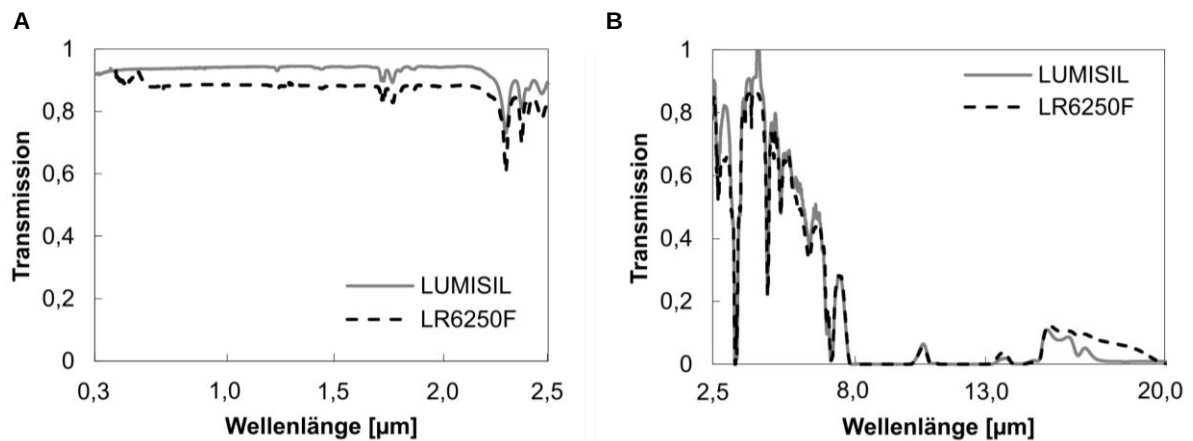


Abb. 5.4 Transmissionsverlauf der Silikonfilme des Type LR6250F und Type LUMISIL.

Schichtdicke LR6250F: $84,62 \pm 1,75 \mu\text{m}$, LUMISIL: $90,51 \pm 3,26 \mu\text{m}$ ($n=10$).

A Transmissionsverlauf der Silikonfilme des Type LR6250F und Type LUMISIL im solaren Bereich; **B** Transmissionsverlauf der Silikonfilme des Type LR6250F und Type LUMISIL im MIR

Beide Transmissionsverläufe liegen im solaren Bereich bei $>85 \%$ und erfüllen damit die in Abschnitt 4.1.2 gestellte Anforderung.

LUMISIL weist mit einer durchschnittlichen solaren Transmission von 89 % (zwischen 0,3–2,5 μm) einen höheren Wert gegenüber LR6250F (87 %) auf. Im mittleren Infrarotbereich sind die Verläufe der Silikontype nahezu identisch. Die Unterschiede hängen mit den im Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Materialkomponenten zusammen. LUMISIL enthält Füllstoffe auf Basis von Siliconharzen und ist damit im sichtbaren Bereich (0,3–0,9 μm) hochtransparent. [118]

Im Rahmen des Materialscreenings wurde festgestellt, dass LUMISIL im Vergleich zu LR6250F grundsätzlich langsamer vernetzt und anfälliger für Inhibierung ist. Bei der Integration der Partikelsysteme Al 214 und IReflex 500 White tritt ein inhibierender Effekt in Bezug auf die Platinkatalyse auf, wodurch das Silikonsystem mit LUMISIL nicht ausreichend vernetzt. Selbst bei erhöhter Temperatur (180 °C) und verlängerter Vernetzungszeit (10 Minuten) kann keine funktionsfähige Beschichtung erzielt werden. Dieser Effekt tritt bei der Integration von Al214 in LR6250F nicht auf. Darüber hinaus zeigt LUMISIL eine höhere Oberflächenklebrigkeit auf. Das kann potenziell negative Auswirkungen auf den Verschmutzungsgrad und die Handhabung des Endprodukts haben.

Aus diesem Grund wird für diese Arbeit der Silikontype LR6250F ausgewählt.

Um den Einfluss im Zusammenhang mit einem textilen Substrat untersuchen zu können, wird die Silikonpaste, wie in 4.2.1 und 4.2.2 beschrieben vermischt, auf einen textilen Träger appliziert und vernetzt. Anschließend erfolgt die spektrale Analyse. PES 65 weist mit einer durchschnittlichen Emissionsleistung von 67,5 % zwischen 8–13 μm die geringste Emissionsleistung im Vergleich zu Glas 163 und PA6.6 150 auf. Aus diesem Grund wird die Emissionserhöhung auf Grundlage des Silikonauftrages in Abhängigkeit der Schichtdicke am Beispiel von PES 65 g/m^2 dargestellt und kann der folgenden Abb. 5.5 entnommen werden.

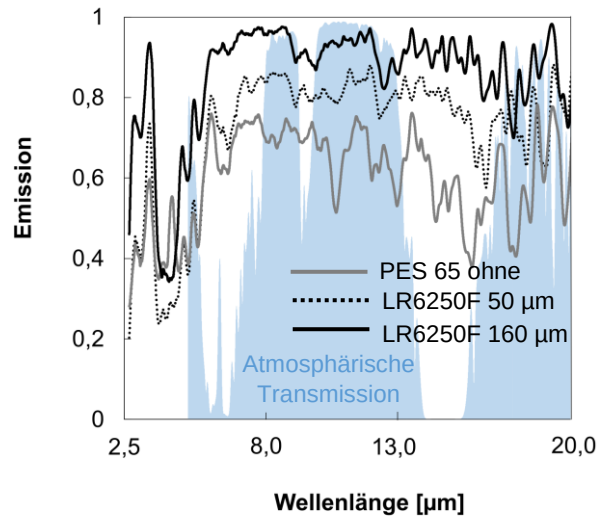


Abb. 5.5 Emissionsspektrum des Polyestergewebes in Abhängigkeit des Beschichtungsauftrages mit Silikon.

Schichtdicke: LR 50 µm: $39,8 \pm 22,4$ µm; LR 160 µm: $172,7 \pm 15,6$ µm ($n=10$).

Durch die höhere Schichtdicke wird die durchschnittliche Emissionsleistung zwischen 8–13 µm von 67,5 % (ohne Beschichtung) auf 82 % mit einem Silikonantrag von 50 ± 20 µm und auf 92,3 % mit einem Auftrag von 160 ± 15 µm erhöht. Die Emissionsleistung speziell zwischen 8–13 µm kann damit basierend auf dem Silikonantrag auf >90 % erhöht werden.

5.1.3 Analysen zu den Weißpigmenten

BaSO₄-Partikel und TiO₂-Partikel werden entsprechend der zu erzielenden Partikelkonzentration abgewogen und jeweils der Silikonmatrix (LR6250F und Vernetzer 525), wie in 4.2.1 beschrieben, hinzugefügt und verrührt. Aufgrund des geringeren Brechungsindex von BaSO₄ mit ca. 1,63 [126] gegenüber TiO₂ mit ca. 2,75 [121] wird eine entsprechend doppelt so hohe Partikelkonzentration von 40 Ma-% für BaSO₄ und eine doppelt so hohe Schichtdicke mit 150 ± 20 µm eingesetzt. Die Schichtdicke für die TiO₂-Beschichtung beträgt 80 ± 10 µm. Die Beschichtung wird auf ein Polyestergewebe (PES 65) mit dem Rakelsystem aufgetragen. Anschließend werden die Muster spektralanalytisch im Lamda 1050+ vermessen.

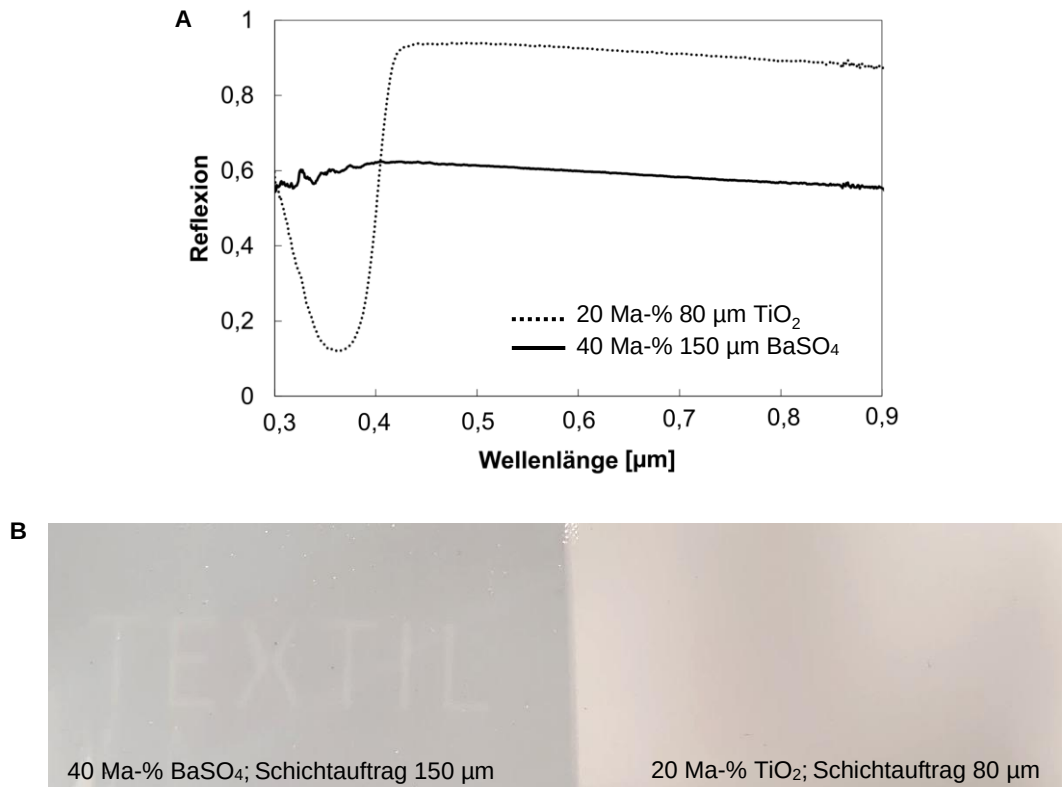


Abb. 5.6 Spektrale und optische Analyse des Partikeleinfluss BaSO₄ gegenüber TiO₂ in Silikon auf einem textilen Substrat.

A Spektraler Reflexionsverlauf von 0,3–0,9 μm für 20 Ma-% TiO₂ und einer Schichtdicke von $82,6 \pm 1,98$ μm auf PES 65 gegenüber 40 Ma-% BaSO₄ und einer Schichtdicke von $146,8 \pm 19,19$ μm auf PES 65; **B** optische Analyse der Opazität – Im Hintergrund liegt ein Schriftzug „Textil“ der von beiden Proben bedeckt wird, links: 40 Ma-% BaSO₄; $146,8 \pm 19,19$ μm auf PES 65, rechts: 20 Ma-% TiO₂, $82,6 \pm 1,98$ μm auf PES 65.

Auch bei doppelt so hoher Partikelkonzentration von BaSO₄ und einer deutlich höheren Schichtdicke gegenüber dem System mit TiO₂-Partikeln wird eine geringere Reflexion zwischen 0,3–0,9 μm von durchschnittlich 58,7 % gegenüber TiO₂ mit 77,7 % erzielt. Die Opazitätsunterschiede sind optisch deutlich zu erkennen. Das darunter liegende Material scheint beim BaSO₄-System durch (vgl. Abb. 5.6B). Der Brechungsindex von BaSO₄ liegt mit ca. 1,6 [126] sehr nahe dem des verwendeten Matrixmaterials (ca. 1,4–1,5) [127]. Dadurch ist der Streufaktor deutlich geringer und das Material erscheint transparenter. Um eine ausreichende solare Reflexion und Opazität mit BaSO₄ und anderen Partikeln mit geringerem Brechungsindex, wie sie in der Literatur zum Teil beschrieben werden, erzielen zu können, muss die kritische Partikelvolumenkonzentration (PVK) deutlich überschritten werden. Masseprozentanteile von 60–90 Ma-% werden eingesetzt. [28, 29] Durch das Überschreiten der kritischen Partikelvolumenkonzentration kann das Matrixmaterial nicht mehr alle Partikel vollständig umschließen; es entstehen zusätzlich Lufteinschlüsse. Durch

die Kombination aus Luft und Partikel entstehen neue Brechungsindexunterschiede an den Grenzflächen, die maßgeblich zum Streufaktor beitragen. Dieser Effekt wird auch als „Dry-Hiding“ bezeichnet. [74] Mit TiO_2 kann bereits mit einer geringeren Partikelkonzentration und Beschichtungsdicke eine insgesamt höhere solare Reflexionsleistung gegenüber BaSO_4 erzielt werden. Aus diesem Grund wird in den weiteren Arbeiten TiO_2 eingesetzt. Hier liegt ein deutlich größerer Brechungsindexunterschied zwischen dem Matrixmaterial und dem Weißpigment vor.

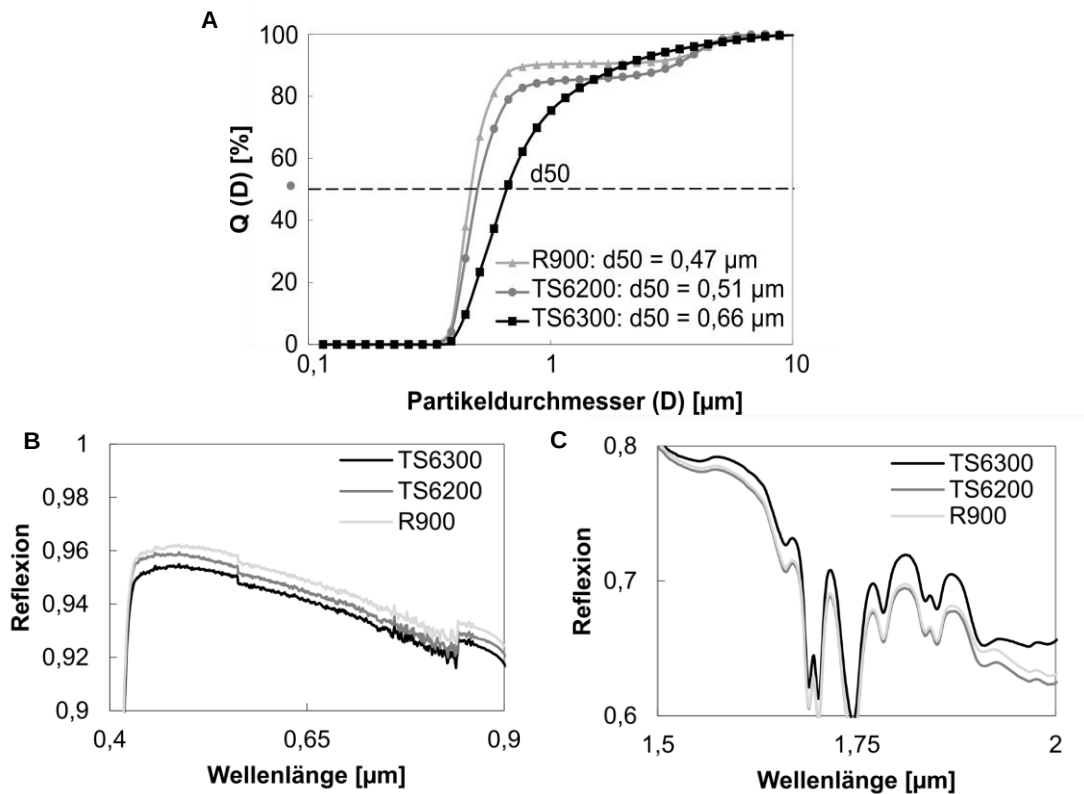


Abb. 5.7 Partikelgrößenverteilung und solarer Reflexionsverlauf der TiO_2 Type.
A Kumulative Verteilungskurve von R900 mit $d_{50} = 0,47 \pm 0,02 \mu\text{m}$, TS6200 mit $d_{50} = 0,51 \pm 0,03 \mu\text{m}$, TS6300 mit $d_{50} = 0,66 \pm 0,01 \mu\text{m}$ ($n=3$); **B** Reflexionsverlauf im sichtbaren Bereich zw. 0,4–1,0 μm für 30 Ma-% TiO_2 in LR6250F, $100 \pm 10 \mu\text{m}$, auf PES 65 g/m^2 ; **C** Reflexionsverlauf im nahen Infrarot zw. 1,5–2,0 μm für 30 Ma-% TiO_2 in LR6250F, $100 \pm 10 \mu\text{m}$, auf PES 65 g/m^2 .

Neben der Partikelart kann der Verlauf der solaren Reflexion durch die Einstellungen der Partikelgrößenverteilung und -konzentration beeinflusst werden.

Um eine optimale Partikelgrößenverteilung von TiO_2 für eine verbesserte Reflexionsleistung im Beschichtungssystem mit Silikon zu erzielen, werden drei verschiedene TiO_2 -Typen mit unterschiedlichen Größenverteilungen untersucht.

Die Partikelgrößenverteilung wird, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, mit dem Partikelgrößenanalysator LA-300 (HORIBA, Japan) vermessen und kann der Abb. 5.7A

entnommen werden. Die Beschichtungssysteme werden, wie in 4.2.1 und 4.2.2 beschrieben, hergestellt und auf das Polyestergewebe (PES 65) aufgetragen. Nach dem Trocknungs- und Vernetzungsprozess wird das Muster spektralanalytisch im Lambda 1050+ (vgl. Abschnitt 4.3.2) vermessen.

Abb. 5.7B zeigt eine durchschnittliche Reflexionsleistung im sichtbaren Bereich ($\lambda = 0,4\text{--}1,0\ \mu\text{m}$) für TiO_2 R900 ($d_{50} = 0,47\ \mu\text{m}$) von 93,4 %. Für den TiO_2 Type TS6300 ($d_{50} = 0,66\ \mu\text{m}$) liegt diese bei 93 %. Im NIR ($\lambda = 1,5\text{--}2,5\ \mu\text{m}$) wird dagegen durch die größere Partikelverteilung mit TS6300 eine Reflexionserhöhung um 1,6 % gegenüber dem Type TiO_2 R900 erzielt (vgl. Abb. 5.7C). Jede Reflexionssteigerung führt zu einer Reduzierung der absorbierten Solarstrahlung und damit zu einer verbesserten Kühlleistung. Bereits geringe prozentuale Zunahmen in der solaren Reflexion können einen positiven Einfluss nehmen.

Eine breite Partikelgrößenverteilung kann die Reflexionsleistung bezogen auf den gesamten solaren Spektralbereich erhöhen [88]. Um das zu untersuchen, werden die Partikeltypen R900, TS6200 und TS6300 zu gleichen Anteilen (1:1:1) gemischt. Die Partikelgrößenverteilung des gemischten Partikelsystems im Vergleich zu TiO_2 TS6300 wird in der folgenden Abb. 5.8 dargestellt.

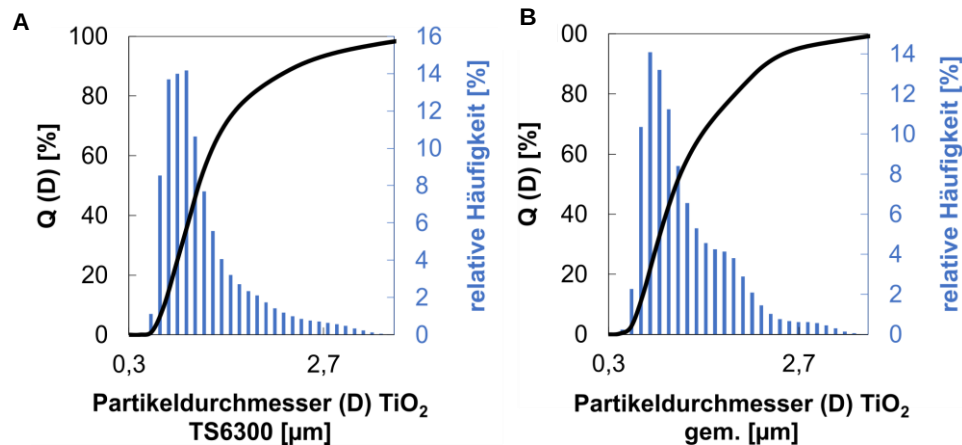


Abb. 5.8 Kumulative und relative Verteilungskurve der Partikelgröße für TiO_2 . ($n=3$)
A Partikelgrößenverteilung TiO_2 TS6300 mit $d_{50} = 0,659 \pm 0,01\ \mu\text{m}$;
B Partikelgrößenverteilung TiO_2 gemischt (TS6300, R900, TS6200; 1:1:1)
 $d_{50} = 0,665 \pm 0,05\ \mu\text{m}$

Das Perzentil d_{50} liegt für beide TiO_2 Typen (gemischt und Type TS6300) bei ca. $0,66\ \mu\text{m}$. Die Diagramme zeigen eine logarithmische Normalverteilung für TiO_2 TS6300 und eine davon etwas abweichende logarithmische Normalverteilung für das gemischte System auf, die mit der größeren Partikelgrößenkombination zusammenhängt.

Die Reflexionsmessungen zeigen, dass durch die gemischten Partikelgrößen eine minimale Steigerung der Reflexionswerte gegenüber den jeweiligen Referenzgrößen erzielt werden kann. Die Reflexionswerte im solaren Bereich ($\lambda=0,3\text{--}2,5\ \mu\text{m}$) liegen 0,3 % höher gegenüber dem Typ TS6300 und 0,4 % höher gegenüber R900 (vgl. Abb. 5.9A und B).

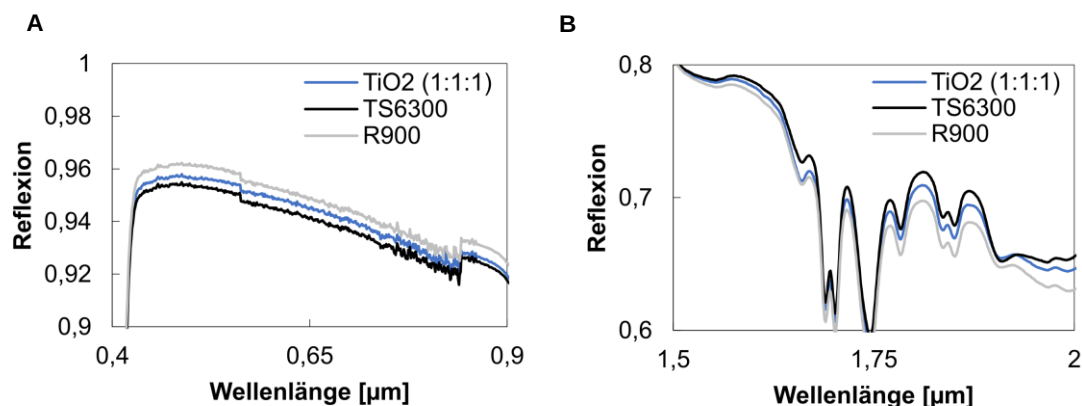


Abb. 5.9 Solarer Reflexionsverlauf der TiO₂ Type TS6300 und R900 im Vergleich zum gemischten System.

A Reflexionsverlauf im sichtbaren Bereich zw. 0,4–1,0 μm für 30 Ma-% TiO₂ in LR6250F; 100 $\pm$ 10 μm ; auf PES 65 g/m²; **B** Reflexionsverlauf im nahen Infrarot zw. 1,5–2,0 μm für 30 Ma-% TiO₂ in LR6250F; 100 $\pm$ 10 μm ; auf PES 65 g/m²

Die Gründe dafür liegen in einer breiteren Streuung über den gesamten solaren Wellenlängenbereich. Trifft eine Lichtwelle auf ein Objekt, dessen Größe in etwa der Wellenlänge des Lichtes entspricht, tritt Mie-Streuung auf. Durch eine breite Partikelgrößenverteilung wird über einen breiteren Spektralbereich das eintreffende Licht gestreut. Die Wertsteigerung für das gemischte System sind zwar sehr gering; eine breitere Partikelgrößenverteilung bietet jedoch den zusätzlichen Vorteil einer geringeren Notwendigkeit zur Kontrolle der Granularität. Dadurch können Herstellkosten verringert werden.

Aus diesem Grund wird in allen Versuchen, die mit TiO₂ durchgeführt werden, die Pigmentmischung eingesetzt. In den nachfolgenden Abschnitten bezieht sich die Verwendung von „TiO₂“ immer auf die Pigmentmischung im Verhältnis 1:1:1 (R900:TS6200:TS6300).

Zur Analyse und Festlegung der optimalen TiO₂-Konzentration für das Beschichtungssystem mit LR6250F werden Titandioxidkonzentrationen von 20 Ma-%, 30 Ma-%, 40 Ma-%, 50 Ma-% und 60 Ma-% untersucht. Dabei wird die Beschichtung, wie in 4.2.1 beschrieben, angesetzt und auf zwei textile Substrate (Glas 163, PES 65) aufgebracht.

Die Abb. 5.10 zeigt die maximale Reflexion im solaren Bereich in Abhängigkeit der Titandioxidkonzentration. Für Glas als Substratmaterial gilt, dass mit einer weiteren

Konzentrationserhöhung nach 40 Ma-% keine signifikante Steigerung der Reflexion mehr zu erzielen ist und die Kurve abflacht.

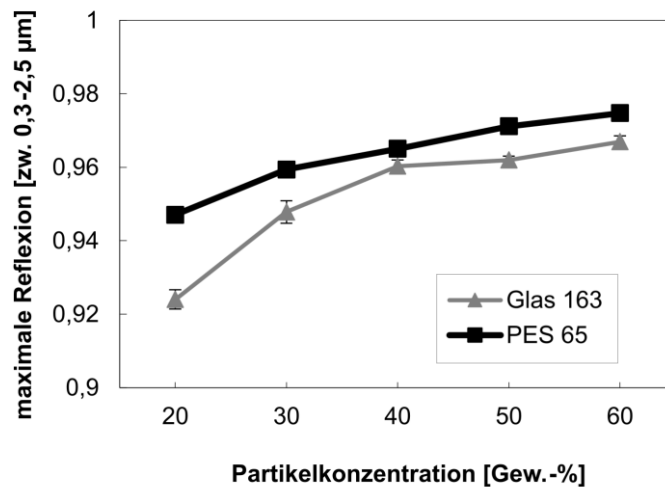


Abb. 5.10 TiO₂-Konzentrationsabhängige solare Reflexion im Vergleich von Glas 163 g/m² und Polyester 65 g/m².

Maximale Reflexion über den solaren Wellenlängenbereich von 0,3–2,5 µm für Glas (Beschichtungsdicke: 95,4±7,73 µm ($n=10$)) und PES (Beschichtungsdicke: 82,6±1,98 µm ($n=10$))

Für Farbsysteme mit TiO₂ ist bekannt, dass die Reflexion mit zunehmender Partikelkonzentration bis ca. 30 Ma-% ansteigt. Danach kann es zu einem optischen Crowding Effekt kommen, der bei einem weiteren Konzentrationsanstieg zu einer Abnahme der Reflexion führt. Um eine optimale Lichtstreuung erzielen zu können, müssen die Pigmente so in der Matrix verteilt sein, dass ein Überlappen von Streuquerschnittsflächen benachbarter Partikel vermieden wird. [88]

Aufgrund der eigenen Messergebnisse (Abb. 5.10) und den Aussagen aus der Literatur werden für die Beschichtungssysteme die Konzentrationen von 30 Ma-% und 40 Ma-% für TiO₂ in den folgenden Abschnitten 5.3 und 5.4 genauer untersucht und entsprechend eingestellt.

5.1.4 Niedrig emittierende Partikel (Low-e)

Wie im Stand der Forschung beschrieben, gibt es verschiedene Materialarten, die als Low-e Materialien eingesetzt werden.

Um die Reflexionseigenschaften weiter zu maximieren, besteht die Möglichkeit Aluminiumpartikel einzusetzen, die eine zusätzliche Weißbeschichtung aufweisen. Zu diesen Partikelsystemen gehört IReflex 5000 white (ECKART GmbH). In den Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass IReflex die Reflexionsleistung bei gleicher

Gewichtskonzentration gegenüber dem Aluminiumpigment erhöht, allerdings ist die Transmissionsleistung und damit die Substratunabhängigkeit deutlich geringer. Um den gleichen Effekt der substratunabhängigen Applikation und Reduzierung der Transmission zu erzielen, wie durch den Einsatz reiner Aluminiumplättchen, muss eine etwa doppelt so hohe Partikelkonzentration im Gegensatz zu Al212 eingesetzt werden. Die Ergebnisse können dem Anhang entnommen werden (vgl. Abb. 9.2) Bei Verdopplung des Materialeinsatzes ist auch der Vorteil einer höheren solaren Reflexionsleistung nicht mehr gegeben. Dazu kommt, dass diese Partikel teurer in der Herstellung und damit wirtschaftlich weniger attraktiv sind.

Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass nicht nur in Kombination mit LUMISIL, sondern auch mit LR6250F inhibierende Effekte auftreten und durch die alleinige Integration von IReflex in das Silikonsystem keine ausreichende Vernetzung möglich ist. Die Beschichtung mit IReflex-Anteil bleibt auch nach fünf Minuten und 150 °C unvernetzt. Die Abb. 5.11 zeigt die unvernetzte Beschichtung mit IReflex-Anteil.

Aus diesen Gründen wird der Nutzen von niedrig emittierenden Partikeln am Beispiel von plättchenförmigen Aluminiumpartikeln weiter untersucht.

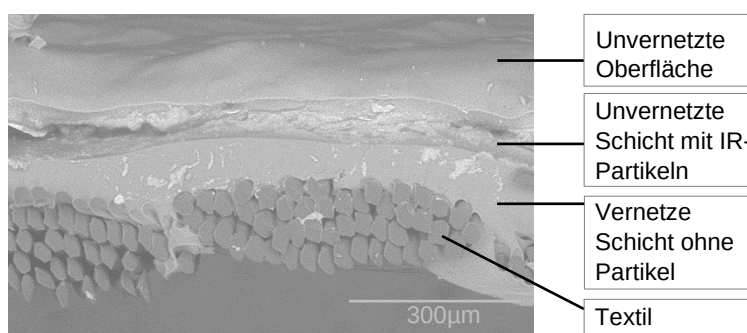


Abb. 5.11 Inhibierende Wirkung bei Zugabe von Ireflex 5000 white in LR.
Beschichtungszusammensetzung: 10 Ma-% IR + 20 Ma-% TiO₂. Der Schichtauftrag mit IR-Partikeln vernetzt nicht ausreichend, sodass keine ausgehärtete Schichtbildung entsteht. Im Rasterelektronenmikroskop kann die noch weiche Schicht optisch von dem vernetzten Silikonanstrich ohne IR-Partikel deutlich unterschieden werden.
(REM (Hitachi TM1000) x250)

5.2 Einfluss und Wirkungsgrad niedrig emittierender Partikel (Aluminium) im einlagigen Beschichtungssystem

Um den Effekt niedrig emittierender Partikel durch ihre direkte Integration in ein hochemittierendes Matrixmaterial zu untersuchen, werden die Einflussfaktoren der Aluminiumpartikel in einem einlagigen Beschichtungssystem (B1) analysiert. Dabei werden die verschiedenen Beschichtungsvariablen sowie der Einfluss des textilen Substratmaterials auf den Spektralverlauf im Bereich von 0,3–20 µm herausgearbeitet und

diskutiert. Die erzielten Ergebnisse dienen als Grundlage für die weiteren Beschichtungsversuche, beschrieben in 5.3 und 5.4.

5.2.1 Einfluss der Partikelgröße

Um eine möglichst geringe Rauigkeit und damit eine hohe gerichtete Reflexion zu erzielen, werden in dieser Arbeit zwei Größenverteilungen der Aluminiumpartikel untersucht.

Die Partikelgrößenverteilung wird mittels dem Partikelgrößenanalysator (LA-300, HORIBA, Japan) gemessen (vgl. Abschnitt 4.3.1). Die kumulative Verteilungskurve kann dem Anhang Abb. 9.3 entnommen werden. Die Größenverteilung für Al 212 liegt bei $d_{50} = 51 \mu\text{m}$ und für Al 214 bei $d_{50} = 33 \mu\text{m}$. Damit liegen die gemessenen Werte innerhalb der Spezifikation des Herstellers (vgl. Abschnitt 4.1.3, Tab. 4.3). Um den Einfluss der Aluminiumplättchen, unabhängig von dem jeweiligen Substrateinfluss, in einem einlagigen Beschichtungssystem auf die Reflexionsleistung untersuchen zu können, werden die Spektralverläufe der Reflexion im solaren Bereich ohne Substrat und mit zwei unterschiedlichen Substratmaterialien mit dem Lambda 1050+ der Firma Perkin Elmer zwischen $\lambda = 0,3\text{--}2,5 \mu\text{m}$ vermessen. Hierzu wird die Beschichtung bei gleicher Schichtdicke ($100 \pm 15 \mu\text{m}$) und Partikelkonzentration (10 Ma-%) auf ein Glasgewebe, ein Polyestergewebe und auf eine Teflon-Folie aufgebracht. Die Beschichtung kann anschließend von der Teflon-Folie abgezogen werden, sodass der Auftrag ohne Substrat in der reinen Filmform vermessen werden kann. In der folgenden Tab. 5.1 kann die gemessene solare Reflexionsleistung gemittelt über den Spektralbereich von $\lambda = 0,3\text{--}2,5 \mu\text{m}$ entnommen werden.

Tab. 5.1 Durchschnittliche solare Reflexionsleistung in Abhängigkeit der Partikelgrößenverteilung der Aluminium Type.

Vermessen auf Polyester, Glasgewebe und ohne Substrat (Film).

$R_{\text{sol}} (\lambda = 0,3\text{--}2,5 \mu\text{m})$	Al 212	Al 214	Ø Abweichung ($\lambda = 0,3\text{--}2,5 \mu\text{m}$)
PES 65 g/m ²	68,5 %	67,3 %	1,69 %
Glas 163 g/m ²	69,8 %	68,3 %	2,11 %
Film	72,1 %	68,8 %	4,6 %

Erkennbar ist, dass die Partikelgröße für Al212 mit einer Partikelverteilung von $d_{50} = 51 \mu\text{m}$ eine höhere durchschnittliche solare Reflexion gegenüber der Größenverteilung von $d_{50} = 32,9 \mu\text{m}$ (Al214) aufweist. Die durchschnittliche prozentuale Zunahme der solaren Reflexion liegt im Mittel bei 2,8 %. Diese Auswirkung zeigt sich besonders deutlich bei dem Beschichtungsfilm ohne Substrat, wobei eine Steigerung um 4,6 % gemessen wurde und damit einen deutlichen Anstieg der Reflexion im solaren Bereich bewirkt. Das liegt unter anderem an der verbesserten Ausrichtung der plättchenförmigen Partikel im Beschichtungssystem. Der Film wird auf einer glatten

Teflonschicht aufgetragen. Dadurch wird die Ausrichtung nicht von der textilen Struktur des Substratgewebes beeinflusst. Die Partikel sind ideal und damit horizontal zur Beschichtungsapplikation ausgerichtet (vgl. Abb. 5.12B, C). Die solare Reflexion, dargestellt in Abb. 5.12A, wird bei einer vergleichbaren Schichtdicke und Partikelverteilung für die Systeme Al212 und Al214 untersucht, sodass das Ergebnis auf den Einfluss der Partikelgröße zurückzuführen ist.

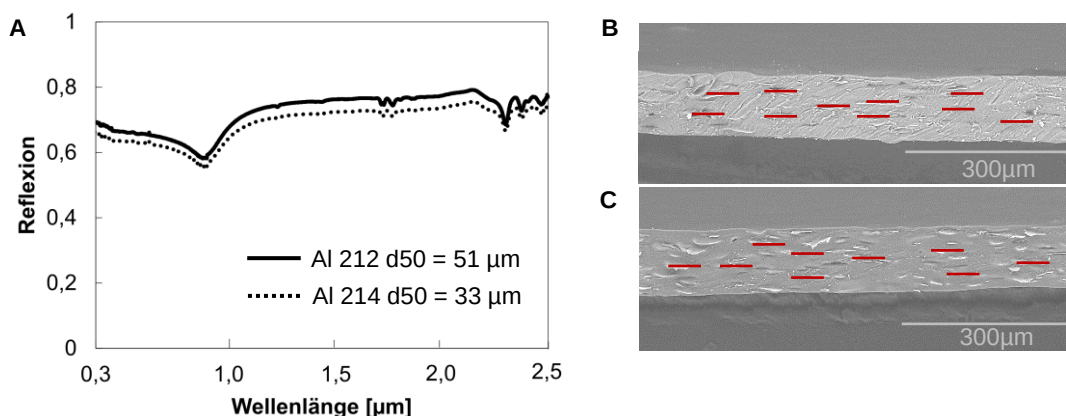


Abb. 5.12 Orientierung und Einfluss der Partikelgröße der Aluminiumpartikel. **A** Reflexionsverlauf der Aluminium Type im solaren Wellenlängenbereich; **B** Verteilung der Aluminiumplättchen in der Filmbeschichtung für Al 212 (rot markiert), Schichtdicke: $107,3 \pm 4,5 \mu\text{m}$ (REM (Hitachi TM1000) x250); **C** Verteilung der Aluminiumplättchen in der Filmbeschichtung für Al 214 (rot markiert), Schichtdicke: $110,9 \pm 3,7 \mu\text{m}$ (REM (Hitachi TM1000) x250)

Wenn Strahlung auf eine raue Oberfläche trifft, wird diese mehrfach gestreut und reflektiert. [120] Mit zunehmender Partikelgröße der Aluminiumplättchen nimmt die Oberflächenrauigkeit ab. Großflächige flache Aluminiumpartikel führen zu einer höheren spiegelnden Reflexion bzw. zu einer geringeren streuenden Reflexion, was die Extinktion schwächt und damit die solare Reflexion im gesamten Wellenlängenbereich von $\lambda = 0,3\text{--}2,5 \mu\text{m}$ erhöht (vgl. Abb. 5.12A).

Für die weiteren Untersuchungen der Einflussfaktoren V2–V5 und der Rolle von Low-e-Partikeln für strahlungskühlende Materialien wird die Partikelgrößenverteilung von $d_{50} = 51 \mu\text{m}$ (Al 212) verwendet.

5.2.2 Einfluss der Partikelverteilung

Neben der Partikelgröße hat die Partikelverteilung der plättchenförmigen Aluminiumpartikel in der Beschichtung einen entscheidenden Einfluss auf die solare Reflexion.

Die Partikelverteilung kann unter anderem durch die Viskosität der Beschichtungspaste beeinflusst werden. Neben verfahrenstechnischen Einstellungen, wie der

Rakelgeschwindigkeit, wird die Viskosität über die Beschichtungsstoffe wie das Matrixmaterial oder den Feststoffanteil eingestellt.

Die Viskosität wird mit einem Rotationsrheometer vom Typ MCR301 (Anton Paar GmbH), wie in Abschnitt 4.3.5 beschrieben, vermessen. Mit zunehmender Partikelkonzentration und damit einem zunehmenden Feststoffanteil in der Silikonmatrix nimmt gleichzeitig die Viskosität zu (vgl. Anhang Abb. 9.4).

Eine zu hohe Viskosität kann dazu führen, dass die Ausrichtung der Partikel negativ beeinflusst wird. [119]

Zur Analyse der Ausrichtung der Partikel im Beschichtungssystem, werden Querschnittaufnahmen im Rasterelektronenmikroskop (Hitachi, Japan) von den Proben aufgenommen (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die Partikelverteilung kann damit optisch analysiert werden und wird in der folgenden Abb. 5.13 wiedergegeben.

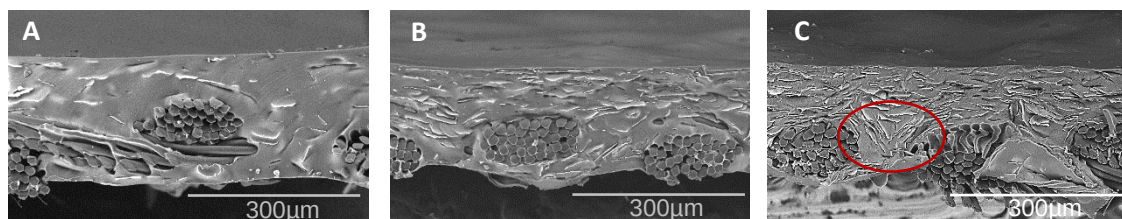


Abb. 5.13 Konzentrationsabhängige Partikelverteilung von Al 212 am Beispiel von PES 65 g/m². (REM (Hitachi TM1000) x250)

A 5 Ma-% Al 212 in LR6250F; **B** 20 Ma-% Al 212 in LR6250F; **C** 30 Ma-% Al 212 in LR6250F (rot markiert: Partikelablagerung in den Faserzwischenräumen).

Die Ausrichtung der Partikel horizontal zum Substratgewebe bleibt auch bei hoher Partikelkonzentration und damit einer höheren Viskosität der Paste bestehen. Was durch die optische Analyse ebenfalls erkennbar ist, dass eine Partikelablagerung auch zwischen den Faserräumen stattfindet (vgl. Abb. 5.13C der rot markierte Bereich). Die Partikelverteilung kann somit maßgeblich durch die textile Struktur beeinflusst werden.

Textile Substratmaterialien weisen durch die spezifische Faserablagerung Hoch- und Tiefstellen auf. Dadurch entsteht eine unregelmäßige Oberfläche, die zu einer Partikelablagerung auch zwischen den Fasern und innerhalb der Faserkreuzungspunkte führt. Die unregelmäßige Struktur kann dazu führen, dass die Orientierung nicht mehr horizontal zum Substratgewebe erfolgt, wie schematisch in Abb. 5.14 dargestellt, und die plättchenförmigen Aluminiumpartikel damit weniger orientiert in der Beschichtung liegen.

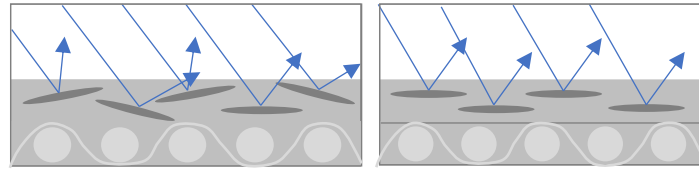


Abb. 5.14 Schematische Darstellung der Partikelorientierung plättchenförmiger Metallpartikel.

links: Partikelorientierung ohne Grundstrich; rechts: Partikelorientierung mit Grundstrich.

Eine Möglichkeit das zu unterbinden bietet die zusätzliche Applikation eines Grundstriches (grstr.). Ein Grundstrich bzw. Basecoat wird appliziert, sodass die Zwischenräume zwischen den Fasern mit der Beschichtungspaste ausgefüllt sind und eine glatte Oberfläche entsteht. Dadurch wird der Einfluss der textilen Struktur minimiert und eine Ablagerung der Partikel in den Faserzwischenräumen kann verhindert werden.

Um den Effekt zu überprüfen, wird ein Gewebe (Glas 163 g/m² und PES 65 g/m²) mit einem Grundstrich <50 µm aus dem gleichen Silikon, wie das des Matrixmaterials versehen (LR6250F). Das Rakel wird dafür soweit heruntergedreht bis es das Textil berührt. Dadurch werden durch den Grundstrich die Faserzwischenräume mit dem Silikonmaterial ausgefüllt, sodass eine möglichst glatte Oberfläche entsteht. Der Beschichtungsauftrag wird im Mathis Labcoater (Werner Mathis AG, Typ-Nr. LTE-S M 68404) für drei Minuten bei 100 °C getrocknet und vernetzt. Danach wird die vorher angerührte Beschichtungspaste mit der entsprechenden Konzentration (5 Ma-%–30 Ma-%) an Aluminiumpartikeln (Al212) auf den getrockneten Grundstrich mit dem Rakelverfahren aufgetragen (vgl. Abschnitt 4.2.2). Anschließend wird der Verbund im Labcoater von Mathis (Werner Mathis AG, Typ-Nr. LTE-S M 68404) für drei Minuten bei 100 °C und für drei Minuten bei 150 °C getrocknet und vernetzt.

Die Verteilung der Aluminiumplättchen wird konzentrations- und substratabhängig mit dem Rasterelektronenmikroskop TM1000 (Hitachi, Japan) optisch analysiert. Der Einfluss der Verteilung wird spektralanalytisch im Hinblick auf die solare Reflexion im Lambda 1050+ untersucht.

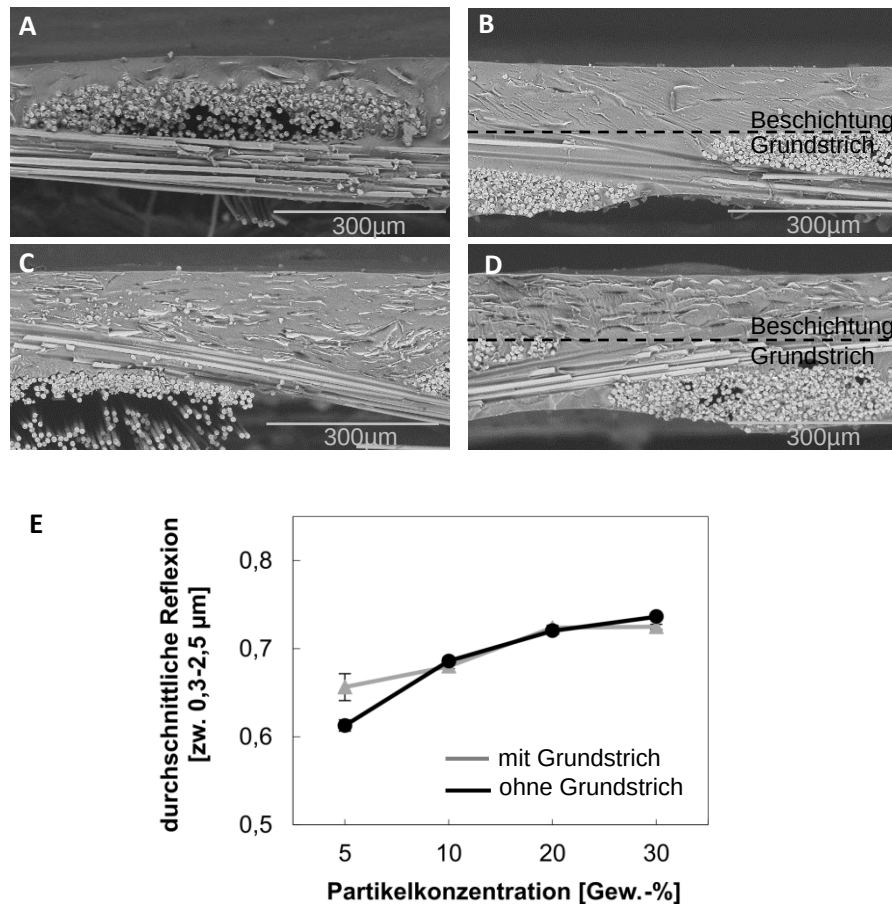


Abb. 5.15 Orientierung der Aluminiumpartikel mit und ohne Grundstrich.

A 5 Ma-% Al 212 auf Glas 163 g/m² ohne Grundstrich (Schichtdicke 92,47±38,0 μm (*n*=10); Flächengewicht: 231,28 g/m²); **B** 5 Ma-% Al 212 auf Glas 163 g/m² mit Grundstrich (Schichtdicke 107,09±7,9 μm (*n*=10); Flächengewicht: 289,66 g/m²); **C** 20 Ma-% Al 212 auf Glas 163 g/m² ohne Grundstrich (Schichtdicke 94,49±13,2 μm (*n*=10); Flächengewicht: 242,30 g/m²); **D** 20 Ma-% Al 212 auf Glas 163 g/m² mit Grundstrich (Schichtdicke 98,17±18,0 μm (*n*=10); Flächengewicht: 298,47 g/m²); **E** Durchschnittliche konzentrationsabhängige solare Reflexion gemessen im Lambda 1050 + (Perkin Elmer) auf Glas 163 g/m² mit und ohne Grundstrich. (REM (Hitachi TM1000) x250)

Bei geringen Aluminiumkonzentrationen bietet eine zusätzliche Applikation eines Grundstriches, mit einer Erhöhung um ca. 5 %, Vorteile für die solare Reflexion. Bei höheren Konzentrationen von ≥ 20 Ma-% wird kein signifikanter Vorteil festgestellt. Die durchschnittliche solare Reflexion liegt für beide Systeme bei 72,3 %. Wie in der Abb. 5.15 erkennbar, verhindert die enge Gewebestruktur des Glasgewebes das tiefe Eindringen der Beschichtungspaste in die Faserzwischenräume.

Dem Anhang Abb. 9.5 können die Ergebnisse für das zweite Substratgewebe (PES 65) entnommen werden. Das Polyestergewebe weist aufgrund der Gewebestruktur größere Fadenzwischenräume auf. Allerdings liegt auch hier die Reflexionserhöhung durch die

Applikation eines zusätzlichen Grundstriches für 20 Ma-% bei $<1,5\%$ und für 30 Ma-% bei $\leq 0,2\%$.

Für Partikel im oberen Bereich der Beschichtung spielt die textile Struktur eine geringere Rolle. Die Orientierung erfolgt horizontal zum Substrat. Hohe Partikelkonzentrationen führen dazu, dass Partikel im unteren Bereich, die möglicherweise weniger geordnet sind, weniger Einfluss haben. Das einfallende Licht wird bereits von den zuvor gut ausgerichteten Partikeln reflektiert und gestreut, bevor es die weniger orientierten Partikel erreicht.

Auf eine Applikation eines Grundstriches und somit einen zusätzlichen Beschichtungs- und Trocknungsschritt kann für Konzentrationen ≥ 20 Ma-% für plättchenförmige Aluminiumpartikel verzichtet werden. Dadurch wird Energie- und Arbeitszeit gespart und der Beschichtungsprozess verkürzt.

5.2.3 Einfluss der Partikelkonzentration

Folgende Konzentrationen werden untersucht: 5 Ma-%, 10 Ma-%, 20 Ma-%, 30 Ma-%. In die Silikonmatrix (LR6250F) werden in einer einlagigen Schicht die entsprechende Konzentration an Aluminiumpartikeln (Al212) hinzugefügt (vgl. Abschnitte 4.2.1). Um eine Aussage hinsichtlich des Einflusses der Partikelkonzentration treffen zu können, wird die Beschichtungspaste aus Silikon und Aluminiumpartikel mit den genannten Konzentrationen und einer Schichtdicke von $100 \pm 15 \mu\text{m}$ auf verschiedenen Substratmaterialien appliziert, die eine große Diskrepanz im Spektralverlauf aufweisen (siehe Abschnitt 5.1.1). Die Proben werden anschließend im Lambda 1050+ (Perkin Elmer, U.S.A) für den solaren Bereich und im Vertex 80 (Bruker, U.S.A) für den mittleren Infrarotbereich spektralanalytisch untersucht.

Anhand der Abb. 5.16 ist der Einfluss der Low-e Konzentration hinsichtlich einer verminderten Transmission im solaren Bereich dargestellt. Mit 20 Ma-% liegt die solare Transmission bereits $<0,3\%$ (in Absolutwerten $<0,003$). Die durchschnittlichen solaren Transmissionswerte (T_{sol}) in Prozent zwischen $\lambda = 0,3\text{--}2,5 \mu\text{m}$ werden in Tab. 5.2 angegeben. Hier kann der Einfluss des Substratmaterials und die konzentrationsabhängige Substratunabhängigkeit durch den Low-e Pigmentanteil aufgezeigt werden.

Tab. 5.2 Solare Transmission in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration.
Vermessen auf Polyester- und Glasgewebe.

T_{sol} (%) Al 212 ($\lambda = 0,3\text{--}2,5 \mu\text{m}$)	Ref. (Textiles Substrat ohne Beschichtung)	5 Ma-%	10 Ma-%	20 Ma-%	30 Ma-%
PES 65 g/m ²	62,66	5,95	2,41	0,24	0,18
Glas 163 g/m ²	43,89	9,12	2,16	0,37	0,19

Ab einer Aluminiumpartikelkonzentration von 20 Ma-% liegt die solare Transmission sowohl für das Glasgewebe als auch für das Polyestergewebe bei unter einem Prozent.

Der Substratunterschied zwischen den beiden Gewebetypen (PES 65, Glas 163) für die Aluminiumkonzentration von 20 Ma-% liegt mit 0,13 % und für die Konzentration von 30 Ma-% mit 0,01 % ebenfalls deutlich unterhalb von einem Prozent. Der Spektralverlauf der solaren Transmission wird in der folgenden Abb. 5.16 wiedergegeben.

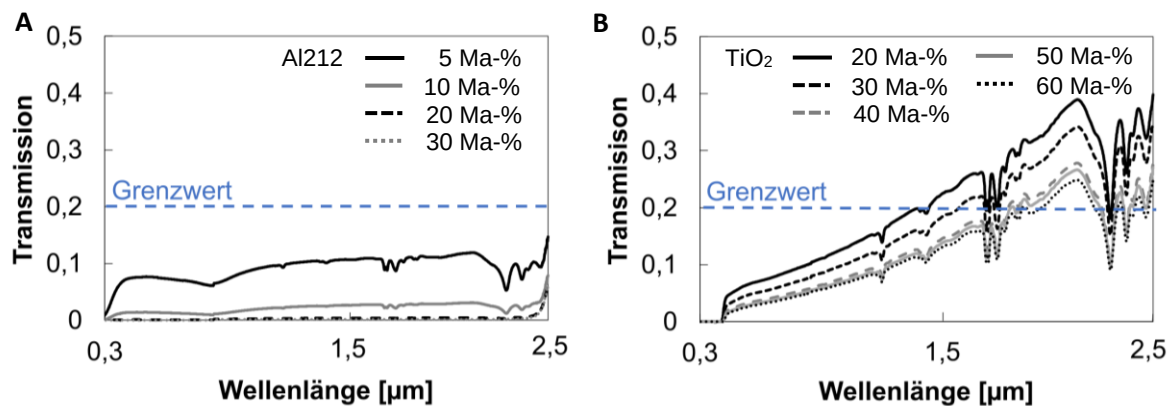


Abb. 5.16 Konzentrationsabhängige solare Transmission am Beispiel Glas 163 g/m². Grenzwert definiert nach Nagshine und Saboonchi [58].

A Solare Transmission in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration Al212 (Schichtdicke: $\varnothing 94,35 \pm 7,13 \mu\text{m}$ ($n=10$)); **B** Solare Transmission in Abhängigkeit der Titandioxidkonzentration (Schichtdicke: $\varnothing 95,4 \pm 7,73 \mu\text{m}$ ($n=10$))

Als Vergleichsprobe wird der Transmissionsverlauf für das Beschichtungssystem mit TiO₂-Partikeln aufgezeigt. Auch hier kann über die Partikelkonzentration Einfluss auf die solare Transmission genommen werden, allerdings sinkt die solare Transmission auch bei hohen Partikelkonzentrationen von bis zu 60 Ma-% speziell im nahen Infrarotbereich nicht unter den Grenzwert von 0,2.

Ein geringer Transmissionsanteil im solaren Bereich kann je nach Untergrund bereits die Kühlleistung stark negativ beeinflussen. Der Grenzwert von 0,2 wird durch B. Naghshine und A. Saboonchi beschrieben und dient als Orientierung. [58]

Generell gilt je geringer die Transmission im solaren Bereich desto geringer der Unterschied zwischen verschiedenen textilen Substratmaterialien und desto geringer der Einfluss dieser Materialien auf den Spektralverlauf und damit die Kühlleistung.

Mit einer Aluminiumkonzentration von 20 Ma-% kann die solare Transmission deutlich reduziert werden, sodass der Substrateinfluss nicht mehr signifikant ist.

Neben der Reduzierung der Transmission gilt es, die solare Reflexion für eine Kühlung am Tag zu maximieren. Aufgrund hoher Reflexionsleistungen über den gesamten solaren Wellenlängenbereich können Low-e Partikel einen weiteren Vorteil bieten und zwar einen

Abfall der Reflexion im nahen Infrarot, der bei dem Einsatz von TiO₂-Partikeln beobachtet werden kann, minimieren. Um die optimale Konzentrationseinstellung für die Aluminiumpartikel zu finden, werden Proben mit einem einlagigen Beschichtungsauftrag in der Konzentration variiert und hinsichtlich der solaren Reflexionsleistung spektralanalytisch vermessen und untersucht.

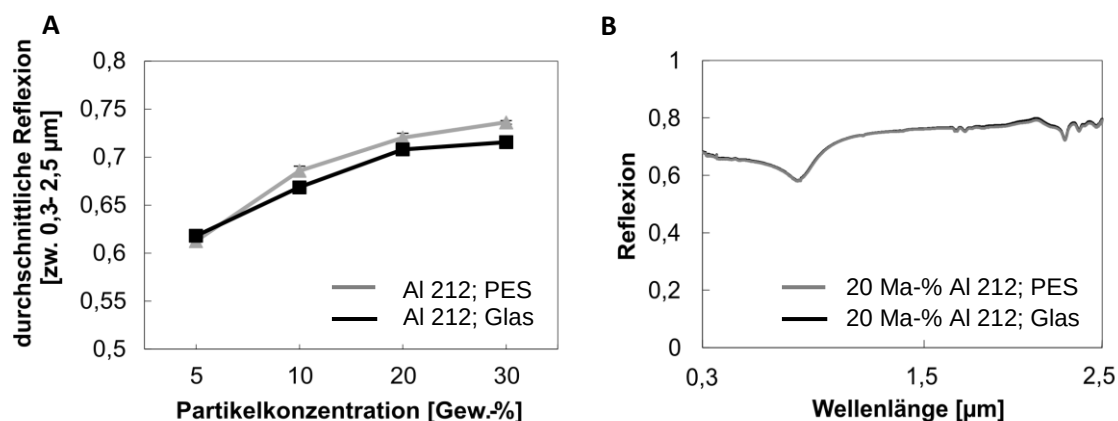


Abb. 5.17 Aluminiumkonzentrationsabhängige solare Reflexion im Vergleich von Glas 163 g/m² und Polyester 65 g/m².

A Durchschnittliche konzentrationsabhängige Reflexion über den solaren Wellenlängenbereich von 0,3–2,5 µm für Glas (Schichtdicke: 101,5±8,62 µm ($n=10$)) und PES (Schichtdicke: 94,35±7,13 µm ($n=10$)); **B** Vergleich der wellenlängenabhängigen solaren Reflexion für die Aluminiumkonzentration von 20 Ma-% zwischen zwei verschiedenen textilen Substraten.

Der Abb. 5.17 ist zu entnehmen, dass ab 20 Ma-% die durchschnittliche Reflexionssteigerung nur noch geringfügig zunimmt. Zurückzuführen ist das auf die dichte Partikelverteilung in der Beschichtungsapplikation. Eine zusätzliche Erhöhung der Partikelanzahl bei gleichbleibendem Matrixanteil führt zu keiner weiteren Reflexionserhöhung, da die Partikel bereits eine sich überlappende metallisierende Schicht ausbilden (vgl. Abb. 5.13). Darüber hinaus kann ein zu hoher Partikelanteil zu einer matten Erscheinung und unebenen Oberfläche führen [119].

Es ist kein Unterschied bei der solaren Reflexion zwischen dem Glas- und Polyestergewebe erkennbar. Der Verlauf ist, aufgrund der eingesetzten Partikelkonzentration, identisch. Durch die hohe Partikelkonzentration entsteht eine dichte Schicht von Partikeln, die die einfallende Strahlung effektiv reflektiert und streut. Dadurch wird die Reflexionsleistung nicht mehr wesentlich vom darunter liegenden Substrat beeinflusst. In bisherigen Systemen werden Metallpartikel, wie Aluminium, speziell zur Erzielung einer geringen Emissionsleistung im mittleren Infrarotbereich eingesetzt. Das Ziel hier ist es, durch die Kombination und direkte Integration der Aluminiumpartikel in das Silikonsystem eine weiterhin hohe Emissionsleistung speziell im atmosphärischen Fenster zwischen 8–13 µm zu erzielen.

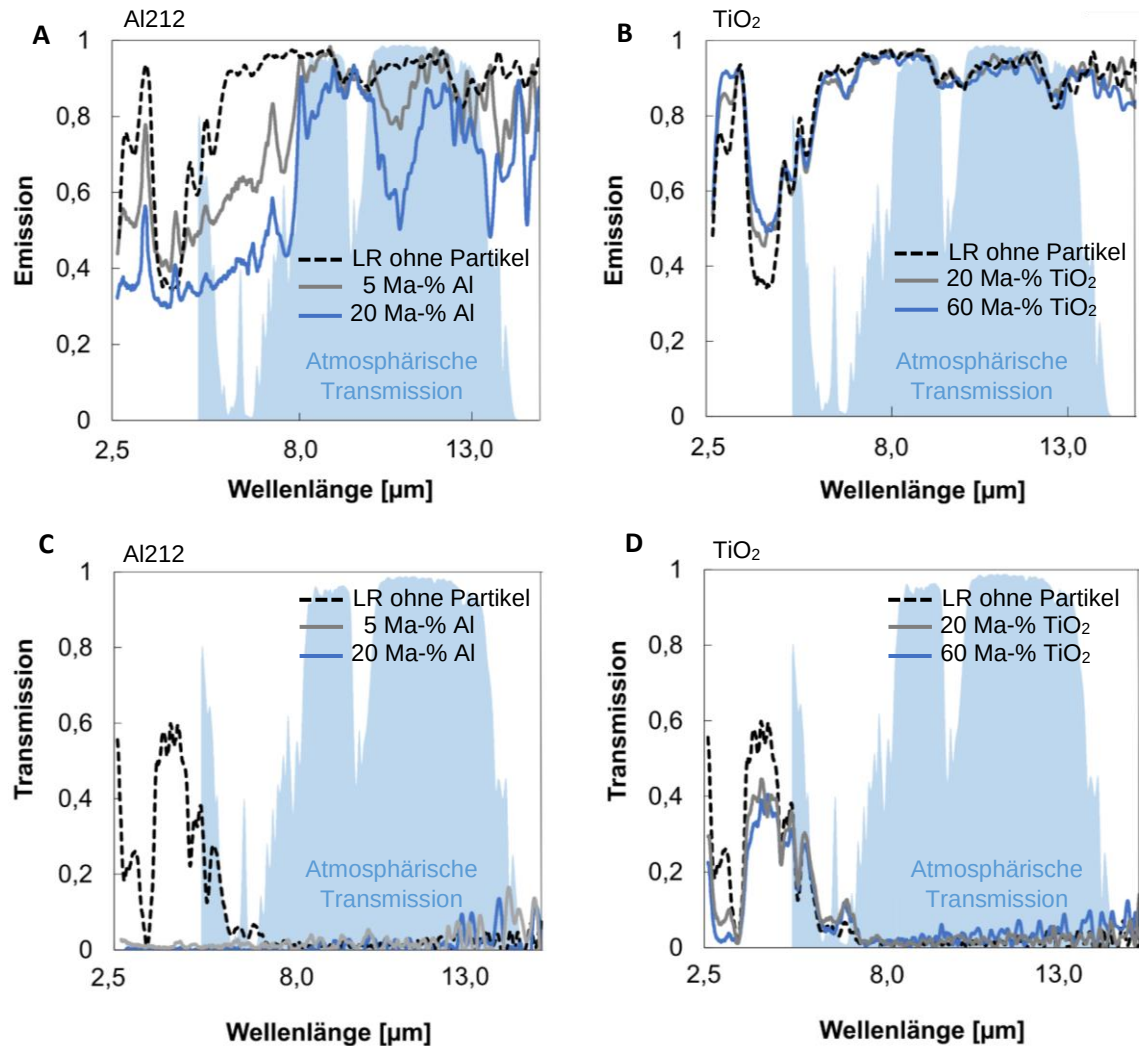


Abb. 5.18 Beeinflussung des Spektralverlaufes im MIR in Abhängigkeit der Partikelart und -konzentration am Beispiel von PES 65 g/m².

A Emission im MIR in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration; **B** Emission im MIR in Abhängigkeit der Titandioxidpartikelkonzentration; **C** Transmission im MIR in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration; **D** Transmission im MIR in Abhängigkeit der Titandioxidpartikelkonzentration. (durchschnittlicher Schichtauftrag Al-Partikel: $101,5 \pm 8,62 \mu\text{m}$ ($n=10$); durchschnittlicher Schichtauftrag TiO₂-Partikel: $82,6 \pm 1,98 \mu\text{m}$ ($n=10$))

Die Abb. 5.18 zeigt den Spektralverlauf der Emission im mittleren Infrarot, der aus dem gemessenen Transmissions- und Reflexionsspektrum durch $E = 1 - R - T$ ermittelt wird.

Die Abb. 5.18 zeigt, dass der Zusatz von Aluminiumpartikeln im hoch emittierenden Siliconsystem den Emissionsverlauf im mittleren Infrarotbereich (speziell zwischen 2,5–13 μm) konzentrationsabhängig zwar beeinflusst, die Gesamtemissionsleistung im atmosphärischen Fenster (8–13 μm) aber bei >75 % liegt (vgl. Abb. 5.18A). TiO₂ Partikel dagegen weisen keinen signifikanten Einfluss im mittleren Infrarot auf. Der Verlauf unterscheidet sich kaum zu dem des einfachen Silikonanstriches ohne Partikel (vgl. Abb. 5.18B, D).

Zusätzlich kann durch den Zusatz der Aluminiumpartikel konzentrationsabhängig die Absorption außerhalb des atmosphärischen Fensters zwischen 2,5–8 μm reduziert werden, was zu einer geringeren Absorption atmosphärischer Gegenstrahlung führen kann. Gleichzeitig wird durch den Zusatz der Aluminiumpartikel eine substratunabhängige Beeinflussung des Spektralverlaufes auch im mittleren Infrarot ermöglicht.

Allerdings führt die Zugabe der Aluminiumpartikel konzentrationsabhängig zu einem negativen Peak im atmosphärischen Fenster. Das kann durch einen Transmissionspeak des Matrixmaterials Silikon in diesem Wellenlängenabschnitt begründet werden. Aluminium kann in den Wellenlängenbereichen Einfluss auf den Spektralverlauf nehmen, in denen das Matrixmaterial Silikon transparent bzw. teiltransparent ist.

Die Tab. 5.3 fasst die wichtigsten Daten bezüglich der solaren Reflexion und der Emission im MIR für verschiedene Aluminiumkonzentrationen zusammen.

Tab. 5.3 Solare Reflexion und Emission zwischen 8–13 μm in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration.

Vermessen auf Polyester und Glasgewebe.

R (%) / ϵ (%)	Ref. (Textiles Substrat ohne Beschichtung)	5 Ma-%	10 Ma-%	20 Ma-%	30 Ma-%
PES 65 g/m ²	29,13/67,5	61,8/88,6	66,9/88,0	70,8/84,4	71,6/78,6
Glas 163 g/m ²	55,04/92,5	61,3/87,7	68,6/86,4	72,0/81,5	73,6/78,6

Durch die Spektralanalyse kann ein konzentrationsabhängiger Einfluss der Low-e-Partikel im mittleren Infrarotbereich bestätigt werden.

Die Reflexion nimmt mit steigender Partikelkonzentration unabhängig vom Substratgewebe zu. Die Zunahme stagniert bei 20–30 Ma-%, gleichzeitig nimmt die Emission zwischen 8–13 μm ab.

Wird die Transmission, solare Reflexion und Emission im MIR berücksichtigt, wird ein Optimum bei einer Partikelkonzentration der Aluminiumpartikel von 20 Ma-% erzielt.

5.2.4 Einfluss der Schichtdicke

Über die Schichtdicke kann die Volumenkonzentration der Partikel beeinflusst werden. Es werden Schichtdicken von ca. $60 \pm 15 \mu\text{m}$, $110 \pm 15 \mu\text{m}$ und $140 \pm 15 \mu\text{m}$ untersucht. Die Partikelkonzentration in Masseprozent bleibt dabei unverändert. Die exakte Schichtdicke kann der Abbildungsbeschreibung (Abb. 5.19) entnommen werden.

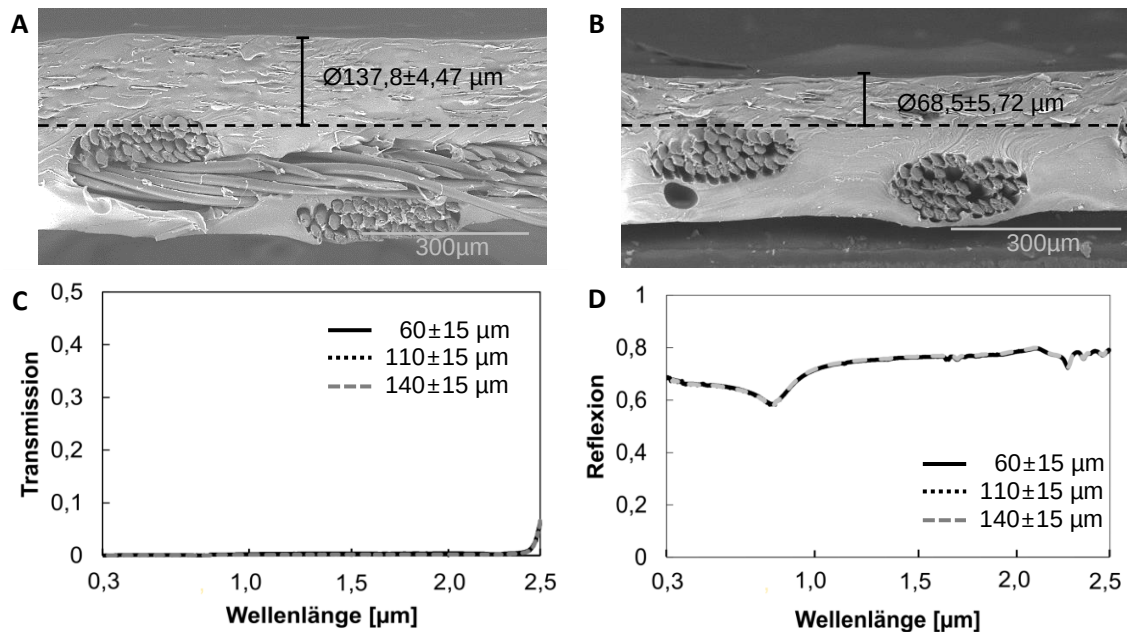


Abb. 5.19 optische und spektrale Untersuchung zur Schichtdickenvariation mit 20 Ma-% Aluminiumpartikeln am Beispiel von PES 65 g/m².

A Querschnittsaufnahme, Schichtdicke: $137,8 \pm 4,47 \mu\text{m}$ ($n=10$) (REM (Hitachi TM1000) x250); **B** Querschnittsaufnahme, Schichtdicke: $68,51 \pm 5,72 \mu\text{m}$ ($n=10$) (REM (Hitachi TM1000) x250); **C** Transmissionsverlauf (0,3–2,5 μm) in Abhängigkeit der Schichtdicke; **D** Reflexionsverlauf (0,3–2,5 μm) in Abhängigkeit der Schichtdicke; die exakt gemessene Schichtdicke für 60 und 140 μm entspricht den Angaben aus A und B, für 110 μm entspricht diese $109,9 \pm 3,78 \mu\text{m}$ ($n=10$)

Abb. 5.19A und B zeigt die dichte Partikelverteilung von Al₂O₃ bei der eingesetzten Konzentration von 20 Ma-%. Aufgrund der dichten Verteilung der Partikel in dem Schichtauftrag wird die Transmission der Strahlung minimiert (vgl. Abb. 5.19C). Mit einer Schichtdicke von $60 \pm 15 \mu\text{m}$ wird bereits eine solare Transmission <1 % erzielt. Ein Schichtauftrag mit einer Partikelkonzentration von 20 Ma-% und einer Schichtdicke $\leq 60 \mu\text{m}$ ist ausreichend, um die solare Transmission zu reduzieren, sodass eine Substratunabhängigkeit gewährleistet werden kann.

Eine Steigerung der solaren Reflexion durch eine größere Schichtdicke wird nicht gemessen (Abb. 5.19D). Hier tritt der gleiche Effekt, wie bei der konzentrationsabhängigen Messung auf. Metallpartikel, wie Aluminium, reflektieren eintreffende solare Strahlung ähnlich einem Spiegel. Aufgrund der Partikelkonzentration von 20 Ma-% und der dichten Partikelverteilung findet eine Überlappung in den oberen Partikelreihen statt, sodass untere Partikelreihen bei einer Schichtdicke von 140 μm keinen signifikanten Einfluss haben.

Die Messergebnisse zeigen, dass durch die direkte Integration von Aluminiumpartikeln in ein High-e Matrixmaterial über Einstellungen der Beschichtungsvariablen 1–5 substratunabhängig Einfluss auf den Spektralbereich im solaren und mittleren Infrarot

genommen werden kann. Durch die Integration der Aluminiumpartikel mit einer Partikelkonzentration von 20 Ma-% und einem Schichtauftrag von $60 \pm 15 \mu\text{m}$ kann die Transmission im gesamten Spektralbereich auf $<0,3$ reduziert werden. Der Spektralverlauf wird dabei nicht durch unterschiedliche textile Substratmaterialien beeinflusst.

Die aktuelle durchschnittliche Reflexionsleistung liegt bei $<75\%$ und reicht damit nicht aus, um eine ausreichende Kühlung zu erzielen. Aus diesem Grund muss die solare Reflexionsleistung weiter erhöht werden.

Die Beschichtungsapplikation mit TiO_2 -Partikeln kann, insbesondere im sichtbaren Bereich (zwischen $0,3\text{--}0,9 \mu\text{m}$), eine Reflexion von $>90\%$ erzielen (vgl. Abschnitt 5.1.3, Abb. 5.10). Um eine Kühlleistung am Tag unterhalb der Umgebungstemperatur zu erreichen, werden in den folgenden Abschnitten der Einfluss von zusätzlichen Weißpigmenten in Kombination mit Aluminiumpartikeln in einem einlagigen (vgl. Abschnitt 5.3) und zweilagigen System (vgl. Abschnitt 5.4) untersucht.

5.3 Einfluss und Wirkungsgrad niedrig emittierender Partikel (Aluminium) im Zusammenhang mit TiO_2 im einlagigen Beschichtungssystem

Für eine verbesserte Reflexionsleistung können Weißpartikel der Beschichtung zugefügt werden. Aufgrund der hohen Streu- und Lichtreflexionseigenschaften wurde TiO_2 ausgewählt. Die Beschichtungsvariable V2 (Partikelgröße) wurde bereits in den Abschnitten 5.1.3 und 5.2.1 charakterisiert und eingestellt. In diesem Abschnitt liegt der Fokus auf den Beschichtungsvariablen V3 (Partikelkonzentration) und V5 (Schichtdicke). V4 (Partikelverteilung) wird mit Hilfe der optischen Untersuchung des Beschichtungsquerschnittes am Rasterelektronenmikroskop analysiert. Die direkte Kombination mit Aluminiumpartikeln in einem einlagigen Beschichtungssystem (B2) wird hinsichtlich der Minimierung von Substrateinflüssen und einer Steigerung der solaren Reflexionsleistung untersucht.

5.3.1 Einfluss der Partikelkonzentration

Um die Substratunabhängigkeit und gleichzeitige solare Reflexionssteigerung für das kombinierte System aus Aluminiumpartikeln und TiO_2 untersuchen zu können, werden verschiedene Partikelkonzentrationen kombiniert.

Die Beschichtungspaste wird, wie in 4.2.1 beschrieben, angesetzt. Dabei werden die entsprechende Al_2O_3 -Konzentration und TiO_2 -Konzentration abgewogen und dem Silikonsystem zugeführt. Um den Einfluss der Al_2O_3 -Konzentration untersuchen zu können, wird die gleiche TiO_2 -Konzentration zunächst nicht verändert und auf 30 Ma-% eingestellt. Folgende Konzentrationen werden angesetzt und untersucht:

- 1 Ma-% Al₂O₃ + 30 Ma-% TiO₂
- 3 Ma-% Al₂O₃ + 30 Ma-% TiO₂
- 5 Ma-% Al₂O₃ + 30 Ma-% TiO₂
- 10 Ma-% Al₂O₃ + 30 Ma-% TiO₂

Die prozentuale Abweichung der unbeschichteten Substratgewebe zwischen Glas 163 und PES 65 liegt im solaren Bereich für die Reflexion bei ca. 47 % (vgl. Abb. 5.2 Abschnitt 5.1.1). Aus diesem Grund wird die Beschichtungspaste auf diese beiden Substrate aufgetragen und die prozentuale Abweichung der solaren Reflexion in Abhängigkeit zur Aluminiumpartikelkonzentration spektralanalytisch untersucht.

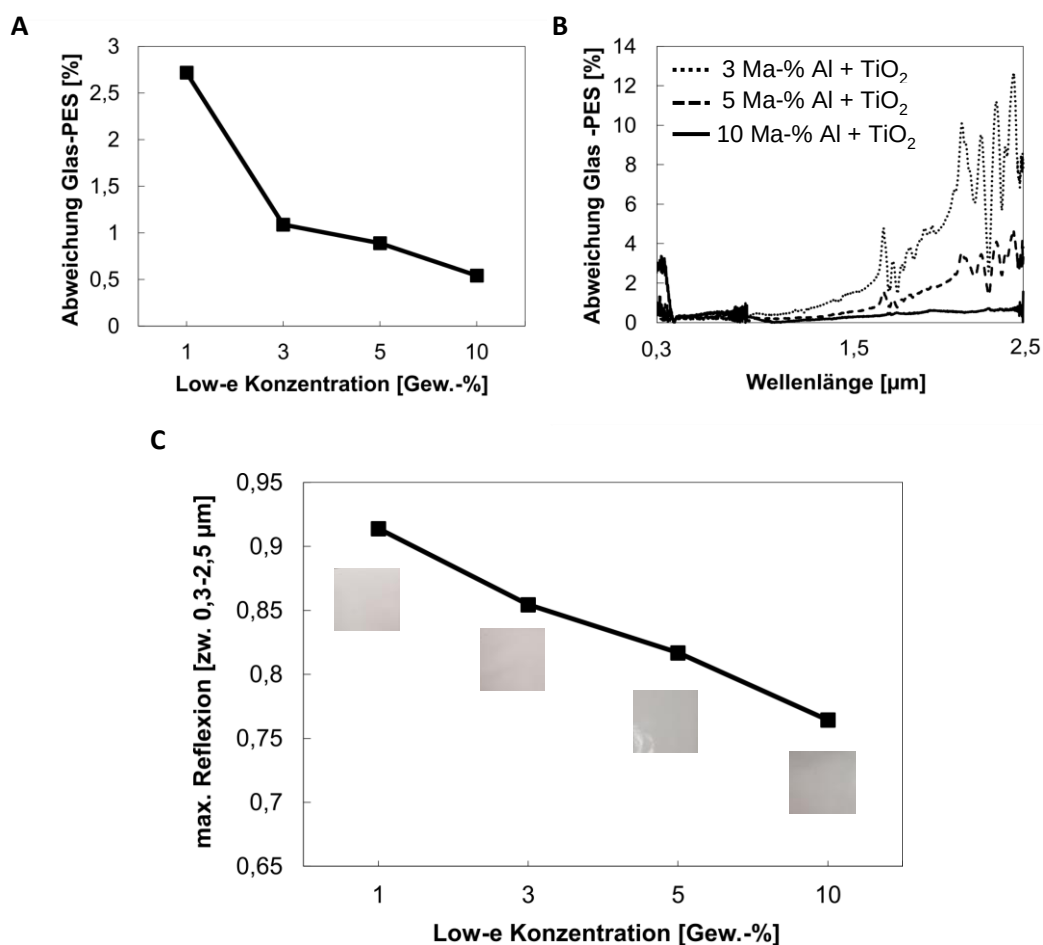


Abb. 5.20 Prozentuale Abweichung und solare Reflexion in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration in direkter Kombination mit 30 Ma-% TiO₂ im einlagigen System.

A Prozentuale Abweichung der solaren Reflexion zwischen Glas 163 und PES 65 in Abhängigkeit zur Aluminiumkonzentration, die Abweichung wird im Betrag angegeben; **B** Wellenlängenabhängige Abweichung der solaren Reflexion; **C** Maximale solare Reflexion in Abhängigkeit zur Aluminiumpartikelkonzentration am Beispiel von PES 65.

Durch die Erhöhung der Aluminiumpartikelkonzentration von 1 Ma-% auf bis zu 10 Ma-% kann die prozentuale Abweichung zwischen Glas und PES auf weniger als 1 % reduziert werden, sodass von einer Substratunabhängigkeit gesprochen werden kann (vgl. Abb. 5.20A). Die Abweichung zwischen Glas 163 und PES 65 für das Beschichtungssystem mit TiO_2 ohne Aluminiumpartikel liegt dagegen bei bis zu 21 %, insbesondere im nahen Infrarotbereich. Abb. 5.20B zeigt, dass die Abweichung der beiden beschichteten Substrate mit einer Aluminiumpartikelkonzentration von ≤ 5 Ma-% zwischen 1,5 und 2,5 μm besonders groß ist. Wie aus Abschnitt 5.2.3 hervorgeht, weist TiO_2 in diesem Wellenlängenbereich die höchsten Transmissionswerte auf. Die Strahlung wird weniger stark gestreut, was dazu führt, dass das darunter liegende Substrat einen größeren Einfluss, besonders im NIR, hat.

Neben der Reduzierung von Substratunterschieden ist die solare Reflexion ein entscheidender Faktor für eine positive Kühlleistung.

Die Abb. 5.20C zeigt die maximale solare Reflexion in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration auf. Mit zunehmender Aluminiumkonzentration nimmt die solare Reflexion nahezu linear ab. Der Einfluss der Aluminiumpartikel ist auch optisch erkennbar: Mit zunehmender Konzentration im einlagigen Beschichtungssystem wird der Weißgrad der Beschichtung reduziert (vgl. Abb. 5.20C).

Über die weitere Anpassung der Titandioxidkonzentration von 30 Ma-% auf 40 Ma-% kann die solare Reflexion von maximal 77 % auf bis zu 81 % gesteigert werden (vgl. Anhang Abb. 9.6A). Die solare Transmission, gemessen am Beispiel von PES 65 und einem TiO_2 -Anteil von 40 Ma-% sinkt von bis zu 11,44 % für 3 Ma-% Al₂O₃, auf bis zu 4,75 % für 5 Ma-% Al₂O₃ und bis zu 1,6 % für 10 Ma-% Al₂O₃. Damit nimmt die Transmission mit steigender Aluminiumpartikelkonzentration linear ab. Mit 10 Ma-% wird bereits eine durchschnittliche solare Transmission < 1 % erzielt (siehe Anhang Abb. 9.6B).

Die Zugabe von TiO_2 führt insgesamt zu einer Erhöhung der Streuintensität des eintreffenden Lichtes. Damit wird sowohl die Lichtreflexion im sichtbaren Bereich, als auch die Opazität erhöht, bzw. die Transmission zusätzlich minimiert.

Damit kann bereits mit einer geringeren Aluminiumpartikelkonzentration von 10 Ma-% eine vergleichbare geringe solare Transmission und damit substratunabhängige Applikation, im Vergleich zum System ohne TiO_2 -Anteil und dem Beschichtungssystem (B1), erzielt wird.

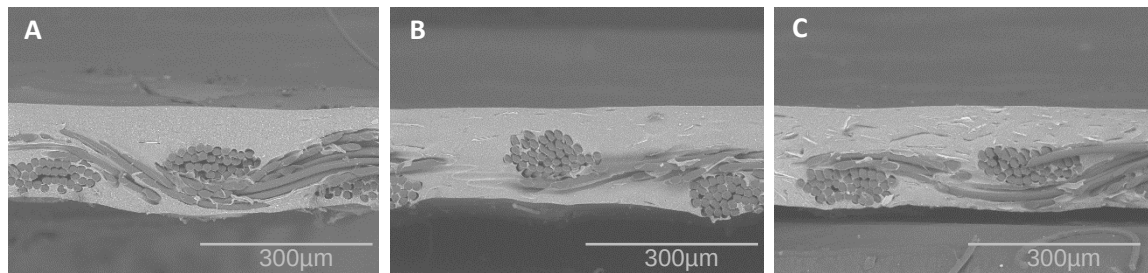


Abb. 5.21 Querschnittsaufnahme der Beschichtung B2. (REM (Hitachi TM1000) x250)

A 1 Ma-% Al₂O₃ + 30 Ma-% TiO₂ auf PES 65 (Schichtdicke: 85,14±19,7 µm (*n*=10));

B 3 Ma-% Al₂O₃ + 30 Ma-% TiO₂ auf PES 65 (Schichtdicke: 91,29±19,6 µm (*n*=10));

C 10 Ma-% Al₂O₃ + 30 Ma-% TiO₂ auf PES 65 (Schichtdicke: 104,39±12,3 µm (*n*=10)).

Die optische Untersuchung zeigt eine gleichmäßige und horizontale Ausrichtung der Al-Partikel im Beschichtungssystem zusammen mit TiO₂-Partikeln. Die Bilder zeigen deutlich die Zunahme der Al-Partikel in Abhängigkeit des Masseprozentanteils bei gleicher Schichtdicke (vgl. Abb. 5.21).

Die Reduzierung des Substratunterschiedes in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration kann auch im mittleren Infrarotbereich nachgewiesen werden. Hier wird der Beschichtungsauftrag zwischen dem Polyester- und Polyamidgewebe analysiert, da diese unbeschichtet die größte Diskrepanz im mittleren Infrarot aufweisen. In Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration findet eine deutliche Annäherung der Spektralverläufe des beschichteten Polyester- und Polyamidgewebes statt. Bei einer Aluminiumpartikelkonzentration von 3 Ma-% kombiniert mit 30 Ma-% TiO₂ wird eine Abweichung zwischen 2,5–13 µm von <1 % erzielt. Gerade zwischen 2,5 und 8 µm beträgt die Abweichung ohne Aluminiumpartikel und 30 Ma-% TiO₂ durchschnittlich knapp 11,5 %.

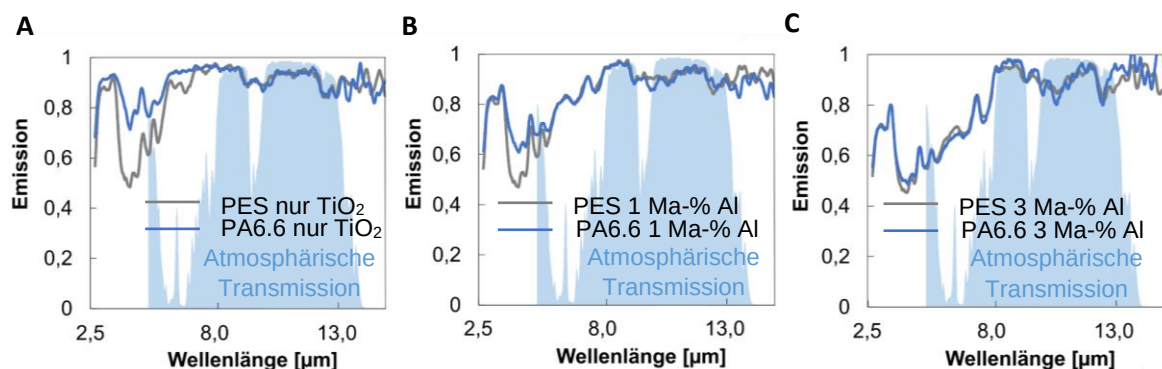


Abb. 5.22 Spektralunterschiede zwischen Polyester und Polyamid im MIR in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration im Beschichtungssystem B2.

A Spektralunterschied im MIR von 30 Ma-% TiO₂ ohne Al₂O₃-Anteil in LR6250F;

B Spektralunterschied im MIR von 30 Ma-% TiO₂ mit 1 Ma-% Al₂O₃-Anteil in LR6250F;

C Spektralunterschied im MIR von 30 Ma-% TiO₂ mit 3 Ma-% Al₂O₃-Anteil in LR6250F.

5.3.2 Einfluss der Schichtdicke

Um den Einfluss der Schichtdicke zu untersuchen, wird diese für die Beschichtungszusammensetzung aus 10 Ma-% Al₂O₃ und 40 Ma-% TiO₂ auf 100±10 µm, 200±20 µm und 300±20 µm eingestellt. Die exakte Schichtdicke kann der Abbildungsbeschreibung entnommen werden.

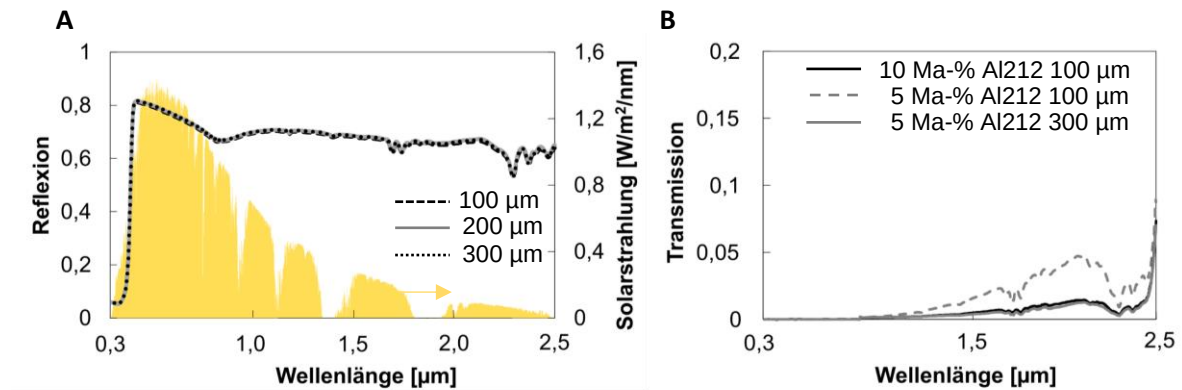


Abb. 5.23 Solare Reflexion und Transmission von B2 in Abhängigkeit der Schichtdicke.

A Solare Reflexion am Beispiel von 10 Ma-% Al₂O₃ und 40 Ma-% TiO₂ auf PES 65; Schichtdicke 100µm: 99,05±3,62 µm; 200 µm: 192,2±22,89 µm; 300 µm: 279,2±22,64 µm ($n=10$); **B** Solare Transmission am Beispiel von PES 65; Schichtdicke 100 µm 10 Ma-% Al₂O₃: 99,05±3,62 µm; 100 µm 5 Ma-% Al₂O₃: 100,02±10,3 µm und 300 µm: 279,2±22,64 µm ($n=10$).

Das Ergebnis zeigt, dass eine weitere Erhöhung der Schichtdicke und damit einhergehend der Partikelvolumenkonzentration keine Erhöhung der Reflexion im solaren Bereich bewirkt (vgl. Abb. 5.23A). Das hängt mit dem unveränderten Verhältnis zwischen Aluminium- und TiO₂-Anteil zusammen. Dieses wird durch die Erhöhung der Schichtdicke nicht beeinflusst, sodass trotz steigender TiO₂-Konzentration die solare Reflexion nicht automatisch zunimmt.

Die solare Transmission wird mit zunehmender Schichtdicke dagegen reduziert (vgl. Abb. 5.23B). Um einen nahezu identischen solaren Transmissionsverlauf gegenüber der Beschichtungsapplikation mit 10 Ma-% Al₂O₃ und 40 Ma-% TiO₂ bei einer Schichtdicke von 100 µm mit 5 Ma-% Al₂O₃ zu erzielen, muss die Schichtdicke von 100±10 µm auf 300±10 µm erhöht und damit verdreifacht werden. Für 10 Ma-% Al₂O₃ und einer Schichtdicke von 100±10 µm liegt die solare Transmission durchschnittlich bei bereits 0,54 % und damit <1 %.

Über die Schichtdickenerhöhung wird somit kein signifikanter Einfluss in Hinsicht auf eine erhöhte solare Reflexion erzielt.

Gegenüber dem Beschichtungssystem B1 wird die solare Reflexion gerade im sichtbaren Bereich gesteigert. Die durchschnittliche Reflexion liegt für B2 zwischen 0,4–0,9 µm bei

73,6 % gegenüber B1 mit 61,8 %. Allerdings nimmt die Reflexion gerade im nahen Infrarot aufgrund der geringen Al-Konzentration deutlich ab und wird zwischen 1,5–2,5 μm um durchschnittlich 11,6 % reduziert.

Die direkte Integration von TiO_2 in das einlagige Beschichtungssystem führt zu keiner signifikanten Verbesserung der solaren Reflexionsleistung über den gesamten Spektralverlauf von 0,3–2,5 μm . Der Nutzen der niedrig emittierenden Partikel wird durch die direkte Zugabe der Weißpartikel minimiert.

Um eine optimale Nutzung beider Partikelsysteme erzielen zu können, wird aus diesem Grund der Beschichtungsaufbau B3 im folgenden Abschnitt untersucht.

5.4 Einfluss und Wirkungsgrad niedrig emittierender Partikel (Aluminium) im Zusammenhang mit TiO_2 im zweilagigen Beschichtungssystem

Um die Eigenschaften der Partikelsysteme optimal zu nutzen, wird ein zweilagiger Beschichtungsaufbau untersucht. Die Beschichtungsvariable V2 (Partikelgröße) und V4 (Partikelverteilung) wurden bereits in den Abschnitten 5.1.3 und 5.2.1 charakterisiert und eingestellt. Die Beschichtungsvariable V3 (Partikelkonzentration) wird basierend auf den Ergebnissen aus 5.1.3 und 5.3 für TiO_2 auf 40 Ma-% festgelegt. Der Einfluss der Aluminiumpartikelkonzentration wird dagegen basierend auf den Ergebnissen aus 5.2 und 5.3 erneut untersucht. Die Einstellung der Beschichtungsvariable V5 (Schichtdicke) für die Aluminiumschicht basiert ebenfalls auf den Ergebnissen aus 5.2, wobei eine Schichtdicke von $60 \pm 10 \mu\text{m}$ festgelegt wird. Die Schichtdicke der TiO_2 -Konzentration wird für das Beschichtungssystem B3 hinsichtlich einer solaren Reflexionserhöhung neu angepasst.

Die Beschichtung besteht aus einer ersten strahlungsfunktionellen Schicht in die nur Al₂₁₂-Partikel integriert werden, anschließend wird eine zweite strahlungsfunktionelle Schicht mit TiO_2 -Partikeln appliziert. Die Kombination von TiO_2 mit Aluminiumpartikeln in einem zweilagigen Beschichtungssystem (B3) wird hinsichtlich einer Minimierung von Substrateinflüssen und einer weiteren Steigerung der solaren Reflexionsleistung untersucht.

5.4.1 Einfluss der Partikelkonzentration

Das Ergebnis aus dem Abschnitt 5.2 zeigt eine optimale Partikelkonzentration in B1 für Aluminiumpartikel bei 20 Ma-%. Durch die direkte Zugabe von TiO_2 im Beschichtungssystem B2 kann die Partikelkonzentration von Al₂₁₂ auf 10 Ma-% reduziert werden. Aus diesem Grund werden für den Beschichtungsaufbau B3 beide Konzentrationen erneut untersucht. Die Beschichtungspaste wird, wie in 4.2.1 beschrieben, angerührt und auf bis zu drei verschiedenen Substraten appliziert. Zuerst wird die

Beschichtungspaste mit Aluminiumpartikelanteil in LR6250F mit dem Rakelverfahren, wie in 4.2.2 beschrieben, auf das textile Substrat aufgebracht und für drei Minuten bei 100 °C getrocknet.

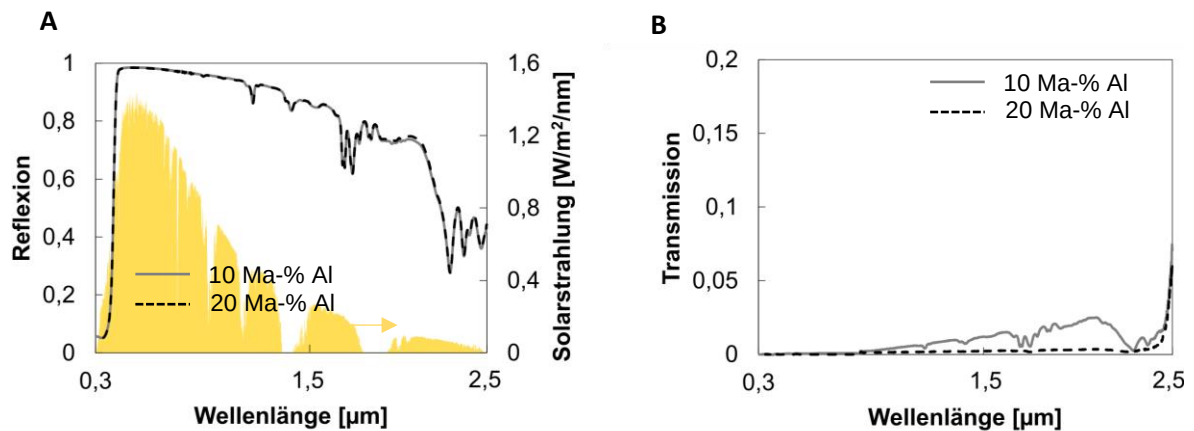


Abb. 5.24 Spektrale Untersuchung der Aluminiumkonzentration in B3.

1. Schicht: $60 \pm 10 \mu\text{m}$; 10 und 20 Ma-% Al₂O₃ in Kombination mit der zweiten Schicht: $200 \pm 15 \mu\text{m}$ und 40 Ma-% TiO₂ im Beschichtungssystem B3 auf PES 65; **A** Solare Reflexion; **B** Solare Transmission.

Anschließend wird die zweite Schicht mit TiO₂-Partikeln in LR6250F ebenfalls mit dem Rakelsystem auf die getrocknete Schicht aufgetragen und für drei Minuten bei 100 °C und weitere drei Minuten bei 150 °C vernetzt.

Die Proben werden spektralanalytisch im Lambda 1050 + vermessen. Die solare Reflexion wird nicht signifikant durch eine höhere Al-Konzentration beeinflusst (vgl. Abb. 5.24A). Die solare Transmission wird um maximal 2,17 % verringert (vgl. Abb. 5.24B). Auch wenn die Reduzierung gering ist, liegt die solare Transmission durch die Konzentration von 20 Ma-% bei <1 %. Aus diesem Grund wird die Al₂O₃ Konzentration für den zweilagigen Aufbau auf 20 Ma-% festgelegt. Damit kann gewährleistet werden, dass kein Substrat- oder Untergrundeinfluss besteht.

Der Einfluss der Aluminiumpartikel und damit der zusätzliche Nutzen im zweilagigen System wird durch den direkten Vergleich mit der Referenzbeschichtung ohne Al-Anteil dargestellt (vgl. Abb. 5.25).

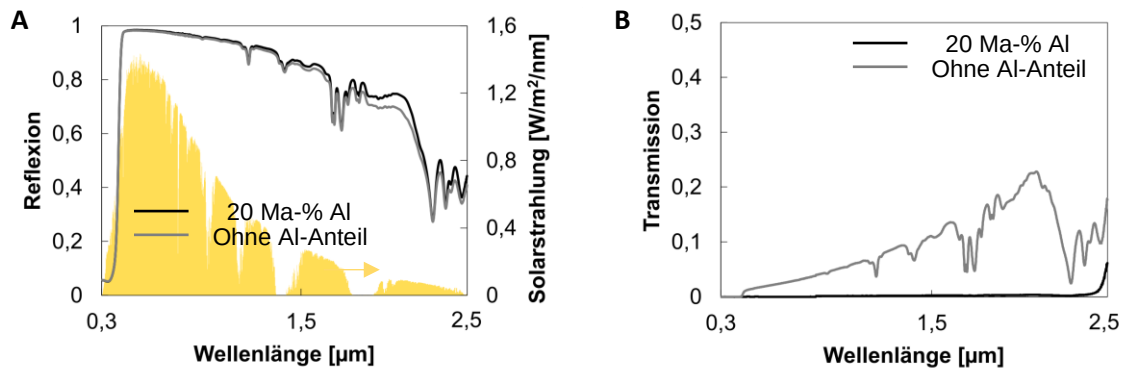


Abb. 5.25 Einfluss der Al-Partikel auf den Spektralverlauf im Vergleich zur Referenzbeschichtung.

60±10 µm 20 Ma-% Al₂O₃ in Kombination mit 200±15 µm 40 Ma-% TiO₂ auf PES 65 im Vergleich zum System ohne Al₂O₃-Anteil - 60±10 µm LR in Kombination mit 200±15 µm 40 Ma-% TiO₂ auf PES 65; **A** Solare Reflexion; **B** Solare Transmission.

Für die Referenzbeschichtung ohne Aluminiumanteil wird der Schichtauftrag ebenfalls in zwei Schichten unterteilt. Damit ein direkter Vergleich bei gleicher Partikelkonzentration und Schichthöhe gewährleistet werden kann, wird die erste Schicht ohne Partikel auf den textilen Träger aufgetragen. In die zweite Schicht werden, wie im Beschichtungssystem B3, 40 Ma-% TiO₂-Partikel zugeführt und anschließend auf die erste Schicht appliziert.

Die solare Transmission wird durch die untere Aluminiumschicht insgesamt deutlich reduziert und liegt, wie auch im einlagigen System (B1), damit nahe Null.

Die solare Reflexion wird im nahen Infrarot (zwischen 1,5–2,5 µm) durch den Al-Anteil um durchschnittlich 3,3 % erhöht. Das Niveau liegt damit ca. 1,7 % über dem Reflexionsanteil im System B2. Gleichzeitig liegt die solare Reflexion im sichtbaren Bereich (zwischen 0,4–0,9 µm) basierend auf der TiO₂-Konzentration und dem getrennten Schichtaufbau bei durchschnittlich 96,6 % und damit deutlich über 90 %. Damit kann insgesamt die solare Reflexion deutlich erhöht werden.

Einen weiteren Einfluss und eine Möglichkeit die Reflexionsleistung zu maximieren, bietet die Schichtdicke (V5).

5.4.2 Einfluss der Schichtdicke

Die Schichtdicke der zweiten funktionellen Schicht mit TiO₂-Anteil wird von 100±15 µm auf 200±15 µm erhöht. Für die erste strahlungsfunktionelle Schicht mit Al-Partikeln bleibt die Schichtdicke unverändert und beträgt 60±10 µm. Damit liegt die Gesamtschichtdicke bei <300 µm, sodass eine ausreichende Flexibilität des Gesamtsystems weiterhin gewährleistet werden kann.

Der Schichtaufbau und die Schichtdickenerhöhung der zweiten strahlungsfunktionellen Schicht können der Abb. 5.26 entnommen werden. Diese zeigt den Querschnitt des Schichtauftrags am Beispiel von PES 65.

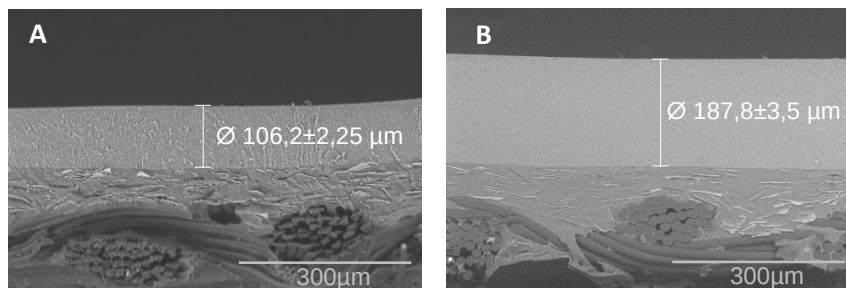


Abb. 5.26 Querschnitt des Beschichtungssystems B3 mit unterschiedlicher Beschichtungsdicke der zweiten strahlungsfunktionellen Schicht. (REM (Hitachi TM1000) x250)

Erste strahlungsfunktionelle Schicht für A und B mit $60 \pm 10 \mu\text{m}$ 20 Ma-% Al₂Ti₂ ($n=10$);
A Zweite strahlungsfunktionelle Schicht mit $106,2 \pm 2,25 \mu\text{m}$ 40 Ma-% TiO₂ ($n=10$); **B** Zweite strahlungsfunktionelle Schicht mit $187,8 \pm 3,5 \mu\text{m}$ 40 Ma-% TiO₂ ($n=10$).

Die Proben werden spektralanalytisch im Lamda 1050+ und der Vertex 80 untersucht.

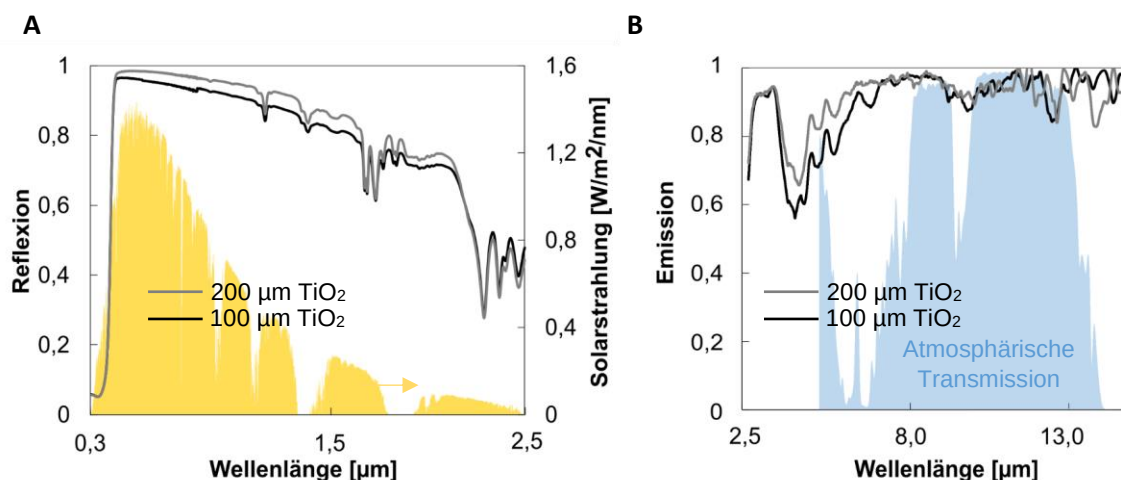


Abb. 5.27 Einfluss der Schichtdickenerhöhung der zweiten strahlungsfunktionellen Schicht in B3.

A Solare Reflexion; **B** Emission im mittleren Infrarot

Das Ergebnis der spektralen Untersuchung in Abb. 5.27 zeigt, dass eine Anpassung der Schichtdicke für die zweite strahlungsfunktionelle Schicht aus TiO₂ von 100 µm auf 200 µm eine Steigerung der solaren Reflexion um durchschnittlich 2,24 % bewirkt. Eine Erhöhung der Schichtdicke bewirkt gleichzeitig einen leichten Anstieg der Gesamtemissionsleistung im MIR. Je höher der Schichtdickenauftrag, desto höher ist die Gesamtemissionsleistung und desto breitbandiger wird der Spektralverlauf.

Grund dafür ist die Zunahme der Materialmenge und damit verbunden der funktionellen Gruppen. Gleichzeitig kann die solare Absorption mit zunehmender Gesamtschichtdicke zunehmen. [93]

Aufgrund der Partikelintegration von TiO_2 und Aluminium wird der Einfluss des Matrixmaterials hinsichtlich einer höheren solaren Absorption vermindert. Der verbesserte Streueffekt, basierend auf der erhöhten Partikelkonzentration durch den Schichtauftrag, ist deutlich größer als der negative Effekt einer größeren solaren Absorption des Matrixmaterials. Die solare Absorption wird maßgeblich über die Partikelzugabe beeinflusst.

Eine weitere Schichtdickenerhöhung ist prinzipiell möglich, allerdings soll in dieser Arbeit eine Kühlleistung mit einer Schichtdicke $< 300 \mu\text{m}$ erzielt werden, sodass keine weitere Schichtdickenerhöhung erfolgt. Mit zunehmender Schichtdicke verliert das Beschichtungssystem an Flexibilität und das Gesamtgewicht nimmt stetig zu.

Um die Substratunabhängigkeit für das Beschichtungssystem B3 zu überprüfen, wird die Beschichtungsapplikation mit den optimierten Einstellungen (20 Ma-% Al_2O_3 und einer Schichtdicke von $60 \pm 10 \mu\text{m}$ für die erste strahlungsfunktionelle Schicht und 40 Ma-% TiO_2 und $200 \pm 10 \mu\text{m}$ für die zweite strahlungsfunktionelle Schicht) auf alle drei textile Substratmaterialien (PES 65, PA6.6 150 und Glas 163) appliziert und anschließend spektralanalytisch im Lambda 1050+ und der Vertex 80 untersucht.

Der Beschichtungsaufbau und der Spektralverlauf der solaren Reflexion des Beschichtungssystems B3 wird in der folgenden Abb. 5.28 für alle drei Substrate dargestellt.

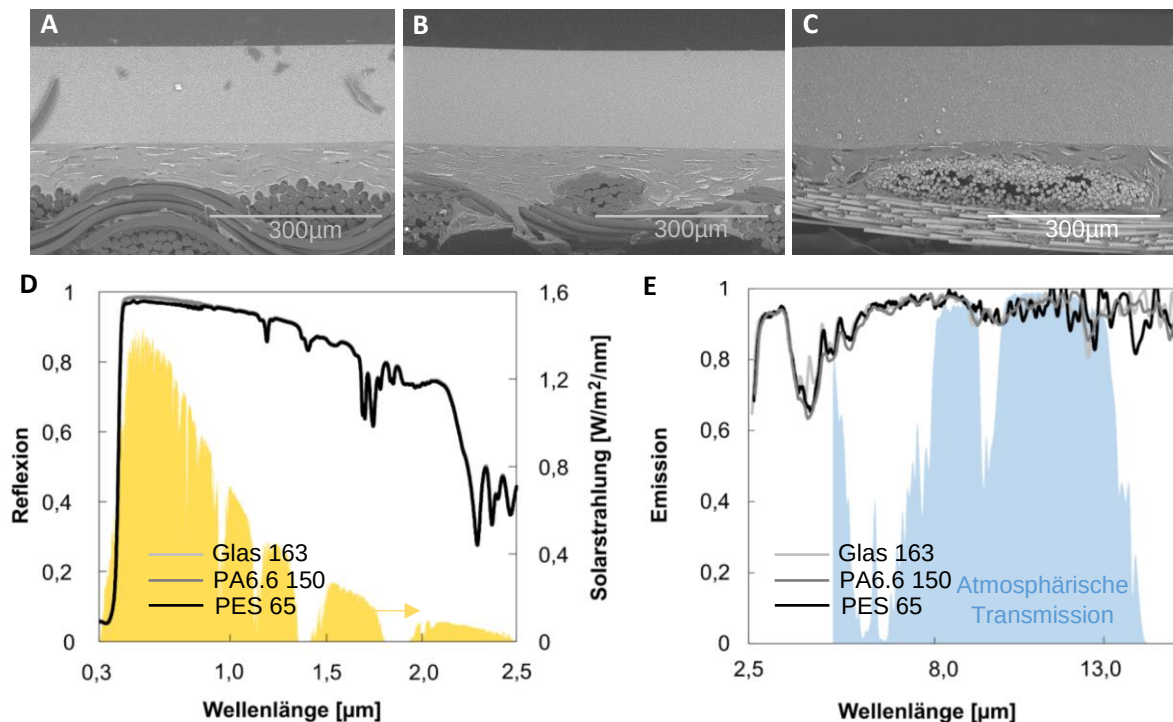


Abb. 5.28 Optische und spektrale Untersuchung der Substratunabhängigkeit für das Beschichtungssystem B3.

A PA6.6 150, Schichtdicke: 1. Schicht: $65,84 \pm 11,36 \mu\text{m}$, 2. Schicht: $194,39 \pm 5,97 \mu\text{m}$; **B** PES 65, Schichtdicke: 1. Schicht: $64,93 \pm 10,14 \mu\text{m}$, 2. Schicht: $187,80 \pm 3,46 \mu\text{m}$; **C** Glas 163, Schichtdicke: 1. Schicht: $60,52 \pm 18,48 \mu\text{m}$, 2. Schicht: $186,89 \pm 10,68 \mu\text{m}$ (REM (Hitachi TM1000) $\times 250$); **D** Solare Reflexion; **E** Emission im MIR.

Der Reflexionsverlauf ist für alle drei untersuchten Substrate identisch. Eine Steigerung der solaren Reflexion auf bis zu 98 % speziell im sichtbaren Bereich wird erzielt. Die Emission zwischen 8–13 μm liegt für alle drei Substrate bei 94 % und damit deutlich über 90 %.

Aufgrund der Trennung der beiden Beschichtungssysteme wird das eintreffende Licht von den TiO_2 -Partikeln in der ersten Schicht gestreut und reflektiert. Licht, dass auf die zweite strahlungsfunktionelle Lage trifft, wird durch die Aluminiumpartikel reflektiert, sodass kein Licht durch die ersten beiden Schichten bis auf das textile Substrat transmittiert. Ein Substrateinfluss wird damit ausgeschlossen.

Bei einem Schichtauftrag ohne Aluminiumanteil nehmen mit zunehmender TiO_2 -Konzentration, basierend auf einem höheren Schichtauftrag, Substratunterschiede zwar zunehmend ab (vgl. Tab. 5.4), allerdings sind Unterschiede im Spektralverlauf immer noch deutlich zu erkennen (vgl. Abb. 5.29).

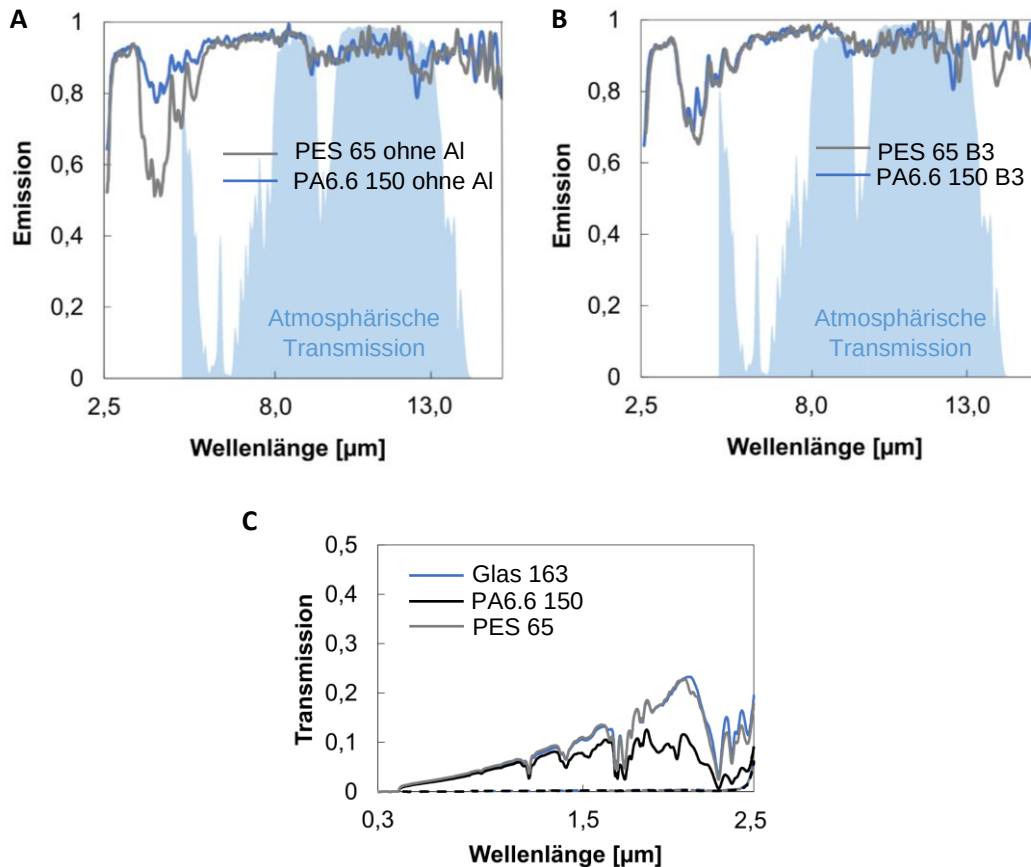


Abb. 5.29 Spektrale Untersuchung und Nutzen der Al-Schicht gegenüber dem Referenzsystem ohne Al-Partikel (B3).

A Emission im MIR der Referenzbeschichtung ohne Al-Anteil auf PES 65 und PA6.6 150; **B** Emission im MIR des Beschichtungssystems B3 auf PES 65 und PA6.6 150; **C** Solare Transmission Referenzbeschichtung gegenüber B3, Gestrichelte Linien = B3 mit Al-Anteil, durchgezogene Linie = B3 ohne Al-Anteil

Die Spektralverläufe des Beschichtungssystems ohne Aluminiumanteil zeigen teilweise deutliche Unterschiede im Hinblick auf das beschichtete Substratmaterial, insbesondere in der Transmission und MIR außerhalb des Bereichs von 8–13 μm . In diesen Wellenlängenbereichen hat TiO_2 im Vergleich zu Aluminium kaum oder nur einen geringfügigen Einfluss. Die Transparenzwerte im nahen Infrarot liegen zum Teil bei >20 %. Durch die Zugabe von Aluminiumpartikeln kann, wie aus dem Abschnitt 5.2 ersichtlich, der gesamte Spektralbereich unabhängig vom Substrat beeinflusst werden. Die Zugabe von Al 212 führt zu einer deutlichen Reduzierung der Transmission. Die Werte für die solare Reflexion, Transmission (0,3–2,5 μm) und Emission (8–13 μm) zeigen sich demnach für das Beschichtungssystem B3 auf sämtlichen drei Substraten auf einem vergleichbaren Niveau, wie in Tab. 5.4 dargelegt ist. Die prozentuale Abweichung für den solaren Bereich zwischen PES und Glas liegt bei 2,09 %, für die Emission im atmosphärischen Fenster (8–13 μm) zwischen PES und PA6.6 bei 0,15 %.

Tab. 5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse des Beschichtungsauftrages B3 im Vergleich zu Referenzsystemen.

Durchschnittswerte der solaren Transmission und Reflexion sowie Emission zwischen 8–13 µm am Beispiel von PES 65, PA6.6 150 und Glas 163.

R_{solar} (%) / T_{solar} (%) / ε_{8-13 µm} (%)	PES 65 g/m²	Glas 163 g/m²	PA6.6 150 g/m²
Referenz ohne Beschichtung	29,1/62,6/67,5	55,0/43,9/92,5	41,6/42,1/91,6
Referenz B3 ohne Al-Partikel	75,8/8,76/91,9	76,2/8,99/92,4	75,7/5,32/92,4
Beschichtungssystem B3	77,4/0,24/94,1	77,3/0,27/94,5	76,9/0,22/94,0

5.5 Fazit zur Beschichtungsapplikation

Das Ziel der Materialentwicklung lag darin eine geeignete Beschichtungsrezeptur zu entwickeln, die auf verschiedene textile Substratmaterialien appliziert werden kann und strahlungsoptisch unabhängig von der Gewebestruktur wirkt. Die Ergebnisse aus den Kapiteln 5.1 bis 5.4 zeigen, dass die Zugabe von niedrig emittierenden Partikeln am Beispiel von Aluminium eine deutliche Veränderung und Anpassungsmöglichkeit der Spektralverläufe bewirkt. Durch die Zugabe der Aluminiumpartikel ist eine deutliche Verringerung der Transmission im gesamten Spektralverlauf von 0,3–20 µm möglich. Damit wird der Einfluss der untersuchten Substratmaterialien erheblich minimiert. Durch die Zugabe von Weißpigmenten, in Form von TiO₂, kann die solare Reflexion speziell im sichtbaren Bereich erhöht werden, was sich positiv auf die Kühlleistung auswirken kann. Tab. 5.5 bietet einen Überblick über die einzelnen untersuchten Beschichtungssysteme B1–B3 im Vergleich zu den jeweiligen Referenzbeschichtungen ohne Aluminiumanteil bzw. ohne Beschichtungsapplikation am Beispiel von PES 65.

Tab. 5.5 Zusammenfassung der spektralen Eigenschaften und Substratunterschiede in der solaren Reflexion und MIR-Emission.

PES 65 g/m²; Referenz B1/B2: 40 Ma-% TiO₂ 100±10 µm, Referenz B3: Silikon (LR) 60±10 µm + 40 Ma-% TiO₂ 200±20 µm; B1: 20 Ma-% Al 212 100±10 µm, B2: 10 Ma-% Al212 + 40 Ma-% TiO₂ 100±10 µm, B3: 20 Ma-% Al212 60±10 µm + 40 Ma-% TiO₂ 200±20 µm. Vis = 0,3–0,9 µm; NIR = 1,5–2,5 µm; solar = 0,3–2,5 µm.

* schwarzer Hintergrund (T=0)

Beschichtung	R_{solar} max. [%]	R_{vis} Ø [%]	R_{NIR} Ø [%]	ε_{solar} Ø * [%]	Emission (Ø 8–13 µm) [%]	T_{solar} Ø [%]	max. Abweichung R_{solar} (PES 65–Glas 163) [%]	Abweichung ε/α (MIR) (PES 65– PA6.6 150) [%]
Referenz PES 65 g/m ²	35,8	30,7	27,3	0,72	67,5	62,6	46,3	26,9 (8–13 µm) 32,2 (2,5–20 µm)
Referenz ohne Al B1/B2	96,5	80,2	59,5	0,16	91,8	12,26	21,23	0,41 (8–13 µm) 2,72 (2,5–20 µm)
Referenz ohne Al B3	98,3	82,1	63,0	0,13	91,9	8,76	2,57	0,46 (8–13 µm) 2,88 (2,5–20 µm)
B1	78,5	62,4	75,9	0,35	84,4	0,24	2,42	0,04 (8–13 µm) 3,03 (2,5–20 µm)
B2	80,9	62,8	64,9	0,33	90,7	0,54	1,34	1,97 (8–13 µm) 5,24 (2,5–20 µm)
B3	98,5	82,3	66,1	0,12	94,1	0,24	2,09	0,15 (8–13 µm) 0,10 (2,5–20 µm)

$\tilde{\epsilon}_{solar}$ beschreibt die durchschnittliche solare Absorption der Oberfläche unter Berücksichtigung des spektralen Emissionsverhaltens der Oberfläche $\epsilon(\lambda)$ und der solaren Strahlungsdichte des Sonnenspektrums $I_{solar}(\lambda)$ und wird durch die folgende Formel basierend auf [60] berechnet:

$$\tilde{\epsilon}_{solar} = \frac{\int_{0.30 \mu m}^{2.5 \mu m} \epsilon(\lambda) I_{solar}(\lambda) d\lambda}{\int_{0.30 \mu m}^{2.5 \mu m} I_{solar}(\lambda) d\lambda} \quad (5.1)$$

Damit können Reflexionsunterschiede in den verschiedenen solaren Wellenlängenbereichen vom sichtbaren bis zum nahen Infrarot unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Intensitäten des solaren Spektrums bewertet werden.

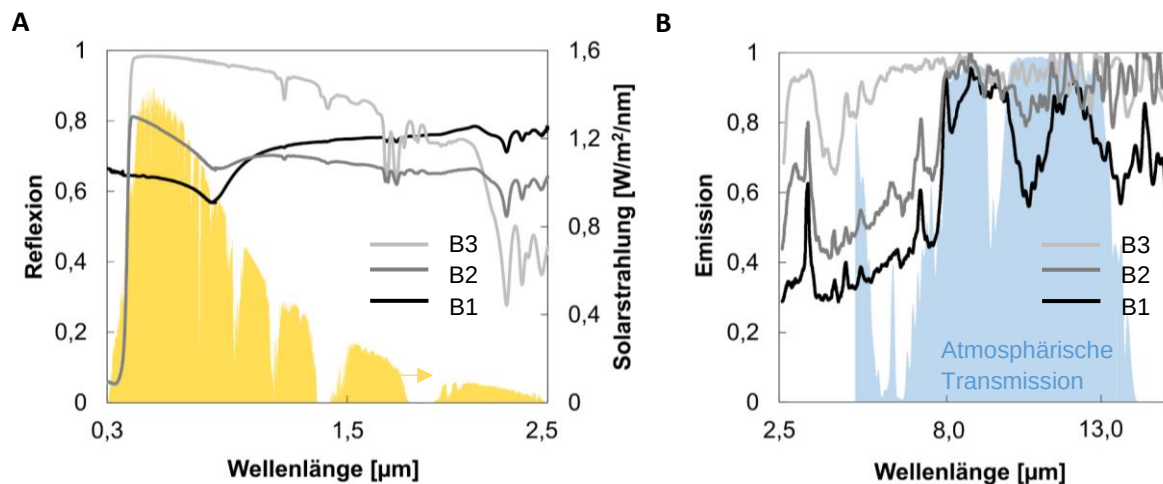


Abb. 5.30 Solare Reflexion und Emission im MIR der Beschichtungssysteme B1–B3.

PES 65 g/m²; B1: 20 Ma-% Al 212 100±10 µm, B2: 10 Ma-% Al212 + 40 Ma-% TiO₂ 100±10 µm, B3: 20 Ma-% Al212 60±10 µm + 40 Ma-% TiO₂ 200±20 µm; **A** Solare Reflexion, **B** Emission im MIR.

In der Abb. 5.30 werden die Spektralläufe der solaren Reflexion und der Emission im mittleren Infrarot für alle drei Beschichtungssysteme (B1–B3) am Beispiel von PES 65 zusammengefasst aufgezeigt. Das Beschichtungssystem B1 zeigt höhere Reflexionswerte im nahen Infrarot gegenüber B2 auf, B2 dagegen eine höhere Reflexion im sichtbaren Bereich. Durch Berücksichtigung der Strahlungsintensitäten der Sonneneinstrahlung und der Berechnung von $\tilde{\epsilon}_{solar}$, wird deutlich, dass B2 trotz geringerer Reflexionswerte im nahen Infrarot durch die Zugabe von TiO₂ eine geringere solare Absorption gegenüber B1 und damit eine etwas bessere Kühlleistung aufweist.

Die Ergebnisse des Beschichtungssystem B3, bestehend aus zwei funktionellen Schichten, zeigen, dass ein idealisierter breitbandiger Spektralverlauf erzielt werden kann, der für die untersuchten Gewebetypen identisch ist. Die prozentuale Abweichung der Spektralverläufe

der solaren Reflexion und Emission im mittleren Infrarot können für das Beschichtungssystem B3 deutlich reduziert werden.

Die Ergebnisse aus den Kapiteln 5.1 bis 5.4 bestätigen die Hypothese (1), dass die Integration von Aluminiumpartikeln eine Substratunabhängigkeit der Beschichtung für die untersuchten textilen Gewebetypen ermöglicht. Die direkte Integration der Partikel zur Reduzierung der Transmission im gesamten Wellenlängenbereich bietet den Vorteil einer einfachen und hochskalierbaren Auftragstechnik. Darüber hinaus betragen die reinen Materialkosten für das Beschichtungssystem B3 ca. 3,82 €/m² (die genaue Kostenanalyse ist dem Anhang Tab. 9.1 zu entnehmen).

Die Kombination mit TiO₂ in einem zweilagigen Beschichtungsaufbau B3 unter Berücksichtigung der Einstellungen der Beschichtungsvariablen V1–V5, führt nicht nur zu einer substratunabhängigen Anwendung im hier untersuchten Anwendungskontext, sondern maximiert auch die strahlungsoptischen Eigenschaften der Beschichtung, insbesondere der solaren Reflexion, sodass eine positive Kühlleistung erzielt werden kann.

Um die untersuchten Beschichtungssysteme hinsichtlich ihrer theoretischen und tatsächlichen Kühlleistung weiter zu analysieren und damit die Hypothesen (2) und (3) zu überprüfen, wird in den folgenden Kapiteln die tatsächliche Kühlleistung der entwickelten Beschichtungsrezepturen B1–B3 durch den Bau eines geeigneten Messprüfstandes unter realen Wetterbedingungen getestet und ein numerisches Vorhersagemodell an textiltechnische Anforderungen angepasst und validiert.

6. Prüfmethode zum Nachweis der Kühlleistung unter realen Wetterbedingungen

Nachdem die Beschichtungskomponenten analysiert, optimiert und eingestellt sind (beschrieben in Kapitel 5), wird die Funktionsweise der Beschichtung unter realen Bedingungen verifiziert und bewertet, um die in Kapitel 5 aufgestellte Hypothese (2) hinsichtlich einer positiven Kühlleistung auch unter realen Bedingungen überprüfen zu können.

Der Prüfaufbau zur Messung der Temperatur und Kühlleistung unter realen Wetterbedingungen wurde auf einer Messfläche auf dem Dach der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung (DITF) aufgebaut (48° 42'02.6"N, 9°20'36.8"E). Damit wird gewährleistet, dass die Messung nicht durch nahestehende Gebäudewände oder Bepflanzung beeinflusst wird. Der Prüfaufbau wird zusätzlich ca. einen Meter oberhalb der Dachfläche mit Boschprofilen befestigt, sodass die Wärmeabstrahlung des Bodens keinen Einfluss auf die Messung nimmt.

6.1 Entwicklung, Konstruktion und Bau eines geeigneten Prüfaufbaus

Die Grundlage für die Konzeption des Prüfaufbaus bietet der in Abschnitt 2.2.5 beschriebene Stand der Technik.

Es werden zwei Prüfaufbauten konzipiert, die sich in wenigen Punkten voneinander unterscheiden. Der erste Prüfaufbau der im Abschnitt 6.1.1 beschrieben wird, dient dem Vergleich verschiedener Materialien hinsichtlich ihrer thermischen Eigenschaften. Dabei liegt der Fokus auf der Messung und dem Vergleich der Temperaturen. Der Aufbau wurde vereinfacht, um eine größere Anzahl von Messstellen zu integrieren, sodass mehrere Materialien gleichzeitig untersucht und unter gleichen Bedingungen vermessen werden können. Vermessen werden die Temperatur direkt unterhalb der Proben, sowie die der Umgebungsluft.

Der zweite Prüfaufbau, beschrieben in Abschnitt 6.1.2, dient zur Messung der tatsächlichen Kühlleistung in Watt pro Quadratmeter. Hierfür werden zwei identische Aufbauten mit einem integrierten Heizplattensystem konzipiert, sodass ein Referenzmaterial im Vergleich zum Probenmaterial vermessen werden kann.

6.1.1 Konzeption und Aufbau zur reinen Temperaturmessung

Der Prüfaufbau wird schematisch in der folgenden Abb. 6.1 dargestellt.

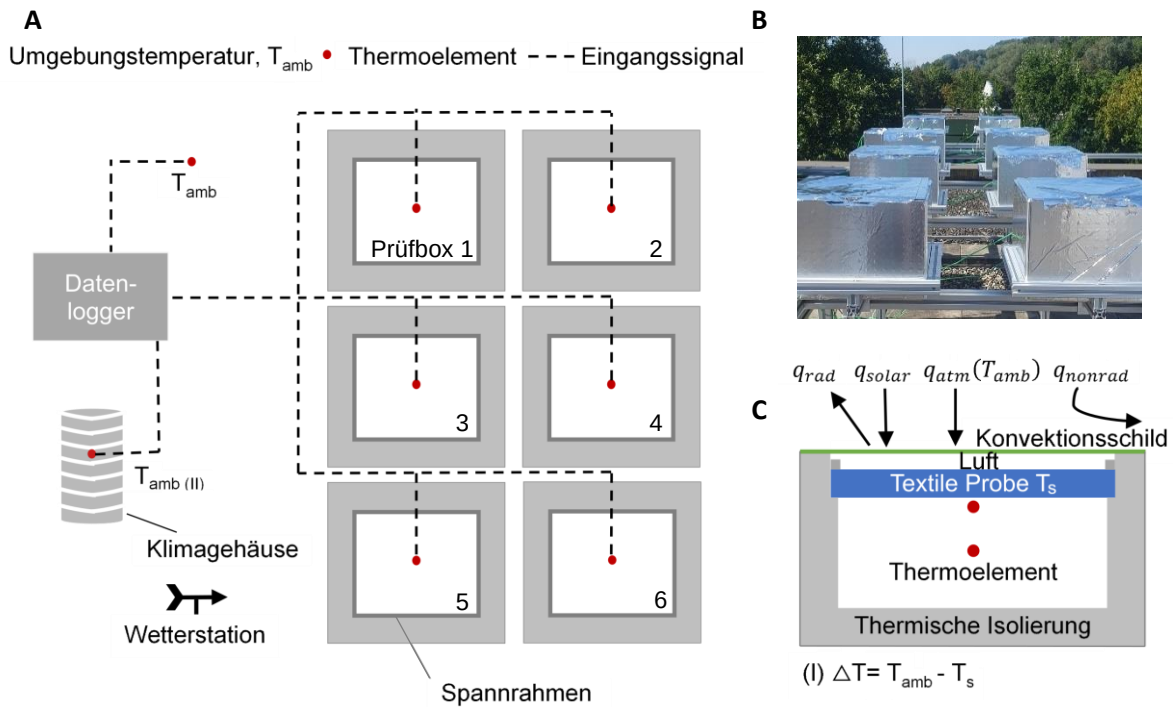


Abb. 6.1 Aufbau der Prüfmodule zum Vergleich verschiedener Materialien und Messung der Temperaturunterschiede.

A Schematische Darstellung der sechs Prüfboxen, wobei die Systemkomponenten, die Datenerfassung und das Steuersystem hervorgehoben werden; **B** Fotografie des Systems auf dem Institutsdach (die Boxen werden vor der Messung mit Aluminiumfolie abgedeckt, bis eine stationäre Temperatur erreicht ist); **C** Schematische Darstellung der Querschnittsansicht eines Prüfmoduls, das die Position der textilen Probe und der Thermoelemente sowie die Energieübertragungsprozesse hervorhebt.

Insgesamt werden sechs Prüfboxen auf dem Institutsdach aufgestellt. Die Probenfläche, die zum Himmel ausgerichtet ist, beträgt $25 \pm 0,5 \text{ cm}^2$. Die Messfläche wird durch die Produktionsbreite des Rakelsystems des Mathis Labcoaters begrenzt. Als Isoliermaterial wird Styropor mit einer Dicke von $10 \pm 0,5 \text{ cm}$ eingesetzt. Die Maße der Isolierbox betragen $350 \times 350 \times 300 \text{ mm}$ Außenmaß (AM) und $250 \times 250 \times 200 \text{ mm}$ Innenmaß (IM). Die Boxen werden von innen und außen mit einer solarreflektierenden, selbstklebenden Aluminiumfolie (Calorique, Deutschland) mit einer Dicke von $30 \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$ ausgerüstet. Die Isolation und die reflektierende Folie dienen der Reduzierung der Konduktion von außen nach innen. Je Prüfaufbau werden zwei Thermoelement-Mantelfühler NiCr-Ni (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Deutschland) des Typs K als Temperatursensor eingesetzt. Ein Temperatursensor befindet sich mittig unmittelbar unterhalb der Probe. Ein zweiter Sensor wird genau mittig in der Box fixiert. Die Temperatursensoren werden mittels einem Datenlogger 710 (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Deutschland) und der WinControl-Software (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Deutschland) ausgelesen. Um die Messung vor dem Einfluss von Konvektion zu schützen,

wird zusätzlich ein Konvektionsschild aus Polyethylen (Low Density Polyethylen (LDPE)) mit einer Dicke von $10 \pm 5 \mu\text{m}$ appliziert. Der Abstand zwischen Konvektionsschild und Probenfläche beträgt $15 \pm 0,5 \text{ mm}$.

Zur Messung der Umgebungstemperatur werden zwei Temperatursensoren eingesetzt (vgl. Abb. 6.1A). Ein Thermoelement-Mantelfühler NiCr-Ni (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Deutschland) des Typs K wird auf Höhe der Prüfmodule montiert. Die Messspitze wird mit einer reflektierenden Folie (Aluminium) abgedeckt, sodass diese vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt und gleichzeitig ein ungehinderter Luftstrom gewährleistet wird. Ein digitaler Fühler zur Messung der Luftfeuchte, Temperatur und Luftdruck (FHAD46C41AL05, Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH) wird in einem Klimagehäuse (Technoline, Deutschland) ebenfalls auf Höhe der Prüfmodule montiert. Das Klimagehäuse, ähnlich einem Stevenson-Screen, dient ebenfalls der Verschattung des Temperatursensors und der gleichzeitigen Gewährleistung eines freien Luftstroms durch die Lamellenöffnungen. Die Umgebungstemperatur wird aus beiden Sensoren gemittelt angegeben.

Die meteorologischen Daten, wie die Luftfeuchtigkeit, die Windstärke, die Solareinstrahlstärke oder der Luftdruck werden durch einen meteorologischen Messwertgeber (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Deutschland), einen Globalstrahlungs-Messkopf (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Deutschland) und ein Pyranometer (Kipp & Zonen, Niederlande) vermessen. Diese sind an einer Wetterstation montiert, die sich ca. drei Meter von dem Prüfaufbau entfernt auf dem Institutsdach befindet.

Basierend auf der Methode (I) (vgl. Abschnitt 2.2.5) wird die Temperatur der Kühlprobe und die der Lufttemperatur gemessen, um die Kühlleistung in Bezug auf die Umgebungstemperatur in Grad Celsius darzustellen.

Die Informationen zu den Messinstrumenten sind in Tab. 6.1 aufgeführt.

Tab. 6.1 Eingesetzte Messinstrumente und deren Abweichung.

Instrument	Modell	Abweichung
Thermoelement-Mantelfühler NiCr-Ni	Typ K	$\pm 1,5 \text{ K}$
Digitaler Fühler für Luftfeuchte, Temperatur, Luftdruck	FHAD46C41AL05	$\pm 0,2 \text{ K}$
Datenlogger	710	-
Meteorologischer Messwertgeber – Wind	FMD760	$\pm 0,3 \text{ m/s}$
Meteorologischer Messwertgeber – Luftfeuchtigkeit	FMD760	$\pm 2 \%$
Meteorologischer Messwertgeber – Luftdruck	FMD760	$\pm 0,5 \text{ hPa}$
Globalstrahlungs-Messkopf UVA-, Vis-, IR-Strahlung	FLA613T1B11	$< 10 \%$
Pyranometer	CM 11	$< 10 \text{ W/m}^2$

Die Informationen der Messinstrumente gelten ebenso für den in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Prüfaufbau.

6.1.2 Konzeption und Aufbau zur Messung der Kühlleistung mittels einem Heizplattensystem

Der Prüfaufbau zur Messung der Kühlleistung wird schematisch in der folgenden Abb. 6.2 dargestellt.

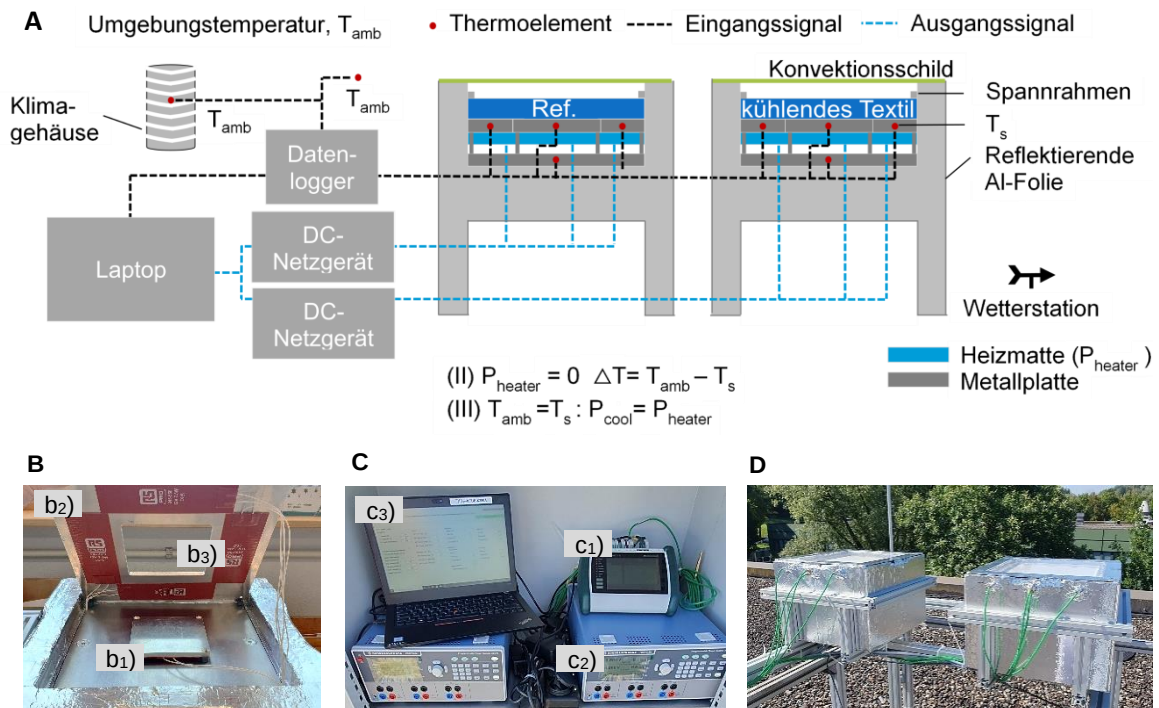


Abb. 6.2 Aufbau der Prüfmole zur Messung der Kühlleistung in Celsius und W/m^2 mittels einem rückgekoppelten Heizplattensystem.

A Schematische Darstellung der Querschnittsansicht der Prüfmole, wobei die Systemkomponenten, die Datenerfassung, das Steuersystem und die Position der einzelnen Komponenten sowie der Thermoelemente aufgezeigt werden; **B** Fotografie des „Guarded-Ring“ Heizplattensystems, b1) Kernplatte, b2) Rahmenplatte, b3) Heizfolien; **C** Fotografie der Datenerfassung, c1) Datenlogger, c2) DC-Netzgeräte (1 & 2) für das jeweilige Prüfmole, c3) Datenerfassung und -regelung der Heizleistung; **D** Fotografie der Prüfmole auf dem Institutsdach.

Durch die Implementierung eines rückgekoppelten Heizplattensystems wird die Kühler-Temperatur (T_s) gleich der Umgebungstemperatur (T_{amb}) gehalten. Die Temperaturdifferenz zwischen der Umgebung und des selbstkühlenden Textils beträgt durch das Heizsystem über den gesamten Messzeitraum weniger als 0,2 K. Einflussfaktoren durch Konvektion oder Konduktion werden damit weiter reduziert.

Die textile Probe wird auf eine Metallplatte gelegt. Diese besteht aus einer $0,6 \pm 0,05$ cm dicken Aluminiumplatte.

Textile Proben haben den Nachteil, dass sie eine flexible und unregelmäßige Struktur aufweisen und ohne weitere Hilfsmittel nicht planar auf der Heizplatte aufliegen würden. Für genaue Messergebnisse ist jedoch eine ausreichende Kontaktierung zwischen der

Metallplatte und der textilen Probe wichtig. Eine Möglichkeit, dies zu gewährleisten, besteht darin, die Unterseite der Proben mit einer zusätzlichen haftenden Beschichtung zu versehen. Dies kann sich insbesondere bei einer nicht beschichteten Referenzprobe negativ auf die Kühlleistung auswirken. Um dies zu verhindern, wird eine Art Spannrahmen verwendet. Die Probe wird mit Hilfe des Rahmens zwischen die Innenseite des Prüfmoduls und den Rahmen gespannt, sodass sie planar auf der Metallplatte aufliegt. Durch die Implementierung eines "Guarded-Ring" Systems kann der mögliche Einfluss des Spannrahmens, der am Rand auf der Metallplatte aufliegt, vernachlässigt werden.

Die Trennung der Metallplatte in eine Kern- und eine Rahmenplatte basiert auf dem Standardprüfverfahren zur Wärmeleitfähigkeit (Guarded-Hot-Plate) [128] und gewährleistet eine eindimensionale Wärmeübertragung zwischen Kern und Probe. Gleichzeitig werden Wärmeübertragungseffekte durch Konduktion von dem Prüfmodul zum Rand der Metallplatte und zur Probe minimiert sowie Seitenverluste nach außen begrenzt [129].

Die Messfläche des Kerns und damit die Oberfläche des Strahlungskühlmaterials beträgt $100 \pm 0,5 \text{ cm}^2$. Der Abstand zwischen Rahmen- und Kernplatte beträgt $5 \pm 0,5 \text{ mm}$. Die Rahmenplatte hat eine Fläche von $456 \pm 0,5 \text{ cm}^2$. Die Module sind auf der gleichen Höhe angebracht, wie die Prüfeinrichtungen für die reine Temperaturmessung (1 Meter oberhalb der Gebäudedachfläche), sodass die Messung nicht durch die Abstrahlung des Bodens beeinflusst wird. Zusätzlich wird das Heizplattensystem zum Minimieren von parasitären Wärmeströmen durch eine $10 \pm 0,5 \text{ cm}$ dicke Isolierschicht aus Styropor an den Seitenflächen und am Boden geschützt. Zur Messung der Kühlleistung in Watt pro Quadratmeter nach der Methode (III) (vgl. Abschnitt 2.2.5) werden unterhalb der Metallplatte des Kerns und des Randes selbstklebende Silikon-Heizmatten (RS Components GmbH, Deutschland) mit einer Dicke von 1,4 mm angebracht. Die Heizmatten sind mit dem Netzgerät HMP4030 3-CH (Rohde & Schwarz, Deutschland) verbunden. Die Thermoelemente NiCr-Ni (Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, Deutschland) des Typ K sind in der Metallplatte so platziert, dass die Messspitze genau in der Mitte der jeweiligen Platte sitzt. Durch die geringe Dicke der Aluminiumplatte kann die exakte Temperatur der Heizplatte und damit T_s bestimmt werden.

Für die Rahmenplatte werden zwei Temperatursensoren mittig in der rechten und linken Rahmenseite eingesetzt. Daraus wird der Mittelwert gebildet.

In einem ersten Prüfaufbau wurde eine zusätzliche Grundplatte mit Heizelementen integriert, um Wärmeverluste zum Boden zu verringern. Anhand der Messergebnisse konnte festgestellt werden, dass die zusätzliche Wärmeentwicklung der Grundplatte die Temperatur der Kernplatte negativ beeinflusst. Aus diesem Grund wird auf eine zusätzliche Grundplatte verzichtet. In diesem Aufbau dient die untere Metallplatte, die mit einem

Abstand von $5 \pm 0,5$ mm zur Kern- und Rahmenplatte eingesetzt ist, als Halterung der obigen Platten.

Ein zusätzlicher Konvektionsschild aus LDPE schützt vor Konvektion. Der transparente Film wird mittels eines Rahmens gespannt horizontal über die Probe gelegt und an den Seiten an dem Prüfmodul mit einem Aluminiumband befestigt. Der Abstand zwischen Konvektionsschild und Probenfläche beträgt $15 \pm 0,5$ mm.

Für die Regelung der Heizplattentemperatur für $T_{\text{amb}} = T_s$ und der Aufzeichnung der benötigten Heizleistung wird das Software-Programm der Firma Günther verwendet. Die Umgebungstemperatur wird, wie in 6.1.1 beschrieben, aus beiden Sensortypen gemittelt angegeben. Die aufzuwendende Heizleistung entspricht der Kühlleistung in W/m^2 ($P_{\text{cool}} = P_{\text{heater}}$).

Neben der Messmethode (III) kann in diesem Prüfmodul auch die maximale Temperatur unterhalb der Umgebungstemperatur basierend auf der Methode (II) (vgl. Abschnitt 2.2.5) gemessen werden, indem das Heizplattensystem ausgeschaltet wird, sodass $P_{\text{heater}} = 0$ entspricht.

Durch den Bau von zwei identischen Prüfmodulen mit Heizplattensystem kann die Probe mit einer Referenzprobe vermessen, sowie die Methode (II) und (III) parallel unter gleichen Wetterverhältnissen durchgeführt werden.

6.2 Auswertung und Analyse der Prüfergebnisse unter realem Wettereinfluss

Die Messungen erfolgten typischerweise über einen Zeitraum von mehreren Stunden oder Tagen und unter klarem oder meist klarem Himmel.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Prüfmodulen sicherzustellen, wurde die Variabilität überprüft, indem für alle Prüfaufbauten Aluminiumfolie als Probe eingesetzt wurde. Die Temperatur der Prüfmodule mit und ohne Heizplattensystem wurde am Tag über einen Zeitraum von 40 Minuten erfasst. Es wurde eine geringfügige durchschnittliche Abweichung von 0,3 K bei einer durchschnittlichen direkten Sonneneinstrahlung von $<400 \text{ W/m}^2$ gemessen. Die Abweichung liegt im Bereich der Messungenauigkeit der Temperatursensoren, sodass die Prüfmodule als identisch angesehen werden können. Das Ergebnis kann der Abb. 9.7A und B im Anhang entnommen werden.

Aufgrund der sehr geringen Emissionsleistung im MIR entspricht die Temperatur der Aluminiumfolie in der Nacht der gemessenen Umgebungstemperatur (Anhang Abb. 9.7C). Der Messaufbau zeigt eine plausible Genauigkeit für die Temperaturmessung der Probe als auch der der Umgebungstemperatur.

Vor Beginn jeder neuen Messreihe werden die Prüfmodule mit Aluminiumfolie abgedeckt, um sicherzustellen, dass alle Prüfboxen eine vergleichbare Ausgangstemperatur aufweisen. Die Demontage der Aluminiumfolie und der Startzeitpunkt der Messung werden in den Graphiken mit einer gestrichelten Linie markiert.

Zunächst werden die Temperaturverläufe verglichen. Die Kühlwirkung wird im Vergleich zur Umgebungstemperatur und anderen Messproben in Celsius dargestellt.

Im zweiten Abschnitt 6.1.2 werden die Ergebnisse der Kühlleistung basierend auf der Methode (II und III) für eine beschichtete und unbeschichtete Referenzprobe dargestellt.

6.2.1 Vergleich der Kühlwirkung in Celsius (°C)

Um die Proben miteinander vergleichen zu können und so wenig Einfluss wie möglich von der Umgebung zu gewährleisten, wird der Temperaturverlauf gemessen durch den Temperatursensor unmittelbar unterhalb der Probe aufgezeigt.

In einer ersten Messreihe wurden die Beschichtungssysteme B1–B3 auf PES 65 miteinander verglichen. Abb. 6.3 zeigt die gemessene Temperatur über einen Zeitraum von >24 Stunden und einem klaren bzw. meist klaren blauen Himmel. Die Solareinstrahlstärke erreicht zu Mittagszeiten einen Peak von >1000 W/m².

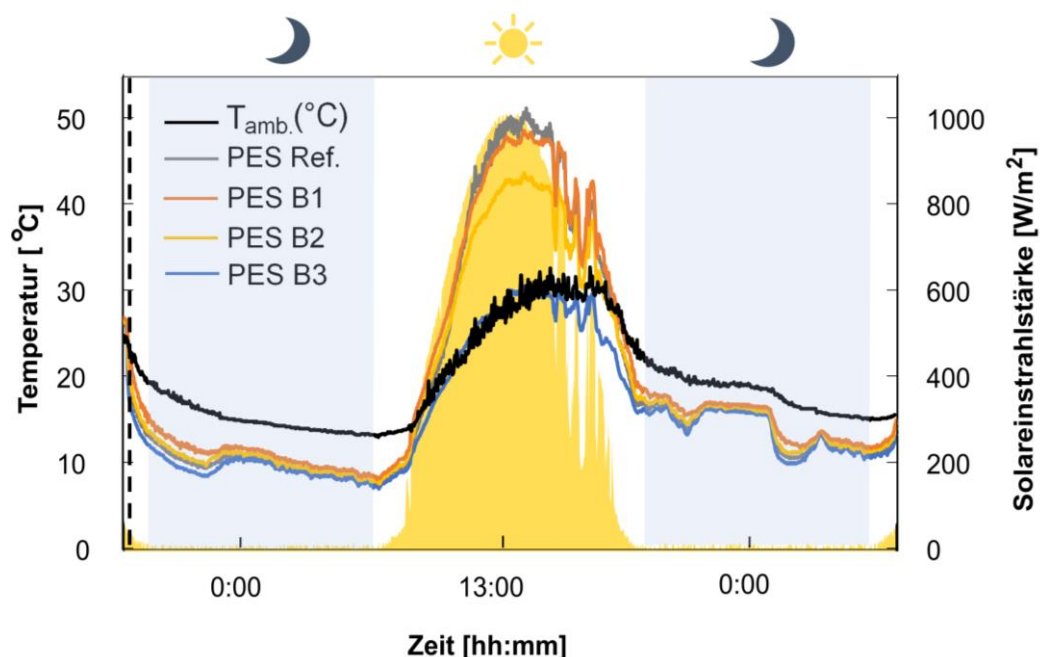


Abb. 6.3 Temperaturmessung der Beschichtungssysteme B1–B3 unter realen Wetterbedingungen über einen Zeitraum von >24h.

Gemessen mit dem Prüfmodul zur reinen Temperaturmessung vom 15.09.2023–17.09.2023 auf dem Dach der DITF. Maximale Solareinstrahlung am Tag (16.09.2023): 1012,9 W/m², durchschnittliche Windgeschwindigkeit am Tag (7:00–19:00 Uhr): 0,7 m/s, durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit am Tag (7:00–19:00 Uhr): 60,1 %.

Die Temperaturen sind nachts insgesamt niedriger und steigen mit dem Beginn der Sonneneinstrahlung an. Die Temperatur kann über den Beschichtungsauftrag deutlich reduziert werden. Das Beschichtungssystem B1 und B2 senkt zwar die Tagestemperatur (7–19 Uhr) gegenüber dem unbeschichteten Textil um jeweils durchschnittlich 3 °C und 5 °C, allerdings wird hiermit keine Temperaturreduktion unterhalb der Umgebungstemperatur erzielt. Das Beschichtungssystem B3 weist die größte Temperaturreduktion mit >10 °C (zwischen 7–19 Uhr) gegenüber dem unbeschichteten System auf und verläuft unterhalb oder auf Niveau der Umgebungstemperatur auch bei einer Sonneneinstrahlung von bis zu 1000 W/m². Die Temperatur der Probe B3 liegt zwischen 7–19 Uhr durchschnittlich 2 °C unterhalb der Umgebungstemperatur. Das hängt mit dem deutlich verbesserten Spektralverlauf des Beschichtungssystems B3 zusammen. Die Reflexion speziell im sichtbaren Bereich ist, wie aus Kapitel 5 zu entnehmen ist, mit >95 % deutlich höher im Vergleich zum Beschichtungssystem B1 und B2, sodass das Material sich gegenüber der Umgebungstemperatur nicht aufwärmt und es sich auch bei voller Solareinstrahlung kühl anfühlt.

Die gemessenen Temperaturverläufe bestätigten damit die Ergebnisse aus Kapitel 5 und bestätigen die abgeleiteten Aussagen aus den gemessenen Spektralverläufen.

Die Temperatur liegt in der Nacht für alle Proben unterhalb der Umgebungstemperatur. Das hängt mit einer ausreichend hohen Emissionsleistung im mittleren Infrarot und speziell zwischen 8–13 µm zusammen. B3 erzielt die höchsten Emissionswerte im mittleren Infrarot (vgl. Abschnitt 5.5). In der Nacht weist das Beschichtungssystem B3 eine durchschnittliche Temperatur von 13,3 °C (20:00–8:00 Uhr) und die größte Temperaturreduktion von durchschnittlich 4,2 °C gegenüber der Umgebungstemperatur auf. Das Ergebnis ist mit dem aus Kapitel 1 konsistent.

In einer zweiten Messreihe wurde die Substratunabhängigkeit des Beschichtungssystems B3 überprüft. Das Beschichtungssystem wird einmal unbeschichtet und beschichtet auf drei Substratmaterialien PES 65, Glas 163 und PA6.6 150 über einen Zeitraum von >24 Stunden vermessen (vgl. Abb. 6.4).

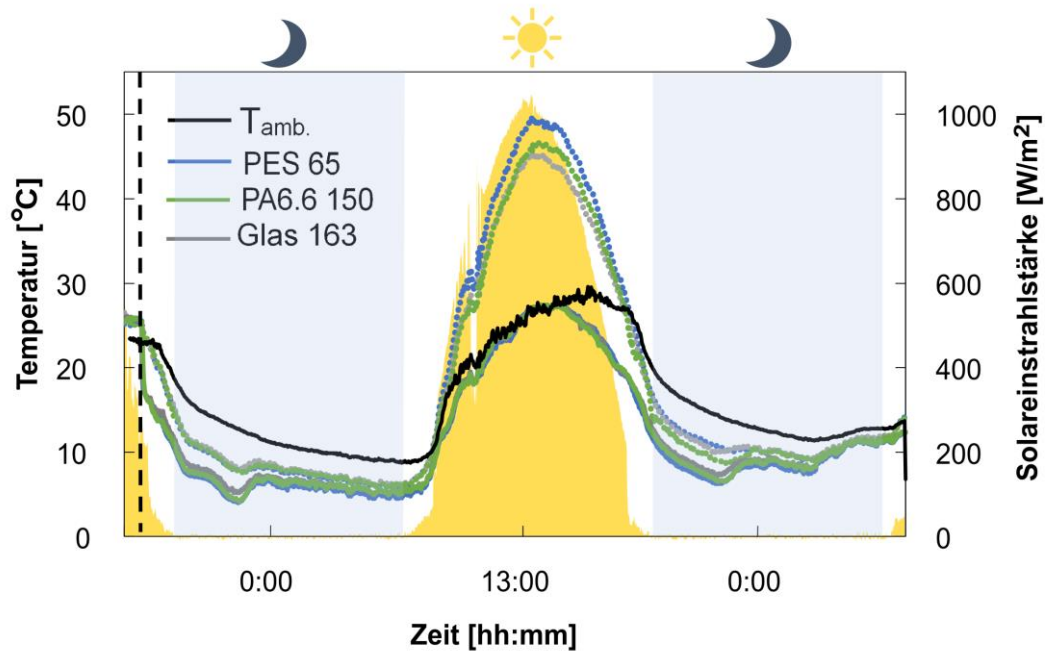


Abb. 6.4 Temperaturmessung des Beschichtungssystems B3 auf unterschiedlichen Substraten unter realen Wetterbedingungen über einen Zeitraum von >24h. Durchgehende Linie = beschichtetes Substrat; gepunktete Linie = unbeschichtetes Substrat (Referenzprobe). Gemessen mit dem Prüfmodul zur reinen Temperaturmessung vom 19.09.2023–21.09.2023 auf dem Dach der DITF. Maximale Solareinstrahlung am Tag (20.09.2023): 1046,1 W/m², durchschnittliche Windgeschwindigkeit am Tag (7:00–19:00 Uhr): 0,7 m/s, durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit am Tag (7:00–19:00 Uhr): 59,3 %.

Der Temperaturverlauf zeigt, dass die Temperatur der beschichteten Proben nahezu identisch verläuft. Es wird eine durchschnittliche Abweichung am Tag von 0,25 K gemessen. Diese liegt im Bereich der angegebenen Messungenauigkeit. Die beschichteten Proben weisen eine durchschnittliche Temperatur am Tag von 19,8 °C, 20,0 °C und 20,0 °C für PES 65, Glas 163 und PA6.6 150 auf. Die Temperatur der Umgebung liegt bei 22,7 °C, sodass eine durchschnittliche Temperaturreduzierung über den Tagesverlauf von ca. 2,7 °C gegenüber der Umgebungstemperatur erzielt wird. Die Temperaturkurve verläuft auch bei einer Solareinstrahlstärke von >1000 W/m² zu Mittagszeiten unterhalb oder auf Niveau der Umgebungstemperatur und weist keine Erwärmung oberhalb von $T_{amb.}$ auf.

Es wurde eine durchschnittliche Temperaturreduktion der beschichteten Proben am Tag (7–19 Uhr) von jeweils 13,5 °C, 10,6 °C und 11,1 °C für PES 65, Glas 163 und PA6.6 150 gegenüber den unbeschichteten Geweben erzielt.

Die Temperaturmessung bestätigt somit auch die Ergebnisse aus Abschnitt 5.4, indem sie zeigt, dass unter realen Wetterbedingungen basierend auf einem nahezu identischen Spektralverlauf auch ein identischer Temperaturverlauf erzielt wird. Eine Kühlung

unterhalb der Umgebungstemperatur am Tag wird unabhängig vom Substrat mit dem Beschichtungssystem B3 erzielt.

PES 65, ausgerüstet mit dem Beschichtungssystem B3, zeigt für beide Messungen in Abb. 6.3 und Abb. 6.4 unter ähnlichen Wetterbedingungen und einer Solareinstrahlstärke von $>1000 \text{ W/m}^2$ tagsüber einen vergleichbaren Temperaturverlauf im Vergleich zur Umgebungstemperatur auf. Die Wirkungsweise dieses Beschichtungssystems wird damit auch über einen längeren Zeitraum und an verschiedenen Messtagen bestätigt.

6.2.2 Kühlleistung in W/m^2

Aufgezeigt wird die gemessene Kühlleistung basierend auf der Methode (III) $T_{\text{amb}} = T_s$ (vgl. Abschnitt 2.2.5). Der Messverlauf für die unbeschichtete und beschichtete Probe wird in der Abb. 6.5 dargestellt.

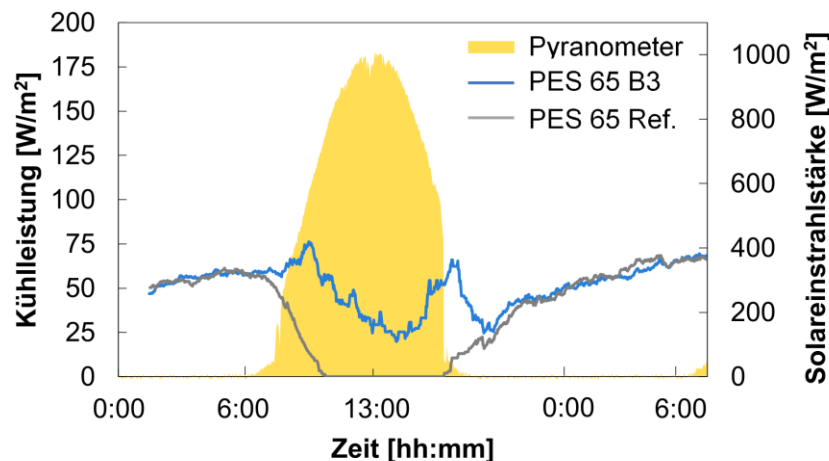


Abb. 6.5 Messergebnis der Kühlleistung (P_{cool}) des beschichteten und unbeschichteten Textils über 24 Stunden.

Probe: PES 65 g/m^2 Ref. unbeschichtet, PES 65 g/m^2 beschichtet mit der Beschichtungsrezeptur B3 (Gesamtbeschichtungsdicke: $250 \pm 20 \mu\text{m}$). Darstellung des Mittelwertes der Wärmezufuhr ($P_{\text{heater}} = P_{\text{cool}}$), gleitender Durchschnitt Periode 50 bei 2419 Datenpunkten. Gemessen mit dem Prüfmodul mit integriertem Heizplattensystem vom 15.09.2023–16.09.2023 auf dem Dach der DITF. Maximale Solareinstrahlung am Tag (15.09.2023): $1007,5 \text{ W/m}^2$, durchschnittliche Windgeschwindigkeit am Tag (7:00–19:00 Uhr): $1,2 \text{ m/s}$, durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit am Tag (7:00–19:00 Uhr): $67,1 \%$.

Mit steigender Solareinstrahlung nimmt die Kühlleistung am Tag ab. In der Nacht ist diese konstant auf einem höheren Niveau.

Zur besseren Lesbarkeit der Kühlleistung P_{cool} (wobei $P_{\text{heater}} = P_{\text{cool}}$ gilt) wird der Mittelwert der Wärmezufuhr in W/m^2 aufgezeigt und in den weiteren Abbildungen und Auswertungen verwendet. Dafür wird ein gleitender Durchschnitt angewendet. Die genauen Angaben sind den Abbildungsbeschreibungen zu entnehmen.

Durch die diskontinuierliche Energiezufuhr über die Heizmatten weisen die Daten ein Rauschen auf. Die exakt gemessenen Werte können dem Anhang Abb. 9.8 entnommen werden. Die Heizleistung wird auf Grundlage von Temperaturunterschieden zwischen der Proben- und Umgebungstemperatur geregelt. Die Heizleistung stoppt, sobald die Probentemperatur T_s der Umgebungstemperatur T_{amb} entspricht und wird aktiviert, wenn die $T_s < T_{amb}$ ist. Dieser Regelmechanismus führt zu Schwankungen in den Daten, die als Rauschen erkennbar sind und tagsüber stärker als nachts auftreten.

Tagsüber liegt die Probentemperatur näher an der Umgebungstemperatur (vgl. Abb. 6.4). Gleichzeitig schwankt die gemessene Umgebungstemperatur aufgrund von Einflussfaktoren, wie dem Wind (vgl. Abb. 6.6 D) und der Solareinstrahlstärke stärker als in der Nacht, sodass es zu unregelmäßigen Änderungen der Differenz von T_s zu T_{amb} kommt und die Heizleistung häufiger aktiviert und deaktiviert wird. In der Nacht führen die Abwesenheit der direkten Solareinstrahlung und der größere Temperaturabfall der Probe unterhalb der Umgebungstemperatur zu stabileren Bedingungen, sodass die Wärmezufuhr kontinuierlicher und damit gleichmäßiger erfolgt. Das Rauschen ist damit geringer (vgl. Anhang Abb. 9.8).

Die Kühlleistung erzielt nach Sonnenaufgang und vor Sonnenuntergang jeweils ein Maximum (vgl. Abb. 6.5). In dieser Zeit ändert sich die Umgebungstemperatur sehr schnell und die Sonneneinstrahlung fällt in großen Zenit-Winkeln auf die Probe. In den Morgenstunden bildet sich unvermeidbar Kondensationswasser auf der Oberfläche der Probe bzw. des Konvektionsschildes. Diese können die Kühlleistung in den Morgenstunden aufgrund von Verdunstungskühleffekten beeinflussen. In einigen Versuchsaufbauten werden die Prüfmodule in einem Neigungswinkel von bis zu 15° eingestellt, sodass Wassertropfen gegebenenfalls abfließen können [114]. Auch hier wurden die Prüfmodule zunächst in einem Neigungswinkel von 15° angebracht. Allerdings reichte dieser Winkel nicht aus. Die Wassertropfen blieben auf der Materialoberfläche haften und verdunsteten bzw. trockneten bei Anstieg der Solareinstrahlung. Um eine weitere Beeinflussung des Solareinstrahlwinkels durch extremere Neigungswinkel zu vermeiden und damit gegebenenfalls einer Über- oder Unterschätzung der Solareinstrahlstärke entgegenzuwirken, wurde entschieden den Neigungswinkel der Prüfmodule auf 0° zurückzustellen.

Um über einen längeren Zeitraum die Konsistenz der Messung aufzuzeigen, wurde die Kühlleistung an drei aufeinanderfolgenden Tagen bei klarem und meist klarem Himmel vermessen (vom 15.09.2023–17.09.2023).

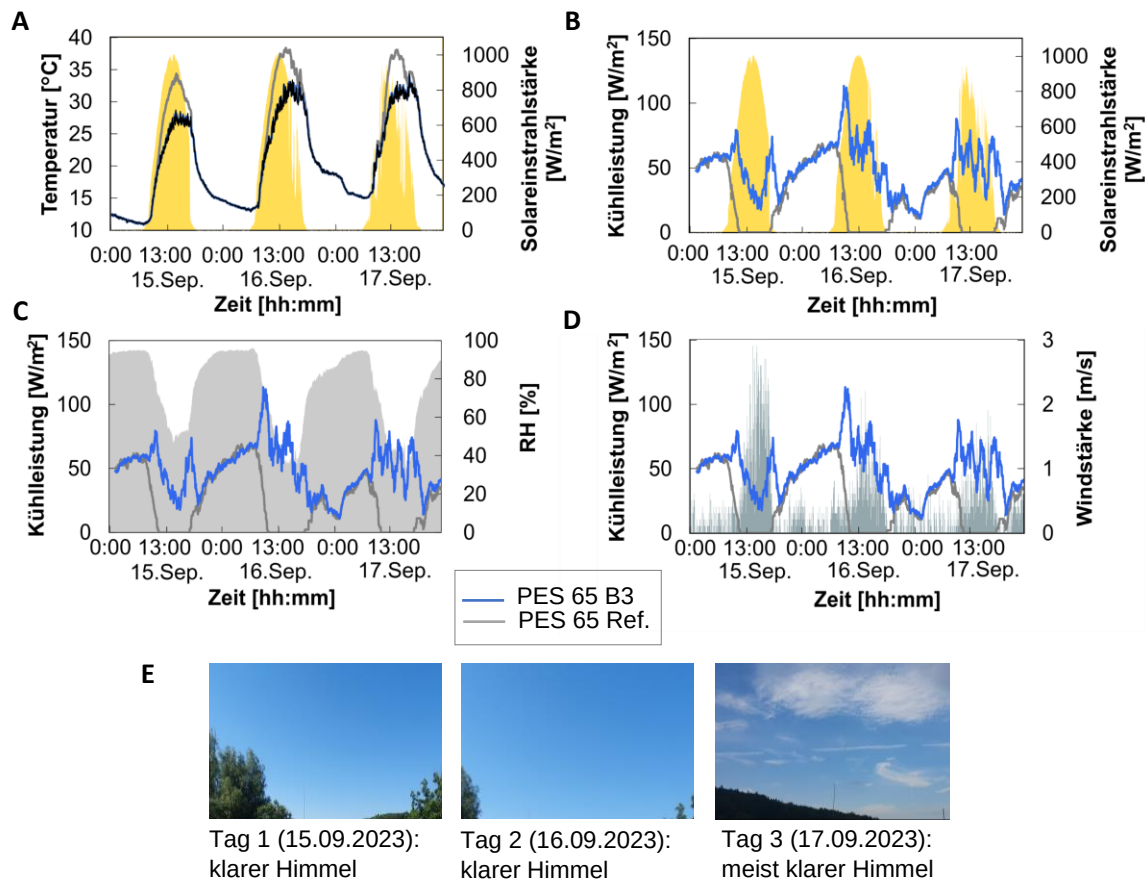


Abb. 6.6 Messergebnis der Kühlleistung und Temperatur der beschichteten und unbeschichteten Probe über einen Zeitraum von drei Tagen.

Probe: PES 65 g/m² unbeschichtet, PES 65 g/m² beschichtet mit der Beschichtungsrezeptur B3 (Gesamtbeschichtungsdicke: 250±20 µm). Darstellung der Wärmezufuhr (P_{heater}) durch den gleitenden Durchschnitt Periode 50 bei 2419 Datenpunkten. Gemessen mit dem Prüfmodul mit integriertem Heizplattensystem vom 15.09.2023–17.09.2023 auf dem Dach der DITF. **A** Temperaturverlauf der Proben ($T_s = T_{amb}$); **B** Kühlleistung der Proben ($P_{heater} = P_{cooler}$) gegenüber der Solarstrahlung (max. Tag 1: 1007,5 W/m²; Tag 2: 1012,9 W/m²; Tag 3: 942,8 W/m²); **C** Kühlleistung gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit (ØTag 1: 67,1 %; Tag 2: 60,1 %; Tag 3: 59,5 %); **D** Kühlleistung gegenüber der durchschnittlichen Windstärke (ØTag 1: 2,1 m/s; Tag 2: 1,4 m/s; Tag 3: 1,1 m/s); **E** Wolkendichte am ersten, zweiten und dritten Tag der Messung

Die Abb. 6.6A zeigt, dass die Temperatur der beschichteten Probe B3 T_s für die gesamte Zeit der Messung der der Umgebungstemperatur T_{amb} entspricht. Die unbeschichtete Probe heizt sich am Tag dagegen deutlich auf, sodass die Probentemperatur T_s die Umgebungstemperatur T_{amb} übersteigt. In der Abb. 6.6B wird die gemessene Kühlleistung für die beschichtete Probe PES 65 mit dem Beschichtungssystem B3 und die unbeschichtete Referenzprobe PES 65 über den Zeitraum von drei Tagen bei klarem und meist klarem Himmel dargestellt.

Die Kühlleistung der beschichteten Probe B3 liegt tagsüber über einen Zeitraum von drei Tagen im positiven Bereich, was darauf hindeutet, dass eine aktive Kühlung auch unter Sonneneinstrahlung stattfindet.

Unregelmäßigkeiten speziell am Tag hängen mit dem erhöhten Einfluss von Wind zusammen (vgl. Abb. 6.6D). Am Tag drei ist die Wolkendichte insgesamt höher, sodass es zu stärkeren Schwankungen in der Messung kommt.

Die Kühlleistung beträgt für Tag 1 zwischen 12–15 Uhr $26 \pm 10 \text{ W/m}^2$ für die beschichtete Probe.

In der Nacht gleichen sich beide Kühlleistungsverläufe trotz unterschiedlicher Gesamtemissionswerte im mittleren Infrarot an. Das kann unter anderem durch die hohen Werte für die relative Luftfeuchtigkeit in der Nacht begründet werden, die bei $>85 \%$ (vgl. Abb. 6.6C) liegen sowie einem hohen PW-Wert. Damit nimmt die Transparenz der Atmosphäre ab und ein Wärmeaustausch mit dem kalten Weltraum wird limitiert.

Eine weitere Messung wurde in Kombination mit der Methode (II) und (III) durchgeführt, sodass die Kühlleistung als auch maximale Kühltemperatur parallel vermessen werden können. Für beide Prüfmodule wurde die gleiche Probe mit der kühlenden Beschichtung (PES 65 B3) eingesetzt. Für das Prüfmodul 1 wird die Heizleistung gleich Null gesetzt ($P_{\text{heater}} = 0$), sodass die Temperatur in Bezug auf die Umgebungstemperatur dargestellt wird (Methode (II)). Für den Prüfaufbau 2 wird dagegen die Temperatur der Probe dynamisch an das Niveau der Umgebungstemperatur angepasst ($T_{\text{amb}} = T_s$), sodass die Kühlleistung anhand der initiierten Heizleistung gemessen wird (Methode (III)).

Folgende Abb. 6.7 stellt das Ergebnis für die Messung am Tag dar.

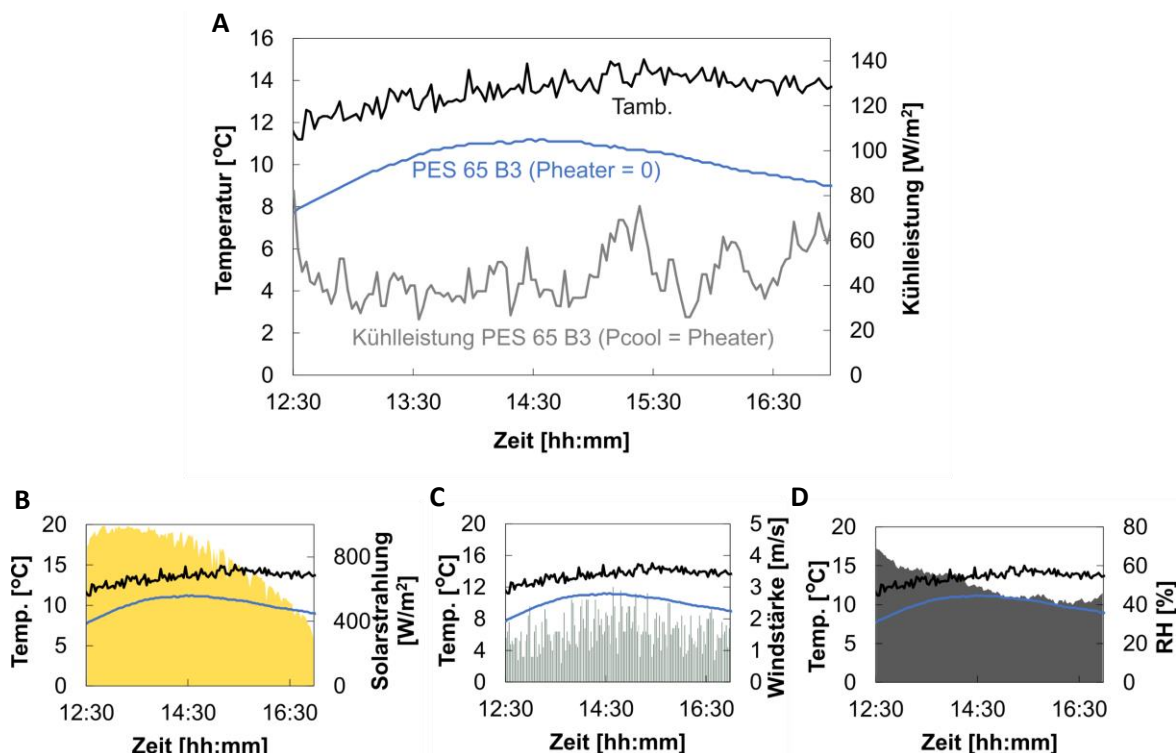


Abb. 6.7 Messergebnis auf Grundlage der Messmethode II und III der beschichteten Probe am Tag.

Probe: PES 65 g/m² beschichtet mit der Beschichtungsrezeptur B3 (Gesamtbeschichtungsdicke: 250 ± 20 µm). Darstellung der Wärmezufuhr (P_{heater}) durch den gleitenden Durchschnitt Periode 10 bei 150 Datenpunkten. Gemessen mit dem Prüfmodul mit integriertem Heizplattensystem am 16.10.2023 auf dem Dach der DITF. **A** Temperaturverlauf und Kühlleistung der Proben; **B** Temperatur der Probe und T_{amb.} gegenüber der Solarstrahlung (max. 995,5 W/m²); **C** Temperatur der Probe und T_{amb.} gegenüber der durchschnittlichen Windstärke (Ø 1,7 m/s); **D** Temperatur der Probe und T_{amb.} gegenüber der relativen Luftfeuchtigkeit (Ø 50,0 %).

Die Proben temperatur des Prüfmodul 1 weist zur Mittagszeit (12–15 Uhr) eine durchschnittliche Temperaturreduktion von 3,3 °C unterhalb der Umgebungstemperatur auf. Damit zusammenhängend wird eine Kühlleistung zur selben Zeit von 43 ± 10 W/m² (gemittelt zwischen 12–15 Uhr) gemessen.

Der Grund für die deutliche Temperaturreduktion für diesen Tag der Messung liegt in der beschriebenen Abhängigkeit der Strahlungskühlung von Umgebungsbedingungen und Wetterverhältnissen. Die Solareinstrahlstärke übersteigt auch zu Mittagszeiten nicht 1000 W/m², gleichzeitig wird eine deutlich niedrigere Umgebungstemperatur mit maximal 15 °C am Tag gemessen.

Die Temperatur- und Kühlleistungsmessungen unter realen Wetterbedingungen bestätigen und verifizieren die Funktionsweise des Beschichtungssystems B3. Es wird eine substratunabhängige positive Kühlleistung gemessen, wobei eine durchschnittliche Temperaturreduktion am Tag von 2 °C unterhalb der Umgebungstemperatur, selbst an sehr

warmen Tagen mit einer Solareinstrahlung von bis zu 1000 W/m^2 , erzielt wird. Damit kann die Hypothese (2) bestätigt werden.

Gleichzeitig wird die Abhängigkeit der Messung der Kühlleistung und Temperatur von Umgebungsbedingungen und sich ändernden Wetterverhältnissen deutlich. Daher ist es wichtig, die Kühlleistung und Temperaturverläufe zu simulieren und berechnen zu können, sodass Materialien theoretisch und unter identischen Bedingungen verglichen werden können.

7. Numerisches Vorhersagemodell zur Berechnung der Kühlleistung für verschiedene Wetterszenarien

Zur weiteren Verifizierung der Kühlleistung und Überprüfung der Hypothese (3) wird das bestehende Vorhersagemodell zur Berechnung der Kühlleistung für verschiedene Wetterszenarien an textiltechnische Anforderungen angepasst und validiert.

Das Verständnis des tatsächlichen Beitrags der Beschichtung zur Strahlungskühlung ist entscheidend für eine genaue Beurteilung der Kühlleistung und des Mehrwertes des Beschichtungsauftrages. Um den Vorteil von Kühlmaterialien zu bewerten, werden häufig Vergleiche mit unbeschichteten oder unbehandelten Textilmaterialien, durchgeführt.

Bei einem Vergleich mit einem teiltransparenten Textil kann der Untergrund zur Messung der Kühlleistung die Kühlkapazität beeinflussen, sodass dies eine zu berücksichtigende Variable darstellt. Wie in 2.2.4 bereits beschrieben, wird diese Variable in der Berechnung und Simulation der Kühlleistung oft vernachlässigt, was zu unterschiedlichen Messergebnissen führen kann.

Um den Effekt der Kühlbeschichtung gegenüber einem unbeschichteten teiltransparenten Textil herauszustellen und damit verschiedene Anwendungsszenarien berücksichtigen zu können, wird ein Ansatz entwickelt, der den Einfluss des nicht transparenten Substrats bzw. Untergrundmaterials berücksichtigt. Durch die Anpassung verschiedener Umgebungsbedingungen kann die Kühlleistung für verschiedene Untergrundmaterialien und Wetterszenarien basierend auf den gemessenen Spektraldaten simuliert werden.

Das Berechnungsmodell wird anschließend anhand der gemessenen Ergebnisse aus Kapitel 6.2 verifiziert.

7.1 Vergleichbarkeit von halbtransparenten und nicht transparenten textilen Proben auf einem opaken Hintergrund

Unter Berücksichtigung der Mehrfachreflexion und -absorption des Sonnenlichts durch das halbtransparente Textil und die nichttransparente Basisschicht ergibt sich das Reflexionsvermögen des kombinierten Textil-Basis-Systems basierend auf [60] durch:

$$r = r_{surf} + r_{base} \frac{\tau_{surf}^2}{1 - r_{base} r_{surf}} \quad (7.1)$$

Dabei stehen r_{surf} für die solare Reflexion, τ_{surf} für die solare Transmission und die α_{surf} für die Absorption eines teiltransparenten Textils.

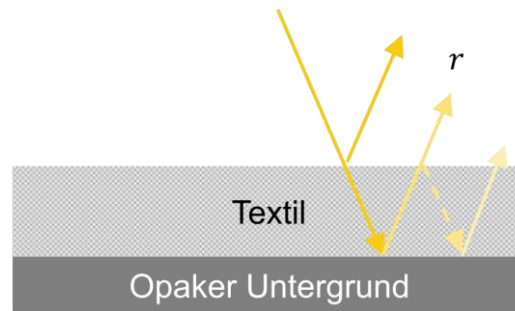


Abb. 7.1 Schematische Darstellung der Reflexion von Solarstrahlung durch ein halbttransparentes Textil auf einem opaken Untergrund (Textil-Basis System).

Der solare Reflexionsgrad und das Absorptionsvermögen des opaken Untergrundmaterials werden mit r_{base} und α_{base} bezeichnet. Die solare Reflexion für ein teiltransparentes Textil mit einem opaken Untergrund wird in der Abb. 7.1 schematisch wiedergegeben. Dieselbe Regel kann verwendet werden, um den spektralen Emissionsgrad des kombinierten Systems aus Textil und Untergrund zu ermitteln.

Der durchschnittliche solare Reflexionsgrad über das Sonnenspektrum (0,3–2,5 μm) wird daraufhin berechnet durch:

$$\tilde{r}_{solar} = \frac{\int_{\lambda_{0.30 \mu\text{m}}}^{\lambda_{2.5 \mu\text{m}}} r(\lambda) I_{solar}(\lambda) d\lambda}{\int_{0.30 \mu\text{m}}^{2.5 \mu\text{m}} I_{solar}(\lambda) d\lambda} \quad (7.2)$$

wobei λ die elektromagnetische Wellenlänge und $I_{solar}(\lambda)$ die spektrale Solarstärke wiedergeben.

Basierend auf den gemessenen Spektraldaten des Textils und eines nichttransparenten Untergrundes können die einzelnen Anteile und die kombinierte solare Reflexion und MIR-Emission berechnet werden. Auf diese Weise lässt sich feststellen, wie viel jedes Material zur Strahlungskühlung beiträgt und ob das Untergrundmaterial einen signifikanten Einfluss auf die Strahlungskühlleistung nimmt.

Zur Simulation des Effektes wurden verschiedene Untergrundmaterialien spektralanalytisch vermessen. Hierzu wurden eine schwarze Folie, eine Aluminiumfolie und eine Aluminiummetallplatte, die der von eingesetzten Heizplatten in beschriebenen Prüfaufbauten entspricht, betrachtet. Aluminium weist im solaren Bereich hohe Reflexionswerte und im mittleren Infrarot geringe Emissionswerte auf. Eine schwarze Folie zeigt ein umgekehrtes Verhalten, im solaren Bereich eine hohe Absorption und geringe Reflexion und im mittleren Infrarot eine hohe breitbandige Emissionsleistung. Damit wird der Einfluss der Untergrundmaterialien an zwei Extremen simuliert und dargestellt. Darüber hinaus kann basierend auf den Messdaten der Aluminiummetallplatte

die Temperatur berechnet und mit der tatsächlichen Temperaturkurve aus 6.2 verglichen werden.

Um zu überprüfen, ob der berechnete Spektralverlauf der kombinierten Systeme von Hintergrund- und Probenmaterial mit den gemessenen Werten konsistent ist, wurden die Materialien auch kombiniert spektralanalytisch untersucht. Dafür wurde das textile Material direkt auf das Untergrundmaterial gelegt und zusammen im solaren und mittleren Infrarot vermessen.

Der berechnete Spektralverlauf des Textil-Basis Systems stimmt mit dem gemessenen Spektralverlauf im solaren und mittleren Infrarot überein. Die Differenz beträgt für den solaren Bereich zwischen 0,3–2,5 μm durchschnittlich 1,4 % (vgl. Anhang Abb. 9.9).

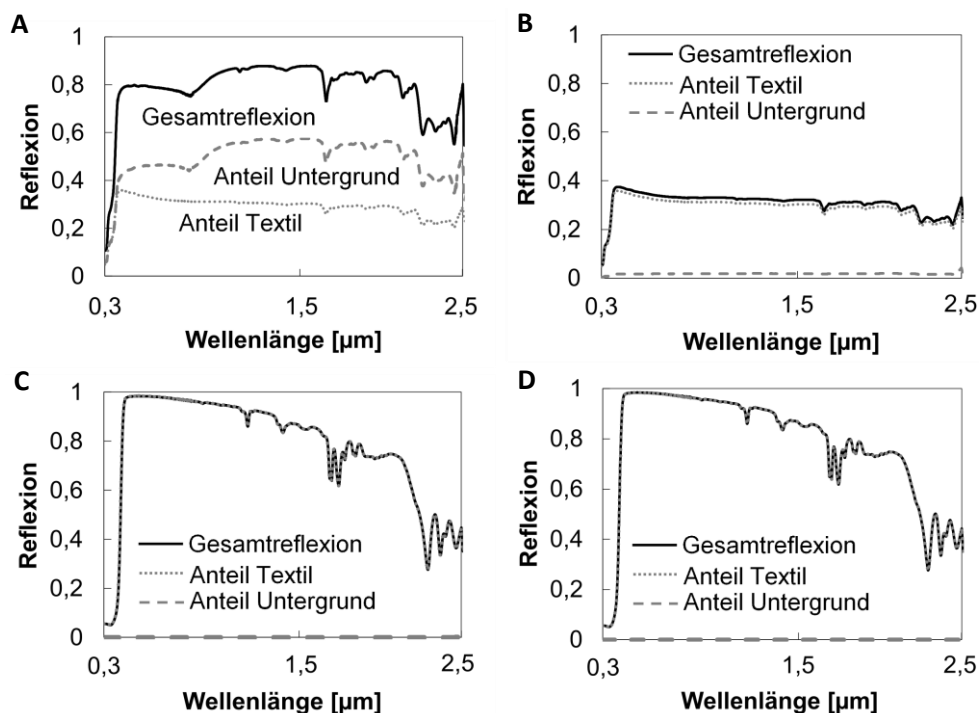


Abb. 7.2 Einfluss der Materialkomponenten auf die Gesamtreflexion des kombinierten Systems.

A Solare Reflexion: unbeschichtetes Textil mit Aluminiumfolie als Untergrundmaterial; **B** Solare Reflexion: unbeschichtetes Textil mit einer schwarzen Folie als Untergrundmaterial; **C** Solare Reflexion: beschichtetes Textil (Beschichtungssystem B3) mit Aluminiumfolie als Untergrundmaterial; **D** Solare Reflexion: beschichtetes Textil (Beschichtungssystem B3) mit einer schwarzen Folie als Untergrundmaterial.

In der Abb. 7.2 wird der Einfluss verschiedener Untergrundmaterialien im Zusammenhang mit einem teiltransparenten und opaken Textil am Beispiel von PES 65 für den solaren Bereich aufgezeigt.

Das Reflexionsverhalten der halbtransparenten Referenzproben zeigt deutlich den Einfluss des jeweiligen Hintergrundmaterials auf. Ein Hintergrundmaterial, das im Sonnenspektrum

stark reflektiert, wie z. B. eine Aluminiumfolie, kann die solare Gesamtreflexion positiv beeinflussen (vgl. Abb. 7.2A). Andererseits führt ein dunkleres Hintergrundmaterial, wie eine schwarze Folie, zur Absorption des gesamten durchgelassenen Lichts. Die Gesamtreflexionsleistung entspricht damit der solaren Reflexion der halbtransparenten Probe (vgl. Abb. 7.2B).

Wie stark ein Untergrundmaterial Einfluss auf den Gesamtspektralverlauf nehmen kann, ist abhängig von der Transmission im jeweiligen Wellenlängenbereich.

Im Falle eines opaken Materials, wie der Textilprobe appliziert mit der nicht transparenten Kühlbeschichtung B3, ist in beiden Fällen kein Einfluss des Hintergrundmaterials auf das spektrale Profil zu erkennen (vgl. Abb. 7.2C, D). Die Leistung der Beschichtung bleibt unabhängig vom spezifischen Hintergrundmaterial und gewährleistet somit eine gleichbleibende Kühlleistung in verschiedenen Anwendungsszenarien.

Der gleiche Effekt lässt sich bei der Gesamtemissionsleistung im mittleren Infrarot erkennen. Auch hier wird der Emissionsverlauf der beschichteten Probe durch ein Hintergrundmaterial nicht beeinflusst (vgl. Abb. 7.3C, D).

Die Beschichtung (B3) weist, wie aus Kapitel 5.4 zu entnehmen ist, im gesamten Spektralverlauf sehr geringe Transmissionswerte auf, sodass ein darunter liegendes Material, ob Textil oder Untergrundmaterial, keinen signifikanten Einfluss auf den Spektralverlauf und damit die Kühlleistung nimmt.

Für textile Proben, die auch im mittleren Infrarotbereich transparent oder teiltransparent sind, wie die Polyesterprobe mit einem Flächengewicht von 65 g/m^2 , wird der Gesamtemissionsverlauf durch das darunter liegende Untergrundmaterial stark beeinflusst. Eine schwarze Probe kann die Gesamtemission im mittleren Infrarot zwischen $8\text{--}13 \mu\text{m}$ von durchschnittlich 0,68 auf 0,93 deutlich maximieren (vgl. Abb. 7.3B).

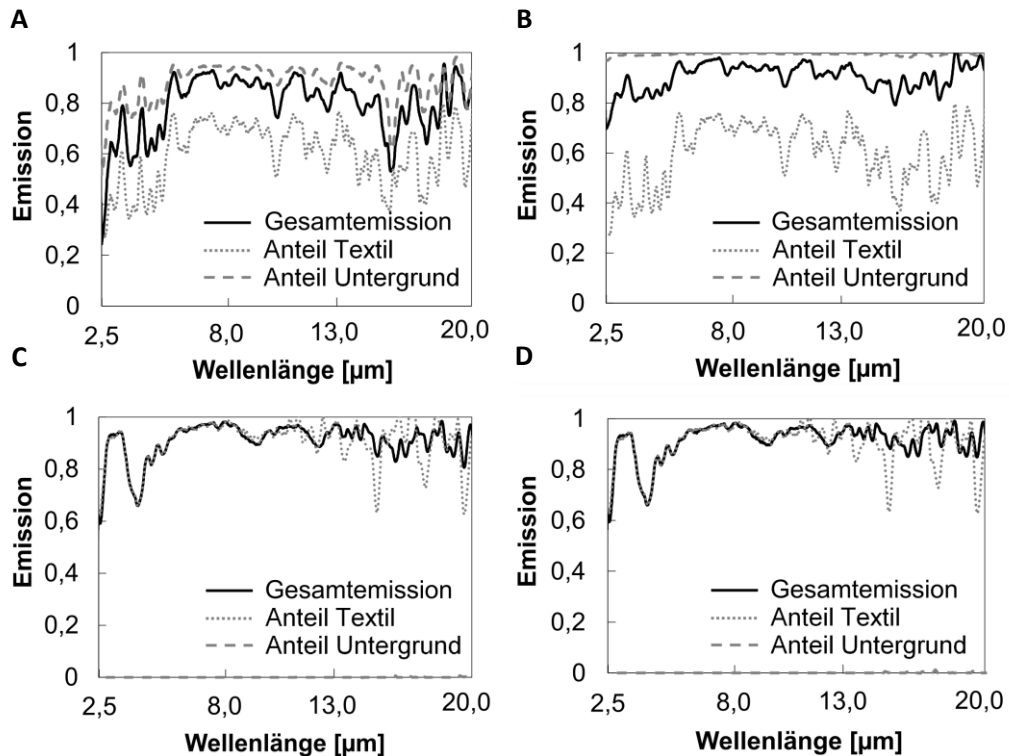


Abb. 7.3 Einfluss der Materialkomponenten auf die Gesamtemission des kombinierten Systems.

A Emission/Absorption im MIR: unbeschichtetes Textil mit Aluminiumfolie als Untergrundmaterial; **B** Emission/Absorption im MIR: unbeschichtetes Textil mit einer schwarzen Folie als Untergrundmaterial; **C** Emission/Absorption im MIR: beschichtetes Textil (Beschichtungssystem B3) mit Aluminiumfolie als Untergrundmaterial; **D** Emission/Absorption im MIR: beschichtetes Textil (Beschichtungssystem B3) mit einer schwarzen Folie als Untergrundmaterial.

Auch mit einer Aluminiumfolie wird in Kombination mit dem Textil eine durchschnittliche Steigerung der Gesamtemissionsleistung zwischen 8–13 μm von 0,18 erzielt (vgl. Abb. 7.3A). Und das obwohl die Emissionsleistung der reinen Aluminiumfolie im mittleren Infrarot nahe Null liegt. Dies kann dadurch begründet werden, dass die Transmission im mittleren Infrarot durch das kombinierte System deutlich vermindert wird. Gleichzeitig wird die Reflexion der Aluminiumfolie durch das darüber liegende Textil im mittleren Infrarotbereich reduziert, sodass insgesamt die Emissionsleistung leicht zunimmt.

Auf Grundlage der Berechnung und den Spektraldaten einzelner Materialien können verschiedene Proben und Kombinationen überprüft werden und der jeweilige Einfluss auf den spektralen Verlauf und somit auf die Kühlleistung oder den Temperaturverlauf herausgestellt und simuliert werden. Ein vereinfachter Vergleich und die Analyse der Kühlung unter gleichen Voraussetzungen und unter Berücksichtigung verschiedener Untergrundmaterialien werden damit ermöglicht.

7.2 Vorhersagemodell für die Berechnung der Kühlleistung textiler Proben

Basierend auf in der Literatur beschriebenen Berechnungsmodellen (vgl. Abschnitt 2.3) und der Spektraldaten der Materialien kann die Kühlleistung in W/m^2 und die Kühlwirkung im Temperaturgradienten verglichen und simuliert werden.

Die Strahlungskühlleistung des Textils ($q_{surf,net\ cooling}$) wird, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, durch die Funktion der emittierten langwelligen Strahlung ($q_{surf \rightarrow atm,rad}$), der absorbierten langwelligen atmosphärischen Gegenstrahlung ($q_{atm \rightarrow surf,rad}$), der absorbierten Solarstrahlung ($q_{solar \rightarrow surf}$) und der konvektiven Wärmegewinne/-verluste zwischen textiler Oberfläche und Umgebung ($q_{conv,amb \rightarrow surf}$) berechnet:

$$q_{surf,net\ cooling} = q_{surf \rightarrow atm,rad} - q_{atm \rightarrow surf,rad} - q_{solar \rightarrow surf} - q_{conv,amb \rightarrow surf} \quad (7.3)$$

Unter Verwendung des vereinfachten aber genaueren Modellierungsansatzes von [50, 115] wird jede Komponente gegeben durch:

$$q_{surf \rightarrow atm,rad} = \pi \int_{2.5}^{\infty} \varepsilon_{surf} I_{BB}(\lambda, T_{surf}) d\lambda \quad (7.4)$$

$$\begin{aligned} q_{atm \rightarrow surf,rad} &= (1 - f_{cloud}) q_{atm \rightarrow surf,rad,clear} + f_{cloud} q_{atm \rightarrow surf,rad,cloud} \\ &= (1 - f_{cloud}) \pi \int_{2.5}^{\infty} \varepsilon_{surf} \varepsilon_{atm} I_{BB}(\lambda, T_{amb}, PW) d\lambda + f_{cloud} \pi \int_{2.5}^{\infty} \varepsilon_{surf} I_{BB}(\lambda, T_{cloud}) d\lambda \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$q_{solar \rightarrow surf} = (1 - \tilde{r}_{solar}) q_{sun} \quad (7.6)$$

$$q_{conv,amb \rightarrow surf} = h_{surf \rightarrow amb} (T_{surf} - T_{amb}) \quad (7.7)$$

ε_{surf} und ε_{atm} beschreiben den Emissionsgrad des kombinierten Textil-Basis Systems bei einem Zenitwinkel von 0° und den Emissionsgrad der Atmosphäre an einem klaren Himmel. q_{sun} beschreibt die eintreffende Solarstrahlung in W/m^2 , T_{surf} die Temperatur der textilen Probe und T_{amb} die messbare Umgebungstemperatur auf Bodenniveau. f_{cloud} beschreibt die Wolkendichte und T_{cloud} die Wolkentemperatur. PW beschreibt das atmosphärische niederschlagbare Wasser in mm und I_{BB} die spektrale Schwarzkörperstrahlung (vgl. Formel (2.1)). $h_{surf \rightarrow amb}$ steht für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten der Luft.

Generell ist zu empfehlen Messungen bei klarem Himmel auszuführen, um den Einfluss von Wolken zu minimieren. Um die Kühlleistung aber auch bei unterschiedlicher Wolkendichte simulieren zu können, wird diese Variable mitberücksichtigt.

Basierend auf Aili *et al.* [50] und Martin *et al.* [130] wird bei vollständiger Wolkenbedeckung davon ausgegangen, dass die Wolken nahe der Erdoberfläche liegen und ähnlich wie ein schwarzer Körper wirken. Bei einem teilweise mit Wolken bedecktem Himmel liegt die Wolkenbasis höher und ist damit kälter, sodass die Wolkendichte f_{cloud} exponentiell proportional zur Wolkentemperatur T_{cloud} ist. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Emission der Wolken nahe 1 liegt, da der Hauptbestandteil Eiskristalle sind, die eine Emission nahe 1 auch zwischen 8–13 μm aufweisen [131], sodass die Wolkentemperatur wie folgt berechnet werden kann. [50, 130]

$$T_{cloud} = \ln(f_{cloud}) \Delta T_o + T_{amb} \quad (7.8)$$

ΔT_o beschreibt die Referenztemperaturdifferenz und wird mit 10°C angegeben [50].

PW wird basierend auf der Clausius-Clapeyron-Gleichung und Ruckstuhl *et al.* [132] gegeben durch:

$$PW \approx a \cdot RH \frac{3800 \exp\left(\frac{17.63T_{amb}}{T_{amb} + 243.04}\right)}{p_{amb}} - b \quad (7.9)$$

Wobei RH and p_{amb} jeweils die messbare relative Luftfeuchtigkeit und den Umgebungsdruck nahe der Oberfläche beschreiben.

a und b sind Konstanten die nur sehr geringfügig vom geographischen Standort oder der Höhe beeinflusst werden. Eingesetzt werden für $a = 2,1$ und $b = 0,8$. [114, 132]

Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf den Wärmeübergangskoeffizient $h_{surf \rightarrow amb}$ kann für flache Oberflächen durch eine lineare Korrelation quantifiziert werden:

$$h_{surf \rightarrow amb} = c \cdot V_{wind} + d \quad (7.10)$$

c and d sind Konstanten und V_{wind} beschreibt die Windgeschwindigkeit. Der Wärmeübergangskoeffizient wurde bereits experimentell untersucht und kann für den Einsatz ohne Konvektionsschild durch $h_{surf \rightarrow amb} = 0,53 V_{wind} + 5,7$ und mit Konvektionsschild $0 V_{wind} + 5,7$ wiedergegeben werden. [61]

Durch einstellbare Parameter der Solareinstrahlstärke in W/m^2 , der Umgebungstemperatur, der Temperatur des Textils, der Windgeschwindigkeit in m/s , der relativen Luftfeuchtigkeit in % und des Umgebungsdrucks kann die Kühlleistung für spezifische Wetterszenarien ermittelt werden.

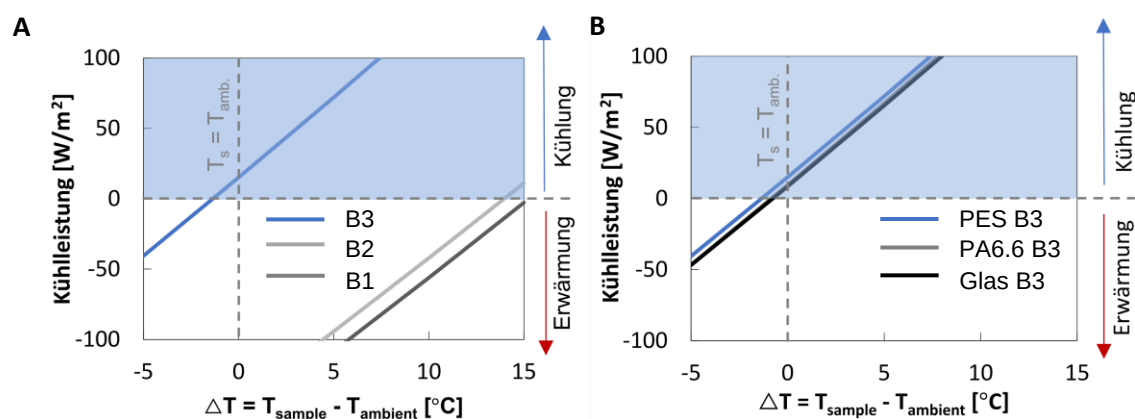


Abb. 7.4 Berechnete Kühlleistung in Abhängigkeit des Beschichtungsaufbaus und Substratmaterial.

Umgebungsparameter: $T_{\text{amb.}}$: 25 °C; Windstärke: 0 m/s; relative Luftfeuchtigkeit: 40 %; Solareinstrahlstärke: 700 W/m². **A** Beschichtungssystem B1–B3 auf PES 65 g/m², Kühlleistung für $\Delta T = 0$: B1: -159,59 W/m², B2: -145,59 W/m², B3: 14,93 W/m²; **B** Beschichtungssystem B3 auf unterschiedlichen textilen Substratmaterialien, Kühlleistung für $\Delta T = 0$: PES: 14,93 W/m², PA6.6: 9,4 W/m², Glas: 8,45 W/m².

Zum Vergleich der verschiedenen Beschichtungssysteme und zur Untersuchung der substratunabhängigen Kühlleistung werden durchschnittliche Umgebungsparameter eingestellt, die der Abbildungsbeschreibung entnommen werden können (vgl. Abb. 7.4).

In der Abb. 7.4 wird der Temperaturgradient zwischen der Proben- und Umgebungstemperatur gegenüber der Kühlleistung dargestellt. Eine positive Kühlleistung bedeutet, dass das Material kühlt und sich unter den eingestellten Parametern nicht erwärmt.

Bei einem thermodynamischen Gleichgewicht zwischen Umgebungstemperatur und Probentemperatur ($\Delta T = 0$) wird eine positive Kühlleistung für das Beschichtungssystem B3 von 14,93 W/m² erzielt. Dagegen findet eine Erwärmung bei den Beschichtungstypen B1 und B2 statt. Dieses Ergebnis ist kohärent mit den gemessenen Werten aus Kapitel 5 sowie mit den gemessenen Temperaturverläufen aus Kapitel 6. Die Abb. 7.4B zeigt die Kühlleistung für das Beschichtungssystem B3 für drei verschiedene textile Substrate auf. Die Werte der Kühlleistung liegen für alle Substrate sehr eng beieinander, sodass keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit des textilen Substrates festgestellt werden können.

Auf Grundlage der berechneten Spektralverläufe des Textil-Basis Systems kann die Kühlleistung der teiltransparenten unbeschichteten Referenzmaterialien für verschiedene Untergrundmaterialien wiedergegeben werden.

Das Hintergrundmaterial hat einen erheblichen Einfluss auf die Kühlleistung.

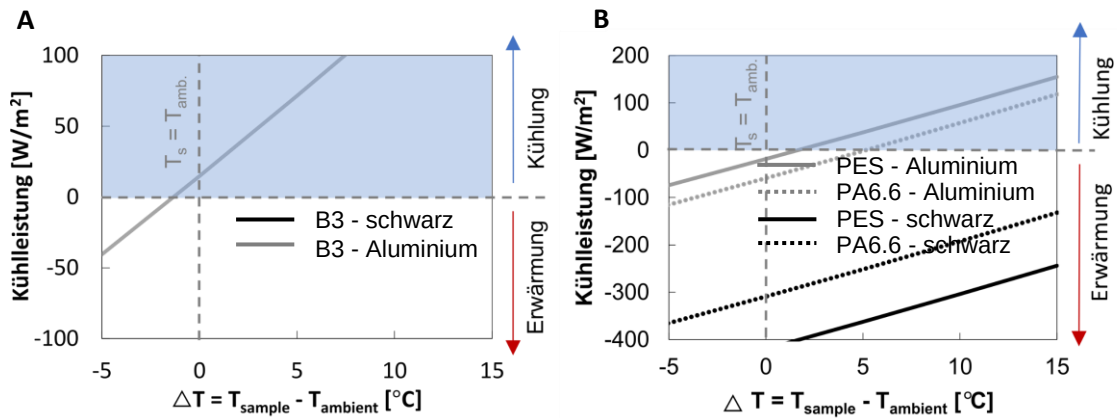


Abb. 7.5 Berechnete Kühlleistung in Abhängigkeit des Untergrundmaterials. Umgebungsparameter: $T_{amb.}$: 25 °C; Windstärke: 0 m/s; relative Luftfeuchtigkeit: 40 %; Solareinstrahlstärke: 700 W/m².

A Unbeschichtete teiltransparente Textilprobe mit verschiedenen Hintergrundmaterialien: Aluminium- und schwarze Folie, Kühlleistung für $\Delta T = 0$: PES - Al: -18,75 W/m², PES - schwarz: -419,62 W/m², PA6.6 - Al: -59,19 W/m², PA6.6 - schwarz: -309,26 W/m²;
B Beschichtete opake Textilprobe (B3) mit verschiedenen Hintergrundmaterialien: Aluminium- und schwarze Folie, Kühlleistung für $\Delta T = 0$: PES - Al: 14,69 W/m², PES - schwarz: 14,93 W/m².

In Abhängigkeit des Untergrundmaterials wird eine deutlich höhere oder geringere Kühlleistung bei $\Delta T = 0$ berechnet. Es gilt, je transparenter das Material im gesamten Wellenlängenbereich, desto größer der Einfluss des darunter liegenden Materials. Dagegen wird für das Beschichtungssystem B3 kein Unterschied in Abhängigkeit des Untergrundmaterials erzielt.

Um die berechneten Ergebnisse mit den gemessenen Temperaturverläufen der Prüfmodule vergleichen zu können wird die Berechnung entsprechend an das thermische Modell des Prüfmoduls angepasst.

7.3 Anpassung und Verifizierung des Vorhersagemodells

Zur Messung von realen Temperaturprofilen und Kühlleistungen wird ein System mit einer beheizten Metallplatte eingesetzt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Diese Metallplatte wird als Hintergrundmaterial für die Berechnung von Temperatur und Kühlleistung angenommen.

Die Berechnung wird an das Prüfmodul mit dem Textil-Basis System bestehend aus einer Heizplatte (Aluminiummetallplatte) als Untergrundmaterial bzw. Basisschicht und der textilen Probe adaptiert. Die schematische Darstellung kann der folgenden Abb. 7.6 entnommen werden.

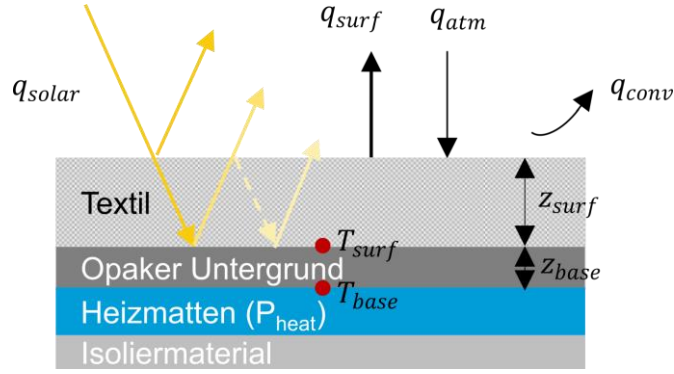


Abb. 7.6 Schematische Darstellung des thermischen Modells in Anlehnung an den Aufbau des Prüfmoduls mit Heizplattensystem.

Einzelne Parameter, wie die Dicke des Textils z_{surf} , die Temperatur des Textils T_{surf} , die Dicke der Basisschicht z_{base} und die Temperatur der Basisschicht T_{base} werden definiert und in dem Modell entsprechend angepasst.

Die Komponenten der Netto-Kühlleistung der textilen Oberfläche ($q_{surf,net\ cooling}$) sind entsprechend, wie in 7.2 beschrieben, die nach außen emittierte langwellige Strahlung der textilen Oberfläche ($q_{surf \rightarrow atm,rad}$), die nach unten gerichtete atmosphärische Gegenstrahlung, die von der textilen Oberfläche absorbiert wird ($q_{atm \rightarrow surf,rad}$), die eintreffende solare Strahlung, die von der textilen Oberfläche absorbiert wird ($q_{solar \rightarrow surf}$) sowie der konvektive Wärmeverlust zwischen Textil und Umgebung ($q_{conv,amb \rightarrow surf}$).

Die Heizleistung wird durch P_{heater} gekennzeichnet.

Während des dynamischen Kühlprozesses mit dem Heizplattensystem wird Wärme von der Wärmequelle an die Metallplatte (Basisschicht), das Textil und anschließend an den Himmel übertragen. Die Wärmeübertragung zwischen der Metallplatte und dem Textil im Laufe der Zeit kann durch folgende Gleichungen beschrieben werden.

$$A_{base}P_{heat} - A_{base}(T_{base} - T_{surf})\frac{k_{surf}}{z_{base}} = m_{base}c_{p,base}\frac{dT_{base}}{dt} \quad (7.11)$$

$$A_{base}(T_{base} - T_{surf})\frac{k_{surf}}{z_{base}} - A_{surf}q_{surf,net\ cooling} = m_{surf}c_{p,surf}\frac{dT_{surf}}{dt} \quad (7.12)$$

Dabei beschreibt A_{base} und A_{surf} jeweils die Oberfläche der Basisschicht bzw. des Textils in cm^2 , die den Angaben beschrieben in Abschnitt 6.1 entsprechen. Die Wärmeleitfähigkeit des Textils, k_{surf} , wird, wie in Abschnitt 4.3.4 beschrieben, gemessen und für die Berechnung verwendet. m_{base} und m_{surf} gibt die Masse der Basisschicht bzw. des Textils an. Die spezifische Wärmeleitfähigkeit $c_{p,base}$ und $c_{p,surf}$ wird in $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ angegeben.

Für einen direkten Vergleich der Temperaturverläufe werden die Daten der Wetterstation zur Definition der Umgebungsbedingungen verwendet. Durch die Implementierung eines Loop-Systems kann nicht nur die Temperatur für ein einziges Umgebungsszenario simuliert, sondern der Temperaturverlauf über mehrere Stunden oder Tage wiedergegeben werden.

Die Modell-Eingangsparameter umfassen, wie beschrieben, Design-Parameter des Prüfmoduls: gemessene Parameter, wie die Solarstärke (W/m^2), die Windgeschwindigkeit (m/s), die relative Luftfeuchtigkeit (%), der Umgebungsdruck (mbar), die Umgebungs- und Proben temperatur ($^{\circ}\text{C}$) und die spektral Daten der Proben - und berechnete Parameter, wie die Emission der Atmosphäre und Daten die auf Angaben aus der Literatur basieren, wie der h_{air} Koeffizient. Die Genauigkeit des thermischen Modells hängt damit von der Genauigkeit der einzelnen Eingangsparameter ab.

Wie in 7.2 beschrieben, beeinflusst der Wasserdampfgehalt (PW) die effektive atmosphärische Emission deutlich, speziell zwischen $8\text{--}13\text{ }\mu\text{m}$, was dem atmosphärischen Fenster entspricht. PW kann durch die Wetterstation nicht direkt gemessen werden, wird aber, wie in 7.2 beschrieben, über die Funktion und die Messdaten der relativen Luftfeuchtigkeit und der Umgebungstemperatur berechnet. In Zentraleuropa werden im Vergleich zu anderen, vor allem südlichen Regionen, geringere PW -Werte gemessen [133]. Um eine möglichst genaue Näherung von PW zu erzielen, wird daher der minimale Wert für PW über den Messzeitraum bestimmt und eine Unsicherheit von ± 5 berücksichtigt.

Die Berechnungen ergeben eine leichte Überschätzung der solaren Absorption um bis zu 2 %. Dies könnte auf Diskrepanzen bei den Zenitwinkelmessungen zurückzuführen sein. Spektrale Daten werden unter einem bestimmten Winkel gemessen. Eine möglicherweise höhere solare Reflexion bei anderen Winkeln kann insgesamt zu einem niedrigeren solaren Absorptionsniveau führen. Die solare Absorption wird mit -0,02 angepasst.

Der Wärmeübergangskoeffizient, $h_{surf \rightarrow amb}$, wird aus berechneten und simulierten Werten in der Literatur abgeleitet [61, 114]. Aufgrund von Variationen in den Versuchsaufbauten und Vereinfachungen wird eine Unsicherheit von ± 5 angegeben.

Unter Berücksichtigung der einzelnen Einflussfaktoren können die Temperaturverläufe und die Kühlleistungswerte in Abhängigkeit spezifischer Wetterdaten simuliert und angegeben werden. Die Eingangsparameter werden, wie beschrieben, gemessen, berechnet oder angegeben verwendet.

In der folgenden Abb. 7.7 wird die gemessene gegenüber der simulierten Kühlwirkung in Celsius und Kühlleistung in W/m^2 für die beschichtete Probe für einen Zeitraum von fünf

Stunden wiedergegeben. Die gemessenen Werte entsprechen der in Abschnitt 6.2.2 beschriebenen Abb. 6.7.

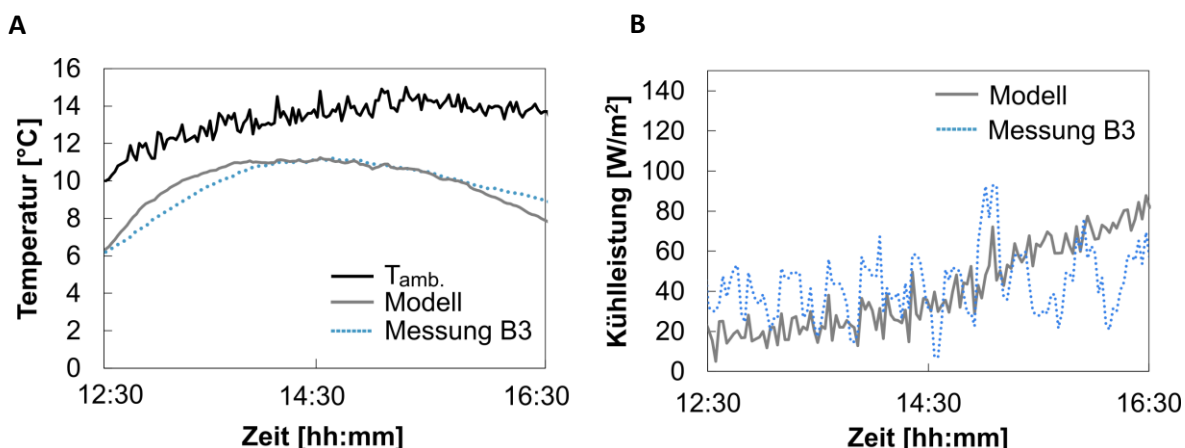


Abb. 7.7 Vergleich der simulierten und gemessenen Kühlleistung in °C und W/m² für das beschichtete Textil (B3).

Probe: PES 65 g/m² beschichtet mit der Beschichtungsrezeptur B3 (Gesamtbeschichtungsdicke: 250±20 µm). Messdaten vom 16.10.2023. PW: 7,33-5 mm; solare Absorption: 0,12-0,02; h_{surf→amb}: 5,7+1 W/m²·K. **A** Temperaturverlauf im Vergleich zur gemessenen Umgebungstemperatur; **B** Kühlleistung in W/m² im Vergleich zur gemessenen Kühlleistung. Darstellung der Wärmezufuhr (P_{heater}) durch den gleitenden Durchschnitt Periode 6 bei 150 Datenpunkten.

Die simulierte Temperaturkurve verläuft auf Höhe der gemessenen Temperaturkurve für das beschichtete Textil (PES 65 B3) mit einer maximalen Abweichung über den Prüfzeitraum von 1,2 K.

Die Kühlleistung verläuft annähernd der gemessenen Leistung. Die geschätzte durchschnittliche Kühlleistung basierend auf dem Modell beträgt über den Messzeitraum 44±10 W/m², was gut mit dem gemessenen Durchschnittswert von 46±10 W/m² übereinstimmt.

Damit kann das Modell für die Vorhersage der Kühlleistung textiler Proben genutzt und zur Simulation unter unterschiedlichen Wetterszenarien eingesetzt werden.

8. Zusammenfassung

Der bisherigen Materialentwicklung der Strahlungskühlung für textiltechnische Anwendungen mangelt es an einer Lösung, die eine einfache Applikation, flexible Anwendbarkeit, kostengünstige Herstellung und gleichzeitig einen ausreichenden Kühleffekt vereint, was die Grundlage für eine hochskalierbare industrielle Umsetzung darstellt.

In dieser Arbeit wurde ein Beschichtungssystem entwickelt, das diese Aspekte berücksichtigt und dessen Funktionsweise erstmals auf verschiedenen textilen Trägern zur Realisierung einer substratunabhängigen Applikation untersucht und charakterisiert wurde. Diese substratunabhängige Applikation wurde am Beispiel von drei Gewebetypen untersucht, die primär im Membran- und Zeltbau eingesetzt werden.

Zur Realisierung und Vereinfachung des Beschichtungsprozesses wurden niedrig emittierende Partikel in das Beschichtungssystem integriert. Dadurch konnte der Spektralverlauf im gesamten Wellenlängenbereich (zwischen 0,3–20 μm) positiv beeinflusst und eine Substratunabhängigkeit erzielt werden. Der Nutzen von niedrig emittierenden Partikeln am Beispiel von Aluminium wurde zunächst in einem einlagigen Beschichtungsaufbau (B1) untersucht und einzelne Beschichtungsvariablen eingestellt.

In Kombination mit solarreflektierenden Weißpartikeln in einem einlagigen Beschichtungssystem (B2) konnte die Reflexionsleistung speziell im sichtbaren Bereich erhöht werden.

Ein idealisierter, breitbandiger, substratunabhängiger Spektralverlauf hinsichtlich einer hohen solaren Reflexion und einer hohen Emission im mittleren Infrarot wurde mit dem zweilagigen Beschichtungssystem (B3) erzielt.

Der Entwicklungsprozess der drei verschiedenen Beschichtungssysteme, die in dieser Arbeit an drei verschiedenen textilen Substraten untersucht wurden, wird schematisch in der folgenden Abb. 8.1 zusammengefasst.

Beschichtungsaufbau (B): Optimierung des Spektralverlaufes und damit einer positiven Kühlleistung.

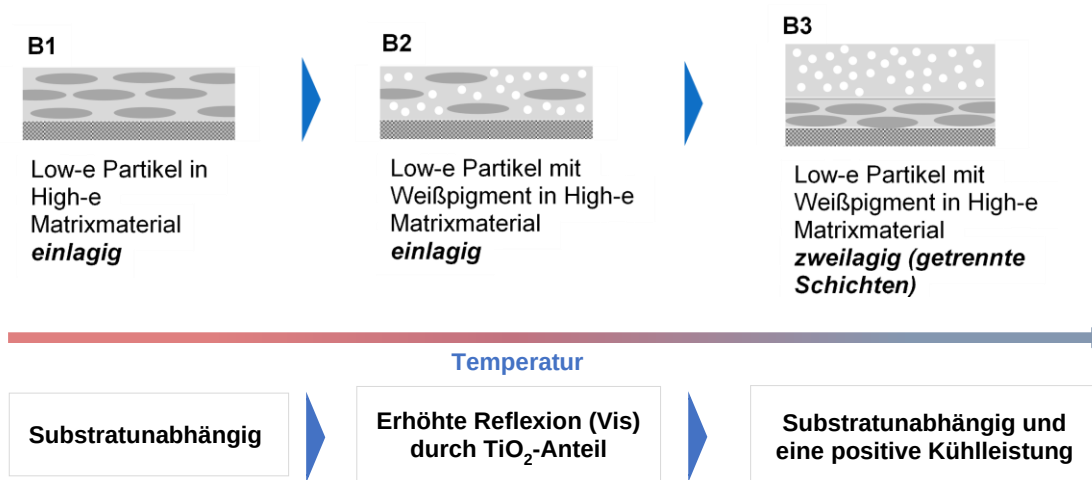


Abb. 8.1 Schematische Darstellung der Beschichtungstypen B1–B3 mit dem Ergebnis einer substratunabhängigen positiven Kühlleistung für das Beschichtungssystem B3.

Die Ergebnisse des Beschichtungssystems (B3) zeigten eine effektive Kühlleistung und Temperaturreduktion unter den getesteten Bedingungen, die den Anforderungen an eine substratunabhängige kühlende Beschichtung für technische Textilien gerecht wird.

Im Vergleich zum beschriebenen Stand der Technik zu substratunabhängigen Systemen, zeigt die Arbeit erstmals einen Beschichtungsansatz der auf verschiedenen textilen Gewebetypen appliziert werden kann und eine identische Kühlwirkung erzeugt. Die Integration der niedrig emittierenden Partikel, am Beispiel von plättchenförmigen Silverdollar Aluminiumpartikeln, führt zu einer Reduzierung der Transmission für alle drei untersuchten Substrate im gesamten Spektralbereich (0,3–20 μm) auf <1 %, sodass der textile Einfluss auf die Gesamtkühlleistung minimiert werden kann. Das Textil weist damit eine untergeordnete Rolle im Hinblick auf die Strahlungskühlleistung auf. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die berechnete Kühlleistung des Beschichtungssystems B3 appliziert auf das textile Substrat keine Abhängigkeit durch ein zusätzliches Untergrundmaterial aufweist. Die Untersuchungen wurden beispielhaft anhand drei ausgewählter textiler Gewebetypen durchgeführt, die sich in der Faserart und im Flächengewicht unterscheiden und für textiltechnische Anwendungen im Membran- und Zeltbau handelsüblich eingesetzt werden. Die weitere Verifizierung der Beschichtungsapplikation bezüglich ihres kühlenden Effekts wurde durch die Messung von realen Temperaturverläufen und Kühlleistungen mittels eines speziell konzipierten Prüfmoduls in Freilandversuchen realisiert. Die Messungen bestätigten die spektralen Untersuchungen und verifizieren die Kühlung des Beschichtungssystems B3 unter Umgebungstemperatur auch bei starker Solareinstrahlung am Tag. Die

substratunabhängige Kühlung konnte somit erstmalig für diese Gewebetypen nachgewiesen werden.

Hypothese (1), dass durch die Integration von niedrig emittierenden Partikeln eine Substratunabhängigkeit erzielt werden kann, und Hypothese (2), dass eine substratunabhängige Kühlleistung mit maximal zwei funktionellen Schichten und einer Gesamtschichtdicke von weniger als 300 μm erreicht wird, gelten im Rahmen der untersuchten technischen Textilien als bestätigt.

Die Integration von Metallpartikeln wie Aluminium bietet insbesondere bei Schichtdicken $<300 \mu\text{m}$ einen entscheidenden Vorteil hinsichtlich einer Substratunabhängigkeit und erhöhter NIR-Reflexion im Vergleich zu den im Stand der Forschung beschriebenen Farbsystemen oder mehrschichtigen Textilsystemen. Durch die geringe Schichtdicke ($<300 \mu\text{m}$) wird eine weitere Steigerung der Kühlleistung begrenzt, allerdings werden selbstkühlende Textilien leichter und ermöglichen eine einfache dreidimensionale Formgebung, was insbesondere für textiltechnische Anwendungsszenarien wie den Membran- oder Zeltbau von großem Vorteil ist und die wirtschaftliche Umsetzbarkeit damit vereinfacht.

Zur Klärung der Hypothese (3) wurde ein Vorhersagemodell zur Berechnung der Kühlleistung an textiltechnische Anforderungen angepasst. Durch die Berücksichtigung und Vermessung verschiedener Untergrundmaterialien bietet die Simulation die Möglichkeit, transparente, teiltransparente und opake Textilien unter identischen Bedingungen zu vergleichen und den Einfluss der Transparenzwerte der Textilien auf die Kühlleistung genau zu charakterisieren. Das Vorhersagemodell wurde erfolgreich anhand der gemessenen Temperaturverläufe der Materialien verifiziert und erlaubt es, basierend auf den gemessenen Spektralverläufen, Aussagen zur Kühlleistung für verschiedene textile Materialien, Textil-Basis-Systeme und Wetterbedingungen zu treffen. Dadurch konnte die Hypothese (3) nach der durch ein Vorhersagemodell angepasst an textiltechnische Anforderungen die Kühlleistung und Temperaturreduktion wetterabhängig berechnet und simuliert werden kann, ebenfalls bestätigt werden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit stellen einen wichtigen Schritt zur Klärung der Substratunabhängigkeit dar, bleiben jedoch aufgrund der Ähnlichkeiten der untersuchten Textilien in Bezug auf die Oberflächenstruktur begrenzt. Unterschiede in der Materialoberfläche durch stark strukturierte oder offenporige Gewebetypen, die den Kühlprozess beeinflussen können, werden anhand der hier untersuchten Gewebetypen nicht beleuchtet und untersucht. Eine Ausweitung der Untersuchung auf unterschiedliche Oberflächenstrukturen und weitere textile Flächengebilde, wie Vliesstoffe oder Gestricke, wären sinnvoll, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weitere textile Einsatzfelder zu

prüfen und die Substratunabhängigkeit im Kontext breiterer textiler Anwendungen weiter zu verifizieren.

Gerade im Hinblick auf großflächige Textilien, die zum Himmel ausgerichtet sind – etwa bei textilen Dachkonstruktionen oder im Zeltbau – bieten die Ergebnisse auf den untersuchten Gewebetypen eine erste Grundlage, um gleichbleibende Kühlergebnisse durch den Beschichtungsauftrag zu ermöglichen. Kühlsysteme werden durch den Klimawandel wachsende Bedeutung gewinnen und ihr Gesamtenergieverbrauch entsprechend ansteigen. Hier bietet das entwickelte Beschichtungssystem auf Basis der Strahlungskühlung enorme energetische Vorteile.

9. Ausblick

Die Forschung zur energiefreien Kühlung basierend auf dem Prinzip der Strahlungskühlung hat sich in den letzten 10 Jahren von komplexen photonischen Strukturen zu skalierbaren Lösungen weiterentwickelt. Gerade im textilen Bereich liegt der Schwerpunkt allerdings noch immer auf der Optimierung des Körperwärmemanagements durch Anpassung der Textilien in der Bekleidung. Die Forschung zur Strahlungskühlung hat gezeigt, dass gerade für großflächige Materialien, die eine freie Sichtachse zum Himmel aufweisen, der Kühleffekt am größten ist. Textiltechnische Verschattungssysteme oder Membrandächer bieten einen optimalen Einsatzbereich für diese Form der energiefreien Kühlung. Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass durch die Optimierung der Beschichtungsparameter und die gezielte Kombination von optisch wirksamen Materialien eine einfache, ressourcenschonende, kostengünstige und adaptive Beschichtung entwickelt werden kann, die auch tagsüber einen positiven Kühleffekt bewirkt.

Bisher wurde das Beschichtungssystem im Labormaßstab getestet und charakterisiert. Infolgedessen stellt die industrielle Hochskalierung einen nächsten logischen Schritt dar. Dafür muss die Beschichtungsrezeptur gegebenenfalls neu eingestellt und an neue Prozessparameter angepasst werden, sodass auch ein großflächiger Auftrag auf verschiedene textile Substrate erfolgen kann. Das Matrixmaterial Silikon bietet zahlreiche Vorteile wie UV-Beständigkeit, Wetterstabilität und Hydrophobie. Jedoch kann Silikon vereinzelt eine staubanziehende Oberfläche aufweisen, was weiterer Untersuchungen bedarf. Die Beschichtung bietet insbesondere für etablierte textile Systeme wie Membran- und Verschattungselemente an Gebäudeflächen energetische Vorteile und ermöglicht im Vergleich zu herkömmlichen Kühlmethoden, wie natürlicher Vegetation oder Ventilation, eine deutliche Kostenreduzierung. Für eine erfolgreiche Umsetzung müssen jedoch Eigenschaften der Lagerung, des Transportes, des Aufbaus und der Anwendung, wie ausfahrbare Elemente, Faltbarkeit und Formbarkeit des Textils in Verbindung mit der Beschichtungsapplikation getestet und geprüft werden.

Ein weiterer Aspekt, der in dieser Arbeit nicht im Fokus stand, jedoch in Zukunft geklärt werden muss, betrifft die Recyclingfähigkeit der Beschichtungskomponenten und die möglicherweise erforderliche Anpassung der Materialien durch den Einsatz wiederverwendbarer Materialien.

Die steigenden Temperaturen werden uns in den nächsten Jahren weiterhin begleiten, wodurch Lösungsansätze für energiefreies und damit nachhaltiges Kühlen einen immer wichtigeren Stellenwert einnehmen werden. Angesichts der bereits jetzt steigenden Energiekosten ist es von enormer Bedeutung, dass Lösungen nicht nur im Labor untersucht,

sondern auch industriell umgesetzt und angewendet werden. Die in dieser Arbeit entwickelte Beschichtungsrezeptur bietet dafür die Basis und einen Lösungsansatz.

Formelverzeichnis

(2.1)	Planck'sche Schwarzkörperstrahlung	8
(2.2)	Stefan-Boltzmann Gesetz	8
(2.3)	durchschnittliche Emission eines Objekts.....	8
(2.4)	Kirchhoff'sches Strahlungsgesetz: Absorption=Emission	9
(2.5)	Nettostrahlungsbilanzierung.....	10
(2.6)	Von einer bodennahen Oberfläche absorbierte atmosphärische Gegenstrahlung ..	12
(2.7)	Von einer Materialoberfläche absorbierte Solarstrahlung	14
(2.8)	Abstrahlung einer Materialoberfläche.....	15
(2.9)	Wärmeverlust durch Konvektion und Konduktion	17
(4.1)	kumulierte Partikelgrößenverteilung.....	46
(4.1)	Wärmeleitfähigkeit.....	50
(5.1)	Solarer Absorptionsgrad über das Sonnenspektrum	89
(7.1)	Reflexionsvermögen des Textil-Basis Systems	107
(7.2)	Solarer Reflexionsgrad über das Sonnenspektrum.....	108
(7.3)	Strahlungsbilanzierung des Textil-Basis Systems.....	112
(7.4)	Emittierte Strahlung des Textil-Basis Systems	112
(7.5)	Absorbierte Atmosphärische Gegenstrahlung des Textil-Basis Systems	112
(7.6)	Absorbierte Solarstrahlung des Textil-Basis Systems	112
(7.7)	Konvektive Wärmegewinne/verluste	112
(7.8)	Wolkentemperatur	113
(7.9)	Ausfällbares Niederschlagwasser in der Atmosphäre (PW)	113
(7.10)	Wärmeübergangskoeffizient	113
(7.11)	Wärmeübertragung zwischen Metallplatte und Textil (1)	116
(7.12)	Wärmeübertragung zwischen Metallplatte und Textil (2)	116

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematische Darstellung der Strahlungsströme an der terrestrischen Oberfläche	10
Abb. 2.2	Atmosphärisches Transmissionsspektrum und Schwarzkörperstrahlung eines Objekts bei $T = 300\text{ K}$	12
Abb. 2.3	Solare spektrale Bestrahlungsstärke bei Luftmasse AM 1.5 (Direkt)	14
Abb. 2.4	Schematische Darstellung idealer Spektralverläufe eines Strahlungskühlmaterials in Abhängigkeit der Wellenlänge	15
Abb. 2.5	Schematische Darstellung der Unterschiede zwischen teiltransparenten und opaken Materialien	17
Abb. 2.6	Schematische Darstellung der Prüfaufbauten und Messmethoden zur Ermittlung der Kühlleistung in $^{\circ}\text{C}$ und W/m^2	18
Abb. 2.7	Anzahl der Publikationen veröffentlicht zwischen 1970–2023	19
Abb. 2.8	Materialbeispiele und verschiedene strukturelle Aufbauten und Beschichtungen in der textilen Strahlungskühlung	24
Abb. 2.9	Materialsysteme für eine textilsubstratunabhängige Strahlungskühlung	27
Abb. 2.10	Schematische Darstellung der Materialentwicklung im Bereich Strahlungskühlung	32
Abb. 2.11	Schematische Zusammenfassung bisheriger substratunabhängiger Systeme und Beschichtungsaufbauten mit Partikelintegration	34
Abb. 3.1	Schematisches Modell zur Charakterisierung der Beschichtungsrezeptur.	36
Abb. 4.1	Fertig gerührte Beschichtungspaste	44
Abb. 4.2	Schematische Darstellung der Pastenherstellung.	45
Abb. 4.3	Vergleich der vernetzten Beschichtung auf einem textilen Substrat bei unterschiedlichen Vernetzungszeiten und Temperaturen	46
Abb. 4.4	Schematische Darstellung des Beschichtungsauftrags	46
Abb. 4.5	Schematische Darstellung der Messeinrichtung für die Spektralmessung mit dem Lambda 1050+ (Perkin Elmer, U.S.A.)	48
Abb. 4.6	Schematische Darstellung der Messeinrichtung für die Spektralmessung mit dem Vertex 80 (Bruker, U.S.A.)	49
Abb. 4.7	Vorrichtung zur visuellen Untersuchung des Beschichtungsquerschnitts und Messung der Schichtdicke	50
Abb. 5.1	Übersichtschart zur Entwicklung der Beschichtungssysteme mit dem Ziel einer substratunabhängigen und positiven Kühlleistung	53
Abb. 5.2	Spektralverlauf der in dieser Arbeit verwendeten textilen Substratmaterialien	55
Abb. 5.3	Emissionsspektrum der Silikonfilme des Type LR6250F und Type LUMISIL im mittleren Infrarot	56

Abb. 5.4	Transmissionsverlauf der Silikonfilme des Type LR6250F und Type LUMISIL.....	56
Abb. 5.5	Emissionsspektrum des Polyestergewebes in Abhängigkeit des Beschichtungsauftrages mit Silikon.....	58
Abb. 5.6	Spektrale und optische Analyse des Partikeleinfluss BaSO ₄ gegenüber TiO ₂ in Silikon auf einem textilen Substrat	59
Abb. 5.7	Partikelgrößenverteilung und solarer Reflexionsverlauf der TiO ₂ Type	60
Abb. 5.8	Kumulative und relative Verteilungskurve der Partikelgröße für TiO ₂	61
Abb. 5.9	Solarer Reflexionsverlauf der TiO ₂ Type TS6300 und R900 im Vergleich zum gemischten System.....	62
Abb. 5.10	TiO ₂ -Konzentrationsabhängige solare Reflexion im Vergleich von Glas 163 g/m ² und Polyester 65 g/m ²	63
Abb. 5.11	Inhibierende Wirkung bei Zugabe von Ireflex 5000 white in LR.....	64
Abb. 5.12	Orientierung und Einfluss der Partikelgröße der Aluminiumpartikel.....	66
Abb. 5.13	Konzentrationsabhängige Partikelverteilung von Al 212 am Beispiel von PES 65 g/m ²	67
Abb. 5.14	Schematische Darstellung der Partikelorientierung plättchenförmiger Metallpartikel	68
Abb. 5.15	Orientierung der Aluminiumpartikel mit und ohne Grundstrich	69
Abb. 5.16	Konzentrationsabhängige solare Transmission am Beispiel Glas 163 g/m ² . Grenzwert definiert nach Nagshine und Saboonchi [60]	71
Abb. 5.17	Aluminiumkonzentrationsabhängige solare Reflexion im Vergleich von Glas 163 g/m ² und Polyester 65 g/m ²	72
Abb. 5.18	Beeinflussung des Spektralverlaufes im MIR in Abhängigkeit der Partikelart und -konzentration am Beispiel von PES 65 g/m ²	73
Abb. 5.19	optische und spektrale Untersuchung zur Schichtdickenvariation mit 20 Ma-% Aluminiumpartikeln am Beispiel von PES 65 g/m ²	75
Abb. 5.20	Prozentuale Abweichung und solare Reflexion in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration in direkter Kombination mit 30 Ma-% TiO ₂ im einlagigen System	77
Abb. 5.21	Querschnittsaufnahme der Beschichtung B2	79
Abb. 5.22	Spektralunterschiede zwischen Polyester und Polyamid im MIR in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration im Beschichtungssystem B2.....	79
Abb. 5.23	Solare Reflexion und Transmission von B2 in Abhängigkeit der Schichtdicke	80
Abb. 5.24	Spektrale Untersuchung der Aluminiumkonzentration in B3	82
Abb. 5.25	Einfluss der Al-Partikel auf den Spektralverlauf im Vergleich zur Referenzbeschichtung	83
Abb. 5.26	Querschnitt des Beschichtungssystems B3 mit unterschiedlicher Beschichtungsdicke der zweiten strahlungsfunktionellen Schicht.....	84

Abb. 5.27	Einfluss der Schichtdickenerhöhung der zweiten strahlungsfunktionellen Schicht in B3.....	84
Abb. 5.28	Optische und spektrale Untersuchung der Substratunabhängigkeit für das Beschichtungssystem B3.....	86
Abb. 5.29	Spektrale Untersuchung und Nutzen der Al-Schicht gegenüber dem Referenzsystem ohne Al-Partikel (B3)	87
Abb. 5.30	Solare Reflexion und Emission im MIR der Beschichtungssysteme B1–B3	89
Abb. 6.1	Aufbau der Prüfmodule zum Vergleich verschiedener Materialien und Messung der Temperaturunterschiede	92
Abb. 6.2	Aufbau der Prüfmodule zur Messung der Kühlleistung in Celsius und W/m^2 mittels einem rückgekoppelten Heizplattensystem.	94
Abb. 6.3	Temperaturmessung der Beschichtungssysteme B1–B3 unter realen Wetterbedingungen über einen Zeitraum von >24h.....	97
Abb. 6.4	Temperaturmessung des Beschichtungssystems B3 auf unterschiedlichen Substraten unter realen Wetterbedingungen über einen Zeitraum von >24h.....	99
Abb. 6.5	Messergebnis der Kühlleistung (P_{cool}) des beschichteten und unbeschichteten Textils über 24 Stunden.....	100
Abb. 6.6	Messergebnis der Kühlleistung und Temperatur der beschichteten und unbeschichteten Probe über einen Zeitraum von drei Tagen	102
Abb. 6.7	Messergebnis auf Grundlage der Messmethode II und III der beschichteten Probe am Tag	104
Abb. 7.1	Schematische Darstellung der Reflexion von Solarstrahlung durch ein halbtransparentes Textil auf einem opaken Untergrund	108
Abb. 7.2	Einfluss der Materialkomponenten auf die Gesamtreflexion des kombinierten Systems.....	109
Abb. 7.3	Einfluss der Materialkomponenten auf die Gesamtemission des kombinierten Systems.....	111
Abb. 7.4	Berechnete Kühlleistung in Abhängigkeit des Beschichtungsaufbaus und Substratmaterial.....	114
Abb. 7.5	Berechnete Kühlleistung in Abhängigkeit des Untergrundmaterials.	115
Abb. 7.6	Schematische Darstellung des thermischen Modells in Anlehnung an den Aufbau des Prüfmoduls mit Heizplattensystem.	116
Abb. 7.7	Vergleich der simulierten und gemessenen Kühlleistung in $^{\circ}C$ und W/m^2 für das beschichtete Textil (B3).....	118
Abb. 8.1	Schematische Darstellung der Beschichtungstypen B1–B3 mit dem Ergebnis einer substratunabhängigen positiven Kühlleistung für das Beschichtungssystem B3.....	120
Abb. 9.1	Spektralvermessung der reinen Substratgewebe ohne Beschichtungsapplikation.....	XXXVII
Abb. 9.2	Vergleich zwischen Aluminium und IReflex 5000 white	XXXVIII

Abb. 9.3	Kumulative Verteilungskurve der Aluminiumpulver Type	XXXVIII
Abb. 9.4	Viskosität in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration.	XXXIX
Abb. 9.5	Orientierung der Aluminiumpartikel mit und ohne Grundstrich	XL
Abb. 9.6	Reflexionserhöhung durch Maximierung der TiO ₂ -Konzentration und Transmissionsreduzierung durch die Aluminiumkonzentration im gemischten einlagigen Beschichtungsauftrag.....	XLI
Abb. 9.7	Vergleichbarkeit der Prüfmodule. Temperaturmessung über einen Zeitraum von 40 Minuten bei identischen Probeneinsatz (Aluminiumfolie)	XLII
Abb. 9.8	Kühlleistung (P_{cool}) des beschichteten und unbeschichteten Textils.....	XLIII
Abb. 9.9	Vergleich der berechneten und gemessenen Spektralverläufe der kombinierten Systems am Beispiel von PES 65 g/m ² auf einer Aluminiummetallplatte.....	XLIII

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Definitionen und Wellenlängenbereiche der Strahlungsbegriffe	10
Tab. 2.2	Übersicht der Materialentwicklungen in der Strahlungskühlung unterteilt in vier Kategorien	23
Tab. 4.1	Physikalische Eigenschaften der eingesetzten textilen Materialien	39
Tab. 4.2	Matrixsysteme	41
Tab. 4.3	Partikelsysteme Low-e	42
Tab. 4.4	Partikelsysteme Weißpigment	43
Tab. 5.1	Durchschnittliche solare Reflexionsleistung in Abhängigkeit der Partikelgrößenverteilung der Aluminium Type	65
Tab. 5.2	Solare Transmission in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration ..	70
Tab. 5.3	Solare Reflexion und Emission zwischen 8–13 μm in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration	74
Tab. 5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse des Beschichtungsauftrages B3 im Vergleich zu Referenzsystemen	88
Tab. 5.5	Zusammenfassung der spektralen Eigenschaften und Substratunterschiede in der solaren Reflexion und MIR-Emission.....	88
Tab. 6.1	Eingesetzte Messinstrumente und deren Abweichung.....	93
Tab. 9.1	Kostenanalyse der Materialien für das Beschichtungssystem B3.....	XLI

Quellen- und Literaturverzeichnis

- [1] „AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 - Summary for Policymakers“, Bd. IPCC AR6 SYR, S. 1–36, März 2023.
- [2] *WMO statement on the state of the global climate in 2021 = State of the Global Climate 2021*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization (WMO), 2022, ISBN: 978-92-63-11290-3.
- [3] European Environment Agency. und S. Quefelec, „Cooling buildings sustainably in Europe: exploring the links between climate change mitigation and adaptation, and their social impacts.“, 2022, doi: 10.2800/36810.
- [4] K. Kiesel, M. Vuckovic, und A. Mahdavi, „The extent and implications of the urban heat island phenomenon in Central European region“, *Contributions to Building Physics*, Bd. Proceedings of the 2nd Central European Symposium on Building Physics 9-11 September 2013, Vienna, Austria, S. 415–419.
- [5] Y. Dong, M. Coleman, und S. A. Miller, „Greenhouse Gas Emissions from Air Conditioning and Refrigeration Service Expansion in Developing Countries“, Bd. Annual Review of Environment and Resources, Juni 2021, doi: 10.1146/annurev-environ-012220-034103.
- [6] M. Santamouris, „Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change“, *Energy and Buildings*, Bd. 207, S. 109482, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109482.
- [7] T. Schütze, „Klimagerechtes Bauen“, in *2023 Bauphysik Kalender*, 1. Aufl., N. A. Fouad, Hrsg., Wiley, 2023, S. 43–82. doi: 10.1002/9783433611289.ch3.
- [8] D. K. Bhamare, M. K. Rathod, und J. Banerjee, „Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art“, *Energy and Buildings*, Bd. 198, S. 467–490, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.06.023.
- [9] Afroditi Synnefa und Mattheos Santamouris, „White or Light Colored Cool Roofing Materials“, in *Advances in the Development of Cool Materials for the Built Environment*, Bd. February 19, 2013, S. 33.
- [10] „Low-e Beschichtungen: Softe Hülle für hohe Ansprüche“, TAG Composites & Carpets GmbH, Bayrisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Projektbericht - Förderkennzeichen 0327382A Projektinfor 05/09.
- [11] D. LeoG. Samuel, S. ShivaM. Nagendra, und M. P. Maiya, „Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: A review“, *Building and Environment*, Bd. 66, S. 54–64, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.buildenv.2013.04.016.
- [12] D. Zhao u. a., „Radiative sky cooling: Fundamental principles, materials, and applications“, Bd. 6, Nr. 2, S. 021306-1-021306–40, Jan. 2019, doi: 10.1063/1.5087281.

- [13] W. Li und S. Fan, „Radiative Cooling: Harvesting the Coldness of the Universe“, *Optics & Photonics News*, Bd. 30, Nr. 11, S. 32, Nov. 2019, doi: 10.1364/OPN.30.11.000032.
- [14] A. P. Raman, M. A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli, und S. Fan, „Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight“, *Nature*, Bd. 515, Nr. 7528, S. 540–544, 2014, doi: 10.1038/nature13883.
- [15] P. Deetjen und E.-J. Speckmann, Hrsg., *Physiologie*, 3. Auflage. München: Urban und Fischer, 1999.
- [16] Z. Cheng u. a., „Efficient radiative cooling coating with biomimetic human skin wrinkle structure“, *Nano Energy*, Bd. 89, S. 106377, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2021.106377.
- [17] L. Cai u. a., „Spectrally Selective Nanocomposite Textile for Outdoor Personal Cooling“, *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.)*, Bd. 30, Nr. 35, S. e1802152, 2018, doi: 10.1002/adma.201802152.
- [18] P.-C. Hsu u. a., „A dual-mode textile for human body radiative heating and cooling“, *Science Advances*, Bd. 3, Nr. 11, S. e1700895, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700895.
- [19] M. I. Iqbal u. a., „Radiative Cooling Nanofabric for Personal Thermal Management“, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Bd. 14, Nr. 20, S. 23577–23587, Mai 2022, doi: 10.1021/acsami.2c05115.
- [20] C. Chen u. a., „Scalable wet-spinning of wearable chitosan-silica textile for all-day radiative cooling“, *Chemical Engineering Journal*, Bd. 475, S. 146307, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.cej.2023.146307.
- [21] S. Zhong u. a., „Self-cleaning and spectrally selective coating on cotton fabric for passive daytime radiative cooling“, *Chemical Engineering Journal*, Bd. 407, S. 127104, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.cej.2020.127104.
- [22] Y.-N. Song, Y. Li, D.-X. Yan, J. Lei, und Z.-M. Li, „Novel passive cooling composite textile for both outdoor and indoor personal thermal management“, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 130, S. 105738, 2020, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105738.
- [23] Z. Yang und J. Zhang, „Bioinspired Radiative Cooling Structure with Randomly Stacked Fibers for Efficient All-Day Passive Cooling“, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Bd. 13, Nr. 36, S. 43387–43395, Sep. 2021, doi: 10.1021/acsami.1c12267.
- [24] Y. Song, M. Lei, J. Lei, und Z. Li, „A Scalable Hybrid Fiber and Its Textile with Pore and Wrinkle Structures for Passive Personal Cooling“, *Advanced Materials Technologies*, Bd. 5, Nr. 7, S. 2000287, 2020, doi: 10.1002/admt.202000287.
- [25] Y. Tian u. a., „Superhydrophobic and Recyclable Cellulose-Fiber-Based Composites for High-Efficiency Passive Radiative Cooling“, *ACS Appl. Mater.*

- Interfaces*, Bd. 13, Nr. 19, S. 22521–22530, Jan. 2021, doi: 10.1021/acsami.1c04046.
- [26] T. Li u. a., „A radiative cooling structural material“, *Science*, Bd. 364, Nr. 6442, S. 760–763, Jan. 2019, doi: 10.1126/science.aau9101.
- [27] S. Zeng u. a., „Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling“, *Science*, Bd. 373, Nr. 6555, S. 692–696, Aug. 2021, doi: 10.1126/science.abi5484.
- [28] X. Li, J. Peoples, P. Yao, und X. Ruan, „Ultrawhite BaSO₄ Paints and Films for Remarkable Daytime Subambient Radiative Cooling“, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Bd. 13, Nr. 18, S. 21733–21739, Mai 2021, doi: 10.1021/acsami.1c02368.
- [29] J. Mandal, Y. Yang, N. Yu, und A. P. Raman, „Paints as a Scalable and Effective Radiative Cooling Technology for Buildings“, *Joule*, Bd. 4, Nr. 7, S. 1350–1356, Juli 2020, doi: 10.1016/j.joule.2020.04.010.
- [30] W. Li, Y. Li, und K. W. Shah, „A materials perspective on radiative cooling structures for buildings“, *Solar Energy*, Bd. 207, S. 247–269, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.06.095.
- [31] H. Y. Woo, Y. Choi, H. Chung, D. W. Lee, und T. Paik, „Colloidal inorganic nano- and microparticles for passive daytime radiative cooling“, *Nano Convergence*, Bd. 10, Nr. 1, S. 17, Apr. 2023, doi: 10.1186/s40580-023-00365-7.
- [32] W. C. Smith, „Metallized Fabrics — Techniques and Applications“, *Journal of Coated Fabrics*, Bd. 17, Nr. 4, S. 242–253, Apr. 1988, doi: 10.1177/152808378801700404.
- [33] A. Senese u. a., „The non-woven geotextiles as strategies for mitigating the impacts of climate change on glaciers“, *Cold Regions Science and Technology*, Bd. 173, S. 103007, Mai 2020, doi: 10.1016/j.coldregions.2020.103007.
- [34] G. Cerbe und G. Wilhelms, Hrsg., *Technische Thermodynamik: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen*, 19., Überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2021. doi: 10.3139/9783446468139.
- [35] G. Cerbe und G. Wilhelms, „Wärmeübertragung“, in *Technische Thermodynamik*, G. Cerbe und G. Wilhelms, Hrsg., München: Hanser, 2021, S. 405–453. doi: 10.3139/9783446468139.008.
- [36] M. Planck, „Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum“, *Ann. Phys.*, Bd. 309, Nr. 3, S. 553–563, 1901, doi: 10.1002/andp.19013090310.
- [37] E. Rephaeli, A. Raman, und S. Fan, „Ultrabroadband Photonic Structures To Achieve High-Performance Daytime Radiative Cooling“, *Nano Lett.*, Bd. 13, Nr. 4, S. 1457–1461, Jan. 2013, doi: 10.1021/nl4004283.

- [38] X. Sun, Y. Sun, Z. Zhou, M. A. Alam, und P. Bermel, „Radiative sky cooling: fundamental physics, materials, structures, and applications“, *Nanophotonics*, Bd. 6, Nr. 5, S. 997–1015, 2017, doi: 10.1515/nanoph-2017-0020.
- [39] S. Lord, „A New Software Tool for Computing Earth’s Atmospheric Transmission of Near- and Far-Infrared Radiation“, *NASA Technical Memorandum 103957*, Bd. NASA-National Aeronautics and Space Administration Ames Research Center Moffett Field, California 940351000, Nr. Gemini Observatory, 1992, Zugegriffen: 25. April 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gemini.edu/observing/telescopes-and-sites/sites#MK%20thermal-infrared%20extinction>
- [40] C. N. Awanou, „Clear sky emissivity as a function of the zenith direction“, *Renewable Energy*, Bd. 13, Nr. 2, S. 227–248, Feb. 1998, doi: 10.1016/S0960-1481(97)00070-0.
- [41] X. Berger und J. Bathiebo, „Directional spectral emissivities of clear skies“, *Renewable Energy*, Bd. 28, Nr. 12, S. 1925–1933, Okt. 2003, doi: 10.1016/S0960-1481(03)00059-4.
- [42] A. W. Harrison, „Effect of atmospheric humidity on radiation cooling“, *Solar Energy*, Bd. 26, Nr. 3, S. 243–247, 1981, doi: 10.1016/0038-092X(81)90209-7.
- [43] E. E. Bell, L. Eisner, J. Young, und R. A. Oetjen, „Spectral Radiance of Sky and Terrain at Wavelengths between 1 and 20 Microns II Sky Measurements“, *J. Opt. Soc. Am.*, Bd. 50, Nr. 12, S. 1313, Dez. 1960, doi: 10.1364/JOSA.50.001313.
- [44] X. Berger, J. Bathiebo, F. Kieno, und C. N. Awanou, „Clear sky radiation as a function of altitude“, *Renewable Energy*, Bd. 2, Nr. 2, S. 139–157, Apr. 1992, doi: 10.1016/0960-1481(92)90100-H.
- [45] T. J. Garrett, L. F. Radke, und P. V. Hobbs, „Aerosol Effects on Cloud Emissivity and Surface Longwave Heating in the Arctic“, *J. Atmos. Sci.*, Bd. 59, Nr. 3, S. 769–778, Feb. 2002, doi: 10.1175/1520-0469(2002)059<0769:AEOCEA>2.0.CO;2.
- [46] Y. Iijima und M. Shinoda, „The Influence of Seasonally Varying Atmospheric Characteristics on the Intensity of Nocturnal Cooling in a High Mountain Hollow“, *J. Appl. Meteor.*, Bd. 41, Nr. 7, S. 734–743, Juli 2002, doi: 10.1175/1520-0450(2002)041<0734:TIOSVA>2.0.CO;2.
- [47] C. G. Granqvist und A. Hjortsberg, „Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films“, *Journal of Applied Physics*, Bd. 52, Nr. 6, S. 4205–4220, Juni 1981, doi: 10.1063/1.329270.
- [48] P. Berdahl und R. Fromberg, „The thermal radiance of clear skies“, *Solar Energy*, Bd. 29, Nr. 4, S. 299–314, 1982, doi: 10.1016/0038-092X(82)90245-6.
- [49] M. Martin und P. Berdahl, „Summary of results from the spectral and angular sky radiation measurement program“, *Solar Energy*, Bd. 33, Nr. 3–4, S. 241–252, 1984, doi: 10.1016/0038-092X(84)90155-5.

- [50] A. Aili, X. Yin, und R. Yang, „Global Radiative Sky Cooling Potential Adjusted for Population Density and Cooling Demand“, *Atmosphere*, Bd. 12, Nr. 11, S. 1379, Okt. 2021, doi: 10.3390/atmos12111379.
- [51] Md. M. Hossain und M. Gu, „Radiative Cooling: Principles, Progress, and Potentials“, *Advanced Science*, Bd. 3, Nr. 7, S. 1500360, 2016, doi: 10.1002/advs.201500360.
- [52] F. X. Kneizys, E. P. Shettle, L. W. Abreu, J. H. Chetwynd, und G. P. Anderson, „Users Guide to LOWTRAN 7“, AIR FORCE GEOPHYSICS LAB HANSCOM AFB MA, Interim scientific report ADA206773, Aug. 1988.
- [53] United States Air Force, „MODTRAN®“. Zugegriffen: 6. Februar 2023. [Online]. Verfügbar unter: <http://modtran.spectral.com/>
- [54] A. Berk, L. S. Bernstein, und D. C. Robertson, „MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN“, United States: N. p., 1987. Web., Technical report, Mai 1986.
- [55] C. Riordan und R. Hulstron, „What is an air mass 1.5 spectrum? (solar cell performance calculations)“, in *IEEE Conference on Photovoltaic Specialists*, Kissimmee, FL, USA: IEEE, 1990, S. 1085–1088. doi: 10.1109/PVSC.1990.111784.
- [56] U.S. Department of Energy (DOE)/NREL/ALLIANCE, „Reference Air Mass 1.5 Spectra ASTM G-173-03“, Bd. NREL Transforming ENERGY, Nr. The National Renewable Energy Laboratory is a national laboratory of the U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, operated by the Alliance for Sustainable Energy LLC, Zugegriffen: 17. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>
- [57] A. Srinivasan, „Thermal Performance of Passive Radiative Cooling Strategies on Building Envelopes“, *Dissertation, Columbia University*, 2020, doi: 10.7916/d8-se2f-q413.
- [58] B. B. Naghshine und A. Saboonchi, „Optimized thin film coatings for passive radiative cooling applications“, *Optics Communications*, Bd. 410, S. 416–423, März 2018, doi: 10.1016/j.optcom.2017.10.047.
- [59] H. Bao, C. Yan, B. Wang, X. Fang, C. Y. Zhao, und X. Ruan, „Double-layer nanoparticle-based coatings for efficient terrestrial radiative cooling“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Bd. 168, S. 78–84, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.solmat.2017.04.020.
- [60] P. Yang, C. Chen, und Z. M. Zhang, „A dual-layer structure with record-high solar reflectance for daytime radiative cooling“, *Solar Energy*, Bd. 169, S. 316–324, 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.04.031.
- [61] F. Fan, D. Xu, Y. Zhu, G. Tan, und D. Zhao, „A simple, accurate, and universal method for characterizing and comparing radiative cooling materials and devices“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 200, S. 123494, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123494.

- [62] C. Y. Tso, K. C. Chan, und C. Y. H. Chao, „A field investigation of passive radiative cooling under Hong Kong’s climate“, *Renewable Energy*, Bd. 106, S. 52–61, Juni 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.01.018.
- [63] Z. Chen, L. Zhu, A. Raman, und S. Fan, „Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day–night cycle“, *Nature Communications*, Bd. 7, Nr. 1, 2016, doi: 10.1038/ncomms13729.
- [64] J. Mandal u. a., „Hierarchically porous polymer coatings for highly efficient passive daytime radiative cooling“, *Science*, Bd. 362, Nr. 6412, S. 315–319, Okt. 2018, doi: 10.1126/science.aat9513.
- [65] T. Wang, Y. Wu, L. Shi, X. Hu, M. Chen, und L. Wu, „A structural polymer for highly efficient all-day passive radiative cooling“, *Nat Commun*, Bd. 12, Nr. 1, S. 365, Jan. 2021, doi: 10.1038/s41467-020-20646-7.
- [66] W. Gao und Y. Chen, „Emerging Materials and Strategies for Passive Daytime Radiative Cooling“, *Small*, Bd. 19, Nr. 18, S. 2206145, Mai 2023, doi: 10.1002/sml.202206145.
- [67] National Center for Biotechnology Information, „Results by Year for ‚radiative cooling‘“. 3. Juli 2023. Zugegriffen: 3. Juli 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=radiative+cooling>
- [68] A. Birner, K. Busch, und F. Müller, *Photonische Kristalle - Mikrostrukturierte Festkörper eröffnen neue Wege zur Manipulation von Licht*, Bd. Nr. 4. in Physikalische Blätter, no. 55, vol. Nr. 4. Panorama, 1999.
- [69] J. Üpping, „3D-photonische Kristalle für photovoltaische Anwendungen“, *Dissertation*, Juli 2011, doi: 10.25673/549.
- [70] H. Zhang u. a., „Biologically inspired flexible photonic films for efficient passive radiative cooling“, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Bd. 117, Nr. 26, S. 14657–14666, 2020, doi: 10.1073/pnas.2001802117.
- [71] D. Wu u. a., „The design of ultra-broadband selective near-perfect absorber based on photonic structures to achieve near-ideal daytime radiative cooling“, *Materials & Design*, Bd. 139, S. 104–111, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.10.077.
- [72] H. Ma u. a., „Multilayered SiO₂/Si₃N₄ photonic emitter to achieve high-performance all-day radiative cooling“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Bd. 212, S. 110584, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.solmat.2020.110584.
- [73] Q. Willot, P. Simonis, J.-P. Vigneron, und S. Aron, „Total Internal Reflection Accounts for the Bright Color of the Saharan Silver Ant“, *PLoS ONE*, Bd. 11, Nr. 4, S. e0152325, Apr. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0152325.
- [74] M. P. Diebold, *Application of Light Scattering to Coatings: A User’s Guide*. Cham: Springer International Publishing, 2014. doi: 10.1007/978-3-319-12015-7.

- [75] J. Jaramillo-Fernandez u. a., „Highly-Scattering Cellulose-Based Films for Radiative Cooling“, *Advanced Science*, Bd. 9, Nr. 8, S. 2104758, März 2022, doi: 10.1002/advs.202104758.
- [76] W. Wei u. a., „An Al₂O₃-cellulose acetate-coated textile for human body cooling“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Bd. 211, S. 110525, 2020, doi: 10.1016/j.solmat.2020.110525.
- [77] X. Li u. a., „Integration of daytime radiative cooling and solar heating for year-round energy saving in buildings“, *Nat Commun*, Bd. 11, Nr. 1, S. 6101, Dez. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-19790-x.
- [78] I. Klöckl, *Chemie der Farbmittel: in der Malerei*. Berlin ; Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co., KG, 2015, doi: 10.1515/9783110374537.
- [79] S. Atiganyanun und P. Kumnorkaew, „Effects of pigment volume concentration on radiative cooling properties of acrylic-based paints with calcium carbonate and hollow silicon dioxide microparticles“, *International Journal of Sustainable Energy*, Bd. 42, Nr. 1, S. 612–626, Dez. 2023, doi: 10.1080/14786451.2023.2221082.
- [80] Y. Zhai u. a., „Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling“, *Science*, Bd. 355, Nr. 6329, S. 1062–1066, Jan. 2017, doi: 10.1126/science.aai7899.
- [81] C. Ziming, W. Fuqiang, G. Dayang, L. Huaxu, und S. Yong, „Low-cost radiative cooling blade coating with ultrahigh visible light transmittance and emission within an “atmospheric window”“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Bd. 213, S. 110563, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.solmat.2020.110563.
- [82] Z. Cheng, Y. Shuai, D. Gong, F. Wang, H. Liang, und G. Li, „Optical properties and cooling performance analyses of single-layer radiative cooling coating with mixture of TiO₂ particles and SiO₂ particles“, *Sci. China Technol. Sci.*, Bd. 64, Nr. 5, S. 1017–1029, Mai 2021, doi: 10.1007/s11431-020-1586-9.
- [83] B. R. Mishra, S. Sundaram, N. J. Varghese, und K. Sasihithlu, „Disordered metamaterial coating for daytime passive radiative cooling“, *AIP Advances*, Bd. 11, Nr. 10, S. 105218, Okt. 2021, doi: 10.1063/5.0064572.
- [84] B. R. Mishra und K. Sasihithlu, „Minimizing solar absorption losses in TiO₂ particles-based passive daytime radiative cooling coatings“, in *2022 IEEE International Conference on Nanoelectronics, Nanophotonics, Nanomaterials, Nanobioscience & Nanotechnology (5NANO)*, Kottayam, India: IEEE, Apr. 2022, S. 1–3. doi: 10.1109/5NANO53044.2022.9828875.
- [85] K. Sasihithlu, S. Sundaram, B. R. Mishra, und N. J. Varghese, „Achieving passive daytime radiative cooling via TiO₂ PDMS coating“, 2022, doi: 10.48550/ARXIV.2202.09598.
- [86] Z. Huang und X. Ruan, „Nanoparticle embedded double-layer coating for daytime radiative cooling“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Bd. 104, S. 890–896, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.009.

- [87] Y. Liu, S. Son, D. Chae, P.-H. Jung, und H. Lee, „Acrylic membrane doped with Al₂O₃ nanoparticle resonators for zero-energy consuming radiative cooling“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Bd. 213, S. 110561, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.solmat.2020.110561.
- [88] X. Li, J. Peoples, Z. Huang, Z. Zhao, J. Qiu, und X. Ruan, „Full Daytime Sub-ambient Radiative Cooling in Commercial-like Paints with High Figure of Merit“, *Cell Reports Physical Science*, Bd. 1, Nr. 10, S. 100221, Okt. 2020, doi: 10.1016/j.xcrp.2020.100221.
- [89] H. Zhong, P. Zhang, Y. Li, X. Yang, Y. Zhao, und Z. Wang, „Highly Solar-Reflective Structures for Daytime Radiative Cooling under High Humidity“, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, Bd. 12, Nr. 46, S. 51409–51417, Nov. 2020, doi: 10.1021/acsami.0c14075.
- [90] T. Jiang u. a., „All-Polymer Superhydrophobic Radiative Cooling Coating Based on Polytetrafluoroethylene/Polydimethylsiloxane Composites“, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Bd. 62, Nr. 12, S. 5024–5034, März 2023, doi: 10.1021/acs.iecr.2c04448.
- [91] K. Herrmann, T. Lauster, Q. Song, und M. Retsch, „Homogeneous Polymer Films for Passive Daytime Cooling: Optimized Thickness for Maximized Cooling Performance“, *Adv Energy and Sustain Res*, Bd. 3, Nr. 2, S. 2100166, Feb. 2022, doi: 10.1002/aesr.202100166.
- [92] P. Das, S. Rudra, K. C. Maurya, und B. Saha, „Ultra-Emissive MgO-PVDF Polymer Nanocomposite Paint for Passive Daytime Radiative Cooling“, *Adv Materials Technologies*, S. 2301174, Sep. 2023, doi: 10.1002/admt.202301174.
- [93] A. Aili, Z. Y. Wei, Y. Z. Chen, D. L. Zhao, R. G. Yang, und X. B. Yin, „Selection of polymers with functional groups for daytime radiative cooling“, *Materials Today Physics*, Bd. 10, S. 100127, 2019, doi: 10.1016/j.mtphys.2019.100127.
- [94] D. Li u. a., „Scalable and hierarchically designed polymer film as a selective thermal emitter for high-performance all-day radiative cooling“, *Nature Nanotechnology*, Bd. 16, Nr. 2, S. 153–158, 2021, doi: 10.1038/s41565-020-00800-4.
- [95] Y. Chen u. a., „Cellulose-Based Hybrid Structural Material for Radiative Cooling“, *Nano Lett.*, Bd. 21, Nr. 1, S. 397–404, Jan. 2021, doi: 10.1021/acs.nanolett.0c03738.
- [96] R. Yang, J. Yang, M. Wang, J. Xu, und Y. Zhang, „Radiative cooling fabrics and products“, EP 3819425 A1, 15. Mai 2021
- [97] „Reflecting Sunlight Front Windshield Radi-Cool covers Custom“. Zugegriffen: 16. September 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.manful.com/product/radi-cool-covers/reflecting-sunlight-front-windshield-radicool-covers-112.html>
- [98] Y. Ji u. a., „Fabrication of Hydrophobic Multilayered Fabric for Passive Daytime Radiative Cooling“, *Macro Materials & Eng*, Bd. 307, Nr. 4, S. 2100795, Apr. 2022, doi: 10.1002/mame.202100795.

- [99] R. Yang, J. Yang, M. Wang, J. Xu, und Y. Zhang, „Radiative Cooling Fabrics and Products“, US20230158786A1, 25. Mai 2023
- [100] A. R. Gentle und G. B. Smith, „Radiative Heat Pumping from the Earth Using Surface Phonon Resonant Nanoparticles“, *Nano Lett.*, Bd. 10, Nr. 2, S. 373–379, Feb. 2010, doi: 10.1021/nl903271d.
- [101] J. Kou, Z. Jurado, Z. Chen, S. Fan, und A. J. Minnich, „Daytime Radiative Cooling Using Near-Black Infrared Emitters“, *ACS Photonics*, Bd. 4, Nr. 3, S. 626–630, März 2017, doi: 10.1021/acsp Photonics.6b00991.
- [102] L. Zhou u. a., „A polydimethylsiloxane-coated metal structure for all-day radiative cooling“, *Nat Sustain*, Bd. 2, Nr. 8, S. 718–724, Aug. 2019, doi: 10.1038/s41893-019-0348-5.
- [103] X. Ao, M. Hu, B. Zhao, N. Chen, G. Pei, und C. Zou, „Preliminary experimental study of a specular and a diffuse surface for daytime radiative cooling“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Bd. 191, S. 290–296, März 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2018.11.032.
- [104] B. Czapla, A. Srinivasan, Q. Yin, und A. Narayanaswamy, „Potential for Passive Radiative Cooling by PDMS Selective Emitters“, in *Volume 1: Aerospace Heat Transfer; Computational Heat Transfer; Education; Environmental Heat Transfer; Fire and Combustion Systems; Gas Turbine Heat Transfer; Heat Transfer in Electronic Equipment; Heat Transfer in Energy Systems*, Bellevue, Washington, USA: American Society of Mechanical Engineers, Juli 2017, S. V001T09A015. doi: 10.1115/HT2017-4853.
- [105] A. Srinivasan, B. Czapla, J. Mayo, und A. Narayanaswamy, „Infrared dielectric function of polydimethylsiloxane and selective emission behavior“, *Appl. Phys. Lett.*, Bd. 109, Nr. 6, S. 061905, Aug. 2016, doi: 10.1063/1.4961051.
- [106] Z. Wang u. a., „Tunneling-enabled spectrally selective thermal emitter based on flat metallic films“, *Applied Physics Letters*, Bd. 106, Nr. 10, S. 101104, März 2015, doi: 10.1063/1.4914886.
- [107] R. Houtman, „Materials used for architectural fabric structures“, in *Fabric Structures in Architecture*, Elsevier, 2015, S. 101–121. doi: 10.1016/B978-1-78242-233-4.00003-6.
- [108] H. Luo u. a., „An ultra-thin colored textile with simultaneous solar and passive heating abilities“, *Nano Energy*, Bd. 65, S. 103998, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.nanoen.2019.103998.
- [109] E. Tavakkol, S. Borhani, A. Zeidaabadi Nezhad, M. Shanbeh, und M. A. Alsharif, „Passive radiative personal heating by woven fabrics containing aluminum particles“, *Materials Today Energy*, Bd. 31, S. 101226, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.mtener.2022.101226.
- [110] L. Cai u. a., „Temperature Regulation in Colored Infrared-Transparent Polyethylene Textiles“, *Joule*, Bd. 3, Nr. 6, S. 1478–1486, Juni 2019, doi: 10.1016/j.joule.2019.03.015.

- [111] H. Luo u. a., „Outdoor Personal Thermal Management with Simultaneous Electricity Generation“, *Nano Lett.*, Bd. 21, Nr. 9, S. 3879–3886, Mai 2021, doi: 10.1021/acs.nanolett.1c00400.
- [112] J. Manara, M. Reidinger, M. Rydzek, und M. Arduini-Schuster, „Polymer-based pigmented coatings on flexible substrates with spectrally selective characteristics to improve the thermal properties“, *Progress in Organic Coatings*, Bd. 70, Nr. 4, S. 199–204, 2011, doi: 10.1016/j.porgcoat.2010.09.024.
- [113] H. Bolm, V. Rekowski, J. Mardalen, M. Hallestvet, und T. Jeffers, „Low Emissive Powder Coating“, US 2007/0251420 A1, November 2007
- [114] A. Aili u. a., „A kW-scale, 24-hour continuously operational, radiative sky cooling system: Experimental demonstration and predictive modeling“, *Energy Conversion and Management*, Bd. 186, S. 586–596, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.03.006.
- [115] A. Aili, X. Yin, und R. Yang, „Passive sub-ambient cooling: radiative cooling versus evaporative cooling“, *Applied Thermal Engineering*, Bd. 202, S. 117909, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117909.
- [116] B. H. Stuart, *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications*, 1. Aufl. in Analytical Techniques in the Sciences. Wiley, 2004. doi: 10.1002/0470011149.
- [117] Wacker Chemie AG, „Technische Textilien“. Zugegriffen: 15. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wacker.com/cms/de-de/products/applications/textile-leather/technical-textiles/technical-textiles.html>
- [118] Wacker Chemie AG, „LUMISIL® LR 7601/70 A/B“. Zugegriffen: 15. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wacker.com/h/de-de/c/lumisil-lr-760170-ab/p/000011015>
- [119] P. Wißling, *Metallic effect pigments: fundamentals and applications*. in European coatings literature. Hannover: Vincentz Network, 2006.
- [120] L. Yuan, X. L. Weng, J. L. Xie, und L. J. Deng, „Effects of shape, size and solid content of Al pigments on the low-infrared emissivity coating“, *Materials Research Innovations*, Bd. 19, Nr. sup1, S. S1-325-S1-330, Apr. 2015, doi: 10.1179/1432891715Z.0000000001497.
- [121] J. Winkler, *Titandioxid: Produktion, Eigenschaften und effektiver Einsatz*. 2. überarbeitete Auflage. Hannover: Vincentz Network, 2014.
- [122] R. F. Brady und L. V. Wake, „Principles and formulations for organic coatings with tailored infrared properties“, *Progress in Organic Coatings*, Bd. 20, Nr. 1, S. 1–25, März 1992, doi: 10.1016/0033-0655(92)85001-C.
- [123] M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik. 1: Partikeltechnologie*, 3., Vollst. neu bearb. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer, 2009.

- [124] E44 Committee, „Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres“. ASTM International. doi: 10.1520/E0903-20.
- [125] „Wärmeschutztechnische Prüfungen; Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Wärmestrommeßplatten-Gerät“, DIN 52616:1977-11.
- [126] H. de Jong und J. Flapper, „Ruling Opacity out of Existence“, Bd. European Coatings Journal, Nr. 10–2017, S. 52–55, 2017.
- [127] S. Deguchi, J. Hotta, S. Yokoyama, und T. S. Matsui, „Viscoelastic and optical properties of four different PDMS polymers“, *J. Micromech. Microeng.*, Bd. 25, Nr. 9, S. 097002, Sep. 2015, doi: 10.1088/0960-1317/25/9/097002.
- [128] C16 Committee, „Practice for Using a Guarded-Hot-Plate Apparatus or Thin-Heater Apparatus in the Single-Sided Mode“, ASTM International. doi: 10.1520/C1044-16R20.
- [129] A. Leroy u. a., „High-performance subambient radiative cooling enabled by optically selective and thermally insulating polyethylene aerogel“, *Sci. Adv.*, Bd. 5, Nr. 10, S. eaat9480, Okt. 2019, doi: 10.1126/sciadv.aat9480.
- [130] M. Martin und P. Berdahl, „Characteristics of infrared sky radiation in the United States“, *Lawrence Berkeley National Laboratory*, Nr. Solar Energy, 1983.
- [131] J. R. Allen, „Measurements of Cloud Emissivity in the 8–13 μ Waveband“, *J. Appl. Meteor.*, Bd. 10, Nr. 2, S. 260–265, Apr. 1971, doi: 10.1175/1520-0450(1971)010<0260:MOCEIT>2.0.CO;2.
- [132] C. Ruckstuhl, R. Philipona, J. Morland, und A. Ohmura, „Observed relationship between surface specific humidity, integrated water vapor, and longwave downward radiation at different altitudes“, *J. Geophys. Res.*, Bd. 112, Nr. D3, S. 2006JD007850, Feb. 2007, doi: 10.1029/2006JD007850.
- [133] „Total precipitable water (TPW)“, Deutscher Wetterdienst (DWD), Product Description Sheet Version 4.0, Aug. 2023. Zugriffen: 2. März 2024. [Online]. Verfügbar unter:
https://www.dwd.de/DE/leistungen/rcccm/int/descriptions/tpw/pds_tpw_en.html

Anhang

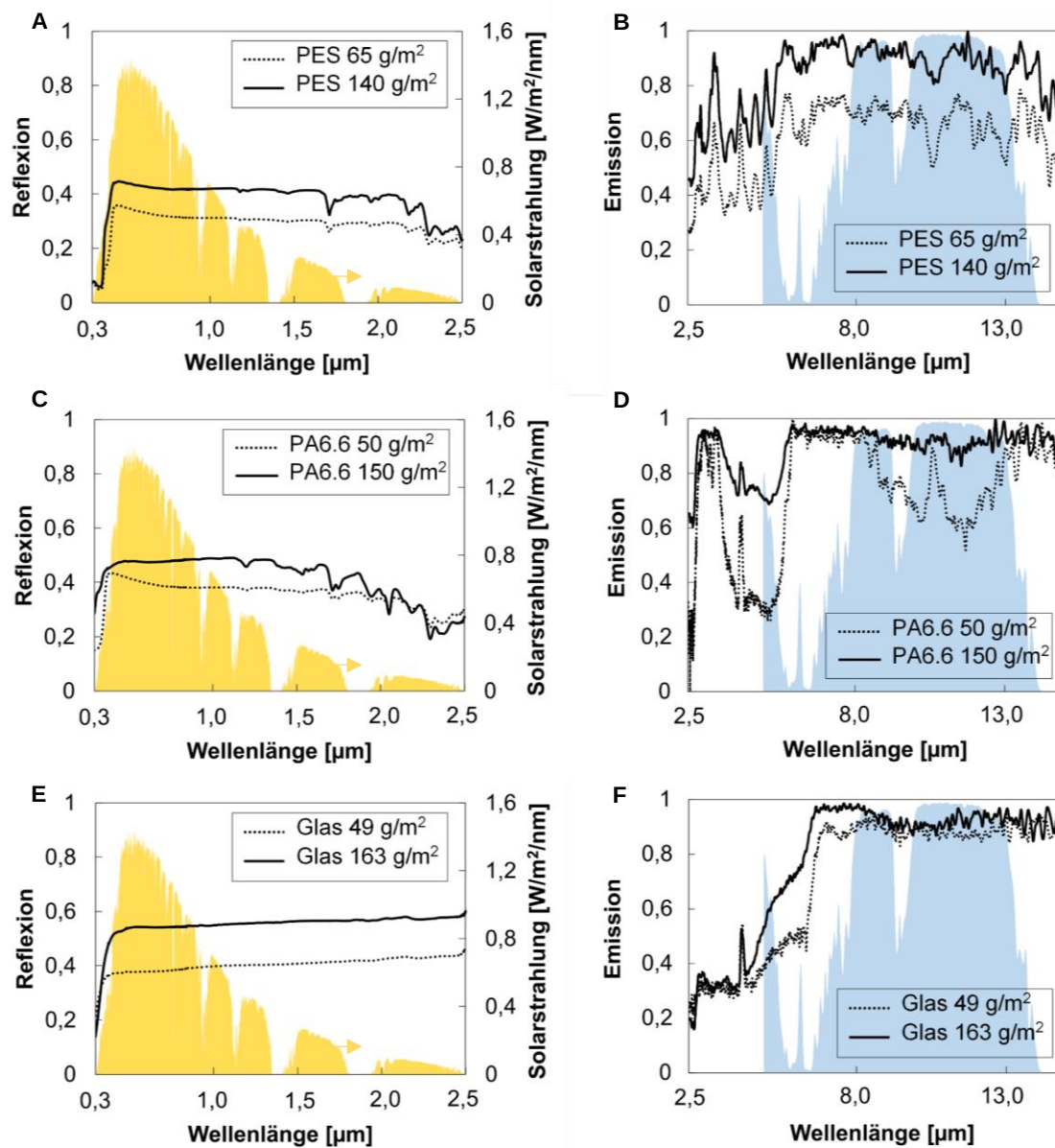


Abb. 9.1 Spektralvermessung der reinen Substratgewebe ohne Beschichtungsapplikation.
A Solare Reflexion und **B** IR-Emission der Glasgewebetypen mit einem Flächengewicht von 163 g/m² und 49 g/m²; **C** Solare Reflexion und **D** IR-Emission der Polyamidgewebetypen PA6.6 mit einem Flächengewicht von 150 g/m² und 50 g/m²; **E** Solare Reflexion und **F** IR-Emission der Polyester gewebetypen mit einem Flächengewicht von 140 g/m² und 65 g/m².

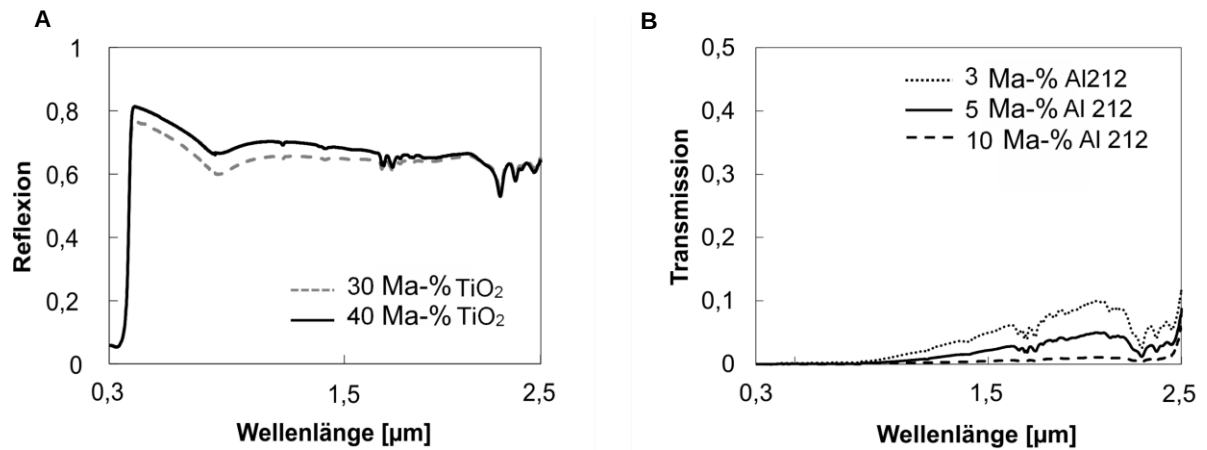


Abb. 9.2 Vergleich zwischen Aluminium und IReflex 5000 white.
 Die Aluminiumkonzentration wird zusammen mit jeweils 30 Ma-% TiO₂ aufgezeigt, beschichtet auf PES 65 g/m². Schichtdicke: 100±20 μm; **A** Solare Reflexion; **B** Solare Transmission

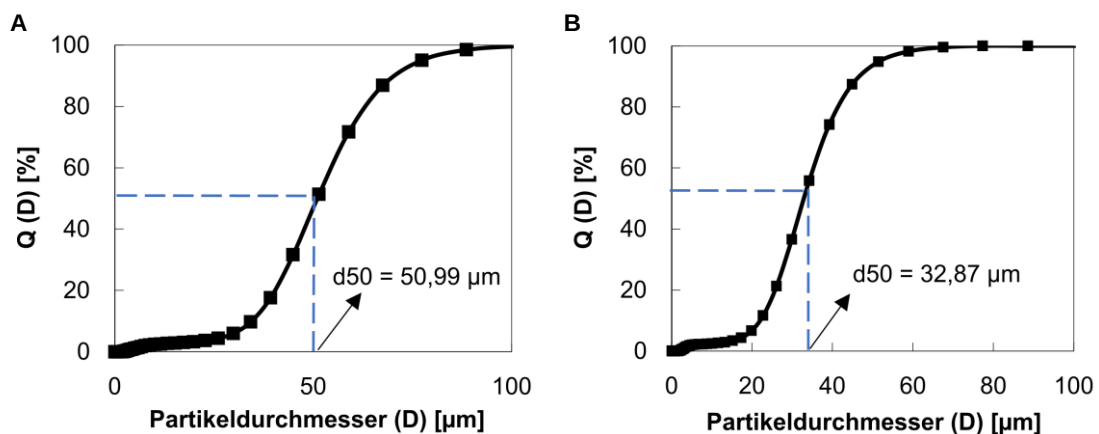


Abb. 9.3 Kumulative Verteilungskurve der Aluminiumpulver Type. (n=3)
A Verteilungskurve für Type Al₂12 mit einer Größenverteilung d₅₀ = 51 μm,
B Verteilungskurve für Type Al₂14 mit einer Größenverteilung d₅₀ = 33 μm.

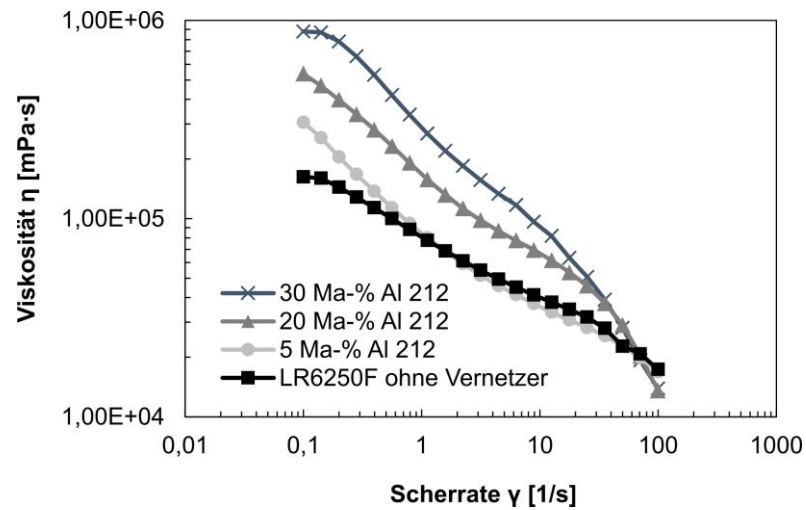


Abb. 9.4 Viskosität in Abhängigkeit der Aluminiumpartikelkonzentration.
Mit zunehmender Partikelkonzentration und damit zunehmendem Feststoffanteil nimmt auch die Viskosität im Vergleich zum reinen Silikonmaterial zu.

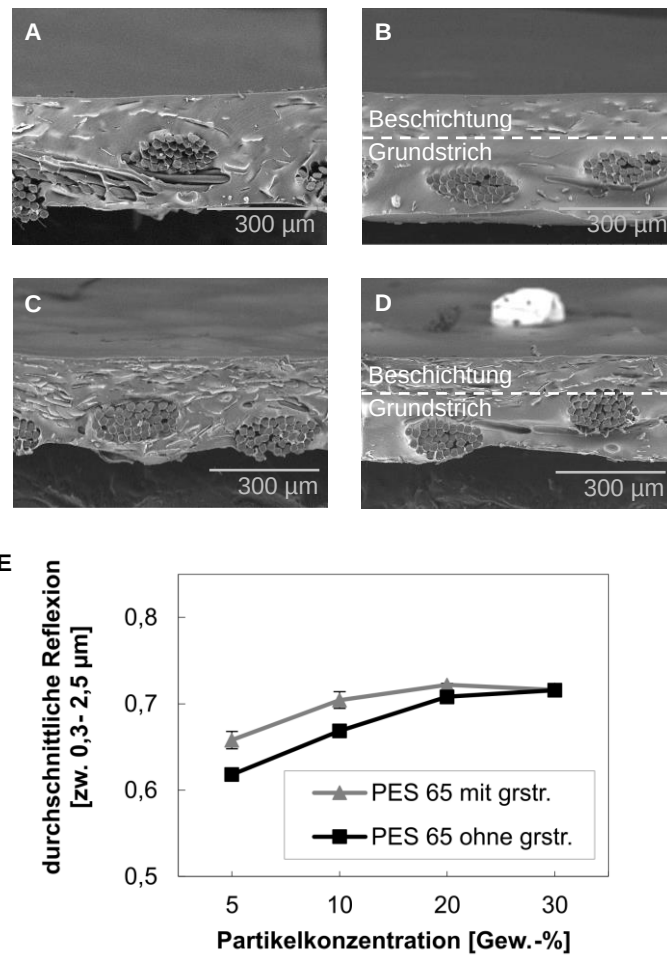


Abb. 9.5 Orientierung der Aluminiumpartikel mit und ohne Grundstrich.
A 5 Ma-% Al 212 auf PES 65 g/m² ohne Grundstrich (Flächengewicht: 256,41 g/m²);
B 5 Ma-% Al 212 auf PES 65 g/m² mit Grundstrich (Flächengewicht: 286,37 g/m²);
C 20 Ma-% Al 212 auf PES 65 g/m² ohne Grundstrich (Flächengewicht: 260,6 g/m²);
D 20 Ma-% Al 212 auf PES 65 g/m² mit Grundstrich (Flächengewicht: 296,94 g/m²);
E Durchschnittliche konzentrationsabhängige solare Reflexion gemessen im Lamda 1050 + (Perkin Elmer) auf Glas 163 g/m² mit und ohne Grundstrich. (REM (Hitachi TM1000) x250)

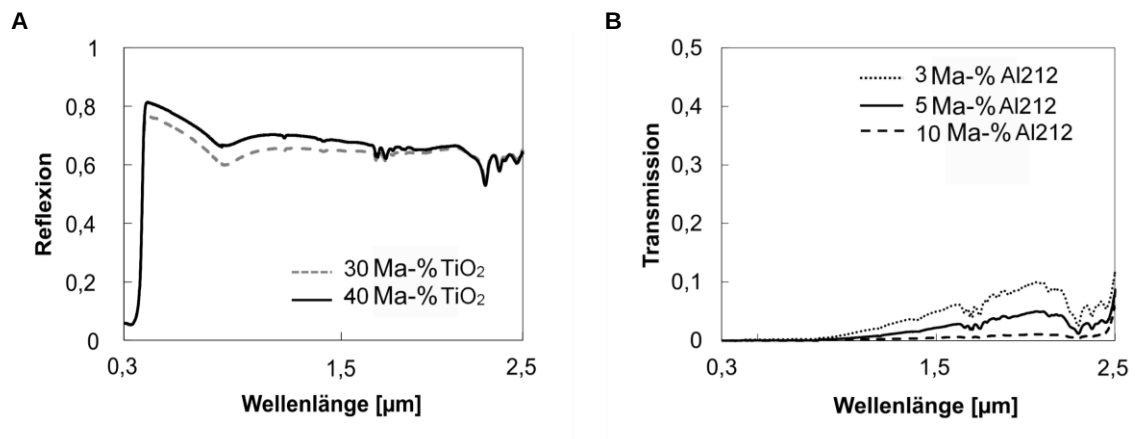


Abb. 9.6 Reflexionserhöhung durch Maximierung der TiO₂-Konzentration und Transmissionsreduzierung durch die Aluminiumkonzentration im gemischten einlagigen Beschichtungsauftrag.

A 10 Ma-% Al 212 + die entsprechende TiO₂-Konzentration auf PES 65 g/m². Prozentuale durchschnittliche Abweichung von ca. 4,2 %; **B** 40 Ma-% TiO₂ + die entsprechende Al-Konzentration auf PES 65 g/m².

Tab. 9.1 Kostenanalyse der Materialien für das Beschichtungssystem B3.

Beschichtung Typ B3			
	Preis pro Einheit	Bedarf pro m ² beschichtetes Textil	Kosten pro m ² beschichtetes Textil
TiO ₂ Partikel	4 €/kg	0,02 kg	0,09 €
Al Partikel	30,0 €/kg	0,003 kg	0,10 €
Silikon	18,0 €/kg	0,19 kg	3,45 €
Vernetzer	35 €/kg	0,01 kg	0,18 €
Gesamt			3,82 €

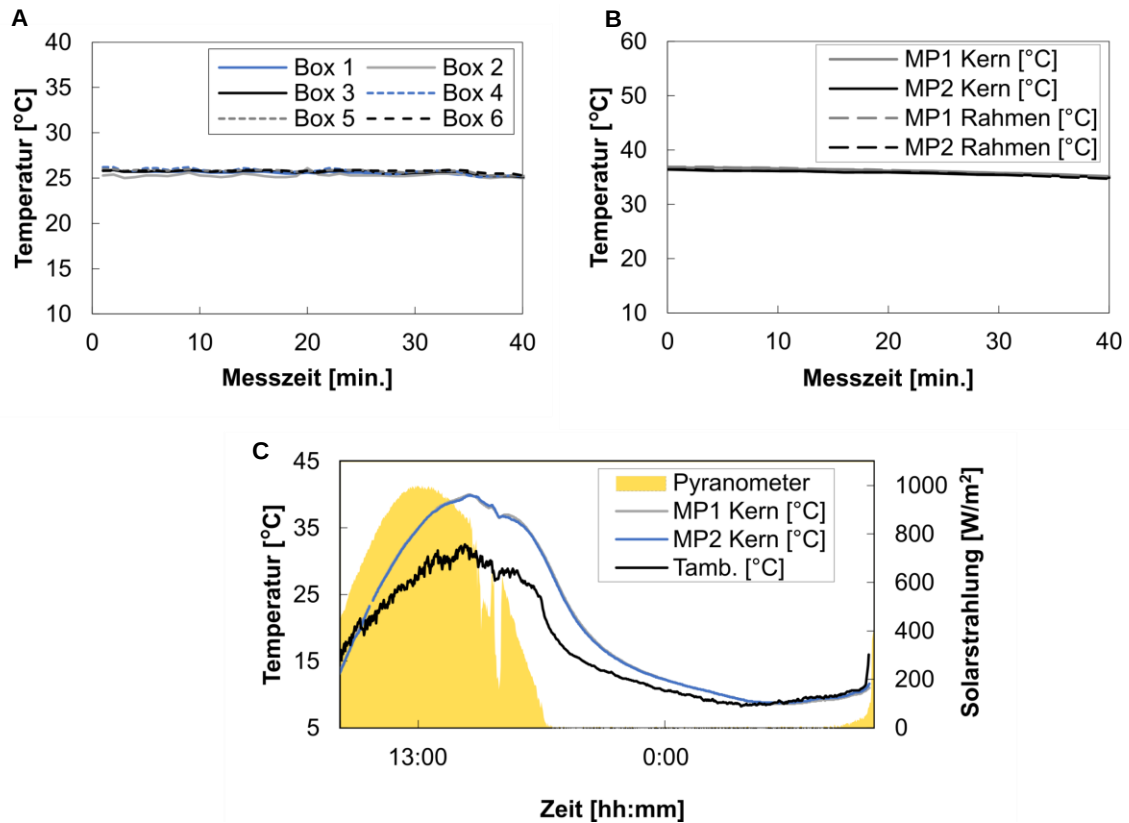


Abb. 9.7 Vergleichbarkeit der Prüfmodule. Temperaturmessung über einen Zeitraum von 40 Minuten bei identischen Probeneinsatz (Aluminiumfolie).
A Vergleichbarkeit der Prüfmodule zur reinen Temperaturmessung am 19.09.2023, 17:05 – 17:45 Uhr, durchschnittliche Solareinstrahlstärke: 332,8 W/m², die Temperatur der Prüfboxen liegen auf einem gleichbleibenden Niveau, die Standardabweichung beträgt 0,2 K; **B** Vergleichbarkeit der Prüfmodule mit Heizplattensystem am 27.09.2023, 17:05 – 17:45 Uhr, durchschnittliche Solareinstrahlstärke: 350,8 W/m², Rahmen- und Kerntemperatur liegen auf einem gleichbleibenden Niveau, die Standardabweichung beträgt 0,3 K; **C** Vergleich der Kerntemperatur für Aluminiumfolie an den Prüfmodulen mit Heizplattensystem – die Temperatur beider Module bleibt konstant auf dem gleichen Niveau für einen Zeitraum von bis zu 24h, die Nachttemperatur entspricht der der gemessenen Umgebungstemperatur.

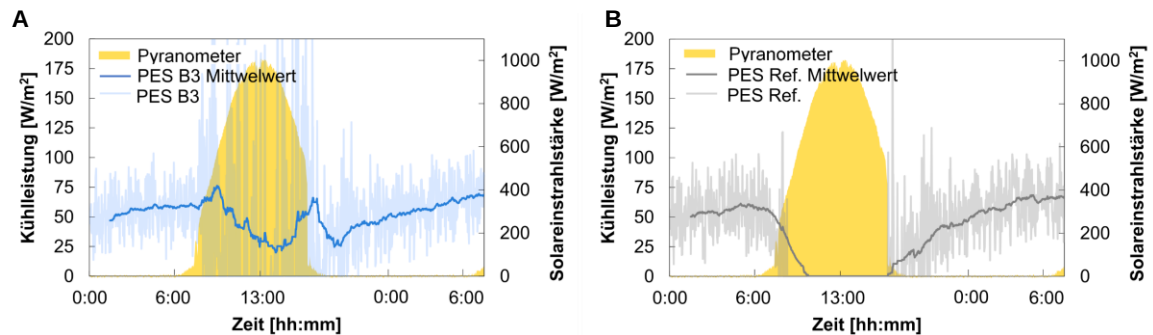


Abb. 9.8 Kühlleistung (P_{cool}) des beschichteten und unbeschichteten Textils. Originaldaten der Wärmezufuhr ($P_{\text{heater}} = P_{\text{cool}}$) und Darstellung des Mittelwertes als gleitender Durchschnitt Periode 50 bei 2419 Datenpunkten. Gemessen mit dem Prüfmodul mit integriertem Heizplattensystem vom 15.09.2023–16.09.2023 auf dem Dach der DITF. Maximale Solareinstrahlung am Tag (15.09.2023): $1007,5 \text{ W/m}^2$, durchschnittliche Windgeschwindigkeit am Tag (7:00–19:00 Uhr): $1,2 \text{ m/s}$, durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit am Tag (7:00–19:00 Uhr): $67,1 \%$; **A** Probe: PES 65 g/m^2 beschichtet mit der Beschichtungsrezeptur B3 (Gesamtbeschichtungsdicke: $250 \pm 20 \mu\text{m}$); **B** PES 65 g/m^2 Ref. unbeschichtet.

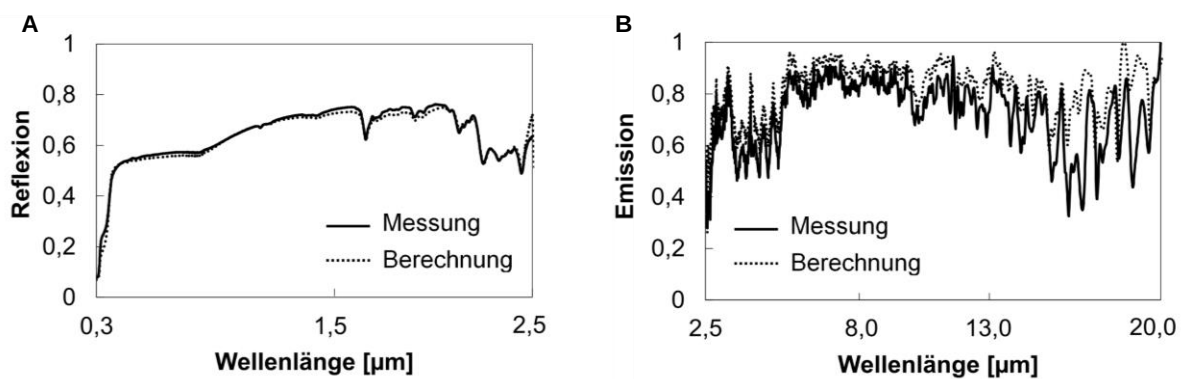


Abb. 9.9 Vergleich der berechneten und gemessenen Spektralverläufe des kombinierten Systems am Beispiel von PES 65 g/m^2 auf einer Aluminiummetallplatte. (teiltransparentes Textil und opaker Untergrund) **A** Solare Reflexion mit einer durchschnittlichen Abweichung von $1,4 \%$; **B** Emission im mittleren Infrarot

