

**Untersuchung des
Langzeitverhaltens der Degradation
des Emissionsvermögens von
Baustoffen mit vermindertem
Emissionsvermögen aufgrund von
künstlicher und natürlicher Alterung**

T 3286

T 3286

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2012

ISBN 978-3-8167-8820-1

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Bitte beachten:

Fehlende Seiten sind **Leerseiten**,
die bei Erstellung
der PDF-Datei für den Download nicht
berücksichtigt wurden

Fraunhofer IRB Verlag

Forschungsbericht: Langzeitverhalten Epsilon

Abschlussbericht

Untersuchung des Langzeitverhaltens der Degradation des Emissionsvermögens von Baustoffen mit vermindertem Emissionsvermögen aufgrund von künstlicher und natürlicher Alterung

Langzeitverhalten Epsilon – Abschlussbericht

Thema	Untersuchung des Langzeitverhaltens der Degradation des Emissionsvermögens von Baustoffen mit vermindertem Emissionsvermögen aufgrund von künstlicher und natürlicher Alterung
Kurztitel	Langzeitverhalten Epsilon
Auftraggeber	Deutsches Institut für Bautechnik Kolonnenstr. 30 L 10829 Berlin
Forschungsstellen	Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München Lochhamer Schlag 4 82166 Gräfelfing ift gemeinnützige Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH Theodor-Gietl-Straße 7-9 83026 Rosenheim
Projektleitung	Dr.-Ing. Martin H. Spitzner (FIW München) Dipl.-Phys. Norbert Sack (ift Rosenheim)
Bearbeitung	Dipl.-Ing. (FH) Holger Simon (FIW München) Dipl.-Phys. Johannes Cammerer (FIW München) Dipl.-Phys. Christine Lux (ift Rosenheim)

Gräfelfing, April 2011

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung	13
2 Messverfahren und Probekörper	15
2.1 Messung des normalen Emissionsgrades mit dem TIR 100	15
2.2 Analyse der Probekörper	17
2.3 Probekörperliste	21
2.4 Zuordnung der gemessenen Emissionsgrade und Materialien	28
2.5 Einteilung der Foliendämmungen nach Anwendungsbereichen und Belastungen	31
3 Alterungen und Ergebnisse	34
3.1 Wechselklima	34
3.2 Freibewitterung	36
3.3 Beurteilungsgrundlagen der EOTA	47
3.4 UV-Bestrahlung	50
3.5 Kochtest	52
3.6 Zusammenfassung der Messergebnisse aus den Alterungsverfah- ren	53
4 Berechnungsbeispiele	56
4.1 Vereinfachte Dachkonstruktion	56
4.2 Dach mit Zwischen- und Untersparrendämmung	58
4.3 Rollläden	60
4.4 Rollladenkasten	62
5 Fazit	63
6 Literaturverzeichnis	69

Kurzfassung

In letzter Zeit drängen zahlreiche Bauprodukte auf den Markt, die zur Verbesserung der wärmeschutztechnischen Eigenschaften niedrigemittierende Folien oder Beschichtungen einsetzen, je nach Produkt an der Produktoberfläche und/oder im Inneren des Produkts. Die Alterung der niedrigemittierenden Eigenschaft, die „Abdeckung“ z.B. durch Staub und der Einfluss dieser Effekte auf den Emissionsgrad, sowie die geeigneten Prüfverfahren sind noch nicht ausreichend bekannt, um Bemessungswerte für den langjährigen Zustand angeben zu können.

Im Rahmen des Vorgängervorhabens „Alterung Epsilon“ wurde der Einfluss einiger Effekte auf die Dauerhaftigkeit des verminderten Emissionsgrades von Baustoffen ermittelt. Dabei wurden im Labor Alterungen durch UV-Belastung, Wechselklima und nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA durchgeführt. Des Weiteren wurden Probekörper in einem Freibewitterungsstand eingebaut. Die Messergebnisse zeigen, dass nur extreme Belastungen zu einer Änderung des Emissionsgrades führen. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde im Speziellen der Einfluss von unterschiedlichen künstlichen Alterungsverfahren über einen längeren Zeitraum untersucht, um Abhängig von der Einbausituation ein möglichst realitätsnahes Alterungsverfahren beschreiben zu können.

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse für die untersuchten Produkte stichpunktartig zusammengefasst:

- Die Proben zeigen sich hinsichtlich ihres Emissionsgrades gegenüber Alterungseinflüssen, wie auch schon im vorangegangenen Forschungsvorhaben, als sehr robust.
- Eine starke Alterung des Emissionsgrades, bis hin zur Zerstörung der Proben, ergäbe sich aus der ungeschützten Freibewitterung. Diese Belastung entspricht aber nicht der regelmäßigen Verwendung der getesteten IR-reflektierenden Produkte.
- Der Einfluss einer dünnen Staubschicht auf den Emissionsgrad ist vernachlässigbar.
- Ein allgemeingültiges Schnelltestverfahren, das eine exakte Vorhersage über die Alterung des Emissionsgrades erlaubt, wurde nicht gefunden. Allerdings gibt die durchgeführte ATR-Spektroskopie Hinweise, dass eine Einteilung der Eigenschaften der untersuchten Produkte über die Art der äußeren Schutzschicht möglich wäre. Hier besteht noch Klärungsbedarf.



- Der Emissionsgrad der getesteten Produkte hat sich als sehr robust erwiesen. Nur sehr starke Belastungen haben zu einer Erhöhung desselben geführt. Daher sind die Verfasser der Meinung, dass ein allgemeingültiges Schnelltestverfahren zur exakten Vorhersage des Alterungsverhaltens IR-reflektierender Produkte nicht notwendig ist und geben folgende Empfehlungen:
- Das in prEN16012 genannte Verfahren zur Konditionierung / Alterung stellt ein einfach durchzuführendes Belastungs- bzw. Alterungsverfahren dar. Mit Hilfe dieses Testverfahrens werden Mindestanforderungen an die Dauerhaftigkeit des Emissionsgrades IR-aktiver Produkte gestellt. Es wird empfohlen an dieser Mindestanforderung festzuhalten.
- Die in prEN 16012, Tabelle 2, genannten Nennwerte für die gealterten Produkte sind, mit Ausnahme der Aluminiumfolie, erheblich zu niedrig. Die genannten Werte in Höhe von $\epsilon = 0,05$ entsprechen Produkten mit einem sehr niedrigen Emissionsgrad. Die Verfasser schlagen vor, die Tabelle zu streichen.
- Der Bemessungswert für den Emissionsgrad eines Produktes mit IR-reflektierender Eigenschaft kann in Anlehnung an DIN V 4108-4 aus dem 1,2-fachen des Nennwertes ermittelt werden.

Abstract

In recent times numerous construction products which use the properties of low-emissivity plastics or coatings to improve the heat insulation properties (on the product surface and/or on the inside of the product depending on the product itself) have been pushed onto the market. The ageing of the low-emissivity properties, the "coverage", for example due to dust, and the influence of these effects on the emissions level in addition to suitable test methods are not sufficiently known in order to state a measurement value for a longstanding condition.

The influence of some effects on the permanence of the reduced emissions level in construction materials was determined in the course of the previous "Ageing Epsilon" project. In this case, ageing due to UV load, climate change and acc. to the valuation criteria of EOTA was carried out in the laboratory. Furthermore, test specimens were fitted to an outdoor weathering stand. The measured results show that only extreme loads result in changes to the emissions level. The effects of different artificial ageing processes were investigated over a long timeframe during the course of this project in order to provide a description of an ageing process dependent on the fitting location as near to reality as possible.

The most important findings for the products investigated are summarised below:

- The samples were shown to be extremely robust with regard to their emissions level when subjected to ageing influences, as was also shown in previous research projects.
- Severe ageing of the emissions level, up to destruction of the samples, resulted from unprotected outside weathering. However, this loading does not correspond to regular use of the tested IR-reflecting products.
- The influence of a thin dust layer on the emissions level is negligible.
- A generally applicable quick test procedure which enables precise prediction of the emissions level ageing was not found. However, the ATR spectroscopy carried out showed that classification of the properties for the investigated products could be carried out using the type of external protective layer. This point must be further clarified.
- The emissions level of the products tested were shown to be extremely robust. Only extremely severe loadings resulted in increases in the level. For this reason, the author is of the opinion that a generally applicable quick



test procedure for precise prediction of IR-reflecting product ageing behaviour is not necessary, and makes the following recommendations:

- The procedure for conditioning / ageing stated in prEN16012 represents a loading or ageing process which is simple to carry out. Minimum requirements on the permanence of the IR-active product emissions level can be made with the help of this test procedure. It is recommended that this minimum requirement is adhered to.
- The rated values for aged products stated in prEN 16012, Table 2 are, with the exception of aluminium foil, considerably too low. The stated values at a level of $\epsilon = 0.05$ correspond to products with an extremely low emissions level. The authors propose deleting the table.
- The measured value for the emissions level of a product with IR-reflecting properties can be determined by using a factor of 1.2 times the rated value based on DIN V 4108-4.

Abrégé

Ces derniers temps, de nombreux produits de construction affluent sur le marché ; pour améliorer leurs propriétés techniques de protection thermique, ces produits intègrent des feuilles ou revêtements faiblement émissifs placés, selon le produit, à la surface et/ou à l'intérieur de ce dernier. Le vieillissement de la propriété Émissivité faible, le « recouvrement » par exemple par la poussière et l'influence de ces effets sur le degré d'émission, ainsi que les procédés d'essai appropriés ne sont pas encore suffisamment connus pour pouvoir indiquer des valeurs de dimensionnement visant l'état sur de longues années.

L'influence de quelques effets sur la durabilité du degré d'émission amoindri des matériaux de construction avait été déterminée dans le cadre du projet précédent intitulé « Vieillissement Epsilon ». A cette fin, des essais de vieillissement avaient été réalisés en laboratoire (sous ultraviolets, climat alterné et critère d'appréciation de l'EOTA). En outre, des échantillons avaient été montés dans un châssis d'exposition en plein air aux intempéries. Les résultats de mesure montrent que seules des contraintes extrêmes entraînent une modification du degré d'émission. Dans le cadre de ce projet a été plus spécialement étudiée l'influence de différentes procédures de vieillissement artificiel sur une période prolongée afin de pouvoir décrire, en fonction du cas d'incorporation, un processus de vieillissement le plus proche possible de la réalité.

Nous résumons ci-après ponctuellement les éléments de connaissance essentiels acquis sur les produits étudiés :

- Comme dans le projet de recherche précédent, les échantillons s'avèrent très robustes quant à leur degré d'émission sous l'action de facteurs de vieillissement.
- L'exposition en plein air aux intempéries sans protection provoquerait un vieillissement important du degré d'émission, et irait jusqu'à détruire les échantillons. Cette contrainte ne correspond toutefois pas à la forme d'utilisation courante des produits testés réfléchissant les IR.
- L'influence qu'exerce une couche de poussière mince sur le degré d'émission est négligeable.
- Il n'a pas été trouvé de procédure d'essai rapide universelle permettant de prédire avec précision le vieillissement du degré d'émission. Toutefois, la spectroscopie ATR réalisée suggère qu'il serait possible de classer les



propriétés des produits analysés par types de couche protectrice extérieure. Ce point reste encore à tirer au clair.

- Le degré d'émission des produits testés s'est avéré très robuste. Seules de très fortes contraintes ont provoqué son augmentation. Pour cette raison, les auteurs sont d'avis qu'une procédure d'essai rapide universelle n'est pas nécessaire pour prédire exactement le comportement au vieillissement des produits réfléchissant les IR, et émettent les recommandations suivantes :
- La procédure de conditionnement / vieillissement indiquée dans le projet de norme prEN16012 est une procédure de mise sous contrainte et de vieillissement facile à réaliser. Cette procédure d'essai permet d'assigner des exigences minimum à la durabilité du degré d'émission des produits actifs envers les IR. Il est recommandé de respecter cette exigence minimum.
- Les valeurs nominales applicables aux produits vieillis, indiquées au tableau 2 dans le prEN 16012, sont considérablement trop basses, à l'exception près de la feuille d'aluminium. Les valeurs mentionnées, à concurrence de $\epsilon = 0,05$, correspondent à des produits présentant un très faible degré d'émission. Les auteurs proposent de supprimer ce tableau.
- La valeur de dimensionnement du degré d'émission d'un produit ayant la propriété de réfléchir les IR peut être déterminée à partir de DIN V 4108-2 en prenant 1,2 fois la valeur nominale.



1 Einleitung

In letzter Zeit drängen zahlreiche Bauprodukte auf den Markt, die zur Verbesserung der wärmeschutztechnischen Eigenschaften niedrigemittierende Folien oder Beschichtungen einsetzen, je nach Produkt an der Produktoberfläche und/oder im Inneren des Produkts. Die Alterung der niedrigemittierenden Eigenschaft, die „Abdeckung“ z.B. durch Staub und der Einfluss dieser Effekte auf den Emissionsgrad, sowie die geeigneten Prüfverfahren sind noch nicht ausreichend bekannt, um Bemessungswerte für den langjährigen Zustand angeben zu können.

Im Rahmen des Vorgängervorhabens „Alterung Epsilon“ [1] wurde der Einfluss einiger Effekte auf die Dauerhaftigkeit des verminderten Emissionsgrades von Baustoffen ermittelt. Dabei wurden im Labor Alterungen durch UV-Belastung, Wechselklima und nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA durchgeführt, des Weiteren wurden Probekörper in einem Freibewitterungsstand eingebaut. Die Messergebnisse zeigen, dass nur extreme Belastungen zu einer Änderung des Emissionsgrades führen. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde im Speziellen der Einfluss von unterschiedlichen künstlichen Alterungsverfahren über einen längeren Zeitraum untersucht, um Abhängig von der Einbausituation ein möglichst realitätsnahes Alterungsverfahren beschreiben zu können.

Hierzu wurden die im Rahmen des abgeschlossenen Vorhabens durchgeführten Alterungen verlängert und erweitert. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, Art, Größe und Effekt möglicher Einflussparameter auf den Emissionsgrad zu klären und zwar als durchschnittliche Werte für praxisrelevante Verhältnisse über die Gebrauchsdauer im Bauteil und als Grenzwerte für den maximalen möglichen Einfluss. Die Erkenntnisse können als Grundlage für die bauaufsichtliche Regelung (z. B. in Form eines Bemessungswertes des Emissionsgrades über die Bauteilnutzungsdauer) dienen.

Die durchgeführten Untersuchungen werden hinsichtlich der Veränderungen des Emissionsgrades in Abhängigkeit der Belastung analysiert. Hierdurch sollen mögliche maximale Grenzen der Veränderung ermittelt werden, sowie für übliche Anwendungen zu erwartende Veränderungen des Emissionsgrades abgeschätzt werden. Die Auswirkung der Veränderungen des Emissionsgrades auf das wärmetechnische Verhalten kompletter Bauteile wie z. B. Rollladenkästen, Rollladenpanzer und Dachaufbauten werden anschließend durch



entsprechende (numerische) Berechnungen z. B. nach DIN EN ISO 10077-2 [2] sowie Berechnungen nach DIN EN ISO 6946 [3] quantifiziert. Hierdurch soll aufgezeigt werden, welchen Einfluss eine Änderung des Emissionsgrades auf den U-Wert einer Konstruktion hat und welche Veränderungen des Epsilon-Wertes durch Alterung bzw. Verschmutzungen noch vertretbar wären.



2 Messverfahren und Probekörper

Im Vorgängervorhaben wurden die Alterungsverfahren UV-Belastung (analog den Unterspannbahnen), Wechselklima, Beurteilungsgrundlagen der EOTA und Langzeit-Freibewitterung als Verfahren identifiziert, deren Einfluss weiter untersucht werden sollte [1]. Diese durchzuführenden bzw. fortzuführenden Prüfungen erfolgten an Probematerial, welches von Firmen bereitgestellt wurde (siehe Abschnitt 2.2).

Für jedes Produkt wurden an jeweils sechs Probekörpern fünf Messwerte aufgenommen und daraus der Mittelwert gebildet. In Tabelle 1 sind die Mittelwerte eingetragen, Abbildung 6 zeigt das zugehörige Diagramm.

Je nach Anwendungsbereich der Folien ergeben sich unterschiedliche mögliche Belastungen. In [1] erfolgte daher eine ausführliche Analyse der Foliendämmungen hinsichtlich ihres Aufbaus, ihrer Anwendungsbereiche und der daraus resultierenden Belastungen. Die Einteilung der Probekörper in die Kategorien und zugehörige Belastungen erfolgt unter Ziffer 2.5.5.

In Ziffer 2.2 wird die Analyse der Probekörper mit Hilfe der ATR-Spektroskopie weiter vertieft.

Der Emissionsgrad eines realen Körpers ist definiert durch das Verhältnis der abgegebenen Strahlungsleistung eines realen Körpers zur abgegebenen Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers gleicher Fläche und Temperatur. Der Emissionsgrad wurde über eine integrale Messung der IR-Reflexion durch ein sog. Emissiometer bestimmt (siehe Abschnitt 2.1). Die Messung des Emissionsgrades der zu untersuchenden Oberflächen erfolgte sowohl vor der Belastung als auch danach. Hierdurch ist es möglich, die Änderung des Emissionsgrades in Abhängigkeit der unterschiedlichen Belastungen zu ermitteln.

2.1 Messung des normalen Emissionsgrades mit dem TIR 100

Wie schon im Vorgängervorhaben wurden alle Probekörper mit einem TIR 100 der Firma Inglas vermessen. Das Messprinzip des TIR 100 ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein Strahler mit 100°C in Form eines sphärischen Halbraumes leuchtet die Messfläche homogen aus. Die reflektierte Strahlung wird von einem Sensor unter einem Winkel von 12° zur Flächennormalen detektiert. Aus



dem Vergleich der Reflexionswerte mit den gespeicherten Referenzwerten zweier kalibrierter Standards wird der normale Emissionsgrad ϵ_n berechnet. Laut Herstellerangaben können Emissionsgrade im Bereich von 0,020 bis 0,980 mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,005$ (bzw. $\pm 0,002$ beim TIR 100-2) im spektralen Messbereich von $2,5 \mu\text{m}$ bis $40 \mu\text{m}$ gemessen werden [4].

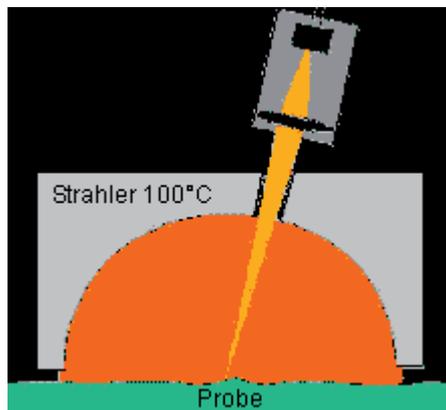


Abbildung 1 Messprinzip des TIR 100 [4].

Im Vorgängervorhaben wurden Vergleichsmessungen zwischen dem TIR 100 und einem spektralen Messverfahren vorgestellt [1]. Daraus resultierte die ebenfalls in diesem Projekt angegebene Standardmessunsicherheit von $\pm 0,03$, die in den Diagrammen stets als Fehlerbalken zu sehen ist.

Da sich das Messverfahren, wie im Vorgängervorhaben festgelegt, bewährt hat, wurden die Messungen ebenso durchgeführt. Um eine Erwärmung der Probekörper und damit eine Verfälschung der Messergebnisse zu vermeiden, wurden die Proben an eine Wärmesenke (Aluminiumplatte) gekoppelt. Bei den Messungen im ift Rosenheim wurde der Messkopf während der Messung zusätzlich in angemessener Geschwindigkeit über den Probekörper bewegt.

Um herauszufinden, ob eine waagrechte oder senkrechte Position von Probekörper und Messgerät die Messung und damit das Ergebnis beeinflussen, wurden Vergleichsmessungen an unterschiedlichen Probekörpern durchgeführt (Abbildung 2). Die Messung des Kalibrierstandards wurde in der gleichen Position wie die darauffolgende Messung des Probekörpers durchgeführt. Das Messgerät wurde während des gesamten Messablaufs nicht aus seiner waagrechten bzw. senkrechten Position gebracht.

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der Vergleichsmessungen. Die gemessenen Emissionsgrade zeigen innerhalb der Fehlergrenzen von $\pm 0,03$ keine signifikante Änderung in Abhängigkeit der Position.

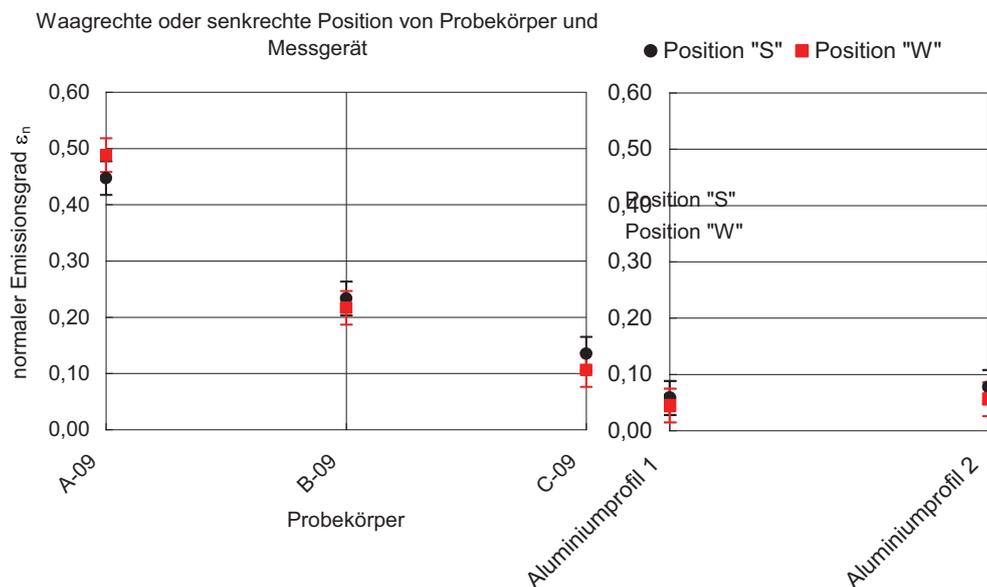


Abbildung 2 Vergleichsmessungen an drei Probekörpern und zwei Aluminiumprofilen bei senkrechter „S“ Position und waagrechter „W“ Position von Probekörper und Messgerät.

2.2 Analyse der Probekörper

Die bereitgestellten Probekörper im DIN A4 Format wurden am **ift** Rosenheim mit Hilfe der ATR-Spektroskopie und einem Lichtmikroskop charakterisiert. Die Ergebnisse sind in den Probekörperlisten Ziffer 2.3 zu finden.

2.2.1 ATR-Spektroskopie

Die ATR-Spektroskopie (*attenuated total reflection*), abgeschwächte Totalreflexion) wird im Allgemeinen benutzt, um Werkstoffe zu charakterisieren, die kaum durch Reflexions- oder Transmissionsmessungen bestimmbar sind. Das



Prinzip der Spektroskopie beruht auf der Absorption von IR-Strahlung durch die Moleküle der zu messenden Substanz. Die absorbierte Energie führt zu Molekülschwingungen und –rotationen. Die Lage der Banden ist charakteristisch und gibt Aufschluss darüber, welche funktionellen Gruppen schwingen/rotieren. Da meist nur die funktionellen Gruppen lokal schwingen und nicht das ganze Molekül, können über die Absorptionsbanden die lokalen Gruppen identifiziert werden.

Für organische Moleküle liegen die charakteristischen Banden im Bereich von 2,5 μm bis 25 μm . Die Grundschwingungen der Moleküle liegen im Bereich von 4000 cm^{-1} bis 400 cm^{-1} , Obertöne und Kombinationsschwingungen im Bereich von 12500 cm^{-1} und 4000 cm^{-1} . Die Lage und Intensität der Banden von Reinsubstanzen sind charakteristisch und eignen sich zum Vergleich und zur Charakterisierung unbekannter Probekörper [5].

Die Messung der ATR-Spektren der Vorderseiten („IR-reflektierende Seite“) und Rückseiten der Probekörper erfolgte mit einem FT-IR Spektrometer Bruker Tensor 27 in einem Spektralbereich von 4000 cm^{-1} bis 600 cm^{-1} (2,5 μm bis 16,7 μm). Für Referenzspektren wurden bekannte Reinsubstanzen vermessen und vorhandene Spektrenbibliotheken genutzt. In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die Ergebnisse dieser Messungen eingetragen. Konnten bei der Messung keine Banden gemessen werden, so wurde davon ausgegangen, dass sich auf der Oberfläche keine Moleküle befinden, die in diesem Spektralbereich aktiv sind. Diese Probekörper sind mit „-/-“ gekennzeichnet.

Nicht alle Substanzen konnten mit Hilfe der ATR-Spektroskopie charakterisiert werden. Bei Oberflächen, die zwar in der ATR-Spektroskopie charakteristische Banden zeigten, bei denen jedoch zum Abgleich kein Referenzspektrum vorhanden war, sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 Fragezeichen eingetragen. Da unter dem Lichtmikroskop keine definierte Schicht zu erkennen war, werden diese „unbekannten“ Substanzen als „Schutzschichten“ bezeichnet.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft das aufgenommene ATR-Spektrum des Probekörpers L-09(f) und das Referenzspektrum Polyethylen (Reinsubstanz). Aufgrund der Übereinstimmung aller charakteristischen Banden von Probe und Referenz kann davon ausgegangen werden, dass die Oberfläche der Vorderseite von Probekörper L-09(f) aus Polyethylen besteht.

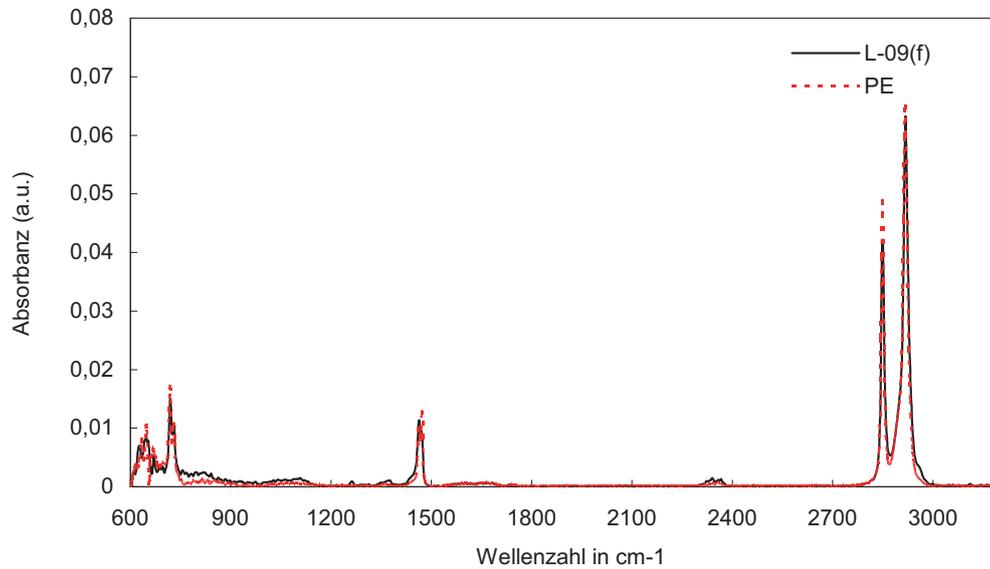
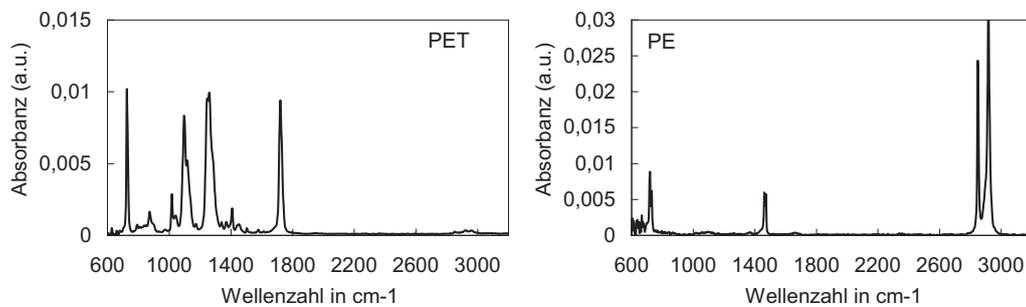


Abbildung 3 Absorbanz in Abhängigkeit von der Wellenzahl: ATR-Spektrum des Probekörpers L-09(f) (IR-aktive Seite, schwarz) und des Referenzspektrums PE Polyethylen als Reinsubstanz (rot gestrichelt).

In Abbildung 4 sind die Referenzspektren von PET, PE und PP abgebildet sowie die charakteristischen Banden von Probekörpern mit unbekanntem Substanzen. Probekörper, die die gleichen, unbekanntem charakteristischen Banden zeigten, wurden nicht mit einem Fragezeichen, sondern mit „u“ bzw. „v“ gekennzeichnet.



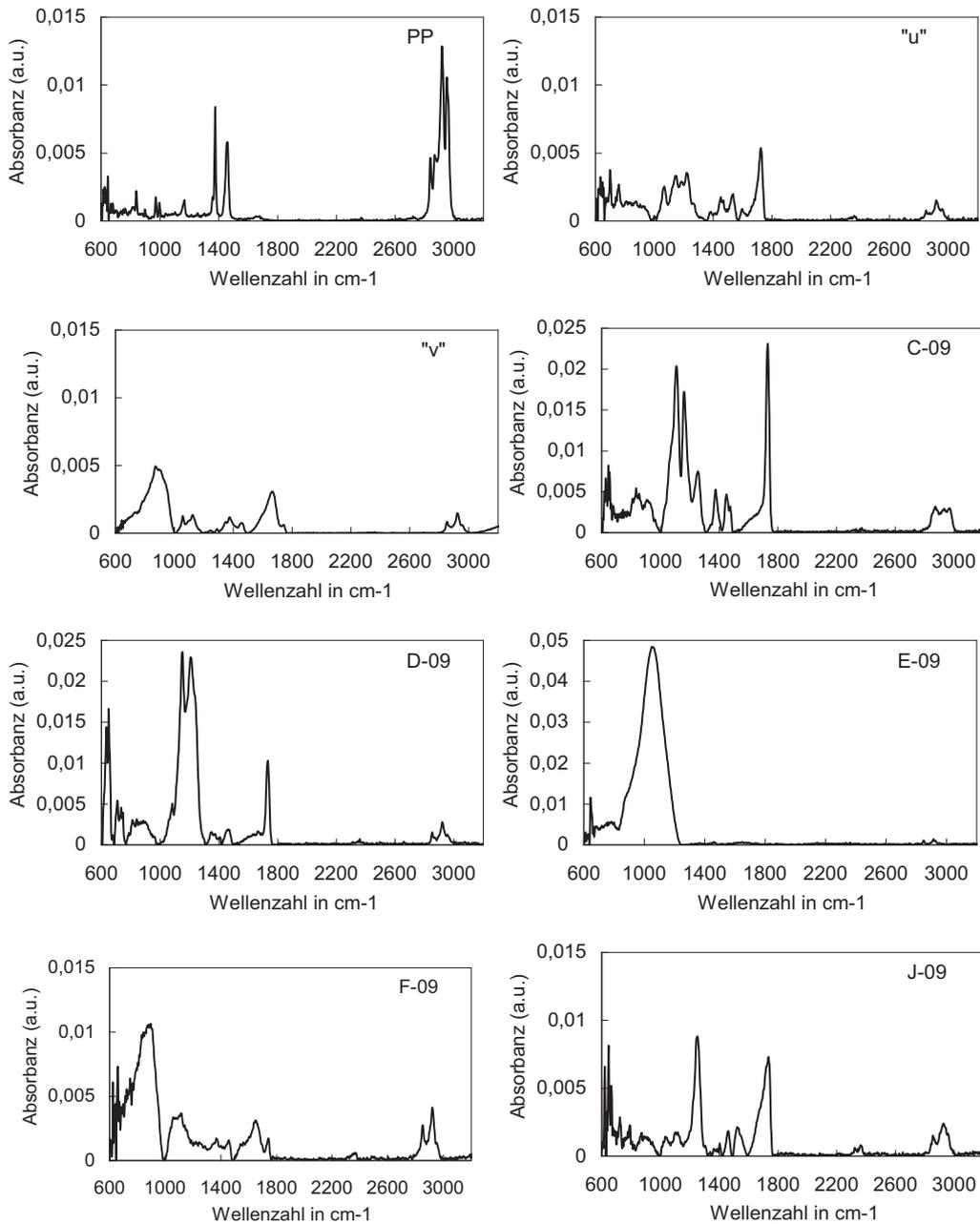


Abbildung 4 ATR-Spektren der Referenzspektren PET, PE, PP und der Probekörper mit unbekanntem Substanzen

2.2.2 Mikroskopie

Zusätzlich zur ATR-Spektroskopie wurden alle Probekörper im Querschnitt mit einem Lichtmikroskop Axioplan der Firma Zeiss bei 100-facher Vergrößerung untersucht. Neben dem Schichtaufbau wurden auch die Schichtdicken vermessen.

Die Thermoplaste (z.B. PE, PP, PET), die bei einigen Probekörpern auf der IR-aktiven Seite festgestellt wurden, und die IR-aktive Schicht konnten unter dem Mikroskop gezielt beobachtet werden (Abbildung 5).

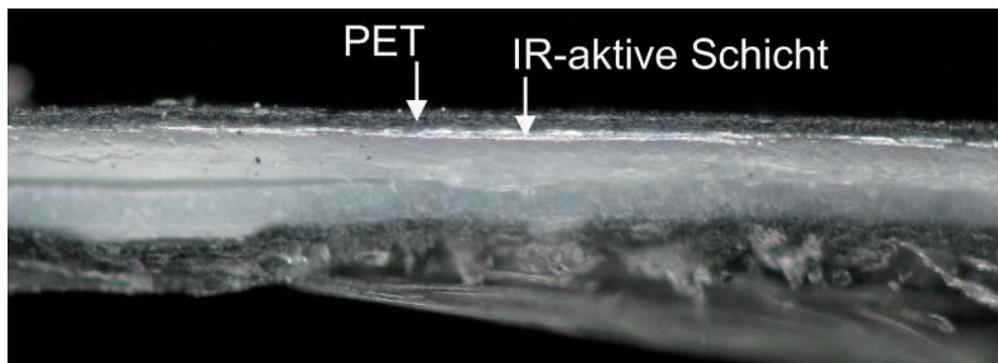


Abbildung 5 Aufnahme des Querschnitts von Probekörper H-09 bei 100-facher Vergrößerung. PET-Folie und IR-aktive Schicht sind klar erkennbar.

Der beobachtete Aufbau der Probekörper ist in den Probekörperlisten Tabelle 1 und Tabelle 2 angegeben. Die rote Linie kennzeichnet jeweils die IR-aktive Schicht. In manchen Probekörpern wurde unter dem Mikroskop Gewebe vorgefunden, das bei der Probenpräparation durchtrennt wurde. In den Tabellen ist dieses Gewebe schematisch mit Kreisen dargestellt.

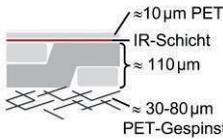
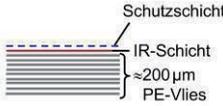
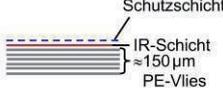
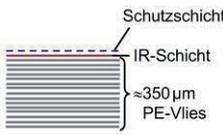
2.3 Probekörperliste

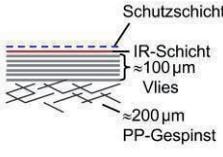
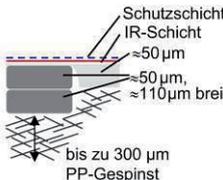
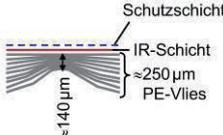
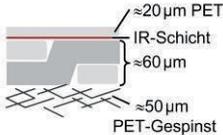
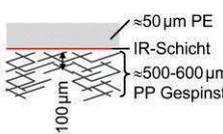
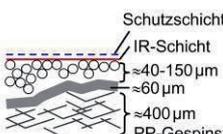
Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Probekörper sind in Tabelle 1, zusammen mit den Ergebnissen aus der Analyse der Probekörper, aufgezählt.

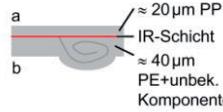
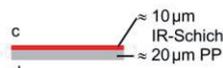
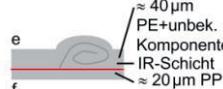
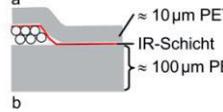
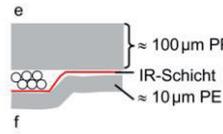


Da die Freibewitterung aus dem Vorgängervorhaben fortgesetzt und im Rahmen dieser Arbeit weiter untersucht wurde, sind die Probekörper aus dem Vorgängervorhaben in Tabelle 2 dargestellt. Die Aufstellung enthält ebenfalls die Ergebnisse aus der Analyse der Probekörper nach Ziffer 2.2.

Tabelle 1 Probekörperliste

Probekörper	normaler Emissionsgrad $\epsilon_n \pm 0,03$	ATR-Messung "IR-reflektierende Oberfläche"	Produktbeschreibung / Anwendungsbereich	Mikroskop	
				schematischer Aufbau / Querschnitt (IR-Schicht --> innen) siehe auch Ziffer 2.2.2	Gesamtdicke in μm
A-09	0,46	PET	Einlagiges Produkt, Dampfsperre		ca. 150 - 200
B-09	0,21	u	Einlagiges Produkt, FaserVLies aus PE Außenseite Steildach und Außenwand		ca. 200
C-09	0,10	?	Einlagiges Produkt, FaserVLies aus PE Außenseite Steildach und Außenwand		ca. 150
D-09	0,10	?	Einlagiges Produkt, FaserVLies aus PE Außenseite Steildach und Außenwand		ca. 350

Probekörper	normaler Emissionsgrad $\epsilon_n \pm 0,03$	ATR-Messung "IR-reflektierende Oberfläche"	Produktbeschreibung / Anwendungsbereich	Mikroskop	
				schematischer Aufbau / Querschnitt (IR-Schicht --> innen) siehe auch Ziffer 2.2.2	Gesamtdicke in μm
E-09	0,15	?	Einlagiges Produkt, Faserservlies aus PE u. Wattierung aus PP Außenseite Steildach und Außenwand		ca. 300
F-09	0,02	?	Einlagiges Produkt, Faserservlies aus PE u. Wattierung aus PP Innenseite Steildach, OG-Decke und Außenwand		ca. 330 - 600
G-09	0,27	u	Einlagiges Produkt, Faserservlies aus PE Außenseite Steildach und Außenwand		ca. 140 - 250
H-09	0,46	PET	Einlagiges Produkt, Dampfsperre		ca. 130
I-09	0,25	PE	Einlagiges Produkt, Dampfsperre		ca. 150 - 650
J-09	0,36	?	Einlagiges Produkt, Unterspan- und Unterdeckbahn		ca. 500 - 610

Probekörper	normaler Emissionsgrad $\epsilon_n \pm 0,03$	ATR-Messung "IR-reflektierende Oberfläche"	Produktbeschreibung / Anwendungsbereich	Mikroskop	
				schematischer Aufbau / Querschnitt (IR-Schicht --> innen) siehe auch Ziffer 2.2.2	Gesamtdicke in μm
K-09(a)	0,13	PP	Mehrlagiges Produkt, äußere Folien: K-09a, f innere Folien: 4 x Luftpolsterfolie aus PE 3 x K-09c/d abwechselnd		ca. 60
K-09(b)	0,16	PE + unbekannte Komponente			
K-09(c)	0,02	-/-			ca. 30
K-09(d)	0,13	PP			
K-09(e)	0,16	PE + unbekannte Komponente			ca. 60
K-09(f)	0,14	PP			
L-09(a)	0,47	PET	Mehrlagiges Produkt, äußere Folien: L-09a/b, e/f innere Folien: 7 x PET-Folie 6 x L-09c/d		ca. 110
L-09(b)	0,26	PE			
L-09(c)	0,02	-/-			ca. 30
L-09(d)	0,13	PP			
L-09(e)	0,15	PP			ca. 110
L-09(f)	0,30	PE			

Probekörper	normaler Emissionsgrad $\epsilon_n \pm 0,03$	ATR-Messung "IR-reflektierende Oberfläche"	Produktbeschreibung / Anwendungsbereich	Mikroskop	
				schematischer Aufbau / Querschnitt (IR-Schicht --> innen) siehe auch Ziffer 2.2.2	Gesamtdicke in μm
M-09	0,51	PET	Einlagiges Produkt, Dampfsperre		ca. 130 – 150
N-09	0,02	-/-	Einlagiges Produkt, Aluminium Z. B. Dämmstoffkaschierung im Rollladenkasten		ca. 60

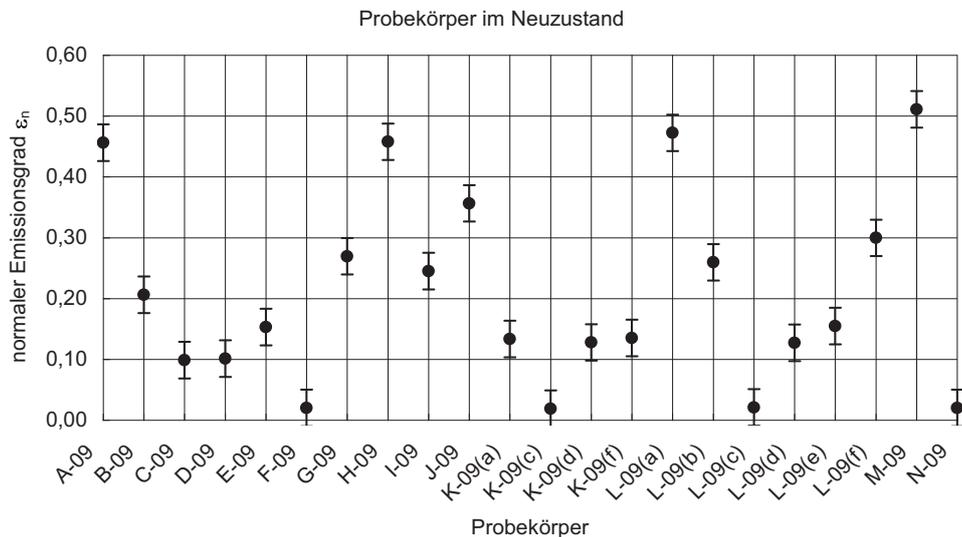
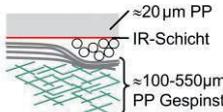
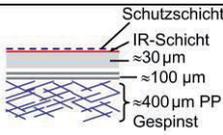
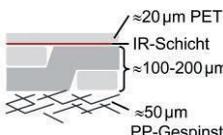
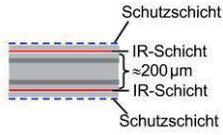
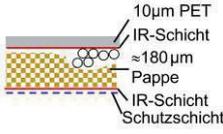
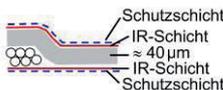
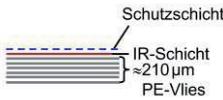
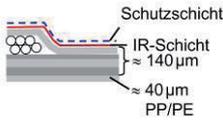
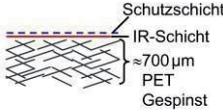
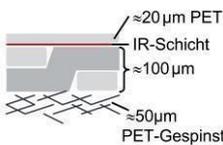
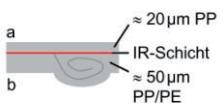
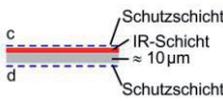
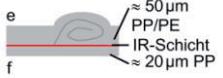
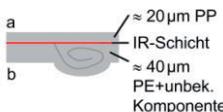
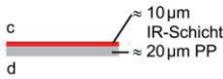
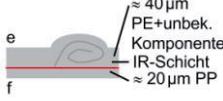


Abbildung 6 Probekörper im Neuzustand: Normaler Emissionsgrad der mit dem TIR 100 vermessenen Probekörpern im Neuzustand. Die Fehlerbalken geben die Messunsicherheit von $\pm 0,03$ wieder.

Tabelle 2 Probekörperliste „Vorgängervorhaben“

Probekörper	normaler Emissionsgrad $\epsilon_n \pm 0,03$	ATR-Messung „IR-reflektierende Oberfläche“	Mikroskop	
			schematischer Aufbau / Querschnitt (IR-Schicht --> innen)	Gesamtdicke in μm
A	0,16	PP		ca. 660
B	0,08	v		ca. 530
C	0,49	PET		ca. 300
D	0,03	v		ca. 260
L	0,03	v		
E	0,48	PET		ca. 190
M	0,03	?		
F	0,03	?		ca. 140
N	0,03	?		

Probekörper	normaler Emissionsgrad $\epsilon_n \pm 0,03$	ATR-Messung „IR-reflektierende Oberfläche“	Mikroskop	
			schematischer Aufbau / Querschnitt (IR-Schicht --> innen)	Gesamtdicke in μm
G	0,17	u		ca. 210
H	0,02	v		ca. 240
I	0,47	?		ca. 700
K	0,47	PET		ca. 230
O(a)	0,13	PP		ca. 320
O(c)	0,03	?		ca. 10
O(d)	0,02	?		
O(f)	0,13	PP		ca. 320

Probekörper	normaler Emissionsgrad $\epsilon_n \pm 0,03$	ATR-Messung „IR-reflektierende Oberfläche“	Mikroskop	
			schematischer Aufbau / Querschnitt (IR-Schicht --> innen)	Gesamtdicke in μm
Die Probekörper P(a) bis (f) entsprechen den Probekörpern K-09(a) bis (f) aus Tabelle 1				
P(a)	0,13	PP		ca. 60
P(b)	0,16	PE + unbekannte Komponente		
P(c)	0,02	-/-		ca. 30
P(d)	0,13	PP		
P(e)	0,16	PE + unbekannte Komponente		ca. 60
P(f)	0,14	PP		

2.4 Zuordnung der gemessenen Emissionsgrade und Materialien

Werden die mit Hilfe der ATR-Spektroskopie bestimmten Materialoberflächen gegen die gemessenen normalen Emissionsgrade aufgetragen (Abbildung 7), werden mehrere Gruppierungen sichtbar. So liegen alle Emissionsgrade der vermessenen Probekörper mit einer PET-Folie oberhalb der IR-aktiven Schicht in einem Bereich von 0,43 bis 0,54 (inklusive der Fehlergrenzen). Für PE erstreckt sich der Bereich von 0,22 bis 0,33, für PP von 0,10 bis 0,19. Auch für die Schutzschichten „u“ und „v“ können die Bereiche von 0,14 bis 0,30 („u“) und von 0,02 bis 0,11 („v“) beobachtet werden. Weitere Probekörper, die zwar charakteristische Banden zeigen, jedoch keiner Substanz zugeordnet werden konnten, sind mit „?“ gekennzeichnet.

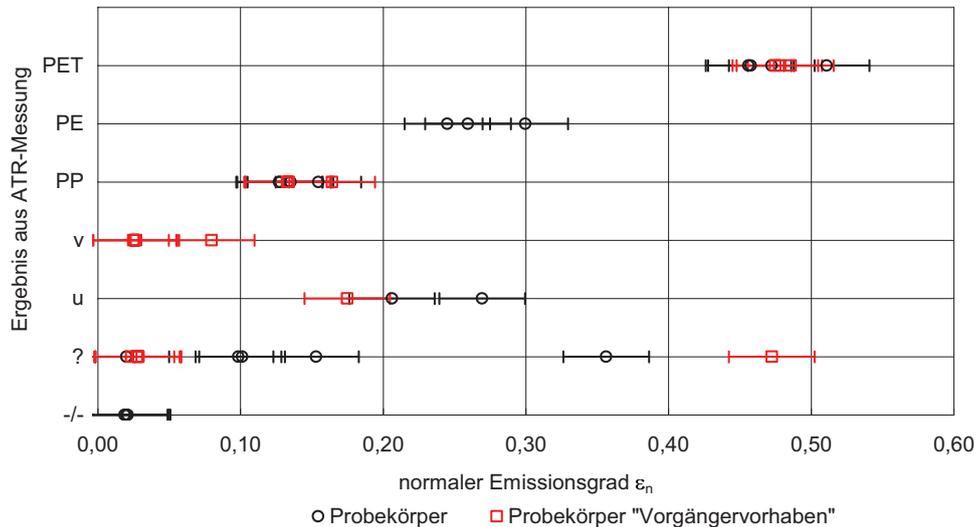


Abbildung 7 Das mit Hilfe der ATR-Spektroskopie bestimmte Material der IR-reflektierenden Oberflächen in Abhängigkeit vom gemessenen Emissionsgrad ϵ_n .

Bei den Probekörpern wird die Reflexion von elektromagnetischer Strahlung, die von einem schwarzen Körper mit 100° C ausgesandt wird, gemessen und daraus der Emissionsgrad berechnet. Die elektromagnetische Strahlung durchquert auf ihrem Weg zuerst die Folie/Schutzschicht, trifft auf die IR-aktive Schicht, an der sie schließlich reflektiert wird, und durchquert dann ein weiteres Mal die Folie/Schutzschicht, bis sie vom Detektor detektiert wird.

Gemäß dem Lambert-Beerschen Gesetz verliert elektromagnetische Strahlung einen Teil ihrer Energie durch Wechselwirkung mit der Materie. Für die Intensität I der Welle (mit der einfallenden Intensität I_0) in der Eindringtiefe x gilt mit dem Absorptionskoeffizienten α [6]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x} \quad \text{Gleichung 1}$$

Der Absorptionskoeffizient ist für jeden Stoff und für jede Wellenlänge charakteristisch. Der negative Logarithmus von I/I_0 wird als Absorbanz A bezeichnet:

$$A = \lg \frac{I_0}{I} = \alpha \cdot x \cdot \lg e \quad \text{Gleichung 2}$$



Die Absorbanz wird mit Hilfe der ATR-Spektroskopie gemessen (Ziffer 2.2.1 und [5]).

Abbildung 8 zeigt die spektrale Strahlungsdichte eines schwarzen Körpers mit 100°C. Sie soll zur Veranschaulichung der spektralen Verteilung der ausgesandten Strahlung des TIR 100 dienen. Der graue Bereich zeigt den Wellenlängenbereich, in dem die bei den Probekörpern charakteristischen Banden gemessen wurden. Der Messbereich erstreckt sich von 2,5 µm bis 16,7 µm. Da sich die Absorption von elektromagnetischer Strahlung durch die Folie/Schutzschicht auf einen Teilbereich erstreckt, der ebenso zum Messsignal beiträgt, beeinflusst die Art und die Dicke des Materials das Messsignal. Für den gemessenen Emissionsgrad gilt nach Kirchhoff [6]:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \quad \text{Gleichung 3}$$

Unter der Annahme, dass die Streuung der elektromagnetischen Strahlung durch die Moleküle vernachlässigt werden kann und nur Absorption stattfindet, kann aus den Gleichungen 1 bis 3 und den Ergebnissen geschlossen werden, dass die Absorption und damit der Emissionsgrad umso größer werden, je mehr Absorptionsbanden die Folie/Schutzschicht hat und je dicker diese ist.

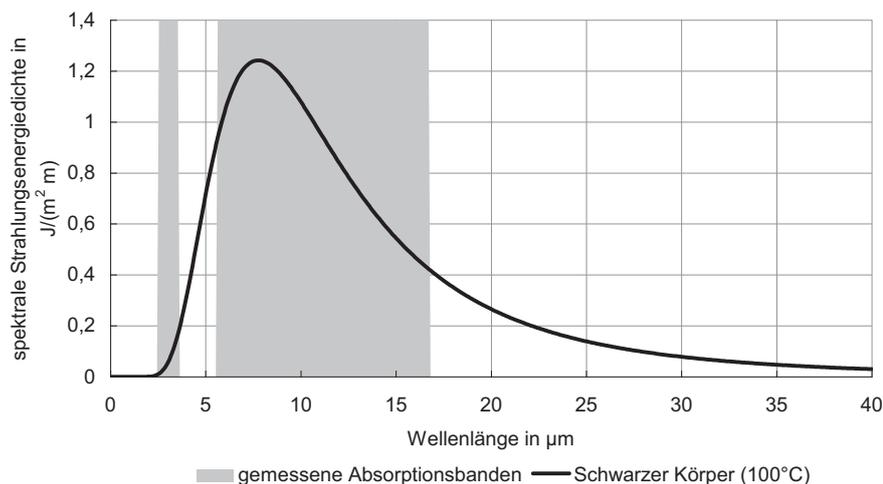


Abbildung 8 Spektrale Strahlungsenergiedichte nach dem Planckschen Strahlungsgesetz für einen schwarzen Körper mit 100°C (schwarze Linie) in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die graue Fläche beschreibt den Bereich, in dem bei den verwendeten Materialien auf der IR-aktiven Seite Absorptionsbanden gefunden wurden (Messbereich begrenzt von 2,5 µm bis 16,7 µm).



2.5 Einteilung der Foliendämmungen nach Anwendungsbereichen und Belastungen

2.5.1 Anwendungsbereiche

Nach [1] können die IR-reflektierenden Foliendämmungen, je nach Anwendung, in die folgenden Kategorien eingeteilt werden:

2.5.2 Kategorie I: Außenbereich

Eine Anwendung im Außenbereich ist die Einbausituation als Unterspannbahn. Durch Fugen, defekte Ziegel oder bei einem nicht eingedeckten Dach ist die Folie dem Außenklima ausgesetzt. Hierdurch können UV-Strahlung, hohe Temperatur, Frost bzw. Frosttauwechsel oder Verschmutzung (Staub, Fett, Ruß, Salz, etc.) auf die Folie einwirken und zu Alterungserscheinungen mit einer Erhöhung des Emissionsgrades führen. Das gleiche gilt für die Einbausituation in einer Fassade (Außendämmung). Auch hierbei können durch Fugen, Beschädigungen oder nicht geschlossene Fassaden die genannten Belastungen auftreten.

2.5.3 Kategorie II: Innenbereich

Im Innenbereich werden die Folien als Untersparrendämmung, zur Dämmung der obersten Geschossdecke, der Außenwände oder des Fußbodens verwendet. Eine Belastung durch UV-Strahlung oder hohe Temperaturen ist hier nicht zu erwarten. Eine Belastung durch Frost wäre unter extremen Bedingungen für die die Einbausituation in der obersten Geschossdecke denkbar. Eine Änderung des Emissionsgrades der Folien durch Ablagerungen (Staub, etc.) wäre möglich.

2.5.4 Belastungen

In Tabelle 3 sind häufig anzutreffende Einbausituationen für niedrigemittierende Folien und daraus resultierende Belastungen dargestellt. Diese Belastungen könnten zur Alterung der Folien und einer Änderung des Emissionsgrades beitragen. Mechanische Belastungen werden hier nicht betrachtet.

Tabelle 3 Darstellung der Einbausituation und daraus resultierende mögliche Belastungen für die Folien (mechanische Belastungen werden nicht



berücksichtigt). Die Aufstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Einbausituation	UV-Strahlung	Hohe Temperatur	Frost- bzw. Frost-Tauwechsel	Verschmutzung (Ablagerungen)
Unterspannbahn	X	X	X	X
Wand außen (unter Fassade)	X	X	X	X
Untersparrendämmung (unter Holzdachschalung)		X	X	X
Oberste Geschossdecke zum unbeheizten Dachraum			X	X
Wand innen (unter Innenverkleidung)				X
Fußboden (Holzbalkenlage, kein Kriechkeller)				X

2.5.5 Probekörper im aktuellen Forschungsvorhaben

Die Probekörper aus dem aktuellen Forschungsvorhaben sind in Tabelle 4 nach Anwendungsbereichen sortiert und daraus resultierenden, möglichen Belastungen dargestellt. Die Einteilung in die Kategorien erfolgt nach Herstellerangaben. Bei einlagigen Produkten für den Innenbereich wird davon ausgegangen, dass diese raumseitig zu einer Dämmung eingebaut werden und keinen extremen Temperaturen ausgesetzt sind. Das raumlagige Produkt L-09 wird ebenfalls raumseitig zu einer Dämmung eingebaut.

Tabelle 4 Einteilung der Probekörper aus dem aktuellen Forschungsvorhaben nach Anwendungsbereichen gemäß Herstellerangaben und möglichen Belastungen. Bei einlagigen Produkten für den Innenbereich wird unterstellt, dass diese raumseitig zu einer Dämmung eingebaut werden und keinen extremen Temperaturen ausgesetzt sind.

Probekörper	ϵ	Anwendungsbereich	Kategorie	UV-Strahlung	Hohe Temperatur	Frost- bzw. Frost-Tauwechsel	Verschmutzung Ablagerungen
A-09	0,46	Innenbereich	II				x
B-09	0,21	Außenbereich	I	x	x	x	x
C-09	0,10	Außenbereich	I	x	x	x	x

Probekörper	ϵ	Anwendungsbereich	Kategorie	UV-Strahlung	Hohe Temperatur	Frost bzw. Frost-Tauwechsel	Ver- schmut- zung Ablage- rungen
D-09	0,10	Außenbereich	I	x	x	x	x
E-09	0,15	Außenbereich	I	x	x	x	x
F-09	0,02	Innenbereich	II				x
G-09	0,27	Außenbereich	I	x	x	x	x
H-09	0,46	Innenbereich	II				x
I-09	0,25	Innenbereich	II				x
J-09	0,36	Außenbereich	I	x	x	x	x
K-09(a)	0,13	Außen- / Innenbereich	I / II	x	x	x	x
K-09(b)	0,16	Innenseite Folienpaket, geschützt	I / II		x	x	
K-09(c)	0,02		I / II		x	x	
K-09(d)	0,13		I / II		x	x	
K-09(e)	0,16		I / II		x	x	
K-09(f)	0,14		Außen- / Innenbereich	I / II	x	x	x
L-09(a)	0,47	Innenbereich unter Dämmung	II				x
L-09(b)	0,26	Innenseite Folienpaket, geschützt	II				
L-09(c)	0,02		II				
L-09(d)	0,13		II				
L-09(e)	0,15		II				
L-09(f)	0,30	Innenbereich unter Dämmung	II				x
M-09	0,51	Innenbereich	II				x
N-09	0,02	Außen- / Innenbereich	I / II	x	x	x	x



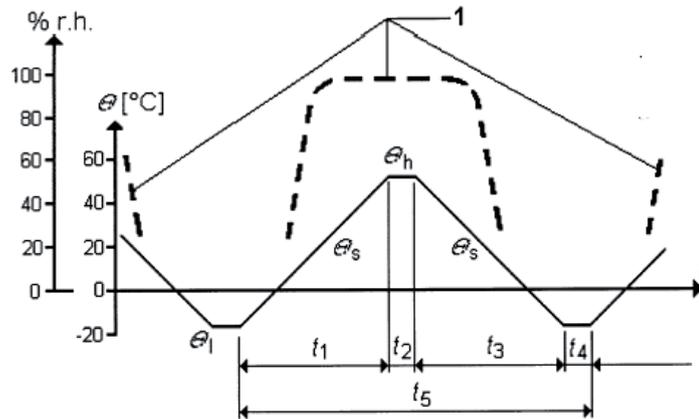
3 Alterungen und Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Alterungen und die Ergebnisse beschrieben. Die ausgewählten Alterungen wurden basierend auf den Erkenntnissen des Vorgängervorhabens ausgewählt. Die Probekörper wurden einer verlängerten Belastung durch Wechselklima (3.1) ausgesetzt. Daneben wurde an neuen Probekörpern die Freibewitterung (3.2.1) durchgeführt und die Freibewitterung aus dem Vorgängervorhaben (3.2.2) fortgesetzt. In zwei realen Dächern (3.2.3 und 3.2.4) wurden Probekörper eingebaut, um hier insbesondere den Einfluss der Verschmutzung zu untersuchen. Des Weiteren wurden die Probekörper ca. 7 Monate nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), 27 Tage mit UV-Strahlung (3.4) und 30 Minuten mit einem Kochtest (3.5) belastet.

3.1 Wechselklima

Diese Prüfung wurde bereits im Vorgängervorhaben in Anlehnung an die EN 1279-2 [7] durchgeführt. Umfang und Dauer der Prüfung wurden verändert: Die durchgeführte Alterung umfasst einen gesamten Belastungszeitraum von sechs mal vier Wochen. Alle vier Wochen wurden die Probekörper aus dem Wechselklima entnommen und der Emissionsgrad bestimmt. In jeder Woche wurden 14 je 12-stündige Temperaturzyklen zwischen -18 °C und $+53\text{ °C}$ mit Änderungen von 14 °C/h gefahren (Abbildung 9). Während eines Zyklus schwankt die relative Luftfeuchte in der Kammer zwischen 60 % und 100 %. Ein geeigneter Ständer sorgte dafür, dass die Probekörper weder untereinander noch mit anderen Probekörpern oder deren Kondensat in Berührung kommen können. Der Abstand zwischen den Probekörpern hat etwa 5 cm betragen, hierdurch wurde eine ausreichende Luftzirkulation gewährleistet.

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Messungen grafisch dargestellt. Daraus lässt sich schließen, dass innerhalb der Fehlergrenzen keine Änderung des normalen Emissionsgrades durch die durchgeführte Belastung Feuchte- und Temperaturwechsel eingetreten ist. Bei den Probekörpern A-09 und H-09 waren lokale, optische Veränderungen zu beobachten (Abbildung 11). Ein Einfluss von Feuchte- und Temperaturwechsel auf den Emissionsgrad dieser Probekörper konnte nicht beobachtet werden.



Legende

- 1 Relative Luftfeuchte während des Temperaturzyklus. Höchstwert von $RH \geq 95\%$. Während der Kaltphase des Zyklus wird die hohe Feuchte unterbrochen. Zeitweilige Kondensation an den Prüfscheiben ist zulässig.
 Zeitintervalle: $t_1 = 5\text{ h}$, $t_2 = 1\text{ h}$, $t_3 = 5\text{ h}$, $t_4 = 1\text{ h}$, $t_5 = \text{Gesamtzykluszeit } 12\text{ h}$
 Toleranzen bei den Zeitintervallen: weniger als 1 min.
 Temperaturen der mittleren Prüfscheibe während des Zyklus:
 — $\theta_h = (53,0 \pm 1,0) \text{ }^\circ\text{C}$ (hohe Temperatur)
 — $\theta_l = (-18,0 \pm 1,0) \text{ }^\circ\text{C}$ (niedrige Temperatur)
 — $\theta_s = (14 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C/h}$ (Steigungen)

Abbildung 9 Temperatur/Zeit und Feuchte/Zeit Beziehung während des Wechselzyklus [7]

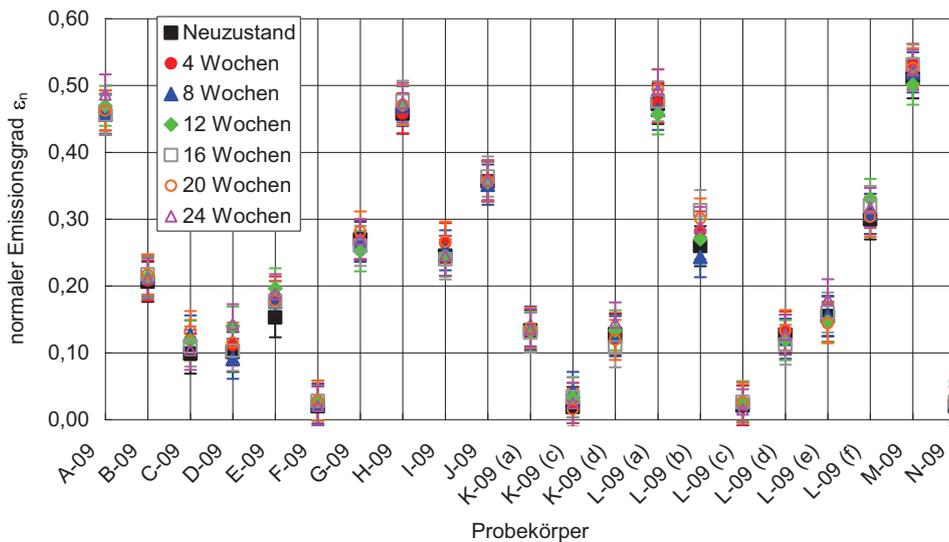


Abbildung 10 Normaler Emissionsgrad der im Wechselklima gealterten Probekörper im Neuzustand, nach 4, 6, 12, 16, 20 und 24 Wochen.

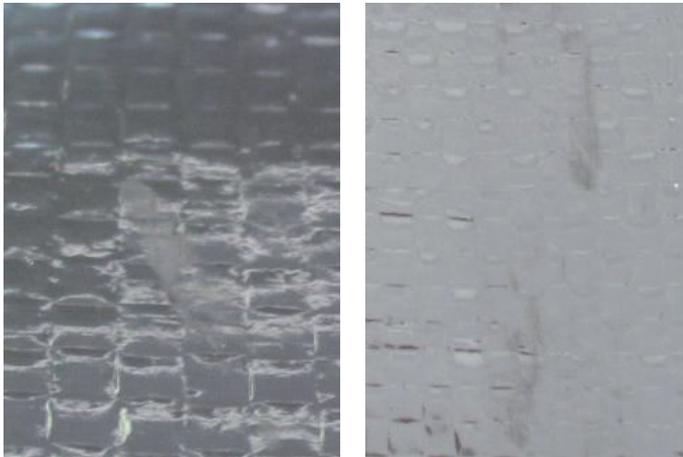


Abbildung 11 Probekörper A-09 (links) und Probekörper H-09 (rechts) nach 24 Wochen Belastung im Wechselklima. Die weißen bzw. grauen Stellen sind ca. 5 mm groß

3.2 Freibewitterung

Die Freibewitterung wurde analog der Freibewitterung aus dem Vorgängervorhaben durchgeführt. Ein Probekörpersatz wurde geschützt in Kästen eingebaut, so dass auf die Probekörper nur Luftfeuchte, Luftdruck, Luftverschmutzung und Temperatur einwirken können, vor Niederschlag und direkter UV-Strahlung sind diese Probekörper geschützt (Abbildung 12, Abbildung 13). Dies entspricht z.B. einer Einbausituation DAD entsprechend DIN 4108-10 [8]. Auf die Oberseite der geschlossenen Kästen wurde ein weiterer Probensatz angebracht, deren IR-aktive Seite der Bewitterung direkt ausgesetzt war (Abbildung 12, Abbildung 14). Der Emissionsgrad der Probekörper wurde in regelmäßigen Abständen bestimmt.

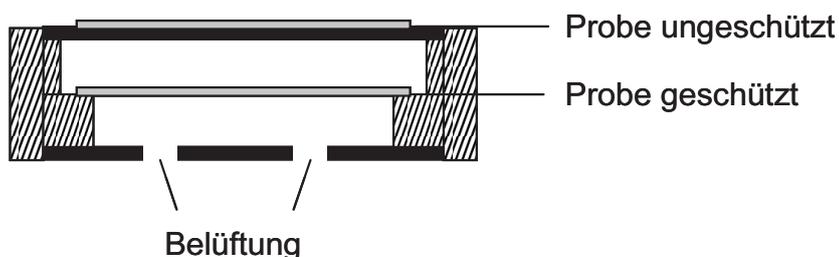


Abbildung 12 Querschnitt eines Kastens (schematische Darstellung)



Abbildung 13 Geschützt eingebaute Proben für die geschützte Freibewitterung vor Montage der Abdeckung. Das Foto zeigt Probekörper aus dem Vorgängervorhaben (Tabelle 2) und Probekörper aus Tabelle 1



Abbildung 14 Der Witterung ausgesetzte Proben für die ungeschützte Freibewitterung. Das linke Foto zeigt Probekörper aus dem Vorgängervorhaben (Tabelle 2), das rechte Foto einen Teil der Probekörper aus Tabelle 1



3.2.1 Freibewitterung der Probekörper (Tabelle 1)

Abbildung 15 zeigt die Ergebnisse der Emissionsgradmessungen der Probekörper im Zeitraum von circa 2, 4, 6 und 8 Monaten in der „ungeschützten“ Freibewitterung.

Bei der „ungeschützten“ Freibewitterung konnte an den Probekörpern B-09, E-09, G-09, H-09, I-09 und L-09(f) eine Änderung des Emissionsgrades gegenüber dem Neuzustand beobachtet werden. Die restlichen Probekörper aus der „ungeschützten“ Freibewitterung zeigten im Rahmen der Messunsicherheit keine signifikante Änderung des Emissionsgrades.

Die Änderungen der Emissionsgrade über die Dauer der „ungeschützten“ Freibewitterung sind in Abbildung 16 dargestellt. Bei Probekörper L-09(a) und L-09(f) lösen sich stellenweise die einzelnen Lagen ab, aus denen der Probekörper besteht. Abbildung 17 zeigt den Probekörper L-09(f) nach circa 8 Monaten „ungeschützter“ Freibewitterung und das zugehörige Rückstellmuster. Bei den Probekörpern A-09, H-09 und I-09 war eine Staubschicht (Abbildung 18) zu beobachten.

Bei den Probekörpern mit verändertem Emissionsgrad bestehen die Materialien auf der IR-aktiven Seite aus PE (I-09, L-09(f)), Schutzschicht „u“ (B-09, G-09), einer unbekanntem Schutzschicht „?“ (E-09) und PET (H-09).

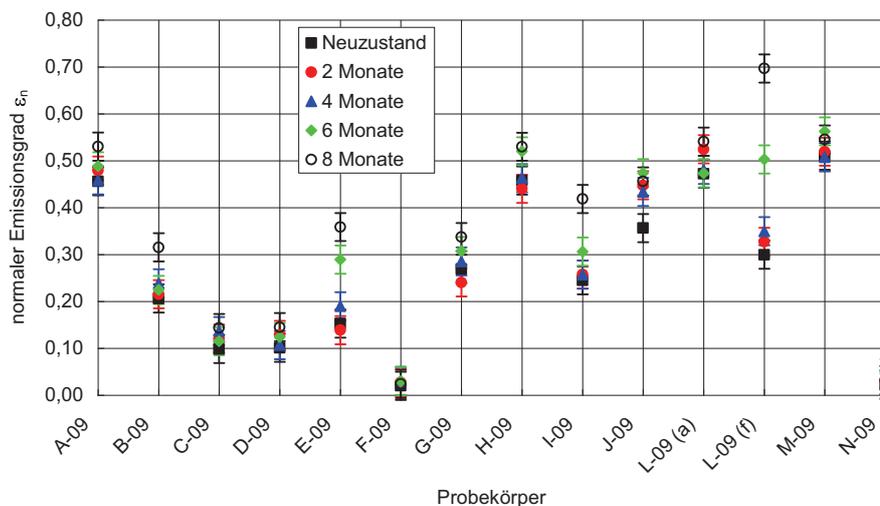


Abbildung 15 Gemessene Emissionsgrade der Probekörper in der „ungeschützten“ Freibewitterung nach ca. 2, 4, 6 und 8 Monaten

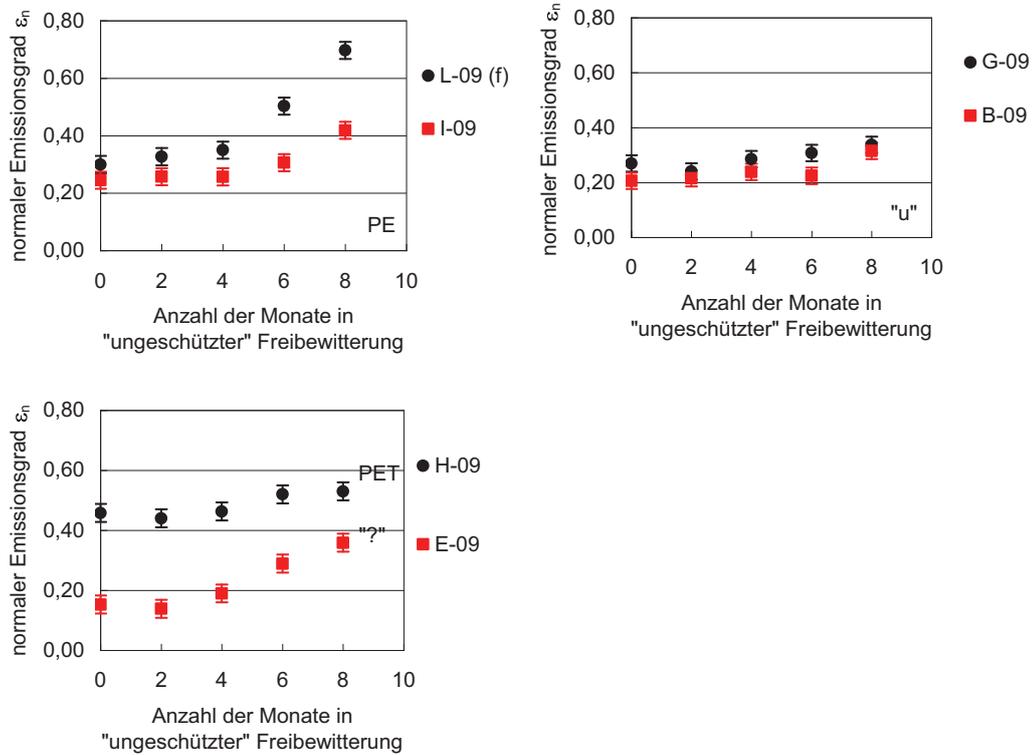


Abbildung 16 Veränderung des Emissionsgrades der Probekörper B-09, E-09, G-09, H-09, I-09 und L-09(f) über die Dauer der „ungeschützten“ Freibewitterung“

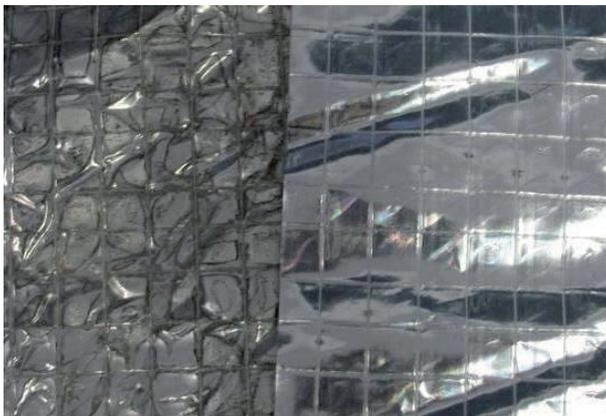


Abbildung 17 Probekörper L-09 (f) nach ca. 8 Monaten „ungeschützter“ Freibewitterung (links) mit Rückstellmuster (rechts)

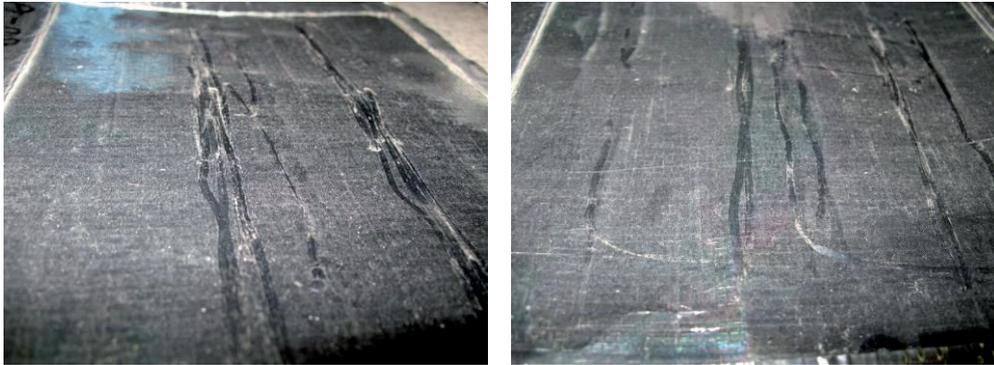


Abbildung 18 Probekörper A-09 (links) und H-09 (rechts) nach ca. 8 Monaten „ungeschützter“ Freibewitterung. Zu erkennen sind Staubablagerungen und „Spuren“ durch die Auflage des Messgeräts zur Messung

Bei der „geschützten“ Freibewitterung konnte beim Probekörper J-09 eine geringfügige Veränderung des Emissionsgrades über die Dauer der Freibewitterung beobachtet werden (Abbildung 19). Alle anderen Probekörper zeigten im Rahmen der Messunsicherheit keine signifikante Änderung des Emissionsgrades. Bei den Probekörpern A-09, F-09, H-09 und L-09(a) waren wie in Abbildung 18 Staubablagerungen beobachtbar. Ansonsten zeigten sich keine optischen Veränderungen gegenüber den Rückstellmustern.

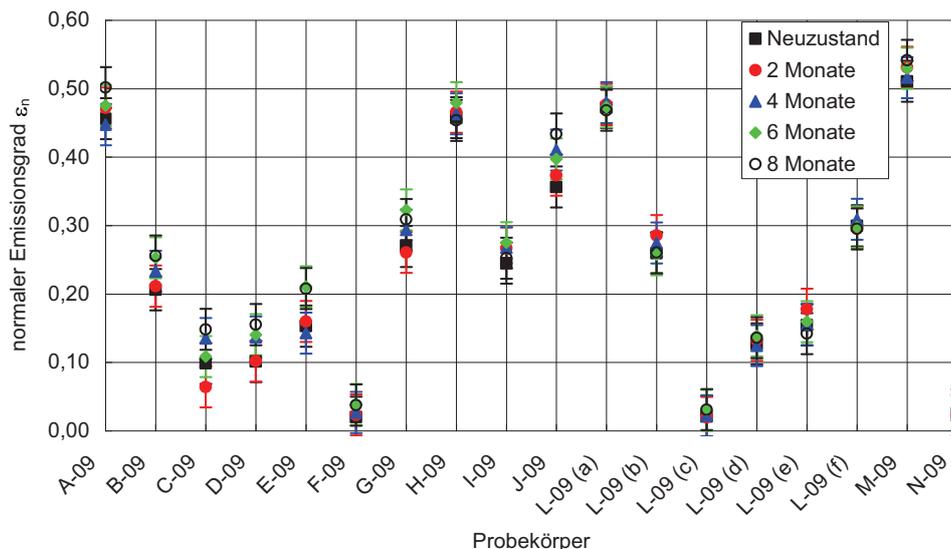


Abbildung 19 Probekörper A-09 bis L-09 (f) in der „geschützten“ Freibewitterung. Die Messung des Emissionsgrades erfolgte nach ca. 2, 4, 6 und 8 Monaten.

3.2.2 Fortgeführte Freibewitterung der Probekörper aus dem Vorgängervorhaben (Tabelle 2)

Die Freibewitterung der Probekörper aus dem Vorgängervorhaben wurde fortgeführt. Die Probekörper „Vorgängervorhaben“ wurden weiterhin regelmäßig vermessen und befinden sich nun seit ca. 20 Monaten in der Freibewitterung (Abbildung 21 und Abbildung 22). Probekörper, bei denen Korrosion der IR-aktiven Schicht oder Ablösen von einzelnen Schichten beobachtet wurde (Abbildung 20), wurden nach erfolgter Messung nicht mehr eingebaut.

Bei den Probekörper des Vorgängervorhabens A, B, D, E, G, H, L, M, O(a) und P(a) können signifikante Änderungen im Emissionsgrad durch die „ungeschützte“ Freibewitterung beobachtet werden (Abbildung 21). Von diesen Probekörpern wurden über die Dauer der Freibewitterung mehrere Probekörper aus der Freibewitterung entnommen, weil diese sich z.B. durch Ablösen von einzelnen Schichten oder Korrosion gegenüber dem Rückstellmuster verändert haben. Die Probekörper des Vorgängervorhabens C, F K und N zeigen keine, Probekörper I eine geringe Änderung des Emissionsgrades über einen gesamten Zeitraum von ca. 20 Monaten in der „ungeschützten“ Freibewitterung. Bei C und K haben sich die Emissionsgrade nicht signifikant geändert, es können jedoch Staubablagerungen auf C und K beobachtet werden, F und I zeigen eine leichte Farbänderung gegenüber dem Rückstellmuster, bei G und N sind im Vergleich zum Rückstellmuster keine Veränderungen beobachtbar.

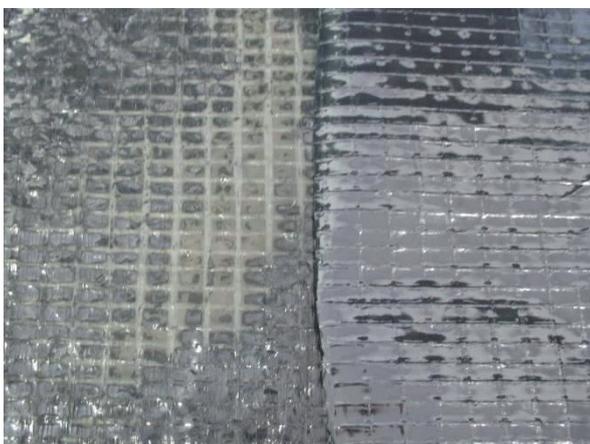


Abbildung 20 Probekörper O(a) (links) mit Rückstellmuster (rechts). Deutlich ist die Korrosion der IR-aktiven Schicht zu erkennen.

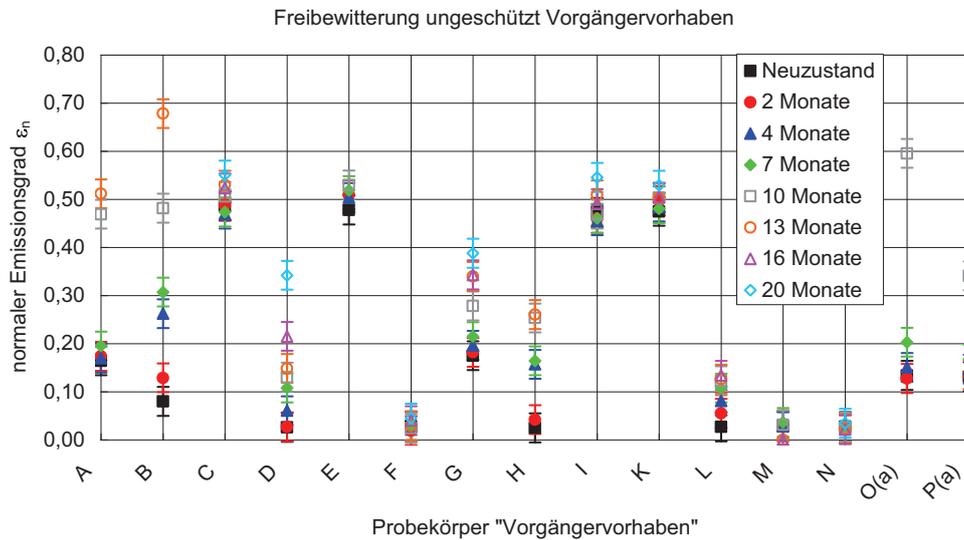


Abbildung 21 Probekörper des Vorgängervorhabens in der „ungeschützten“ Freibewitterung. Die Emissionsgrade wurden nach ca. 2, 4, 7, 10, 13, 16 und 20 Monaten vermessen.

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse aus der „geschützten“ Freibewitterung über ca. 20 Monate eingezeichnet. Es konnten deutliche Änderungen im Emissionsgrad bei den Probekörpern B, D, G, H, L und M beobachtet werden. Bei den restlichen Probekörpern aus dem Vorgängervorhaben konnte keine signifikante Änderung des Emissionsgrades beobachtet werden. Alle Probekörper bedeckt eine dünne Staubschicht.

Abbildung 23 zeigt die Änderung der Emissionsgrade der Probekörper B, D, G, H, L und M über die Dauer der „geschützten“ Freibewitterung.

Die Probekörper B, D; H und L sind gemäß der ATR-Messung mit derselben, unbekanntem Schutzschicht „v“ oberhalb der IR-aktiven Schicht versehen. Bei den Probekörpern G und M wurden unterschiedliche ATR-Spektren und damit unterschiedliche, unbekanntete Schutzschichten beobachtet.

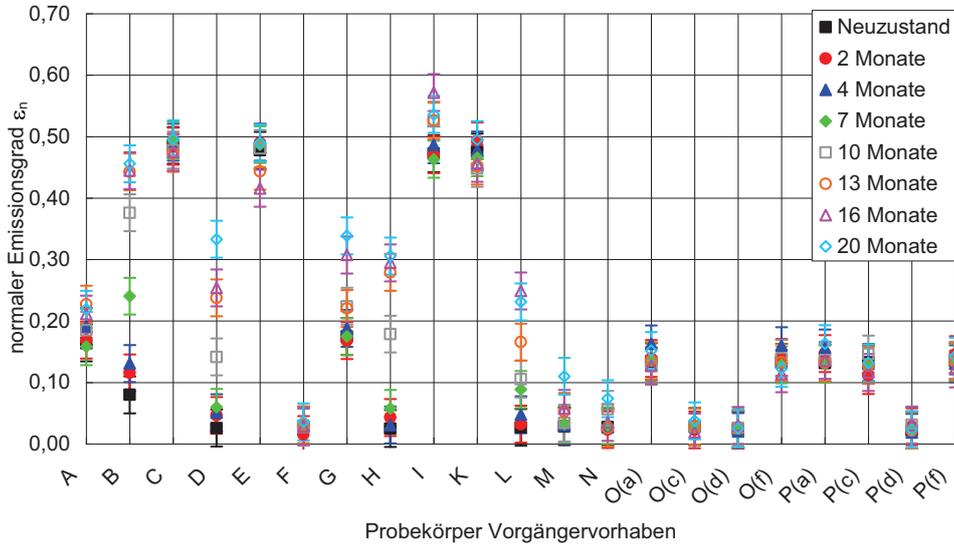


Abbildung 22 Probekörper des Vorgängervorhabens in der „geschützten“ Freibewitterung. Die Emissionsgrade wurden nach ca. 2, 4, 7, 10, 13, 16 und 20 Monaten vermessen.

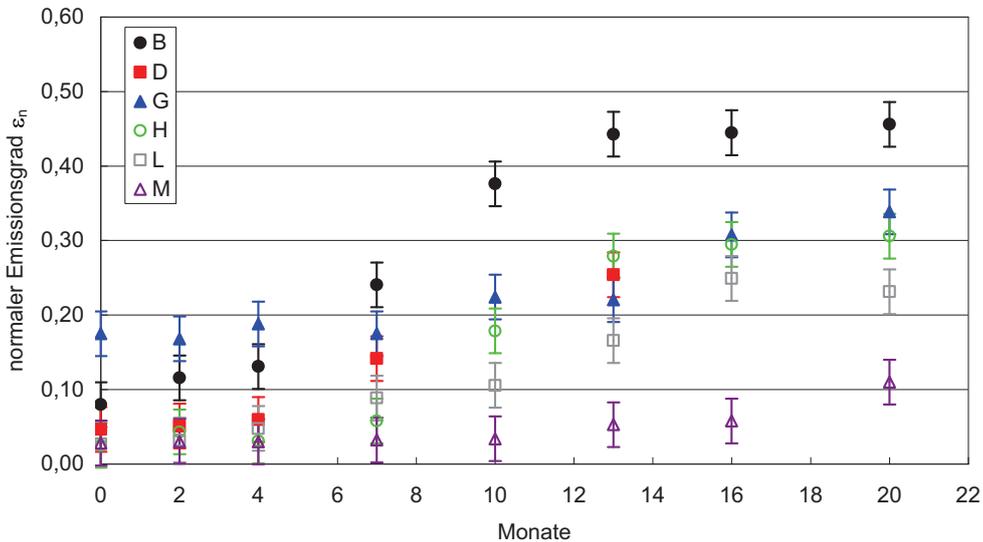


Abbildung 23 Probekörper des Vorgängervorhabens aus der „geschützten“ Freibewitterung, die eine Änderung des Emissionsgrades aufweisen. Verlauf der Änderung des Emissionsgrades in Abhängigkeit von der Dauer der „geschützten“ Freibewitterung



3.2.3 Realversuch der Probekörper A-09 bis J-09

Die Probekörper A-09 bis J-09 wurden im November 2009 im DIN A3 Format in einem Vordach unterhalb der Dachziegel zwischen Lattung und Bitumen-Dachbahn eingebaut (Abbildung 24).

Eine erste Messung erfolgte im Juli 2010, eine zweite Messung im November 2010. Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Sowohl nach neun als auch nach zwölf Monaten konnte kein verändertes Emissionsvermögen gemessen werden. Bei den Probekörpern A-09, D-09, F-09, G-09, H-09 und I-09 wurden zudem die ebenfalls teilweise in der Freibewitterung auf dem Labordach des ift Rosenheim aufgetretenen Staubablagerungen beobachtet.



Abbildung 24 Probekörper eingebaut in einem Vordach

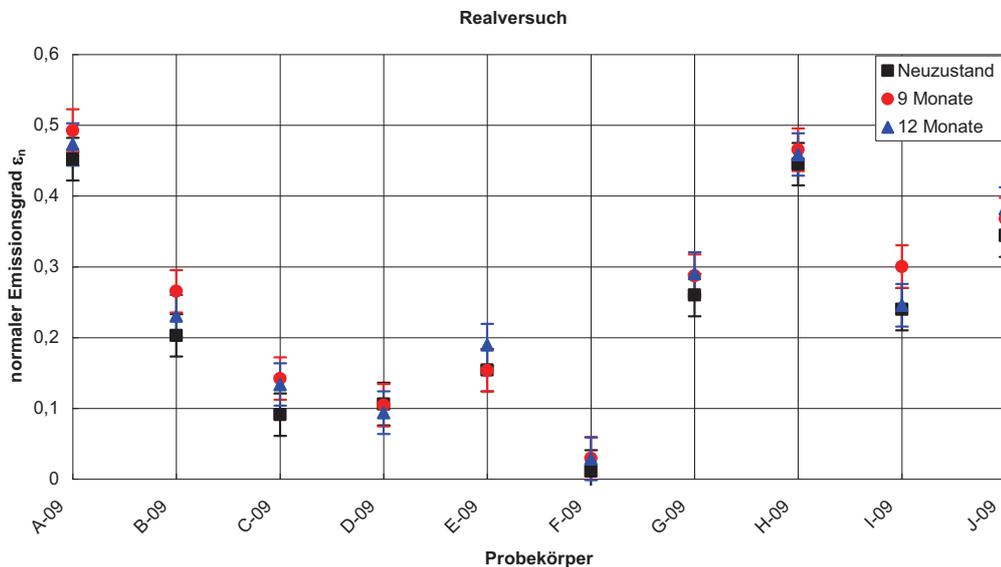


Abbildung 25 Probekörper im Realversuch. Die eingebauten Probekörper wurden nach 9 und 12 Monaten vermessen.

3.2.4 Realversuch des Probekörpers K

Von der Probe K-09 (hier als vollständiges, mehrlagiges Produkt) wurden in einem „Realversuch“ zwei identische Probekörper (1 und 2) in ein existierendes Dach eingebaut. Das Dach war mit gewellten Eternit-Platten eingedeckt und hatte eine Neigung von ca. 30° (Abbildung 26). Der Einbau erfolgte im Gefach zwischen den Sparren. Die Luftschicht zwischen der Oberseite der Foliendämmung und der Eindeckung des Daches war hinterlüftet.

Nach dem Ausbau zeigten die Probekörper deutliche Verschmutzungen (Abbildung 27), wobei Probekörper 1 optisch geringfügig stärker verschmutzt war als Probekörper 2.

Der Emissionsgrad wurde vor dem Einbau der Foliendämmung und nach dem Ausbau, nach ca. 12 Monaten, an der äußeren Folie K-09(a) bestimmt (Abbildung 28). Die Messungen zeigen beim Probekörper 1 im Rahmen der Messunsicherheit eine geringe Erhöhung des Emissionsgrades. Probekörper 2 zeigt keine Erhöhung des Emissionsgrades.



Abbildung 26 Einbausituation im Dach nach Ausbau der Probekörper

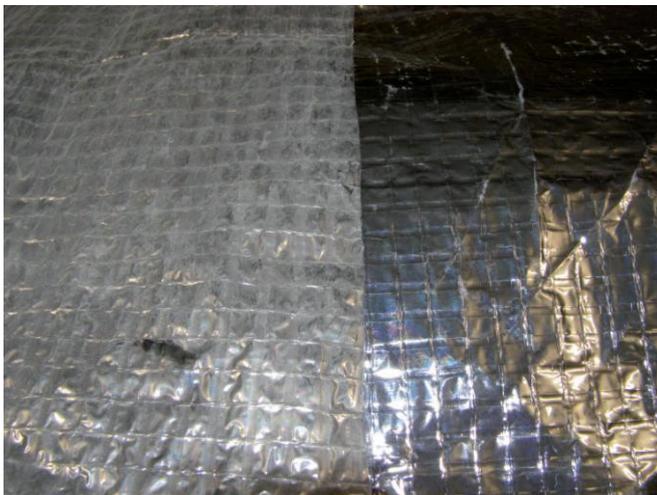


Abbildung 27 Links die verschmutzte Oberseite der Folie K-09 (vollständiges, mehrlagiges Produkt), rechts die nahezu sauber gebliebene Rückseite nach ca. 12 Monaten im hinterlüfteten Dach

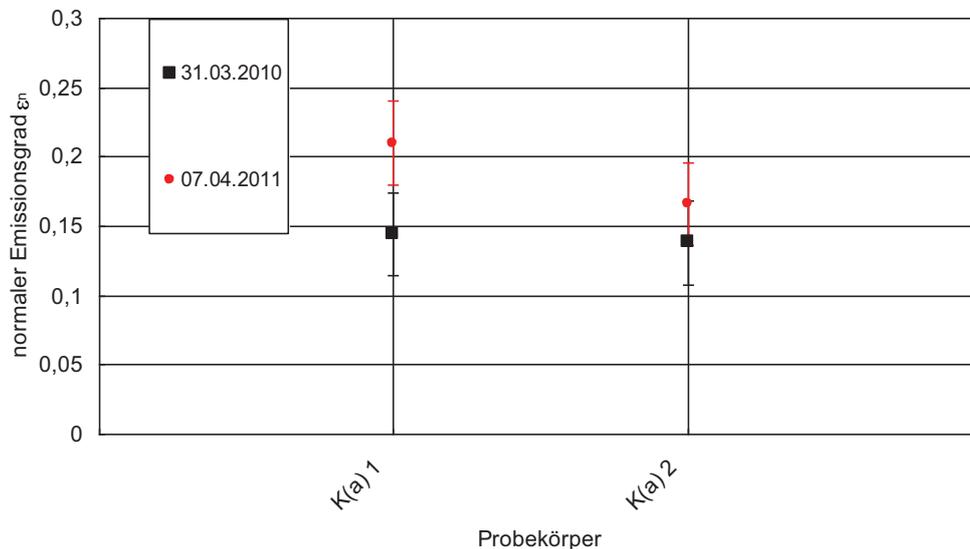


Abbildung 28 Emissionsgrad der beiden, identischen Probekörper K-09 (vollständiges, mehrlagiges Produkt) vor dem Dacheinbau und nach dem Ausbau, nach ca. 12 Monaten

3.3 Beurteilungsgrundlagen der EOTA

Für Produkte, die IR-reflektierende Komponenten besitzen und zur Wärmedämmung in der Gebäudehülle eingesetzt werden, existieren Beurteilungsgrundlagen der EOTA [9], die eine künstliche Alterung beschreiben. Nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA werden die Probekörper für 28 Tage einer Temperatur von 70 °C und einer Raumluftfeuchte von 90 % ausgesetzt. Dieses Verfahren ist mittlerweile auch in den Normenentwurf zur DIN EN 16012 eingearbeitet worden [10]. Bei mehrlagigen Produkten wurden die einzelnen Lagen herausgetrennt und gealtert.

In Anlehnung an das vorhergehende Forschungsvorhaben [1] wurde die Alterung nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA über einen längeren Zeitraum fortgesetzt. Über 215 Tage wurden die Probekörper bei 70 °C und 90 % rel. Luftfeuchte gelagert. Den Einbau der Probekörper in den Klimaschrank zeigt Abbildung 29. Während der ca. 7-monatigen Belastung wurde der Emissionsgrad in regelmäßigen Abständen gemessen.



In Abb. 30 und 31 ist zu erkennen, dass die Wärme- und Feuchtebelastung nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA über einen Zeitraum von ca. 7 Monaten lediglich bei den Probekörpern J-09, K-09(c) und L-09(c) den Emissionsgrad beeinflusst. Die anderen Probekörper zeigen im Rahmen der Messunsicherheit keine Änderung des Emissionsgrades.



Abbildung 29 Probekörper im Klimaschrank, vor der Alterung nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA

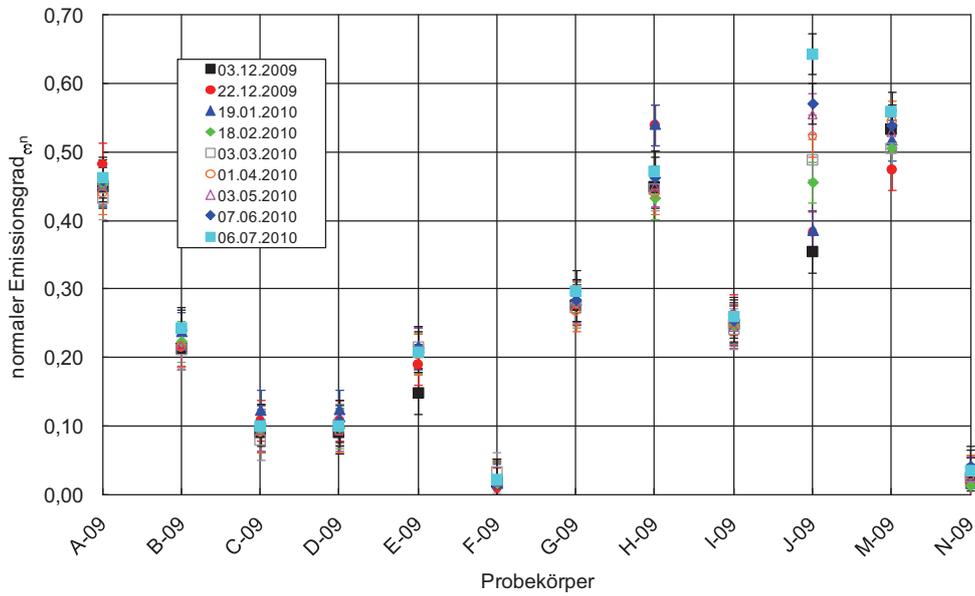


Abbildung 30 Probekörper A-09 bis J-09, M-09 und N-09 mit ca. 7-monatiger Belastung nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA (70 °C und 90 % r. F.)

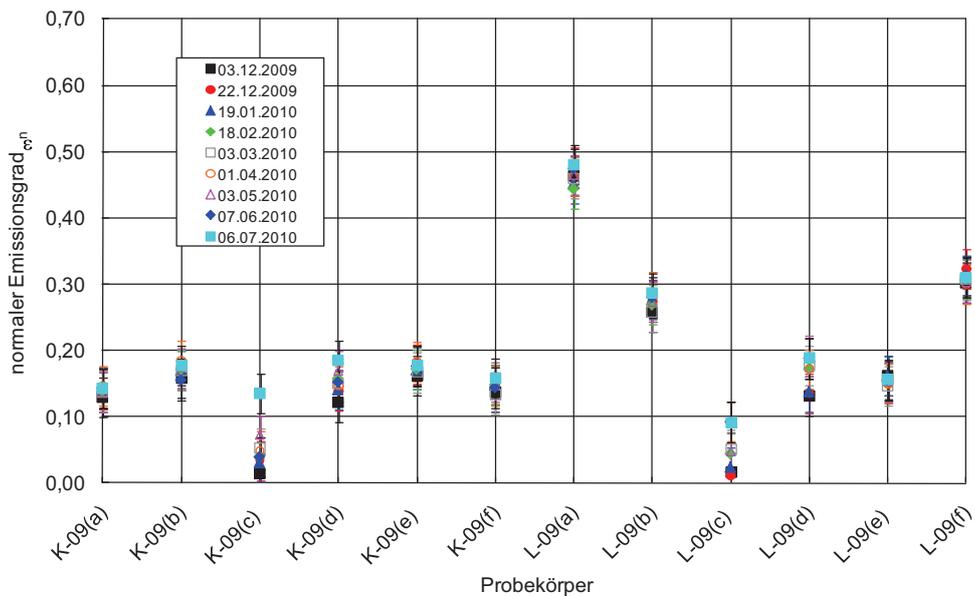


Abbildung 31 Probekörper K-09 und L-09 mit ca. 7-monatiger Belastung nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA (70 °C und 90 % r. F.)



3.4 UV-Bestrahlung

In Anlehnung an die DIN EN 13859-1:2009-01 [11] Anhang C wurden die Proben einer intensiven UV-Strahlung ausgesetzt. Abweichend von der Norm wurden die Proben allerdings länger bestrahlt und nicht in einer Klimakammer nachbehandelt. Die UV-Exposition dauerte 27 Tage an und wurde bei einer Schwarzstandard-Temperatur von 50 °C durchgeführt. Dies entspricht einer Gesamtbestrahlung von 106 MJ/m². Eine Wassersprühvorrichtung war nicht in Betrieb. Während dieser Zeit wurden sieben Messungen des Emissionsgrades vorgenommen.

Die Probe K-09(a) zeigte durch die UV-Bestrahlung eine starke Beschädigung. Die ausgebaute Probe zeigt Abbildung 32.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 33 dargestellt. Bei vier von 16 Probekörpern, nämlich I-09, K-09(a), L-09(f) und M-09, zeigt sich eine Zunahme des Emissionsgrades. Für die restlichen Probekörper wurde im Rahmen der Messunsicherheit keine Erhöhung des Emissionsgrades festgestellt.

Bei den Probekörpern B-09 und G-09 zeigt sich eine leichte Abnahme des Emissionsgrades. Gemeinsam haben diese Probekörper über der IR-aktiven Schicht die gleiche, unbekannte Schutzschicht, die in 2.2.1 mit „u“ bezeichnet wird. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten wäre, dass sich die Schutzschicht zersetzt und damit dünner wird. In Folge wird weniger Strahlung in der Schutzschicht absorbiert und der Emissionsgrad sinkt. Eine alternative Möglichkeit wäre, dass sich durch die UV-Belastung die molekulare Struktur der Schutzschicht ändert, so dass weniger Absorption im gewählten Messbereich stattfindet.

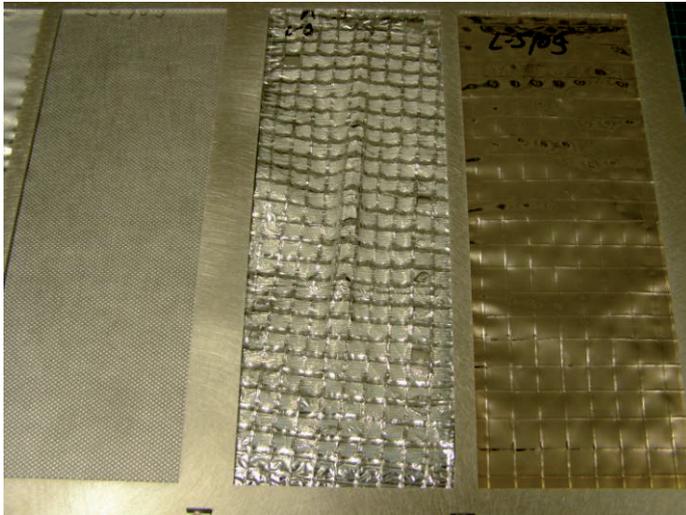


Abbildung 32 Probekörper nach der UV-Bestrahlung. Der Probekörper K-09(a) (Mitte) wurde stark beschädigt.

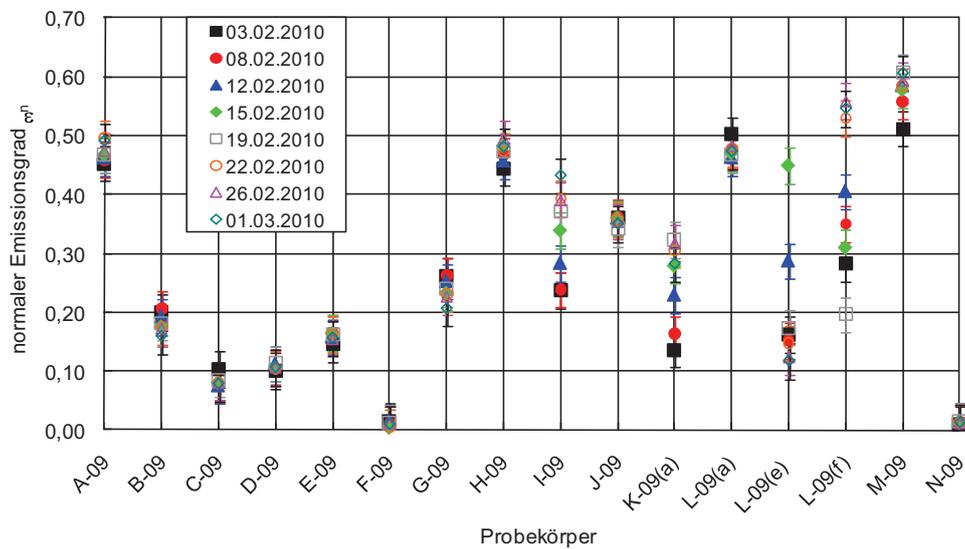


Abbildung 33 Normaler Emissionsgrad der Probekörper nach 27-tägiger UV-
Belastung

3.5 Kochtest

Bei diesem Schnelltest, dem sogenannten Kochtest, wurden die Probekörper jeweils 15 Minuten über kochendes Wasser gehalten, getrocknet und anschließend der Emissionsgrad gemessen. Diese Prozedur wurde ein zweites Mal wiederholt, so dass die Probekörper insgesamt 30 Minuten dem Wasserdampf ausgesetzt waren.

Die Probekörper B-09 und I-09 zeigen einen erhöhten Emissionsgrad nach der Belastung. Abbildung 34 stellt den Emissionsgrad der Proben jeweils vor und nach den Belastungen dar.

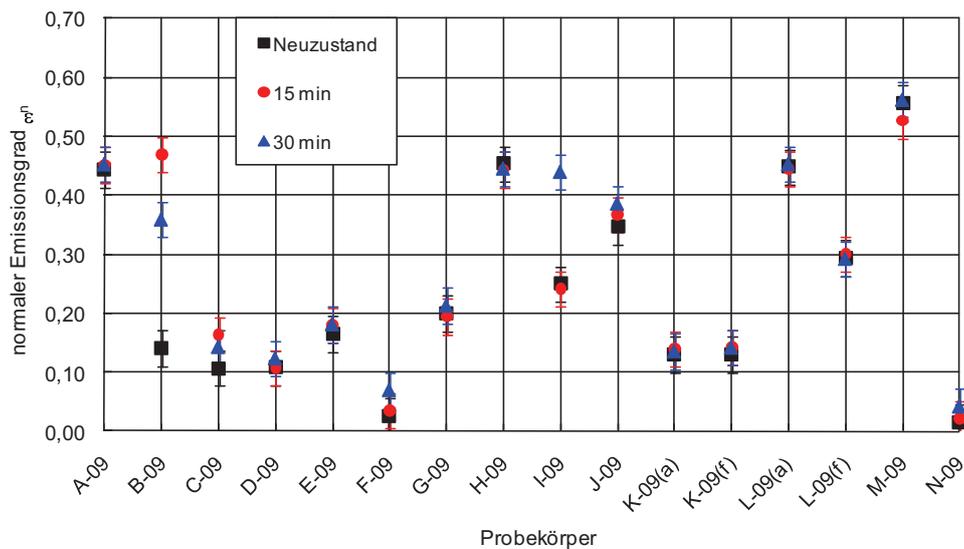


Abbildung 34 Probekörper nach 15 min und 30 min Kochtest



3.6 Zusammenfassung der Messergebnisse aus den Alterungsverfahren

Die Belastung mit dem Wechselklima hat den Emissionsgrad der hier verwendeten Probekörper praktisch nicht beeinflusst. Auch die in den Realversuchen vorgefundene dünne Staubschicht zeigt keinen bzw. nur einen geringen Einfluss auf den Emissionsgrad. Die Belastung nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA wurde auf ca. 7 Monate ausgedehnt. Unter dieser Belastung zeigen aber lediglich drei der 24 Probekörper eine Änderung des Emissionsgrades. Der UV-Test wurde über ca. 4 Wochen durchgeführt. Bei dieser Untersuchung zeigten 4 von 16 Probekörpern eine Zunahme des Emissionsgrades. Mit dem Kochtest-Verfahren konnte ebenfalls bei 4 von 16 Proben eine Zunahme des Emissionsgrades festgestellt werden.

Die lang andauernde Freibewitterung zeigt von den durchgeführten Belastungen den größten Einfluss auf den Emissionsgrad der Probekörper. Abbildung 35 und Abbildung 36 zeigen die Änderung des Emissionsgrades in der „geschützten“ und „ungeschützten“ Freibewitterung, abhängig vom Material auf der IR-aktiven Seite. In den Diagrammen sind die Messergebnisse aus dieser Arbeit und dem vorangegangenen Vorhaben enthalten. Die Änderungen $\Delta \epsilon$ ergeben sich jeweils aus der letzten Messung abzüglich der Ausgangswerte. Die Werte unterhalb der gestrichelten Linie repräsentieren die Probekörper, die im Rahmen der Messunsicherheit keine signifikante Änderung des Emissionsgrades zeigen.

Die „geschützte“ Freibewitterung stellt eine Belastung dar, wie sie bei realen Einbausituationen häufig anzutreffen ist.

Da bei den meisten Probekörpern in der „geschützten“ Freibewitterung keine signifikante Änderung des Emissionsgrades beobachtet wurde, stützen diese Ergebnisse die Aussagen des Vorgängervorhabens: Signifikante Änderungen des Emissionsgrades treten nur vereinzelt auf.

Die „ungeschützte“ Freibewitterung führt langfristig bei den meisten der untersuchten Probekörper zu einer Änderungen im Emissionsgrad. Die Tendenz von den Probekörpern des Vorgängervorhabens B, D/L, G, H und M in der „ungeschützten“ Freibewitterung waren nicht oder nur teilweise zu Beginn der „ungeschützten“ Freibewitterung erkennbar. In der „ungeschützten“ Freibewitterung zeigen auch andere Probekörper eine Änderung im Emissionsgrad. Es kann also keine Übertragung durch eine kurze „ungeschützte“



Freibewitterung auf eine lange „geschützte“ Freibewitterung bezüglich einer Änderung des Emissionsgrades gemacht werden. Bei den untersuchten Probekörpern treten Änderungen im Emissionsgrad in der „ungeschützten“ Freibewitterung unabhängig von der Wahl des Materials auf der IR-aktiven Oberfläche nach circa 2-4 Monaten auf. Deshalb sollte bei Lagerung, Transport und Einbau der Produkte darauf geachtet werden, dass diese nicht zu lange einer Belastung durch „ungeschützte“ Freibewitterung ausgesetzt sind bzw. ausreichend davor geschützt werden.

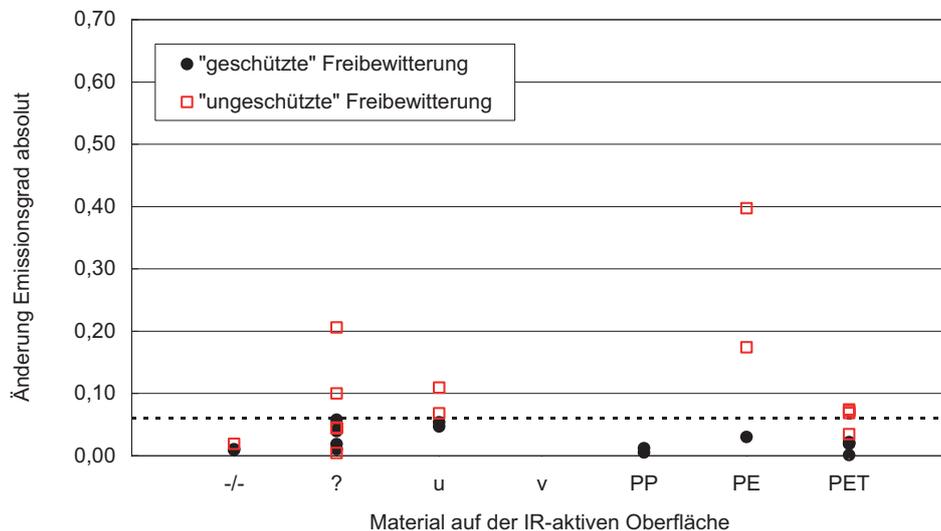


Abbildung 35 Änderung des Emissionsgrades der Probekörper aus Tabelle 1 in der Freibewitterung (bis zu ca. 10 Monate). Die Änderung $\Delta\varepsilon$ ergibt sich aus der letzten Messung abzüglich dem Neuzustand. Die Änderungen $\Delta\varepsilon$ sind jeweils in Abhängigkeit von der Substanz auf der IR-aktiven Seite aufgetragen

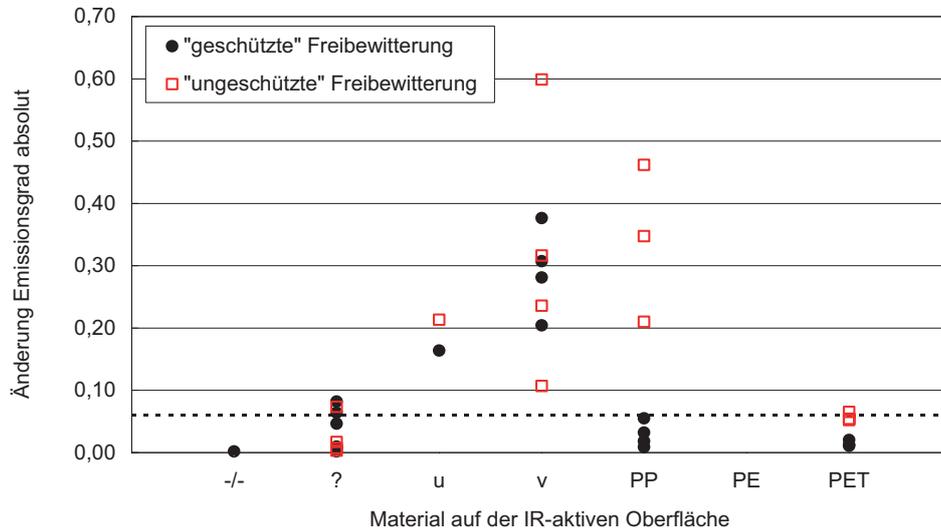


Abbildung 36 Änderung des Emissionsgrades der Probekörper aus Tabelle 2 in der Freibewitterung (bis zu ca. 20 Monate). Die Änderung $\Delta\varepsilon$ ergibt sich aus der letzten Messung abzüglich dem Neuzustand. Die Änderungen $\Delta\varepsilon$ sind jeweils in Abhängigkeit von der Substanz auf der IR-aktiven Seite aufgetragen.



4 Berechnungsbeispiele

Im Folgenden soll anhand von vier Berechnungsbeispielen der Einfluss der Alterung von niedrigemittierenden Oberflächen in typischen Einbausituationen auf den U-Wert der jeweiligen Konstruktion aufgezeigt werden. Für eine bessere Vergleichbarkeit sind die Neuwerte und die „gealterten“ ϵ -Werte in allen Beispielen identisch. Es wurde eine durchschnittliche Folie als Referenz gewählt mit einem Neuwert von $\epsilon = 0,15$ und einem aufgrund Alterung um 50 % erhöhten Wert von $\epsilon = 0,23$. Das entspricht beispielsweise dem Ausgangswert der Folie E-09 und dem Emissionsgrad der Folie nach ca. $4\frac{1}{2}$ „ungeschützter“ Freibewitterung (Ziffer 3.2.1) oder in Etwa nach der künstlichen Alterung bei 70 °C und 90 % r. F. (Ziffer **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Die Berechnungen werden auf Grundlage von [2] und [3] durchgeführt.

4.1 Vereinfachte Dachkonstruktion

Für die Berechnung des Einflusses der Alterung einer niedrigemittierenden Folie in einer Dachkonstruktion werden zwei Situationen betrachtet: Der Einfluss einer Foliendämmung im Winter und im Sommer. Im Winter ist der Wärmestrom nach oben gerichtet und im Sommer umgekehrt. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmeübergangswiderstände für beide Richtungen des Wärmestroms ergeben sich unterschiedliche Wärmedurchlasswiderstände für die Konstruktion. In Abbildung 37 ist der zugrundeliegende Dachaufbau schematisch dargestellt. Die Berechnung erfolgt vereinfachend nur für das Gefach.

Folgende Berechnungsparameter werden verwendet:

- Dachschalung, Holz: $d = 20\text{ mm}$; $\lambda = 0,13\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Foliendämmung: $d = 30\text{ mm}$; $R_{\text{Kern}} = 0,72\text{ m}^2\text{K/W}$; ϵ nach Ziffer 4
- Luftschichten (oben und unten): $d = 30\text{ mm}$; ruhend
- Bekleidung innen, Holz: $d = 20\text{ mm}$; $\lambda = 0,13\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Mitteltemperatur: Winter 10 °C ; Sommer 20 °C



Abbildung 37 Schematischer Aufbau der vereinfachten Dachkonstruktion

Die Berechnungsergebnisse für den Winterfall mit der Wärmestromrichtung nach oben bzw. für den Sommerfall mit umgekehrter Wärmestromrichtung zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5 Berechnungsergebnisse für das vereinfachte Dach

	$\epsilon = 0,15$ [-] neuwertig		$\epsilon = 0,23$ [-] gealtert	
	R [m ² K/W]	U-Wert [W/(m ² K)]	R [m ² K/W]	U-Wert [W/(m ² K)]
Wintersituation (Wärmestrom nach oben)	1,77	0,51	1,67	0,53
Sommersituation (Wärmestrom nach unten)	2,22	(0,41) ¹⁾	1,97	(0,46) ¹⁾

1) Die U-Wert-Berechnung erfolgt üblicherweise für den Winterfall. Der hier angegebene Wert dient Vergleichszwecken.

Die Wärmedurchlasswiderstände der oberen und unteren Luftschichten betragen unter Berücksichtigung der Emissionsgrade in Summe ca. 40 bis 45 Prozent des Wärmedurchlasswiderstandes der gesamten Dachkonstruktion. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass sich eine Änderung des Emissionsgra-



des der Foliendämmung noch geringfügig auf den R- bzw. U-Wert der Konstruktion auswirkt.

4.2 Dach mit Zwischen- und Untersparrendämmung

Für eine weitere Dachkonstruktion wird der Einfluss der Alterung einer niedrigemittierenden Folie in der Dachkonstruktion ebenfalls für den Winter- und den Sommerfall betrachtet. Berechnet wird ein Schrägdach mit einem nach oben (Winter) bzw. nach unten (Sommer) gerichteten Wärmestrom. Die Konstruktion entspricht dem Beispiel aus [12], allerdings mit geänderten Wärmedurchlasswiderstand und Emissionsgrad der Foliendämmung. Der Dachaufbau ist gegenüber dem Aufbau aus Ziffer 4.1 durch eine zusätzliche Dämmschicht besser wärmegeklämt und für mitteleuropäische Klimaverhältnisse geeignet. In Abbildung 37 ist der zu untersuchende Dachaufbau schematisch dargestellt. Die Berechnung erfolgt nach [3] unter Berücksichtigung des Gefach- und Sparrenanteils. Vereinfachend wird ein Bereich ohne die bis in die Ebene der Foliendämmung reichende Pfetten gewählt.

Folgende Berechnungsparameter werden verwendet:

- Zwischensparrendämmung: $d = 120 \text{ mm}$; $\lambda = 0,035 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Foliendämmung: $d = 30 \text{ mm}$; $R_{\text{Kern}} = 0,72 \text{ m}^2\text{K/W}$; ε nach Ziffer 4
- Luftschichten (oben und unten): $d = 20 \text{ mm}$; ruhend
- Sparren: $b = 80 \text{ mm}$; $h = 120 \text{ mm}$; Achsabstand 600 mm
- Mitteltemperatur: Winter $10 \text{ }^\circ\text{C}$; Sommer $20 \text{ }^\circ\text{C}$

Example of insulation for a roof

An example of assembly of the product is described as an informative indication in the figure n° 1 for a wooden roof insulation. The product is applied interior side as an additional thermal insulation.

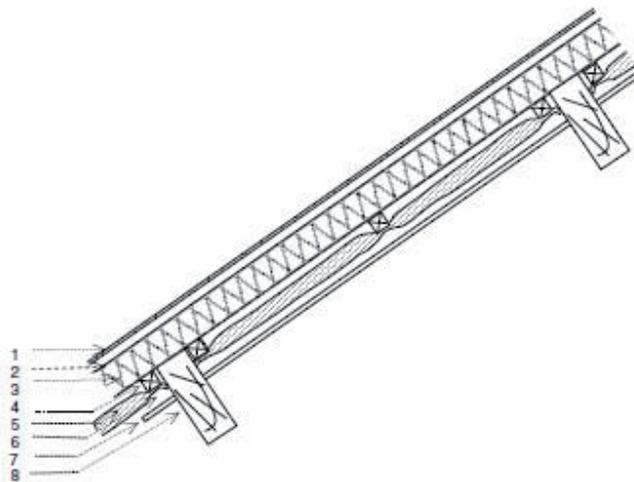


Figure 1 Example of insulation of a roof

- 1 : roof covering,
- 2 : rafters,
- 3 : insulating product installed between rafters
- 4 : cleats: first air space,
- 5 : reflective product,
- 6 : cleats: second air space,
- 7 : interior facing,
- 8 : intermediate purlins.

Abbildung 38 Aufbau der Dachkonstruktion mit Zwischensparrendämmung und Foliendämmung unter den Sparren

Die Berechnungsergebnisse für den Winterfall mit der Wärmestromrichtung nach oben bzw. für den Sommerfall mit umgekehrter Wärmestromrichtung zeigt Tabelle 6.



Tabelle 6 Berechnungsergebnisse für das Dach mit Zwischen- und Untersparrendämmung

	$\varepsilon = 0,15$ [-] neuwertig		$\varepsilon = 0,23$ [-] gealtert	
	R [m ² K/W]	U-Wert [W/(m ² K)]	R [m ² K/W]	U-Wert [W/(m ² K)]
Wintersituation (Wärmestrom nach oben)	4,24	0,23	4,15	0,23
Sommersituation (Wärmestrom nach unten)	4,47	(0,21) ¹⁾	4,30	(0,22) ¹⁾

1) Die U-Wert-Berechnung erfolgt üblicherweise für den Winterfall. Der hier angegebene Wert dient Vergleichszwecken.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass der R- bzw. U-Wert der Dachkonstruktion von der Aufsparrendämmung dominiert wird. Eine Änderung des Emissionsgrades der Foliendämmung zeigt kaum Auswirkung auf den R- bzw. U-Wert.

4.3 Rollläden

In diesem Beispiel wird der Einfluss der Änderung des Emissionsgrades an einem Rollladenpanzern untersucht, welcher auf der Innenseite eine niedrigemittierende Beschichtung aufweist. Dargestellt wird der zusätzliche Wärmedurchlasswiderstand für den geschlossenen Rollladen einschließlich der Luftschicht zwischen Rollladen und Fenster für die Luftdurchlässigkeiten des Rollladens „niedrig“ und „luftdicht“ nach [13]. Abbildung 39 zeigt den Aufbau schematisch. Der Emissionsgrad der beschichteten Lamellen wird nach Ziffer 4 und der des Fensterglases mit $\varepsilon = 0,9$ berücksichtigt. Der Wärmedurchlasswiderstand des Rollladens wird nach [13] für einen Kunststoff-Rollladen mit $R_{sh} = 0,10$ m²K/W angesetzt. Die Mitteltemperatur beträgt 10 °C.

Die Berechnungsergebnisse für die beiden Luftdurchlässigkeitsklassen sind jeweils für eine Beschichtung des Rollladens mit neuwertigem bzw. gealtertem ε in Tabelle 7 dargestellt.

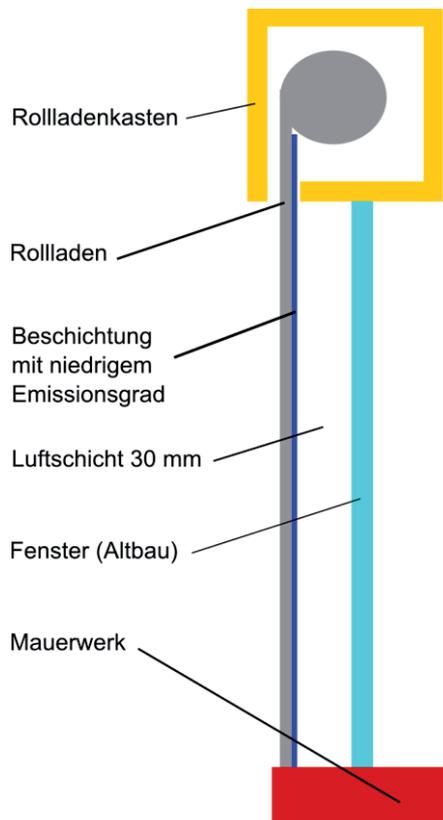


Abbildung 39 Schematischer Aufbau des Rollladens

Tabelle 7 Berechnungsergebnisse für den zusätzlichen Wärmedurchlasswiderstand geschlossener Rollladen mit Luftschicht

	Luftdurchlässigkeit: Niedrig		Luftdurchlässigkeit: Luftdicht	
	$\epsilon = 0,15$ [-] neuwertig	$\epsilon = 0,23$ [-] gealtert	$\epsilon = 0,15$ [-] neuwertig	$\epsilon = 0,23$ [-] gealtert
	ΔR [m ² K/W]			
Rollladen geschlossen mit Luftschicht	0,50	0,43	0,57	0,50

Der zusätzliche Wärmedurchlasswiderstand des Rollladens mit Luftschicht verringert sich durch die Änderung des Emissionsgrades beim Abschluss mit niedriger Luftdurchlässigkeit um 14 Prozent und bei beim luftdichten Abschluss um 12 Prozent.

4.4 Rollladenkasten

Dieses Beispiel zeigt einen Rollladenkasten, dessen Dämmung mit einer niedrigemittierenden Kaschierung versehen ist. Die Außentemperatur bei der Berechnung beträgt 0°C und die Innentemperatur 20°C . Abbildung 40 zeigt den schematischen Aufbau des Rollladenkastens. Die Berechnungsergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt.

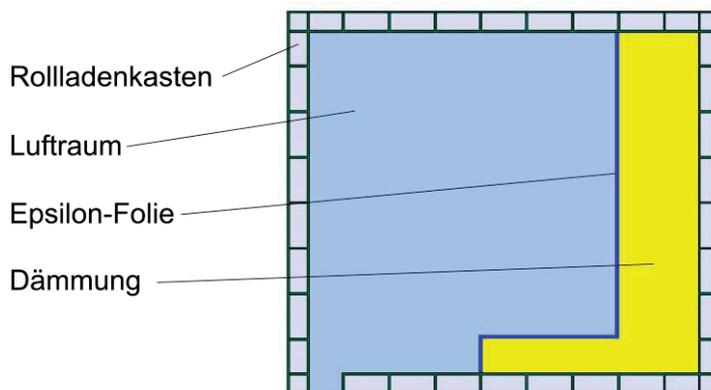


Abbildung 40 Schematischer Aufbau des Rollladenkastens [2]

Tabelle 8 Berechnungsergebnisse für den Rollladenkasten

	$\varepsilon = 0,15$ [-] neuwertig	$\varepsilon = 0,23$ [-] gealtert
	U-Wert [W/(m ² K)]	U-Wert [W/(m ² K)]
Rollladenkasten	0,95	0,97



5 Fazit

Die Ergebnisse aus Abschnitt 3 zu den beschriebenen Messungen des Emissionsgrades und Abschnitt 4 zu den Berechnungen des U-Wertes von Bauteilen, in denen diese Probekörper eingesetzt werden, werden im Folgenden zusammengefasst.

Die ATR Spektroskopie bietet bei bekannten Referenzspektren eine geeignete Messmethode, um die Schutzschichten oberhalb der IR-aktiven Schicht zu charakterisieren und die Probekörper in Gruppen entsprechend ihrer Schutzschichten und Emissionsgrade zusammen zu fassen.

Die Alterung im Wechselklima wurde in dieser Arbeit gegenüber dem Vorgängervorhaben verschärft, indem die Anzahl der 12-stündigen Temperaturzyklen von 70 im Vorgängervorhaben auf 336 in dieser Arbeit fast verfünffacht wurde. Die untersuchten Probekörper zeigten trotz der erhöhten Belastung keine messbare Änderung des Emissionsgrades, während im Vorgängervorhaben 5 Proben, nämlich B, D, H, L und N, mit einem erhöhten Emissionsgrad auf die Belastung reagiert haben.

Mit Hilfe der ATR-Spektroskopie wurden die Proben aus beiden Forschungsvorhaben untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Proben B, D, H und L mit der gleichen, unbekanntem Schutzschicht „v“ oberhalb der IR-aktiven Schicht ausgestattet sind. Probekörper aus der aktuellen Forschungsarbeit sind nicht mit dieser Schutzschicht „v“ ausgestattet.

Der Emissionsgrad der Folien B, D, H und L wurde auch durch die Belastung in der geschützten Freibewitterung erhöht. Diese entspricht in etwa der Einbausituation unter der Dacheindeckung. Es ist anzunehmen, dass die IR-aktiven Folien mit der unbekanntem Schutzschicht „v“ für Anwendungen nicht geeignet sind, bei denen Feuchte und Temperaturwechsel auftreten.

Die Alterung durch Freibewitterung wurde, wie schon im Vorgängervorhaben, an geschützten und ungeschützten, d. h. direkt der Bewitterung ausgesetzten Probekörpern, durchgeführt. Neben den Probekörpern aus dieser Arbeit wurden die Probekörper der bereits im Vorgängervorhaben begonnenen Freibewitterung untersucht. Die Belastung der Probekörper aus dieser Arbeit dauerte ca. 8 Monate, die der Probekörper aus dem Vorgängervorhaben ca. 20 Monate, sofern die Probekörper durch die Belastung nicht zerstört waren.



In der aktuellen Forschungsarbeit zeigt bei der geschützten Freibewitterung lediglich die Probe J-09 nach 8 Monaten eine geringe Erhöhung des Emissionsgrades. Bei den Proben aus dem vorangegangenen Forschungsvorhaben zeigen die Proben B, D, G, H, L und M eine Erhöhung des Emissionsgrades. Die Ergebnisse korrelieren zum Teil mit den Ergebnissen aus der Wechselklima-Belastung. Allerdings lässt sich die Veränderung des Emissionsgrades durch die geschützte Freibewitterung nicht 1 zu 1 auf die Alterung im Wechselklima übertragen.

Im Rahmen der aktuellen Forschungsarbeit wurden auch Proben in zwei reale Dächer eingebaut, um eine Vergleichsmöglichkeit zu erhalten, in wie weit sich die Alterung in einem realen Dach und der geschützten Freibewitterung ähneln. Die Staubablagerung, die auch in geschützter Freibewitterung aufgetreten ist, führte nach einem Jahr im realen Dach zu keiner Veränderung des Emissionsgrades. Wie auch schon im Vorgängervorhaben festgestellt, wird durch eine dünne Staubschicht der Emissionsgrad im Rahmen der Messunsicherheit nicht beeinflusst. Der Einfluss von dickeren Ablagerungen wurde hier nicht untersucht. Es ist aber zu vermuten, dass mit zunehmender Dicke der Ablagerungen diese einen Einfluss auf den Emissionsgrad der Folien erlangen.

Die Alterung nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA wurde in dieser Arbeit gegenüber dem Vorgängervorhaben verschärft, indem die Belastungsdauer von 28 Tage im Vorgängervorhaben auf ca. 7 Monate in dieser Arbeit verlängert wurde. Bei drei von 24 Proben hat die extreme Belastung eine Erhöhung des Emissionsgrades bewirkt. Bereits im Vorgängervorhaben hat sich gezeigt, dass die IR-aktiven Folien einer Belastung nach den Beurteilungsgrundlagen der EOTA standhalten.

Wie unter Ziffer **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** erwähnt, ist dieses Alterungsverfahren mittlerweile auch in den Normenentwurf DIN EN 16012 eingearbeitet worden. Das Verfahren stellt ein einfach durchzuführendes Belastungs- bzw. Alterungsverfahren dar. Mit Hilfe dieses Verfahrens soll ein Mindestmaß an Dauerhaftigkeit beim Emissionsgrad IR-aktiver Produkte sichergestellt werden. Die Untersuchungen dieser und der vorangegangenen Forschungsarbeit haben gezeigt, dass die getesteten Produkte der Belastung widerstehen und der Emissionsgrad weitgehend stabil bleibt. Um an die Dauerhaftigkeit des Emissionsgrades auch bei zukünftigen Produkten eine Mindestanforderung zu stellen, scheint dieses einfach zu handhabende Testverfahren, auch unter praktischen Aspekten, geeignet.



Wie bereits im vorangegangenen Forschungsvorhaben wurden die Probekörper aus der aktuellen Arbeit einer UV-Belastung ausgesetzt. Die Belastungsdauer wurde von 14 auf 27 Tage verlängert. 4 von 16 Proben zeigten unter dieser starken Belastung eine Erhöhung des Emissionsgrades. Die Probe K-09(a) wurde durch die UV-Bestrahlung stark beschädigt.

Ein von Herstellern angewandter Schnelltest, der sog. Kochtest, wurde ebenfalls durchgeführt. Bei dieser Alterung wurden die Proben zwei mal 15 Minuten dem Dampf von kochendem Wasser ausgesetzt. 4 von 16 Proben zeigen nach der Belastung einen erhöhten Emissionsgrad. Allerdings wurde keine Korrelation zu den anderen Alterungsverfahren gefunden.

Die Auswirkung einer Erhöhung des Emissionsgrades auf den R- bzw. U-Wert einer Konstruktion wurde an vier Beispielen untersucht. Es wurden der Wärmedurchlasswiderstand (R) bzw. der Wärmedurchgangskoeffizient (U) für zwei Dächer mit Foliendämmung, der zusätzliche Wärmedurchlasswiderstand (ΔR) eines geschlossenen Rollladens mit Luftschicht zwischen Rollladen und Fenster und der U-Wert eines Rollladenkastens mit IR-reflektierender Kaschierung jeweils mit einem neuwertigen und gealterten Emissionsgrad bestimmt.

Die Erhöhung des Emissionsgrades der Foliendämmung führt bei den Bauteilen Dach zu einer Verringerung des Wärmedurchlasswiderstandes der Konstruktionen. Die Höhe der Änderung ist abhängig vom Dämmniveau des Bauteils. Bei einem, z. B. durch Zusatzdämmung, besser gedämmten Dach fällt die Änderung des Emissionsgrades der Foliendämmung wenig ins Gewicht. Bei einem Dach hingegen, dessen Dämmung weitgehend auf einer Reduktion des Strahlungswärmeverlustes basiert, wirkt sich eine Änderung des Emissionsgrades deutlicher auf den Wärmedurchlasswiderstand oder U-Wert der Konstruktion aus. Im untersuchten Fall betrug die Verringerung des Wärmedurchlasswiderstandes 6 Prozent bei einem nach außen gerichteten Wärmestrom (Winter) und 11 Prozent bei umgekehrtem Wärmestrom (Sommer).

Bei einem mit einer IR-reflektierenden Beschichtung versehenen Rollladen verringert sich der zusätzliche Wärmedurchlasswiderstand durch eine Erhöhung des Emissionsgrades der Beschichtung. Der auch als „temporärer Wärmeschutz“ bezeichnete zusätzliche Wärmedurchlasswiderstand des geschlossenen Rollladens mit der Luftschicht zwischen Rollladen und Fenster verringert sich im untersuchten Fall um 12 bzw. 14 Prozent, abhängig von der Luftdurchlässigkeit des Abschlusses.



Auf den U-Wert des Rollladenkastens hat die Kaschierung der Dämmung im Rollraum und deren Emissionsgrad einen verhältnismäßig kleinen Einfluss, da der Wärmeverlust des Kastens im wesentlichen von seiner Geometrie und den Wärmeleitfähigkeiten seiner Komponenten bestimmt wird. Im untersuchten Fall führte die Erhöhung Emissionsgrades zu einem um zwei Prozent größeren U-Wert des Kastens.

Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse für die untersuchten Produkte stichpunktartig zusammengefasst:

- Änderungen im Emissionsgrad durch die durchgeführten Alterungen treten wie auch schon im vorangegangenen Forschungsvorhaben nur vereinzelt auf.
- Eine starke Alterung des Emissionsgrades, bis hin zur Zerstörung der Proben, ergäbe sich aus der ungeschützten Freibewitterung. Diese Belastung entspricht aber nicht der regelmäßigen Verwendung der getesteten IR-reflektierenden Produkte.
- Der Einfluss einer dünnen Staubschicht auf den Emissionsgrad ist vernachlässigbar.
- Ein allgemeingültiges Schnelltestverfahren, das eine exakte Vorhersage über die Alterung des Emissionsgrades erlaubt, wurde nicht gefunden. Allerdings gibt die durchgeführte ATR-Spektroskopie Hinweise, dass eine Einteilung der Eigenschaften der untersuchten Produkte über die Art der äußeren Schutzschicht möglich wäre. Hier besteht noch Klärungsbedarf.
- Der Emissionsgrad der getesteten Produkte hat sich als sehr robust erwiesen. Nur sehr starke Belastungen haben zu einer Erhöhung desselben geführt. Daher sind die Verfasser der Meinung, dass ein allgemeingültiges Schnelltestverfahren zur exakten Vorhersage des Alterungsverhaltens IR-reflektierender Produkte nicht notwendig ist und geben folgende Empfehlungen:
 - Das in prEN16012 genannte Verfahren zur Konditionierung / Alterung stellt ein einfach durchzuführendes Belastungs- bzw. Alterungsverfahren dar. Mit Hilfe dieses Testverfahrens werden Mindestanforderungen an die Dauerhaftigkeit des Emissionsgrades IR-aktiver Produkte gestellt. Es wird empfohlen an dieser Mindestanforderung festzuhalten.
 - Die in prEN 16012, Tabelle 2, genannten Nennwerte für die gealterten Produkte sind, mit Ausnahme der Aluminiumfolie, erheblich zu niedrig. Die genannten Werte in Höhe von $\epsilon = 0,05$ entsprechen Produkten mit einem sehr niedrigen Emissionsgrad. Die Verfasser schlagen vor, die Tabelle zu streichen.



- Der Bemessungswert für den Emissionsgrad eines Produktes mit IR-reflektierender Eigenschaft kann in Anlehnung an DIN V 4108-4 aus dem 1,2-fachen des Nennwertes ermittelt werden.



6 Literaturverzeichnis

- [1] Martin H. Spitzner, Norbert Sack, Johannes Cammerer, Holger Simon, Christine Lux: Alterung Epsilon. Untersuchung des Einflusses von Alterung und Verschmutzung auf das wärmetechnische Verhalten von Baustoffen mit vermindertem Emissionsgrad. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin 2009.
- [2] DIN EN ISO 10077-2:2008-08
Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten - Teil 2: Numerisches Verfahren für Rahmen
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [3] DIN EN ISO 6946:2008-04
Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchlasskoeffizient - Berechnungsverfahren
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [4] Informationen der Fa. Inglas, www.inglas.de (28.10.2008, 03.09.2010)
- [5] Hans-Ulrich Gremlich, IR Spektren verstehen, Eine Einführung in die Interpretation von Spektren organischer Verbindungen, Informationen der Fa. Bruker Optics (2002)
- [6] Stöcker, Taschenbuch der Physik, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main (2000)
- [7] EN 1279-2:2002
Glas im Bauwesen - Mehrscheiben-Isolierglas . Teil 2: Langzeitprüfverfahren und Anforderungen bezüglich Feuchtigkeitsaufnahme
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [8] DIN 4108-10:2008-06
Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe
Beuth Verlag GmbH, Berlin



- [9] Draft for issuing an European Technical Approval (Edition Nr 6, February 2007), ETA request No. 12.01/12, Product with radiant heat reflective component for use in thermal insulation systems of building envelopes (wall, ceiling, floor and roof)
- [10] DIN EN 16012:2009-11 (Entwurf)
Wärmedämmstoffe für Gebäude – Reflektierende Wärmedämm-Produkte – Bestimmung der Nennwerte der wärmetechnischen Eigenschaften
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [11] DIN EN 13859-1:2009-1
Abdichtungsbahnen- Definitionen und Eigenschaften von Unterdeck- und Unterspannbahnen- Teil 1: Unterdeck- und Unterspannbahnen für Dachdeckungen;
Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [12] ETA-08/0052, THERMOCONFORT, Fa. ABS S.A ZI CAPPÀ - F-26140 Saint Rambert d'Albon, CSTB, 23.01.2008
- [13] DIN EN ISO 10077-1:2010-05
Wärmetechnisches Verhalten von Fenstern, Türen und Abschlüssen - Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten - Teil 1: Allgemeines
Beuth Verlag GmbH, Berlin



Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München

Lochhamer Schlag 4

82166 Gräfelfing

Telefon +49 (0) 89 8 58 00-0

Telefax +49 (0) 89 8 58 00-40

E-Mail: info@fiw-muenchen.de

<http://www.fiw-muenchen.de>



ift Rosenheim

Theodor-Gietl-Str. 7-9

83026 Rosenheim

Telefon +49 (0) 8031 261-0

Telefax +49 (0) 8031 261-290

E-Mail: info@ift-rosenheim.de

<http://www.ift-rosenheim.de>