

Schlussbericht vom 02.08.23

zu IGF-Vorhaben Nr. 20497 N

Thema

Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (RotorBeWi)

Berichtszeitraum

01.03.2019-28.02.2023

Forschungsvereinigung

Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. – DFO

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsstelle 1:

Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung
Wienerstraße 12
28359 Bremen

Forschungsstelle 2:

Deutsche Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. – DFO
Hammfelddamm 10
41460 Neuss

Gefördert durch:

Danksagung

Wir möchten uns bei den Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses für die Unterstützung im Rahmen des Projektes bedanken. Die vielen Anregungen und Vorschläge aus dem Gremium haben maßgeblich zum Gelingen der durchgeführten Untersuchungen beigetragen. Der Ausschuss bestand aus den folgenden Unternehmensvertretern:

- 3M Deutschland GmbH
- Atlas MTT GmbH
- Dr. Alfred Baalman IAB Ingenieurbüro
- Covestro Deutschland AG
- Deutsche Windtechnik Offshore und Consulting GmbH
- Deutsche Windtechnik Service GmbH & Co. KG
- Emil Frei GmbH & Co. KG
- Fraunhofer IWES
- Dr. Dieter Kockott
- Mäder Germany GmbH
- Omexom Renewable Energies Offshore GmbH
- Pausch Messtechnik GmbH
- SLCR Lasertechnik GmbH
- Walter Gerätebau GmbH

Insbesondere danken wir den Firmen 3M, Freilacke und Mäder für die Beschichtung der Versuchskörper.

Schließlich bedanken wir uns für die über die *Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF)* gewährte finanzielle Unterstützung durch das *Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)*. Der *Deutschen Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO)* danken wir für die professionelle organisatorische Begleitung des gesamten Projektes.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Danksagung | 2 |
| 1 Zusammenfassung | 5 |
| 2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung..... | 7 |
| 3 Stand der Technik..... | 8 |
| 3.1 Anti-Erosionsbeschichtungen | 8 |
| 3.2 Regenerosionstest..... | 9 |
| 3.3 Bewitterung..... | 10 |
| 3.4 Prüfung der mechanischen Beständigkeit von Beschichtungen | 11 |
| 4 Forschungsziel | 12 |
| 5 Gesamtvorgehen | 13 |
| 6 Experimente, Ergebnisse und Diskussion..... | 14 |
| 6.1 Mess- und Prüfmethoden..... | 17 |
| 6.1.1 Lichtmikroskopie..... | 17 |
| 6.1.2 FT-IR-Spektroskopie..... | 17 |
| 6.1.3 Rasterelektronenmikroskopie (REM) | 18 |
| 6.1.4 Energiedispersive Röntgenspektrometrie (EDX)..... | 18 |
| 6.1.5 Mechanische und Optische Prüfungen | 19 |
| 6.1.6 Bestimmung des E-Moduls..... | 19 |
| 6.1.7 Regenerosionsprüfungen nach ISO TS 19392-2 | 21 |
| 6.2 Beschaffung und Untersuchung von Feldproben | 22 |
| 6.2.1 Probenmatrix | 23 |
| 6.2.2 IR-spektroskopische Untersuchungen der Feldproben | 23 |
| 6.2.3 REM/EDX-Untersuchungen der Feldproben | 30 |
| 6.3 Auswertung der analytischen Untersuchungen der im Rahmen des Projektes ausgelagerten Proben | 33 |
| 6.3.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen | 33 |
| 6.3.2 REM-Untersuchungen | 38 |
| 6.3.3 Problematik und Herkunft der SiO ₂ -Ablagerungen auf den Proben nach dem Xenontest (DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1/ DIN EN ISO 4892-2 Zyklus)..... | 41 |
| 6.3.4 REM/EDX-Untersuchungen..... | 43 |
| 6.3.5 Infrarot-Spektroskopie | 48 |
| 6.4 Auswertung der mechanischen und optischen Untersuchungen der im Rahmen des Projektes ausgelagerten Proben..... | 56 |
| 6.4.1 Medienaufnahme..... | 56 |
| 6.4.2 Gitterschnittprüfung vor und nach Beanspruchung | 57 |
| 6.4.3 Stirnabzugstests vor und nach Beanspruchung | 58 |
| 6.4.4 Bestimmung der optischen Eigenschaften vor und nach Beanspruchung | 59 |
| 6.4.5 Bestimmung des E-Moduls vor und nach Beanspruchung | 63 |
| 6.4.6 Auswertung der Regenerosionsprüfungen vor und nach der Beanspruchung.... | 67 |
| 6.5 Normative Vorgaben zur Beanspruchung von Regenerosionsprüfungen | 74 |

| | | |
|------|---|----|
| 7 | Gegenüberstellung der Ergebnisse mit der Zielsetzung des Antrags | 74 |
| 8 | Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit..... | 75 |
| 9 | Schlussfolgerungen und Resümee | 76 |
| 10 | Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für kleinere und mittlere Unternehmen | 77 |
| 10.1 | Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Nutzung der erzielten Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen | 77 |
| 10.2 | Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse | 78 |
| 10.3 | Einschätzung der Realisierbarkeit einer industriellen Umsetzung | 79 |
| 10.4 | Veröffentlichungen..... | 79 |
| 10.5 | Transfermaßnahmen | 81 |
| 11 | Durchführende Forschungseinrichtungen | 84 |

1 Zusammenfassung

Die geplante Lebensdauer von Windenergieanlagen (WEA) beträgt mindestens 20 Jahre. Jedoch können erste Erosionsschäden an Rotorblättern nach zwei Jahren Betrieb in harschen Regionen festgestellt werden [1], [2]. Einerseits entstehen strukturelle Schäden an der Vorderkante, andererseits wird die Aerodynamik der Blätter verändert, was Einbußen in der Energiegewinnung zur Folge hat. Abhängig vom Schweregrad der Erosion werden bei der jährlichen Energieproduktion Verluste von 0,5% erwartet [3]. Die Größe der wirtschaftlichen Verluste ist aufgrund der Vielzahl von Parametern nur schwer einzugrenzen, jedoch wird die jährliche Schadenssumme für Deutschland auf etwa 22 Mil. € geschätzt [4]. Die Annahme beruht darauf, dass die jährlichen Ertragsverluste etwa bei 0,5% liegen, die Einspeisevergütung etwa 4 Cent/kWh beträgt und jährlich etwa 113 TWh durch Windenergie produziert werden [4].

Bei den Rotorblättern handelt es sich um eine der kritischen Komponenten von Windenergieanlagen. Reparaturen an Rotorblättern sind in den 20 Jahren Betriebsphase frühestens nach 4 Jahren und spätestens nach 10 Jahren notwendig. Es handelt sich bei den Rotorblättern um eines der Bauteile mit dem höchsten Instandhaltungsaufwand. Kommt es zu strukturellen Schäden an den Rotorblättern, so müssen diese ausgetauscht werden. Es hat sich jedoch gezeigt, dass Rotorblattbeschichtungen zum Schutz vor Regenerosion häufig noch deutlich vor den veranschlagten 20 Jahren Lebensdauer versagen. So waren beispielsweise bereits 2018, nach ca. 5 Jahren Betriebsdauer, im Windpark Anholt fast 300 Rotorblätter so stark von Erosion betroffen, dass sie in einer teuren witterungsabhängigen Reparatur wieder in Stand gesetzt werden mussten [5]. Auch im Windpark Meerwind Süd|Ost, in Betrieb seit 2014, mussten kürzlich alle Blätter abmontiert und an Land in Stand gesetzt werden [6]. Die Erosionsschäden durch hohe Blattspitzengeschwindigkeiten, gerade im offshore Bereich, in Kombination mit standortspezifischen Witterungsbedingungen und den hochdynamischen Schädigungsverhalten werden häufig unterschätzt und ein unangepasstes Erosionsschutz- bzw. Wartungskonzept führt zum vorzeitigen Versagen [7].

Dies stellte zu dem Zeitpunkt die teuerste Reparatur einer WEA dar, die an Land ca. 175 TEuro/kW kostet [8] (entspricht für eine moderne Onshore-Anlage (2,5 MW) einem Betrag von ca. 440.000 Euro). Für Offshore-Anlagen liegt dieser Betrag wesentlich höher. Unter Offshore-Bedingungen kommt hinzu, dass die Wetterbedingungen nur an rund 20 Prozent der Tage im Jahr so günstig sind, dass die Service-Schiffe für Reparaturarbeiten ohne Gefahr nah genug an den Windpark heranfahren können [9].

An Rotorblattvorderkanten von Windenergieanlagen treten oft massive Schädigungen der Beschichtung auf. In der Anfangsphase führt dies zu Effizienzreduzierung; ein Fortschreiten dagegen bis zur strukturellen Schädigung der Rotorblätter. Ursache ist eine Kombination aus Alterung der Beschichtung durch Witterungseinflüsse und mechanischer Beanspruchung durch Regenerosion, mit Aufprallgeschwindigkeiten von z.T. über 300 km/h [10]. Daraus folgt, dass die bisherige Kombination der Prüfung unbewitterter Proben in Regenerosionstests und separater Bewitterung unzureichend ist. Im Rahmen des von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderten Projekts "RotorBeWi" nahmen sich die DFO und das Fraunhofer IFAM der Problematik an. Ziel war es, den Schädigungsmechanismus aufzuklären und eine Bewitterungsmethode zu entwickeln, die den realen Schädigungsmechanismen bestmöglich entspricht, um anschließend die Regenerosionsbeständigkeit zu prüfen.

Folgende Schlussfolgerungen konnten aus den Kernergebnissen gezogen werden:

- Die ermittelten Werte zur Bestimmung der Haftfestigkeit durch die Gitterschnittprüfung gemäß DIN EN ISO 2409 und durch den Stirnabzugstest gemäß DIN EN ISO 4624 zeigen, dass die Haftfestigkeit der Beschichtung unabhängig von der Beanspruchung durch Laboralterung oder durch Freibewitterung ist. Ein Zusammenhang zwischen Haftfestigkeit und Regenerosionsbeanspruchung liegt nicht vor.
- Die Medienaufnahme der einzelnen Beschichtungen ist nicht relevant und eindeutige Unterschiede zwischen den Systemen konnten nicht nachgewiesen werden. Die These, dass die Beschichtungen durch eine Wasseraufnahme beeinträchtigt werden, konnte nicht bestätigt werden.
- Anhand der Bestimmung des E Moduls der beanspruchten Beschichtungssysteme konnte nachgewiesen werden, dass sich bei einer höheren Beanspruchung durch Freibewitterung bzw. künstliche Bewitterung mit Fluoreszenzlampen und Xenonlampen das E-Modul verändert und die untersuchten Systeme zum Teil verspröden.
- Die Ergebnisse der IR-spektroskopischen und REM/EDX- Untersuchungen der Systeme nach den verschiedenen Bewitterungen zeigen, dass die chemisch-physikalischen Veränderungen vom Beschichtungsmaterial abhängig sind und stark variieren, so dass von den ausgewählten Bewitterungsarten keine als die am stärksten schädigende Bewitterung festgelegt werden kann.
- Die visuelle Auswertung der Regenerosionsprüfungen, die nach der ISO TS 19392-2 durchgeführt wurde, weist bei vielen Beschichtungssystemen unterschiedliche Schadensbilder auf. Bei einigen Proben lag nur ein punktueller Schaden vor, bei anderen Proben war ein abrasiver Abtrag zu beobachten oder die Beschichtung löste sich vom Substrat. Diese Bewertung war für das Projekt nur bedingt geeignet.
- In den verschiedenen Normen und Richtlinien wird nicht immer die Alterung vor der Regenerosionsprüfung verlangt. Die vereinzelt Richtlinien verweisen dann auf den Zyklustest nach DIN EN ISO 12944-9 oder auf eine UV-Licht-Beanspruchung. Auch wenn die Norm 12944-9 die Korrosionsprüfung von beschichteten Stahlbauten beschreibt, wurde diese Alterungsprüfung im Rahmen des RotorBeWi Projektes ausgewählt, da sie der Beanspruchung der Rotorblätter im Feld sehr nahekommt. Weiterhin wurden zwei UV-Licht-Beanspruchungen aufgenommen und die gewonnenen Erkenntnisse können für nachfolgende Projekte verwendet werden.
- Die Projektergebnisse aus RotorBeWi wurden in dem DIN-Arbeitsausschuss NA 002-00-16 AA „Beschichtungen an Rotorblättern für Windenergieanlagen vorgestellt und eine zusätzliche Beanspruchung soll zukünftig in die Norm eingearbeitet werden.

2 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Seit Inbetriebnahme von Windenergieanlagen (WEA) sind vermehrt massive Schäden an den Rotorblattvorderkanten bekannt geworden (Abbildung 1). Durch ein schnelles Voranschreiten der Schäden kommt es teilweise zu strukturellen Schäden an Rotorblättern. Die Schadensbildung wurde im DIN-Arbeitsausschuss NA 002-00-16 AA „Beschichtungen an Rotorblättern für Windenergieanlagen“ des DIN-Normenausschusses Beschichtungsstoffe und Beschichtungen (NAB) unter Experten für Bewitterungsprüfungen, Windenergieanlagen- und Beschichtungstoffherstellern kontrovers diskutiert.

Der Normenausschuss kam zu dem Ergebnis, dass die starken Erosionsprobleme, da sie unerwartet schnell auftreten, durch bisher unbekannte Kombinationen von Schädigungsmechanismen verursacht werden. Die heute eingesetzten Prüfverfahren reichen nicht aus, um diese Schädigungen vorherzusagen bzw. nachzustellen.

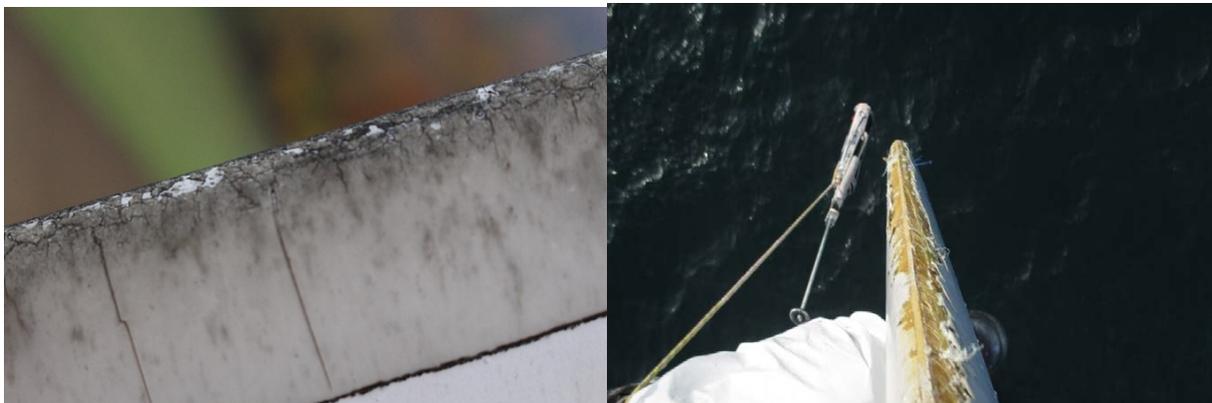


Abbildung 1: Starke Erosionsschäden an Rotorblatt, links Onshore und rechts bei einer Offshore-WEA [11]

Nach dem Stand der Technik werden die Beschichtungen von Rotorblattvorderkanten, in der Entwicklung per Regenerosionstest und per Bewitterungstest separat geprüft. Es wird jedoch angenommen, dass im Feld die unerwarteten Schäden durch die kombinierte Beanspruchung aus Bewitterung und mechanischer Beanspruchung hervorgerufen werden. Dies wird in den derzeit bei der Beschichtungsentwicklung gängigen, entwicklungsbegleitenden Prüfverfahren nicht abgebildet.

Bisher ist keine Methode bekannt, die die voraussichtliche kombinierte Schädigung, im Labor zuverlässig nachstellen könnte. Ein aussagekräftiges Prüfverfahren ist die Voraussetzung für eine zielgerichtete Entwicklung von beständigen Beschichtungen für die Rotorblattvorderkanten von WEA.

Derzeit erfolgt die mechanische Prüfung der Rotorblattvorderkantenbeschichtungen im Regenerosionstest, der an nicht gealterten Beschichtungssystemen durchgeführt wird. Der Regenerosionstest wurde in zahlreichen Untersuchungen auf den Anwendungsfall der Rotorblätter von WEA optimiert und die Versuchsergebnisse galten als gesichert. In den Diskussionen im Arbeitsausschuss NA 002-00-16 AA wurde davon ausgegangen, dass bei den Rotorblättern die extremen Witterungseinflüsse eine Vorschädigung auf molekularer Ebene des Polymerharzes und anderer Bestandteile der Beschichtung verursachen. Diese führen zu Änderung der mechanischen Beständigkeit der Rotorblattvorderkantenbeschichtung.

Es wurde angenommen, dass dadurch die Beständigkeit gegen Regenerosion sinkt und die gealterten Proben schneller versagen als vorhergesagt. Ziel des Projektes war zum einen die Aufklärung der Schädigungsmechanismen und zum anderen die Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für Beschichtungen von Rotorblattvorderkanten von Windenergieanlagen inklusive Offshore-Anlagen, welches die Auswirkungen der zahlreichen Beanspruchungen von Beschichtungen kombiniert nachstellt. Nachfolgend sollte auf Basis dieses entwickelten künstlichen Bewitterungsverfahrens gemeinsam mit dem Arbeitsausschuss NA 002-00-16 AA „Beschichtungen an Rotorblättern für Windenergieanlagen“ ein nationaler Normenvorschlag ausgearbeitet werden. Dieser sollte dann ebenfalls im ISO-Spiegelgremium eingereicht werden.

In die Untersuchungen des Projektes wurden explizit die mechanischen Eigenschaftsänderungen der Rotorblattvorderkantenbeschichtungen durch Bewitterungseinflüsse einbezogen.

Neben den mechanischen Eigenschaftsänderungen sind die besonderen Witterungseinflüsse bei dieser Anwendung zu berücksichtigen. Diese sind eine Kombination aus UV-Strahlung, Temperatur, Feuchtigkeit, sowie bei Offshore Anwendungen ein hoher Salzgehalt der Luft.

Um die Schädigungsmechanismen aufzuklären wurden schadhafte Beschichtungen aus dem Feldeinsatz untersucht und mit Proben aus der Labor- und Freibewitterung verglichen. Durch die Bewertung der Schädigungen aus dem Feld sollte die Entwicklung eines praxisrelevanten Prüfverfahrens gewährleistet werden, das die natürlichen Beanspruchungen simuliert.

3 Stand der Technik

Es ist Stand der Technik, dass die Entwicklung von Beschichtungsstoffen durch Labor-Kurzzeittests begleitet wird, die die Beanspruchungen der Beschichtung in dem jeweiligen Einsatzgebiet simulieren.

Die Bewitterungsbeständigkeit wird derzeit separat über Kurzzeitbewitterungstests überprüft, wobei üblicherweise Parameter wie Glanz, Farbe und Kreidung bewertet werden. Einen Prüfablauf der Beanspruchungsszenarien für Rotorblätter, die die mechanischen und die bewitterungsbedingten Einflüsse abbilden, ist bislang nicht verfügbar. Im Folgenden sind etablierte Prüfmethode erläutert, die angewendet werden, oder auf die sich die Testentwicklung in diesem Projekt beziehen.

3.1 Anti-Erosionsbeschichtungen

Heutige Lösungen für den Vorderkantenschutz (Leading Edge Protection – LEP) von Rotorblättern basieren üblicherweise auf elastischen Klebebändern (Tapes) oder speziellen Lacken. Bei den Lacken gibt es Lösungen, die harte Oberflächen oder auch elastische Schichten erzeugen.

Aus den Erkenntnissen über den Mechanismus der Regenerosion und den Beobachtungen an den heute eingesetzten Erosionsschutzsystemen lässt sich ableiten, dass polymere Materialien mit einer hohen Schutzwirkung gegenüber Regenerosion u.a. eine hohe Dämpfungswirkung, eine gute Haftfestigkeit zum Substrat, eine hohe Kohäsion, ein

geringes Ermüdungsverhalten, eine hohe Witterungsbeständigkeit und eine effiziente Reparierbarkeit aufweisen müssen.

Ein wesentlicher Schadensmechanismus für das Versagen von Erosionsschutzmaterialien besteht in der Akkumulation von Mikrorissen im Polymernetzwerk, hervorgerufen durch den Einschlag von Regentropfen. Die nachfolgende Abbildung zeigt einen typischen Beschichtungsaufbau eines Rotorblattes.

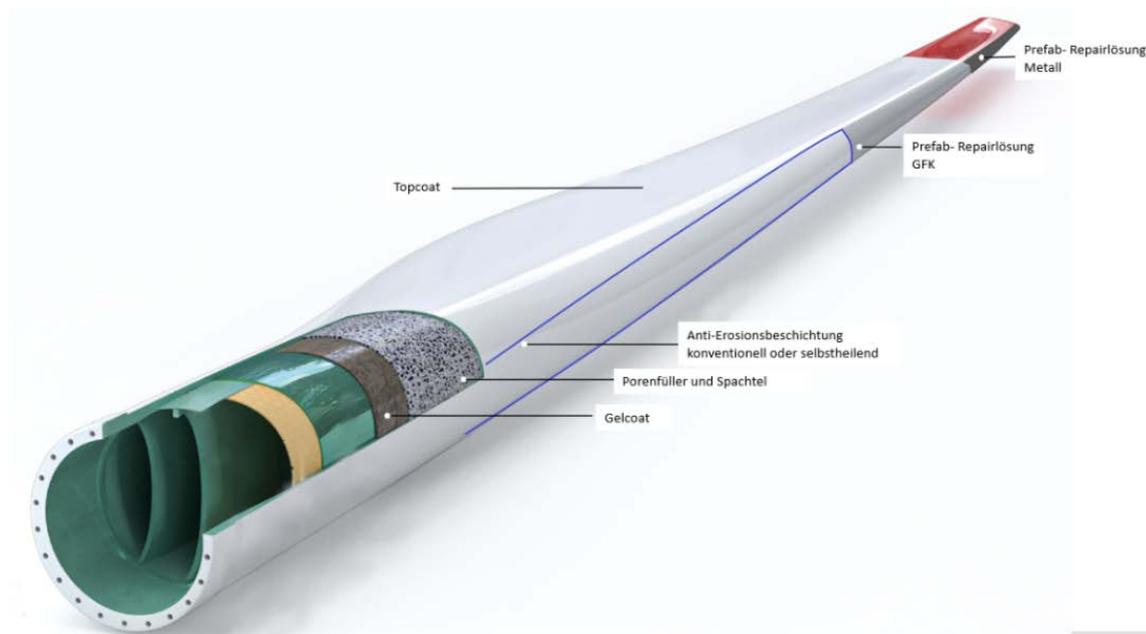


Abbildung 2: LEP Systeme offshore WEA-Rotorblätter

3.2 Regenerosionstest

Die Mechanismen der Erosion von Werkstoffen durch Regentropfen, ist seit Jahrzehnten intensiv untersucht und verstanden worden [12], [13]. Speziell im Hinblick auf WEA wurde der Einfluss der Regenerosion mittels numerischer Simulation erforscht [14]. Auf Basis dieser Untersuchungsergebnisse wurden verschiedene Prüfverfahren für die Beurteilung der Regenerosionsbeständigkeit ausgewählt, bei denen drei grundsätzlich unterschiedliche Ansätze verfolgt werden:

a. Bewegung der Probe und künstlicher Regen (Helikoptertest)

Hier werden flache Prüfkörper oder Prüfkörper, die annähernd ein Modell eines aerodynamischen Profils repräsentieren, auf einer rotierenden Scheibe oder auf entsprechenden Rotoren angebracht und mit hoher Geschwindigkeit durch einen künstlichen Regen mit definierten Tropfengrößen bewegt. Die Prüfung erfolgt nach der ISO/TS 19392-2 und ist Stand der Technik. Die Geschwindigkeiten der Prüfkörper werden dem betrachteten Anwendungsfall angepasst. Für Windenergieanwendungen wird üblicherweise mit Geschwindigkeiten von 80-200 m/s gearbeitet [15].

b. Stehende Probe und Hochdruckwasserstrahl

Mit einem Hochdruckwasserstrahl wird der Regen simuliert, wobei der Wasserstrahl häufig in kleinere Stücke zerteilt wird, die dann Regentropfen simulieren sollen. Ein

typischer Vertreter dieser Herangehensweise ist der P-Jet Test, wie er bei Airbus Operations GmbH in Ottobrunn durchgeführt wird. [16]

c. Bewegung der Probe und Hochdruckwasserstrahl

Eine weitere Variante wird in der ISO/TS 19392-3 der Regenerosionsprüfung beschrieben. Diese Prüfung zeichnet sich dadurch aus, dass eine beschichtete Probe in definierter Art und Weise bewegt wird, während sie von einem Wasserstrahl getroffen wird [16]. Dieser Test kann für die Bewertung der Erosionsfestigkeit von Werkstoff-Oberflächen bei wiederholter Einwirkung von Flüssigkeitstropfen eingesetzt werden [17]. Der Erosions-Prozess kann dabei gleichzeitig mehrere Verschleißmechanismen beinhalten, entweder durch plastische Verformung oder durch Versprödung hervorgerufen [18], [19].

Alle drei Varianten sind im Normentwurf ISO/NP TS 19392 [20] [21], *Paints and varnishes — Coating systems for wind-turbine rotor blades* beschrieben und spezifiziert. Der PJET-Test weist sehr hohe Streuungen auf und hat sich in der Branche nicht etabliert. Untersuchungen zum Vergleich der Ergebnisse von Helikoptertest und wasserstrahlbasierten Tests liegen vor. Offenbar sind die Ergebnisse hinsichtlich der Rangfolge von Beschichtungen vergleichbar [16]. Da der Mechanismus der Regenerosion aber bei den Helikoptertests mit dem in der Natur vergleichbar ist, wird dieser Test, obwohl aufwändiger und kostenintensiver, zur Absicherung herangezogen.

3.3 Bewitterung

Es gibt verschiedene Prüfnormen zur künstlichen Bewitterung von Beschichtungen. Diese dienen als Ausgangsbasis der in diesem Projekt zu entwickelnden Laborprüfmethode. Von Bedeutung für dieses Projekt sind die folgenden Normen:

- DIN EN ISO 16474 (3 Teile), *Beschichtungsstoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten*

Diese Norm beschreibt Methoden zur künstlichen Bewitterung von stationären Probenoberflächen von Beschichtungen und spezifiziert die spektrale Bestrahlungsstärke, und die zyklischen Änderungen von Temperatur und Benässung. Die besonderen klimatischen Verhältnisse am Rotorblatt werden nicht berücksichtigt.

- DIN EN ISO 4892 (3 Teile), *Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten*

Diese Norm beschreibt Methoden zur künstlichen Bewitterung von stationären Probenoberflächen von Kunststoffen und spezifiziert die spektrale Bestrahlungsstärke, und die zyklischen Änderungen von Temperatur und Benässung. Die besonderen klimatischen Verhältnisse am Rotorblatt werden nicht berücksichtigt.

- DIN EN ISO 12944-9 (Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungsstoffe; Teil 9 Beschichtungssysteme und Leistungsprüfverfahren im Labor für Bauwerke im Offshorebereich)

Die ISO 20340 wurde ab Mai 2018 in die DIN EN ISO 12944 als Teil 9 überführt. Die neue Vorschrift spezifiziert die Prüfung von Korrosionsschutzlacken zum Einsatz an Offshore-Bauwerken. Diese Norm enthält ein Prüfprogramm für die beschleunigte Bewitterung, welches die Beanspruchung der Oberflächen unter Offshore-Bedingungen abbildet.

Auch wenn die Norm auf die Prüfung von Korrosionsschutzsystemen abzielt, könnte das Beanspruchungsszenario als Ausgangspunkt für die Spezifizierung eines Vorkonditionierungsverfahrens für Rotorblattvorderkantenbeschichtungen, vor der Erosionsprüfung durchaus geeignet sein, da es die Witterungsbedingungen im Offshore-Bereich nachstellt.

Die derzeit eingesetzten Methoden zur Prüfung der Beständigkeit von Rotorblattvorderkantenbeschichtungen gegen die Umwelteinflüsse UV-Bestrahlung, Temperatur und Feuchte (Bewitterung), beruhen aus den Erfahrungen der Lackindustrie aus anderen Anwendungen, wie etwa der Luftfahrt. Sowohl die Substrate (glasfaserverstärkte Kunststoffe), als auch die Anforderungen (Offshore Installationen) können für Rotorblattvorderkantenbeschichtungen stark abweichen, erfordern daher spezielle Prüfverfahren.

Es ist zwingend notwendig eine Prüfmethode zu entwickeln, die zum einen auf die Beanspruchung von Rotorblättern angepasst ist, zum anderen möglichst in Normen etabliert werden kann, um zuverlässige und vergleichbare Ergebnisse von beschleunigten Bewitterungsprüfungen zu erzielen.

Eine definierte Vorkonditionierung von Beschichtungen vor Durchführung einer Regenerosionsprüfung für Windenergieanlagen, ist bislang nicht normativ beschrieben. Das beantragte Vorhaben wird diese Lücke füllen und eine wissenschaftlich fundierte und abgesicherte Vorkonditionierungsmethode liefern.

3.4 Prüfung der mechanischen Beständigkeit von Beschichtungen

Der Mechanismus der Regenerosion an unbewitterten Proben ist bei Beschichtungen bekannt und gut untersucht [7] (Abbildung 3). Ein mit hoher Geschwindigkeit auftreffender Wassertropfen erzeugt zunächst eine Druckwelle im Beschichtungsmaterial, die an der Substratoberfläche reflektiert wird (Abbildung 3 links, oben). Diese Druckwelle beansprucht das Beschichtungsmaterial mechanisch (Dehnung) und schwächt die Adhäsion am Substrat. Im zweiten Schritt bildet der an der festen Oberfläche zerspritzende Tropfen laterale Jets aus, die sich mit hoher Geschwindigkeit parallel zur Oberfläche bewegen und eventuelle Unebenheiten angreifen (Abbildung 3 links unten).

Abb. 3 rechts zeigt die Entwicklung eines Erosionsschadens an einer beschichteten Aluminiumoberfläche.

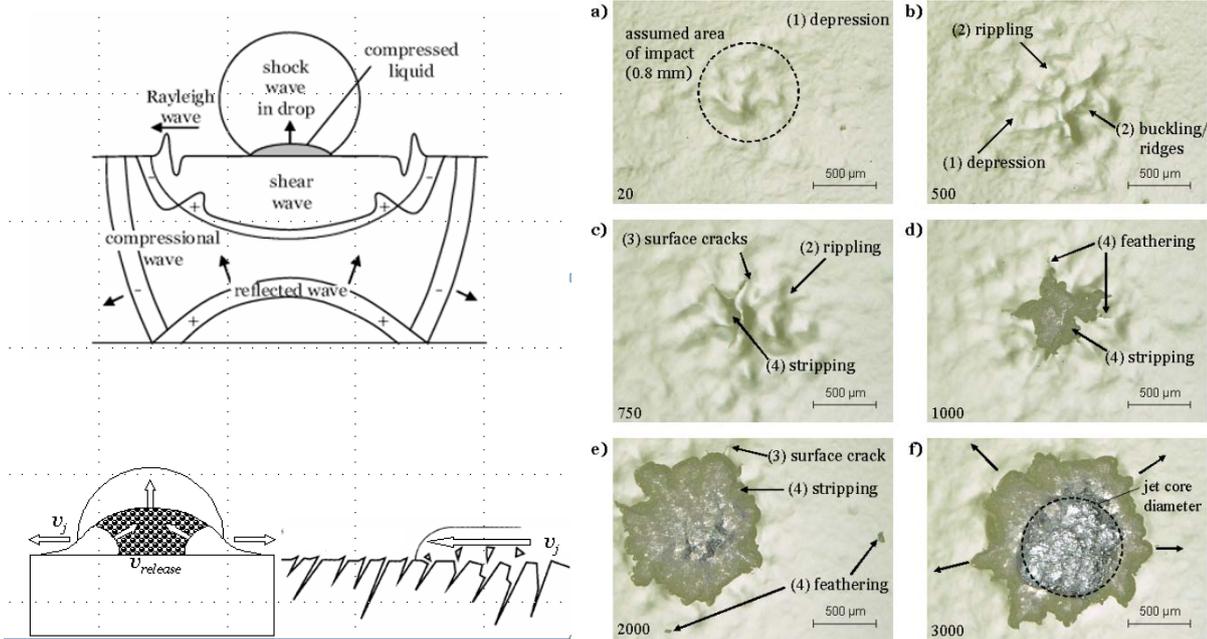


Abbildung 3: links oben und unten: Mechanismus der Regenerosion [7]; rechts: Schadensbild durch wiederholtes Auftreffen von Wasserstropfen [8]

Um den Einfluss der Bewitterung auf zu erwartende Widerstandsfähigkeit eines Beschichtungsmaterials zu charakterisieren, ist es demnach notwendig, die mechanischen Parameter einer Beschichtung vor und nach der Bewitterung zu bestimmen.

4 Forschungsziel

Ziel des Projektes war:

- die Aufklärung der Schädigungsursache und-mechanismen für Feldschäden von Rotorblattvorderkantenbeschichtungen von WEA
- die Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens, das diese Materialalterung aus dem Feld die zu einer Schwächung gegen Regenerosion führt, in einer Laborprüfung nachstellt und eine Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattvorderkantenbeschichtungen ermöglicht
- Diskussion und Bewertung des Prüfablaufs für Beschichtungen von Rotorblattvorderkanten mit dem DIN-Arbeitsausschuss NA 002-00-16 AA und Ausarbeitung einer Norm mit den Experten des PBA und des Norm-Ausschusses

Die Beschichtungen von Rotorblattvorderkanten unterliegen einer starken Bewitterung und mechanischen Beanspruchung. Es wird angenommen, dass die Bewitterungsbeanspruchungen die mechanischen Kennwerte der Beschichtung verschlechtern. In der Folge widersteht die Beschichtung nicht mehr der mechanischen Beanspruchung durch Wind und Regen. Es entstehen die beobachteten Schadensbilder an Beschichtungen von Rotorblattvorderkanten.

Die Arbeitshypothese lautet: Wenn der Einfluss der Änderung der mechanischen Eigenschaften durch die Bewitterung bekannt ist und nachgestellt werden kann, wird es möglich, durch kombinierte künstliche Bewitterung und mechanische Beanspruchung, das Verhalten der Beschichtungen zu simulieren und durch entwicklungsbegleitende Prüfungen beständigere Beschichtungen herzustellen.

Darüber hinaus wird angenommen, dass die Schädigung durch die Bewitterung zum einen über makroskopische Schäden, wie Farbveränderung und Vermattung, quantifiziert werden können und zum anderen, dass die Schäden und Schadensmechanismen analytisch erfasst (Mikroskopie, EDX- und Infrarotspektroskopie) und aufgeklärt werden können.

Die Schädigungen wurden an ausgewählten Beschichtungen durch folgende Beanspruchungen erzeugt:

- Temperaturschwankungen
- Frost-, Feuchtigkeit und Nässe
- Wechselprozesse der Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe
- UV-Bestrahlung
- Salzgehalt (Off-Shore)

Der Degradationsgrad der Beschichtungsbestandteile und die Veränderung der mechanischen Kenndaten können zur Charakterisierung des Gesamtschädigungsmechanismus erhoben werden. Wenn die einzelnen Schädigungsmechanismen und die synergistische Wirkung der einwirkenden Faktoren verstanden sind, dann vereinfacht sich die Entwicklung für ein Bewitterungsverfahren, welches das Schadensbild ausreichend nachstellt. Für die Ausarbeitung des Bewitterungsverfahrens ist zu beachten, dass die reproduzierbare künstliche Bewitterung von Profilausschnitten aus Rotorblattvorderkanten umfangreiche Voruntersuchungen erfordert.

Sie stellt hohe Anforderungen an die wiederholbare Anordnung der Proben im Probenraum der Bewitterungsgeräte. Bei fehlerhafter (leicht variabler) Anordnung können schnell Unterschiede bei der Strahlungsbeanspruchung von einem Faktor 2 auftreten.

Parallel wurden Feldschäden untersucht, um auszuschließen, dass durch die künstliche Bewitterung Schädigungen an den Beschichtungen erzeugt werden, die in natürlicher Umgebung nicht vorkommen.

5 Gesamtvorgehen

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit von Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) und der Deutschen Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO) bearbeitet.

Im Rahmen des Projektes, analysierte die DFO als Forschungsinstitut systematisch die Schäden an den Beschichtungen, klärte die Schadensmechanismen auf und brachte ihre Praxiserfahrungen ein. Das IFAM übernahm die Entwicklung des Bewitterungsverfahrens und die mechanische Charakterisierung der Beschichtungen.

Ziel der gemeinsamen Aktivität war es, die wissensbasierte Entwicklung einer Laborprüfmethode mit einem hohen Praxisbezug. Das Projekt war in insgesamt 8 Arbeitspakete unterteilt und ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

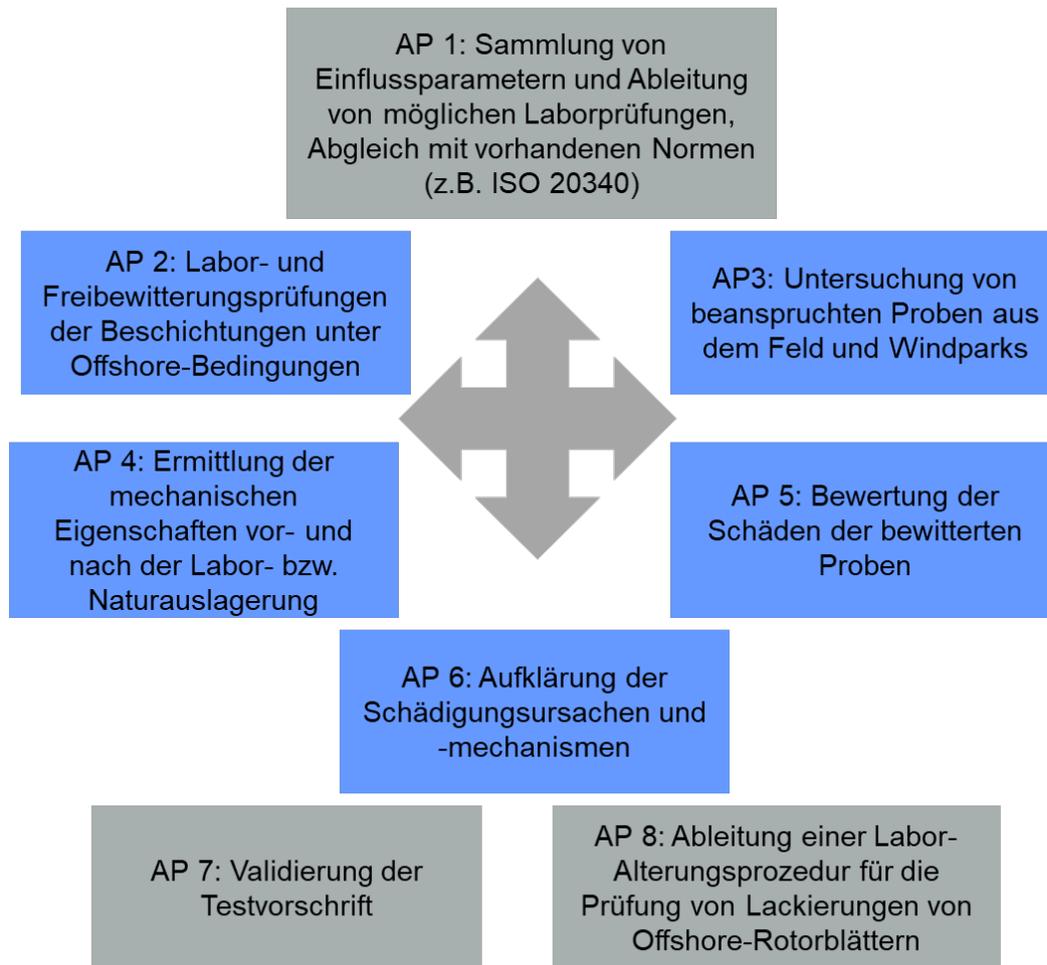


Abbildung 4: Projektstrukturplan

6 Experimente, Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des Projektes wurden etablierte Regenerosionsschutzbeschichtungen speziell für die Vorderkante von Rotorblättern ausgewählt. Neben den organischen Lacksystemen wurden auch robuste und im Einsatz befindliche Folien verwendet.

Tabelle 1: Übersicht LEP Systeme

| Nr. | System |
|-----|--|
| 1 | LEP System Lack mit UV-Absorber, elastisch |
| 2 | LEP System Lack ohne UV-Absorber, elastisch |
| 3 | LEP System Lack mit UV-Absorber, hart bzw. spröde |
| 4 | LEP System Lack ohne UV-Absorber, hart bzw. spröde |
| 5 | Foliensystem, elastisch |
| 6 | Foliensystem, elastisch |
| 7 | Sonderbeschichtung für Rotorblätter |

Bei den Regenerosionsproben handelt es sich um ein aerodynamisches GFK Profil, das durch Vakuuminfusion in 80-cm-Substraten (Abbildung 5a) hergestellt wird. Die Gewebe werden über eine Kernstruktur gelegt, um ihr die aerodynamische Form zu geben. Auf die Außenfläche der Gewebe wird Druck ausgeübt, um deren Glätte zu verbessern.

Bei der Beschichtung wird zunächst das 80-cm-Profil verwendet, um Kanteneffekte und Dickenschwankungen zu minimieren. Aus dem jeweiligen Profil (Abbildung 5b) werden anschließend drei Proben (Abbildung 5c) geschnitten.

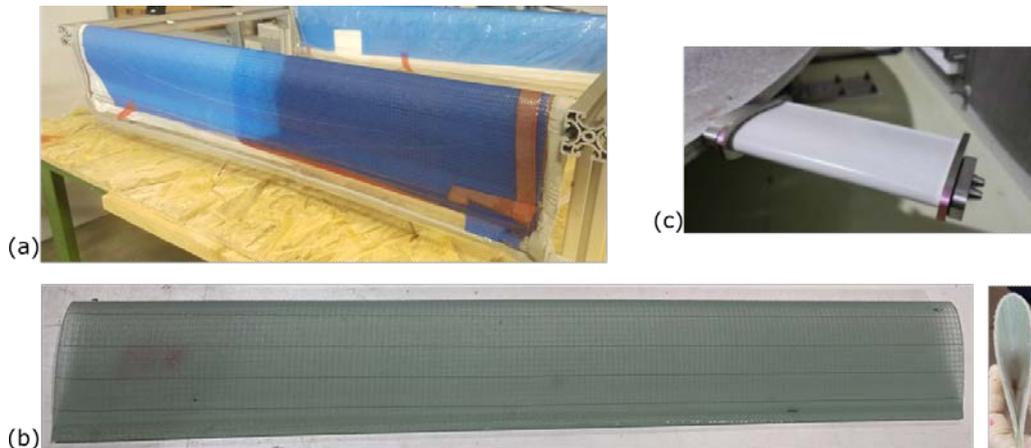


Abbildung 5: mit Gewebe und Vakuummaterialien überzogener Kern (a), 800 mm langes Fertigungsprofil (b) und beschichtete Probe (236 mm) im Prüfstand (c)

Ein Teil der hergestellten Prüfkörper mit den ausgewählten Rotorblattvorderkantenbeschichtungen wurde an verschiedenen Freibewitterungsständen ausgelagert.

Ein Vorteil von Freibewitterungsversuchen gegenüber Laborprüfungen ist, dass hier unter sehr anwendungsnahen Bedingungen geprüft wird, die der Komplexität der realen Bedingungen Rechnung tragen. Dies ermöglicht anhand der Standorte den systematischen Vergleich zwischen unterschiedlichen Beanspruchungen:

- Helgoland: Salzwasser, Kühl, UV (Off-Shore)
- Bewitterungsstand Bremen (vgl. On-/Off-Shore)
- Florida: starke UV-Beanspruchung und hohe Temperaturen (Ein Teil der Proben wurde von der Firma ATLAS MTT GmbH in Florida ausgelagert.)

Die Prüfstände in Bremen und Helgoland sind in der Abbildung 6 dargestellt.



Abbildung 6: Freibewitterung links Bremen und rechts Helgoland

Da die Freibewitterungen zur Prüfung der Beschichtungen meist sehr lange dauern (einige Jahre) wurden parallel Laborprüfungen durchgeführt. In der Kombination ergänzen sich Laborprüfungen und Freibewitterungen, aufgrund des komplementären Charakters, sehr gut und erlauben zusammen eine fundierte Aussage über das Langzeitverhalten von Schutzsystemen.

Es gibt verschiedene Prüfnormen zur künstlichen Bewitterung von Beschichtungen. Diese dienen als Ausgangsbasis der in diesem Projekt zu entwickelnden Laborprüfmethode. Von Bedeutung für dieses Projekt waren die folgenden Normen:

- DIN EN ISO 16474-2, Zyklus 1 Beschichtungsstoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten
- DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2, Kunststoffe - Künstliches Bestrahlen oder Bewittern in Geräten

Die Prüfkörper wurden für insgesamt 3.000 Stunden in den Prüfkammern ausgelagert und visuell alle 500 Stunden bewertet.

Zusätzlich wurden die Prüfkörper für 4.200 Stunden nach einer Korrosionsschutzprüfung nach DIN EN ISO 12944-9 ausgelagert, um Offshore-Bedingungen nachzustellen.

- DIN EN ISO 12944-9 (Beschichtungsstoffe – Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme; Teil 9 Beschichtungssysteme und Leistungsprüfverfahren im Labor für Bauwerke im Offshorebereich)

Diese Norm enthält ein Prüfprogramm für die beschleunigte Bewitterung, welches die Beanspruchung der Oberflächen unter Offshore-Bedingungen abbildet.

Auch wenn die Norm auf die Prüfung von Korrosionsschutzsystemen abzielt, könnte das Beanspruchungsszenario als Ausgangspunkt für die Spezifizierung eines Vorkonditionierungsverfahrens für Rotorblattvorderkantenbeschichtungen, vor der Erosionsprüfung durchaus geeignet sein. Der Prüfzyklus ist in der folgenden Abbildung (Abbildung 7) dargestellt.

| Tag 1 | Tag 2 | Tag 3 | Tag 4 | Tag 5 | Tag 6 | Tag 7 |
|---|-------|-------|--|-------|-------|---|
| UV/Kondensation — ISO 16474-3 | | | Neutraler Salzsprühnebel — ISO 9227 | | | Beanspruchung bei niedriger Temperatur (-20 ± 2) °C |
|  | | |  | | |  |

Abbildung 7: Prüfzyklus nach DIN EN ISO 12944-9

Die derzeit eingesetzten Methoden zur Prüfung der Beständigkeit von Rotorblattvorderkantenbeschichtungen gegen die Umwelteinflüsse UV-Bestrahlung, Temperatur und Feuchte (Bewitterung), beruhen auf den Erfahrungen der Lackindustrie, aus anderen Anwendungen, wie etwa der Luftfahrt.

6.1 Mess- und Prüfmethoden

6.1.1 Lichtmikroskopie

Die Lichtmikroskopie wurde eingesetzt, um die Oberflächen der Proben auf strukturelle Veränderungen, wie z.B. Risse zu untersuchen. Das reflektierte Licht lässt glatte, ebene Strukturen hell erscheinen, raue und mit einem Relief versehene Bereiche erscheinen partiell dunkel, da das auftreffende Licht in einem anderen Winkel reflektiert, also diffus gestreut wird. Zur Untersuchung der Proben des Projektes wurde ein Lichtmikroskop der Firma Leica verwendet.

6.1.2 FT-IR-Spektroskopie

Bei der Infrarot-Spektroskopie wird sich das Absorptionsverhalten insbesondere organischer Verbindungen von Infrarot-Strahlung zunutze gemacht. Bestimmte Molekülverbindungen und funktionelle Gruppen werden durch Infrarot-Strahlung unterschiedlicher Wellenlängenbereiche in verschiedenste Schwingungen versetzt. Dabei wird die Infrarotstrahlung aus diesem Wellenlängenbereich zum Teil absorbiert. In der Auswertung, dem Absorptions- oder Transmissionsspektrum, wird die Abhängigkeit der Absorptions- oder Transmissionsmenge der eingestrahlten IR-Strahlung gegen die Wellenlänge bzw. Wellenzahl des Lichtes dargestellt. Abhängig von der chemischen Struktur der analysierten Substanz sind die Absorptionsbereiche und -intensitäten unterschiedlich, so dass anhand meist mehrerer Absorptionsbanden (Peaks) im Absorptionsspektrum eine Identifikation der analysierten Substanz sowohl qualitativ als auch bedingt quantitativ möglich ist. Mittels IR-Spektroskopie wurden die im Rahmen des Projektes bewitterten Proben und die Feldproben bezüglich Veränderungen der chemischen Struktur der Beschichtung untersucht. Beschichtungssysteme bestehen aus einer Vielzahl von (organischen) Inhaltsstoffen, die anhand der Spektren nicht immer einzeln eindeutig identifiziert bzw. differenziert werden können. Somit wird bei komplexen Gemischen vielmehr vergleichend geprüft. Es werden die Spektren von unbewitterten Proben mit den Spektren der bewitterten Proben verglichen. Im Rahmen des Projektes wurden die Proben mit dem IR-Spektroskop Bruker Lumos mit stickstoffgekühltem Detektor im ATR-Verfahren untersucht.

6.1.3 Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Das Rasterelektronenmikroskop (REM) nutzt zur Bilderzeugung die Wechselwirkung eines Elektronenstrahls mit der untersuchten Probe. Dabei wird ein Primärelektronenstrahl erzeugt, der einen Bereich der Probe abrastert. Dabei werden zum Teil Elektronen von der Probenoberfläche reflektiert bzw. Sekundärelektronen erzeugt. Diese Elektronen können detektiert werden. Abhängig davon auf welches Element in der Probe die einzelnen Elektronen aus dem Primärelektronenstrahl treffen, ist die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Reflexion oder Erzeugung von Sekundärelektronen kommt, abhängig von der Ordnungszahl des Elements, auf das der Elektronenstrahl trifft, also letztlich von der Anzahl der Elektronen dieses Elements. Die Bilderzeugung des REM basiert folglich auf einem Elementkontrast: hellere Bereiche des erzeugten Bildes werden aufgrund relativ schwerer Elemente und dunklere Bereiche aufgrund relativ leichter Elemente erzeugt.

Der nutzbare Vergrößerungsbereich liegt bei bis zu 100.000-facher Vergrößerung. Das erreichbare Auflösungsvermögen ist im Vergleich zum Lichtmikroskop etwa um den Faktor 100 besser. Der besondere Vorteil des REM liegt in seiner hohen Tiefenschärfe.

Mit dem Rasterelektronenmikroskop können in Ergänzung zur Lichtmikroskopie sehr gut topografische Defekte untersucht und charakterisiert werden. Es wurde das Rasterelektronenmikroskop Phenom Pro X verwendet.

6.1.4 Energiedispersive Röntgenspektrometrie (EDX)

Zur Klärung der Elementzusammensetzung wird die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) eingesetzt. Mit diesem Verfahren können einzelne chemische Elemente nachgewiesen werden. Die im REM erfolgende Wechselwirkung zwischen Primärelektronenstrahl und Probenoberfläche führt, neben den in Kapitel 6.1.3 beschriebenen Wechselwirkungen, zu einer Anregung von Elektronen der Elemente der Probenoberfläche. Diese werden dadurch auf ein höheres Energieniveau gebracht. Unter Abgabe eines Röntgenquants gerät das angeregte Elektron wieder zurück in seinen ursprünglichen, energetisch vorteilhafteren Zustand.

Diese Röntgenquanten können detektiert werden und weisen eine spezifische Energie auf, die davon abhängig ist, von welchem Element sie emittiert wurden. Die detektierten Röntgenquanten können folglich hinsichtlich Ihrer detektierten Energie in ein Energiespektrum sortiert werden, das auf die Art und relative Menge der detektierten Elemente rückschließen lässt. Die EDX ist somit ein Analyseverfahren im Mikrobereich, das zur Elementanalyse im oberflächennahen Bereich von Festkörpern eingesetzt wird.

Die Informationen zur untersuchten Probe erhält man, abhängig von den Messbedingungen und dem Probenmaterial, aus einem oberflächennahen Probenvolumen mit einer Ausdehnung von ca. 1 bis 3 μm .

Auf den Probenoberflächen wurden Flächenscans (Mappings) mit den Beschleunigungsspannungen 10kV und 15kV durchgeführt, um einen Bindemittelabbau, Pigmentabbau oder Einlagerungen von Fremdpartikeln nachzuweisen. Zur Untersuchung der Elementzusammensetzung wurden die Proben des Projektes mit einem Rasterelektronenmikroskop PhenomWorld Pro X mit integrierter EDX-Analyse mittels BSE-Detektor verwendet.

6.1.5 Mechanische und Optische Prüfungen

Im Rahmen des Projektes war es sinnvoll, die mechanischen und optischen Eigenschaften der Beschichtung vor- und nach der Beanspruchung zu bestimmen und entsprechende Kennwerte zu ermitteln. Die relevanten Parameter waren:

- Adhäsion zum Untergrund
- Schlagfestigkeit (in Anlehnung an ISO 6272-1, nach ISO 29601 bewertet)
- Reißdehnung (freier Film)
- E-Modul (freier Film)
- Zugfestigkeit (freier Film)

Im Rahmen des Projektes wurden diverse normgerechte Prüfungen ausgewählt, um die mechanischen und optischen Eigenschaften vor und nach der Beanspruchung zu untersuchen und zu bewerten. Folgende Prüfmethode wurden mit dem projektbegleitenden Ausschuss ausgewählt.

- Medienaufnahme (Wasser, Salzlösung 3,5%)
- Beschichtungsstoffe - Gitterschnittprüfung (ISO 2409:2020); Deutsche Fassung EN ISO 2409:2020
- Beschichtungsstoffe - Abreißversuch zur Bestimmung der Haftfestigkeit (ISO/DIS 4624:2022)
- Beschichtungsstoffe - Bestimmung des Glanzwertes von Beschichtungen (außer Metallic-Beschichtungen) unter 20°, 60° und 85° nach DIN EN ISO 2813:2015-02
- Farbmessung nach DIN EN ISO 11664-5: Farbmessung - Teil 5: CIE 1976 L*u*v*-Farbenraum und gleichabständige u', v'-Farbtafel (ISO/CIE 11664-5:2016); Deutsche Fassung EN ISO 11664-5:2016
- Ausgabe 2017-01 Zugversuch nach DIN 53504:2017-03

6.1.6 Bestimmung des E-Moduls

Die Bestimmung des E-Moduls erfolgte nach der Norm DIN 53504 - Prüfung von Kautschuk und Elastomeren - Bestimmung von Reißfestigkeit, Zugfestigkeit, Reißdehnung und Spannungswerten im Zugversuch und erfolgte an der universal Zwick Prüfmaschine. Folgende Parameter wurden ausgewählt.

- Messlänge Standardweg: 20 mm
- Prüfgeschwindigkeit: 200 mm/min
- Umgebungstemperatur: 21°C
- Raumfeuchte: 48 % r.F.
- Prüfmaschine: Zwick 50kN [C1.130-0011]
- Kraftaufnehmer: 200N [C 1.132-0005]
- Probentyp: Schulterstab S2

Die folgenden Abbildungen zeigen den Probentyp zur Bestimmung der Zug-Dehnung und die Zwick Prüfmaschine mit Taster.

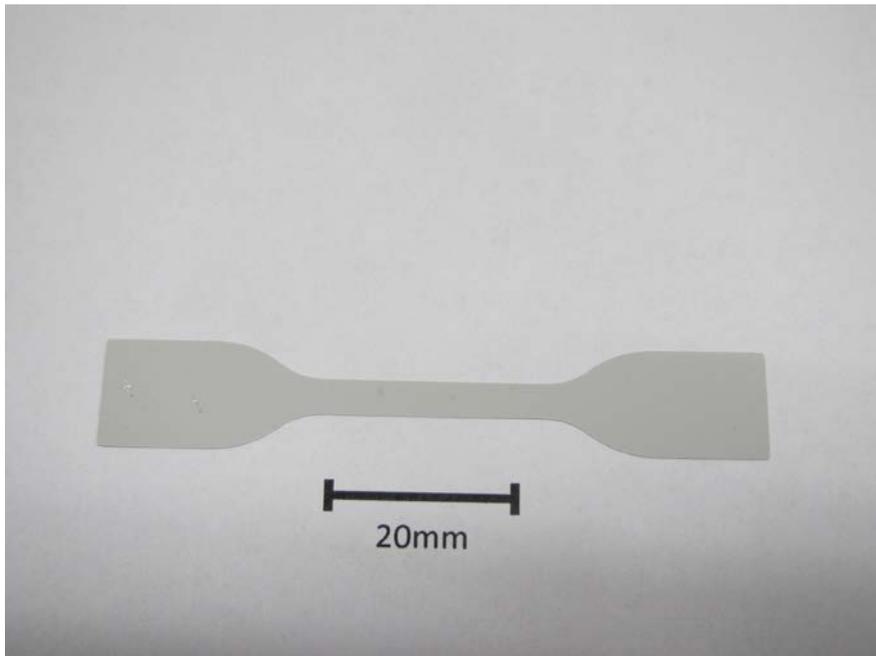


Abbildung 8: Prüfkörper Schulterstab S2 für Zugversuche



Abbildung 9: Universal Zwick Prüfgerät

6.1.7 Regenerosionsprüfungen nach ISO TS 19392-2

Für die Durchführung der Regenerosionsprüfungen am Fraunhofer IWES, wurde das Leading Edge Lab (LEL) verwendet. In Abbildung 10 ist eine Prinzip-Zeichnung des Prüfstandes sowie eine Innenansicht dargestellt. Der Prüfstand arbeitet mit dem Helikopterprinzip. An einer rotierenden Scheibe am Boden des Prüfstandes werden drei Proben befestigt. Die Schadensinitiierung erfolgt über Regentropfen, die in Regengeneratortanks 3 Meter über den Proben erzeugt werden.

Um verschiedene Blattspitzengeschwindigkeiten und Standortbedingungen möglichst realitätsnah nachzubilden, können verschiedene Parameter des Prüfstandes eingestellt werden. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den Prüfstand und das Prinzip der Regenerosionsprüfung.

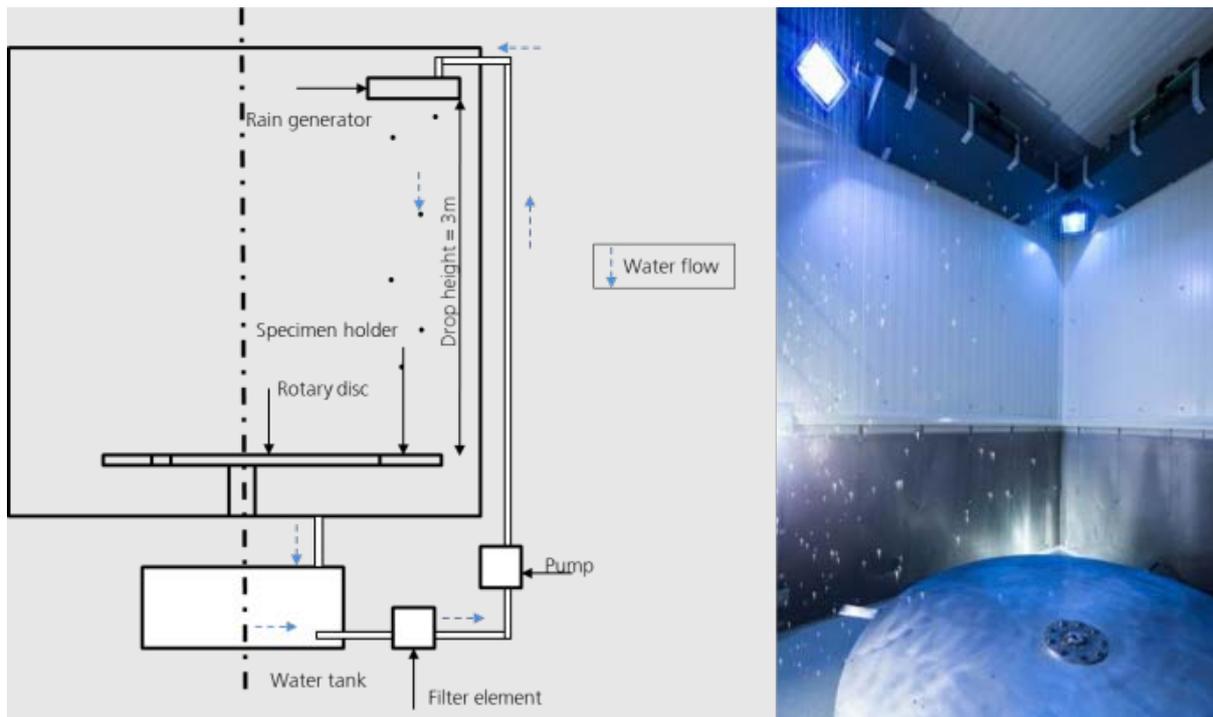


Abbildung 10: Regenerosionsprüfstand des Fraunhofer IWES

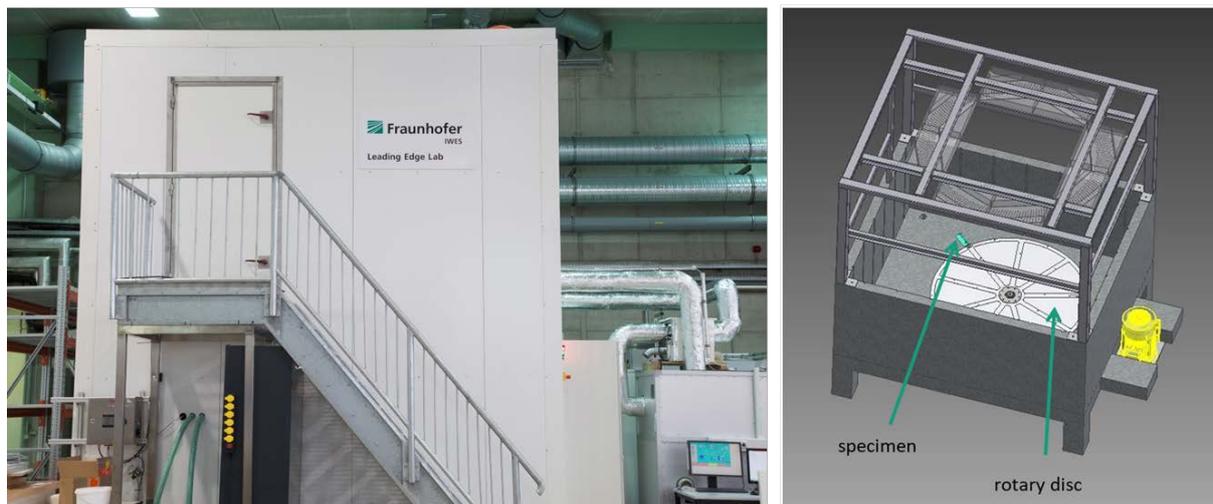


Abbildung 11: Prinzip des Prüfstandes

Im Rahmen des Projektes wurden die Versuchsparameter mit dem projektbegleitenden Ausschuss festgelegt und folgende Parameter ausgewählt.

Tabelle 2 Festlegung Prüfparameter Regenerosionsprüfungen

| Test parameter | ISO 19392-2 | IWES standard | Projekt |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------|----------------|
| Temperature of test medium | 20 ± 3°C | 25 ± 3°C | 20 ± 3°C |
| Tip Speed at specimen area | 80 to 200 m/s | 120 m/s | Start: 115 m/s |
| Droplet mean diameter | 1,5 to 5,5 mm | 1-2mm | 2 mm |
| Rain rate | 10 to 720 mm/h | 720 mm/h | 360 mm/h |
| Water flow | 1 to 60 l/min | 24 l/min | 12 l/min |

Die gängige Methode zum Auswerten von Regenerosionsprüfungen ist die im DNVGL-RP-0171 [22] beschriebene Schadenskurve, die den Masseverlust über die Zeit aufträgt und eine visuelle Bewertung hinsichtlich Schädigung der Beschichtung beinhaltet. Im Rahmen des Projektes wurde festgelegt, dass die Prüfung gemäß der Beurteilung in ISO 19392-2 „Determination and evaluation of resistance to rain erosion using rotating arm“ so lange durchgeführt wird, bis eine Schädigung des Substrates auftritt.

6.2 Beschaffung und Untersuchung von Feldproben

Zur Aufklärung der Schädigungsursache und-mechanismen für Feldschäden von Rotorblattvorderkantenbeschichtungen von WEA wurden Feldproben an verschiedenen Standorten entnommen (Tabelle 3). Bei Auslieferung einer WEA ist gesichert, mit welchen Materialien die Rotorblätter beschichtet sind. Aufgrund fehlender Dokumentation zu Reparaturvorgängen und Neubeschichtungen der Rotorblätter ist eine Rückführung auf die diesbezüglichen verwendeten Materialien nicht möglich.

Daraus ergibt sich eine relevante Unsicherheit bezüglich der erhaltenen Feldproben und deren tatsächlicher Identität.

6.2.1 Probenmatrix

Es konnten von folgenden Windenergieanlagen Feldproben genommen werden:

Tabelle 3 Übersicht der entnommenen Feldproben

| Bezeichnung | Standort | Baujahr | Beschichtung | Alter der Probe | Probenentnahme |
|--------------|-----------------------------------|---------------------|---|-----------------|----------------|
| Feldproben 1 | Windpark Odenwald, Neutscher Höhe | Inbetriebnahme 1994 | Folien der Firma 3M | Nicht bekannt | November 2019 |
| Feldproben 2 | Windpark Görtz, Küstenstandort | Mai 2001 | Nicht bekannt | Nicht bekannt | März 2020 |
| Feldproben 3 | Bremerhaven, Lune Deich | Nicht bekannt | Nicht bekannt | Nicht bekannt | Juni 2020 |
| Feldproben 4 | Altbokhorst | Nicht bekannt | Nicht bekannt, wahrscheinlich identisch mit Feldprobe 2 | Nicht bekannt | August 2020 |

Bei den durch das Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM) im November 2019 an zwei Windenergieanlagen entnommenen Proben (Feldproben 1) soll es sich laut Information des Windenergieanlagenbetreibers um Folien der Fa. 3M handeln.

Bei den Feldproben 2 und 4 soll es sich laut Information des Windenergieanlagenbetreibers um das gleiche Beschichtungsmaterial handeln. Um diese Aussagen zu bestätigen, wurden die Feldproben zunächst im Labor der Deutschen Forschungsgesellschaft für Oberflächenbehandlung e.V. (DFO) infrarotspektroskopisch untersucht.

Da das Beschichtungsmaterial laut Windenergieanlagenbetreiber der Feldproben 1 dem Beschichtungsmaterial der Firma 3M zugeordnet werden kann und dieses Material auch im Rahmen des Projektes bewittert und untersucht wurde, erfolgte ein Vergleich der Feldproben mit dem unbewitterten Material und dem im Rahmen des Projektes bewitterten Materials.

6.2.2 IR-spektroskopische Untersuchungen der Feldproben

Feldproben 1

Der IR-spektroskopische Vergleich der unbewitterten Proben (Folien der Firma 3M) mit den Feldproben 1 und den bewitterten Proben zeigt grundsätzlich Polyurethan-Spektren. Auffällig sind die Abweichungen der Feldprobe zu der unbewitterten und den bewitterten Proben bei den Wellenzahlen (ca.) 1720 und 730 cm^{-1} (Abbildungen 12 bis 15). Erstere kann der C=O-Bindung von Polyurethanen und letztere der sogenannten Rocking-Bande, länger-kettige $-(\text{CH}_2)_n$ -Bindungen, zugeordnet werden. Die Spektren der bewitterten Proben und der Feldprobe zeigen unterschiedliche Spektren. Falls es sich hier ursächlich um einen chemischen Abbau handelt, entspricht der Abbau der bewitterten Proben nicht dem der Feldproben.

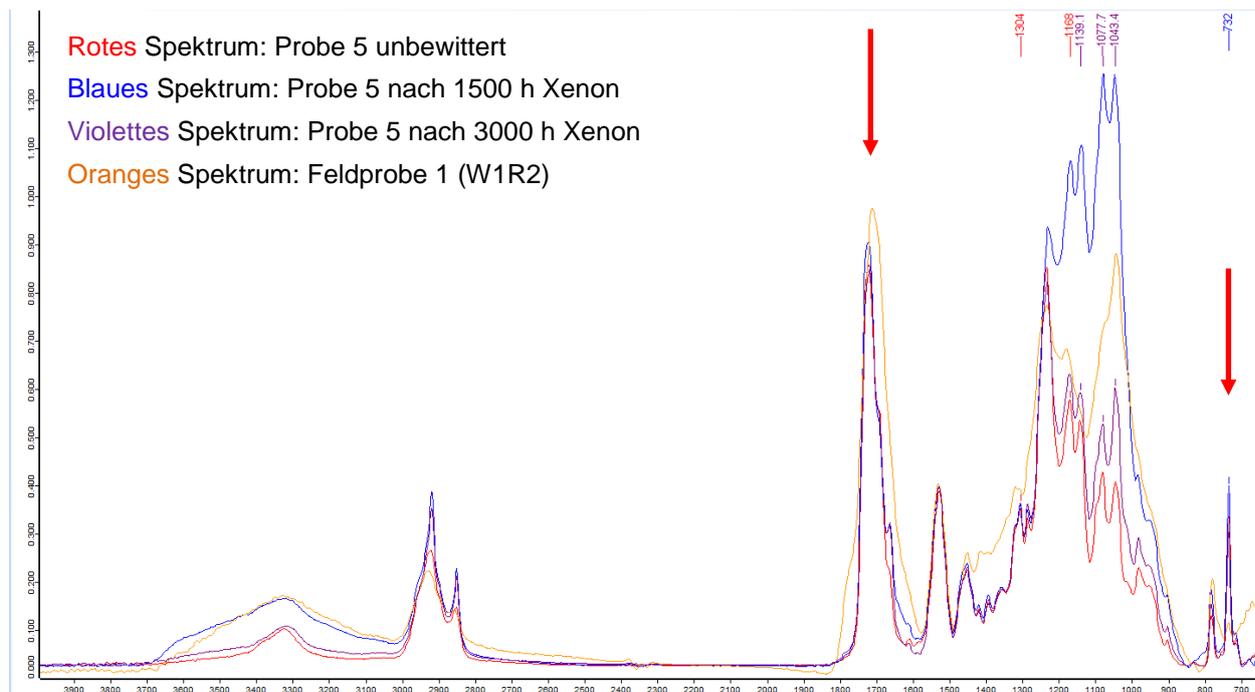


Abbildung 12: Vergleich der IR-Spektren der Folie der Fa. 3M unbewittert nach 1.500 Stunden und 3.000 Stunden Xenon (DIN EN ISO 16472-2 Zyklus 1 / DIN EN ISO 4892-2 Zyklus 1) und der Feldprobe 1

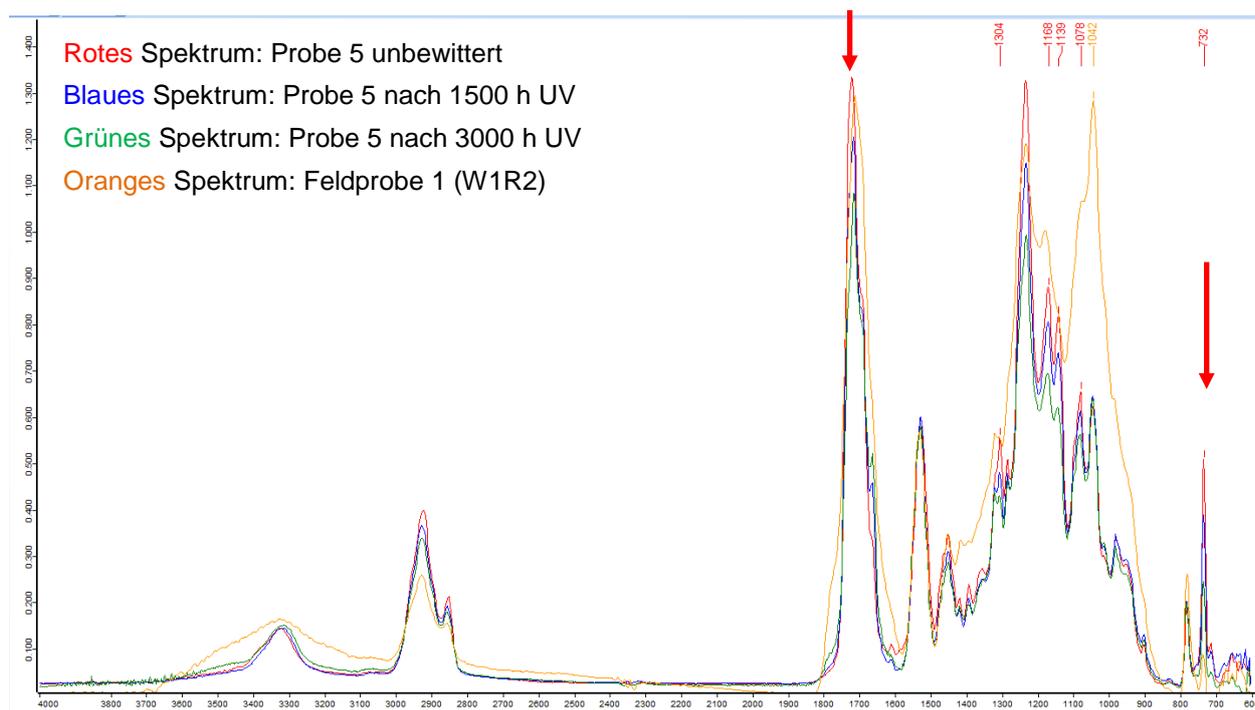


Abbildung 13: Vergleich der IR-Spektren der Folien der Fa. 3M unbewittert, nach 1.500 Stunden und 3.000 Stunden Fluoreszenztest (DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2) und der Feldprobe 1

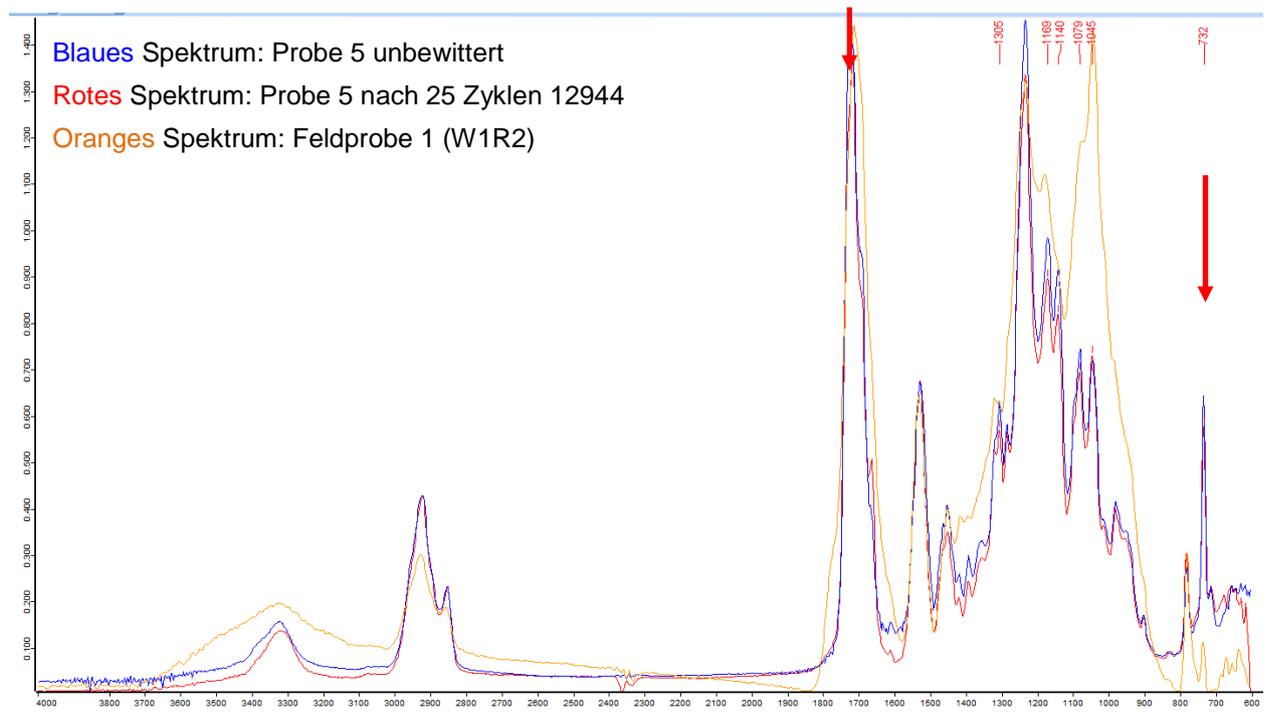


Abbildung 14: Vergleich der IR-Spektren der Folien der Fa. 3M unbewittert, nach 25 Zyklen Offshoretest (DIN EN ISO 12944-9) und der Feldprobe 1

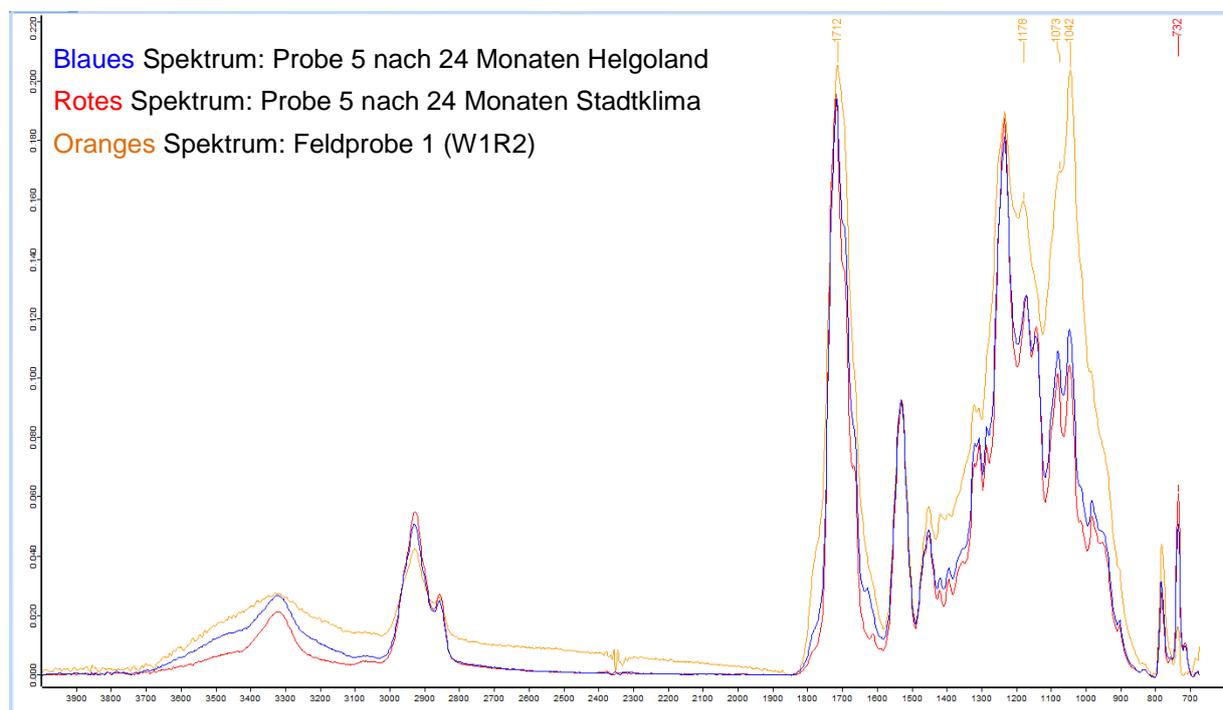


Abbildung 15: Vergleich der IR-Spektren der Folien der Fa. 3M nach 24 Monaten Helgoland, 24 Monaten Stadtklima und der Feldprobe 1

Beispielhaft wurden einige IR-Spektren der Feldprobe 1 und der im Rahmen des Projektes bewitterten Proben dargestellt (Abbildungen 12-15). Die IR-spektroskopischen

Spektren aller Proben der Laborbewitterungen gemäß DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1 / DIN EN ISO 4892-2 Zyklus 1, DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2, DIN EN ISO 12944-9 und den Freibewitterungen 24 Monate Stadtklima, 24 Monate Helgoland und 24 Monate Florida zeigten signifikante Abweichungen zu den IR-Spektren der Feldproben 1. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass keine der gewählten Bewitterungen der Alterung im Feld entsprechen.

Auf Basis einer einzelnen identifizierten Feldprobe, ist eine Schlussfolgerung, dass keine der gewählten Bewitterungen die Alterungen von Feldproben widerspiegeln, statistisch nicht haltbar. Da allerdings alle im Rahmen des Projektes bewitterten Proben starke Unterschiede im IR-spektroskopischen Vergleich zur Feldprobe 1 zeigen, besteht ein Zweifel an der Identität der Feldprobe 1.

Feldproben 2 und Feldproben 4

Laut Information des Windenergieanlagenbetreibers handelt es sich bei den Feldproben 2 und 4 um das gleiche Beschichtungsmaterial. Die WEA der Feldproben 2 befand sich 2 km von der Küste entfernt, die WEA der Feldprobe 4 befand sich im Inland. Um den Einfluss der verschiedenen Standorte auf die Beschichtung zu untersuchen, erfolgte ein IR-spektroskopischer Vergleich der Feldproben 2 und 4.

Anhand der Fotodokumentation (Abbildungen 16 a-c) während der Probeentnahme der Feldproben 2, konnte bereits visuell festgestellt werden, dass sich auf den verschiedenen Rotorblättern unterschiedliche Beschichtungen befanden.

Feldproben 2, Entnahme: 26.03.2020



a) Feldproben 2, Probe 5



b) Feldproben 2, Probe 10



c) Feldproben 2, Proben 14 und 15

Abbildung 16 a-c: Übersicht der verschiedenen Materialien der Feldproben 2

Da der visuelle Vergleich der unterschiedlichen Entnahmestellen der Feldproben 2 (Abbildungen 16 a-c) bereits bestätigt, dass es sich um unterschiedliche Materialien handelt, ist ein IR-spektroskopischer Vergleich der Feldproben 2 und 4 nicht zielführend. Die Proben wurden daher separat untersucht.

IR-Spektroskopische Untersuchung von 7 verschiedenen Proben der Feldproben 2

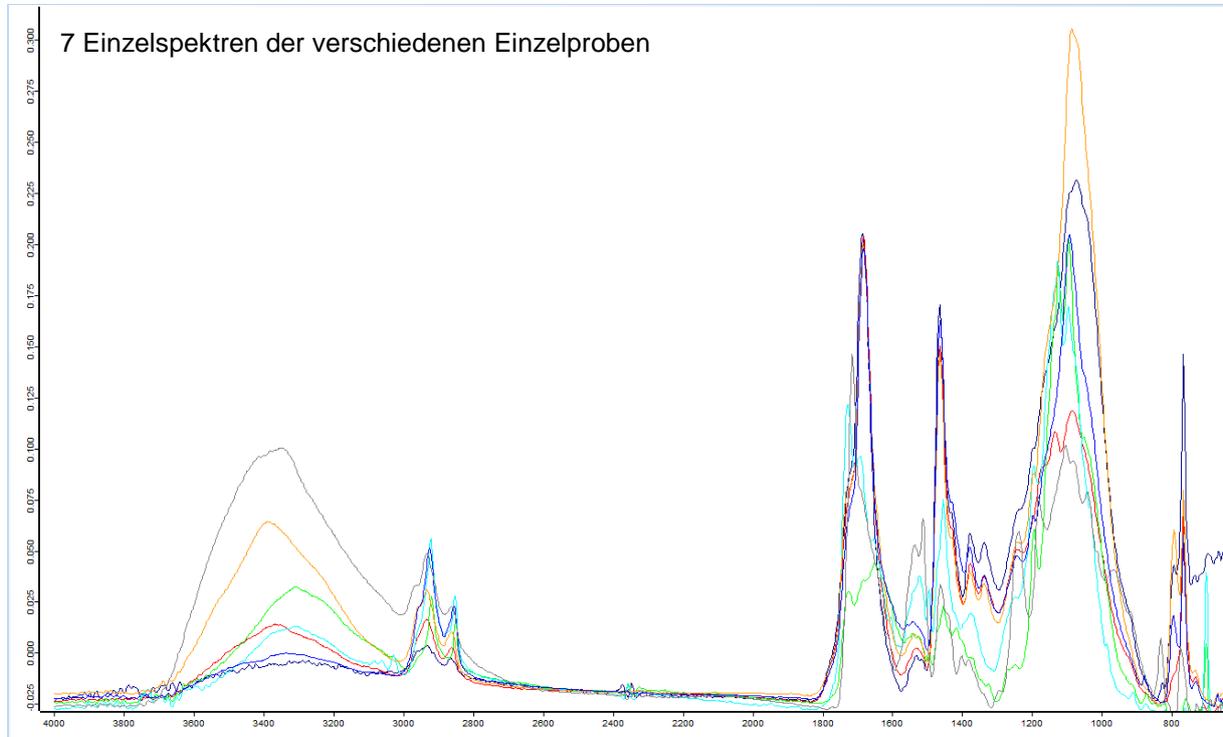


Abbildung 17: Vergleich der IR-Spektren von 7 Einzelproben der Feldproben 2

IR- Spektroskopische Untersuchung von 3 verschiedenen Proben der Feldproben 4

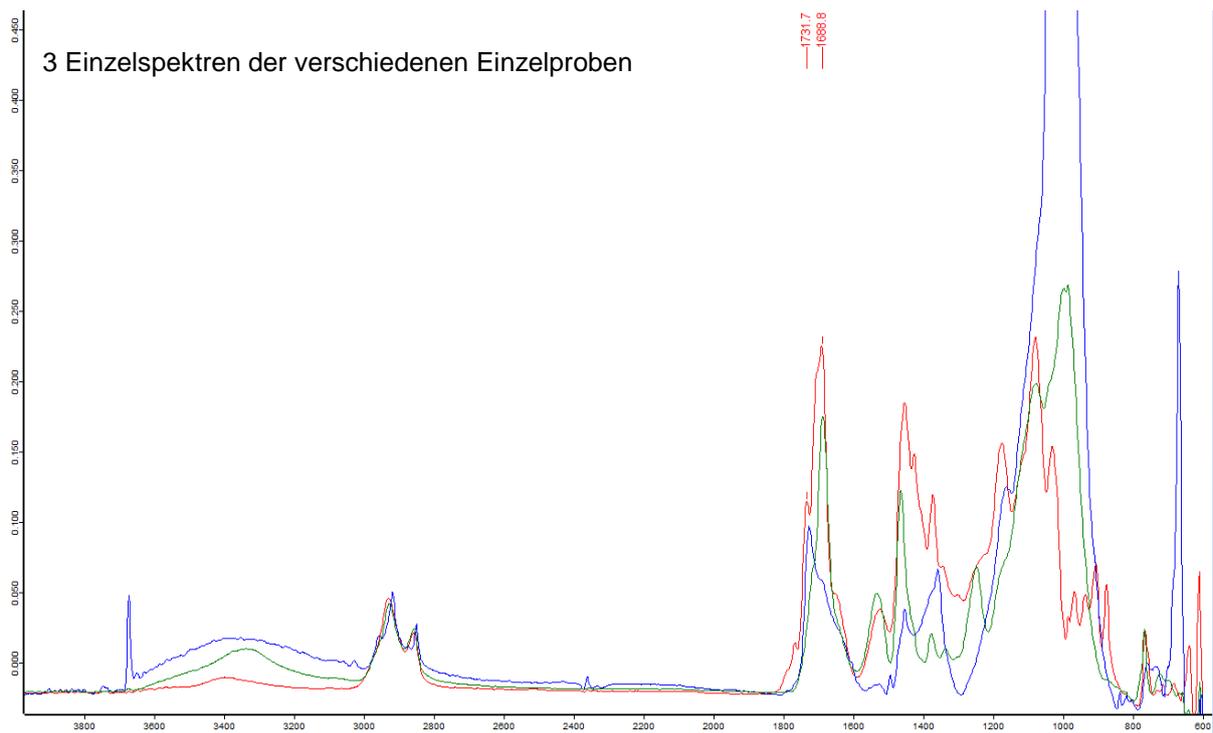


Abbildung 18: Vergleich der IR-Spektren von 3 Einzelproben der Feldproben 2

Die Untersuchungen der Feldproben 2 und 4 (Abbildungen 17 und 18) zeigen, dass es sich teilweise um PU-Systeme handelt, deren IR-Spektren jedoch starke Unterschiede aufweisen. Hierbei könnte es sich um unterschiedliche chemische Abbaumechanismen handeln oder um unterschiedliche Materialien. Um die Ursache der Unterschiede klar zu definieren, wären unbewitterte Proben der Beschichtung für einen entsprechenden Abgleich notwendig. Da keine unbewitterten Proben dieser Beschichtung vorliegen und die Beschaffung auch nach längeren Bemühungen nicht möglich ist, kann die Ursache der unterschiedlichen Spektren nicht eindeutig geklärt werden.

Feldproben 3

Zur Identität der Feldproben 3 liegen keine Informationen vor. Es erfolgte eine IR-spektroskopische Untersuchungen der visuell ähnlichen Einzelproben.

IR-Spektroskopische Untersuchung von 4 visuell ähnlichen Proben der Feldproben 3

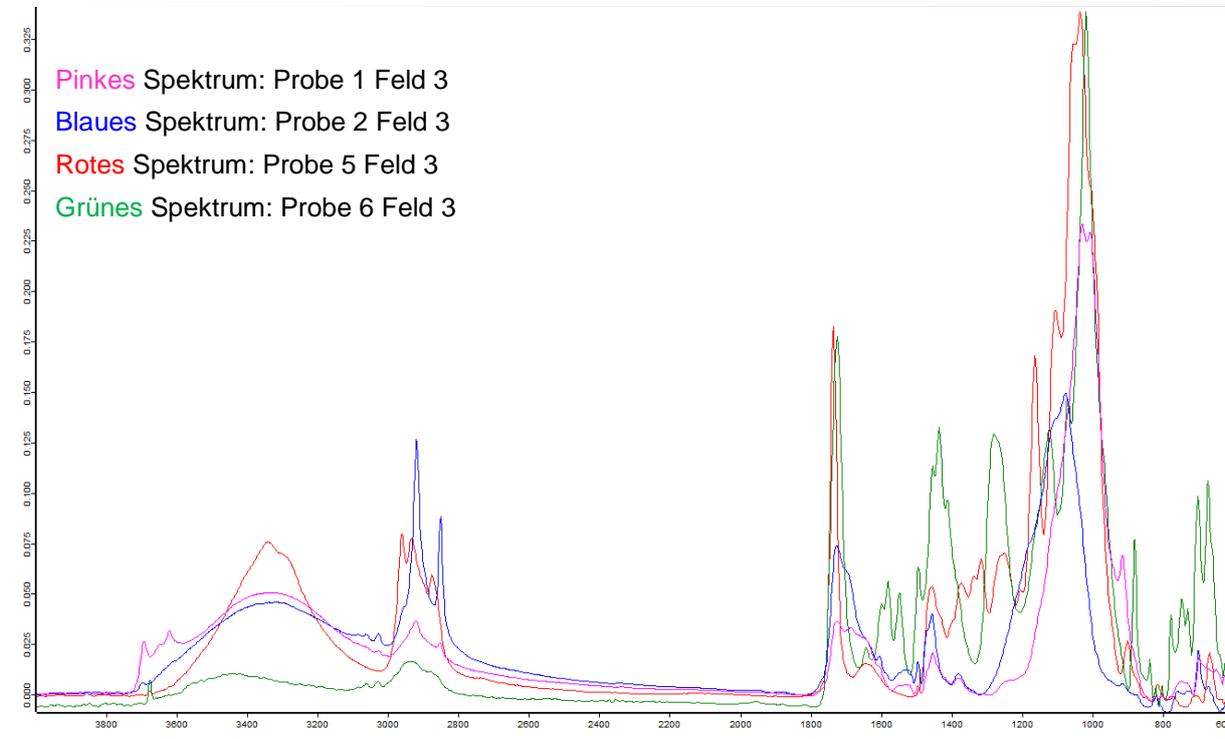


Abbildung 19: Vergleich der IR-Spektren der Feldprobe 3

Die IR-spektroskopischen Untersuchungen der visuell ähnlichen Einzelproben 1, 2, 5 und 6 der Feldproben 3 (Abbildung 19) ergaben unterschiedliche Spektren. Es handelt sich wahrscheinlich um unterschiedliche Beschichtungen. In den Bereichen der Probenahme wurden verschiedene Materialien eingesetzt. Auch hier war es nach längeren Bemühungen nicht möglich, unbewitterte Proben dieser Beschichtungen zu erhalten. Somit kann auch hier die Ursache der unterschiedlichen Spektren nicht klar definiert werden.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Ein Vergleich der Feldproben 2, 3 und 4 mit unbewitterten Proben (Abbildungen 16-19) und eine zielführende Interpretation der Ergebnisse ist nicht möglich, da es, auch nach längeren Bemühungen, nicht möglich war, unbewitterte Proben dieser Beschichtungen zu erhalten.

Aufgrund der IR-spektroskopischen Ergebnisse ist die Identität der Feldprobe 1 anzuzweifeln (Abbildungen 12-15). Eine zielführende Auswertung der Ergebnisse ist somit nicht möglich.

6.2.3 REM/EDX-Untersuchungen der Feldproben

Weiterhin wurden die Feldproben mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht. Hintergrund ist die Charakterisierung von topografischen und chemischen Veränderungen der verschiedenen Probenoberflächen und ein entsprechender Abgleich zu Feldproben. Nachfolgend sind einige exemplarische Untersuchungsergebnisse dargestellt und beschrieben.

Feldproben 1

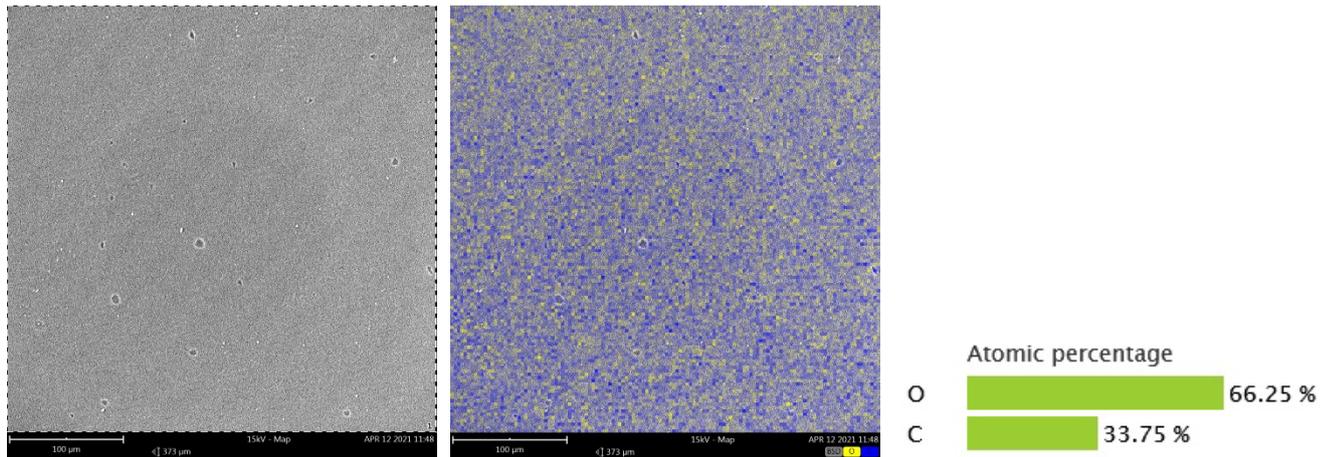


Abbildung 20: REM/EDX-Untersuchung der unbewitterten Proben (Folie der Firma 3M)

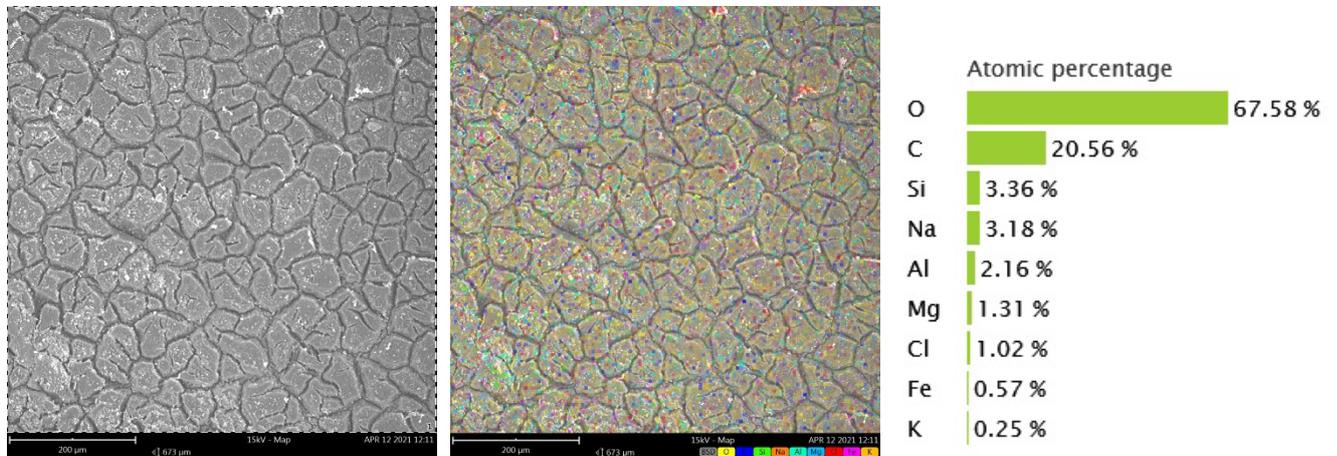


Abbildung 21: REM/EDX-Untersuchung der Feldproben 1 Probe W1R2 (Folien der Firma 3M)

Die vergleichende REM/EDX-Untersuchung der unbewitterten Proben (Folien der Firma 3M), mit den Feldproben 1 (Abbildungen 20 und 21) zeigt eine deutliche Veränderung in der Struktur und eine Verunreinigung der Oberfläche durch z.B. Salze (Natriumchlorid).

Feldproben 2

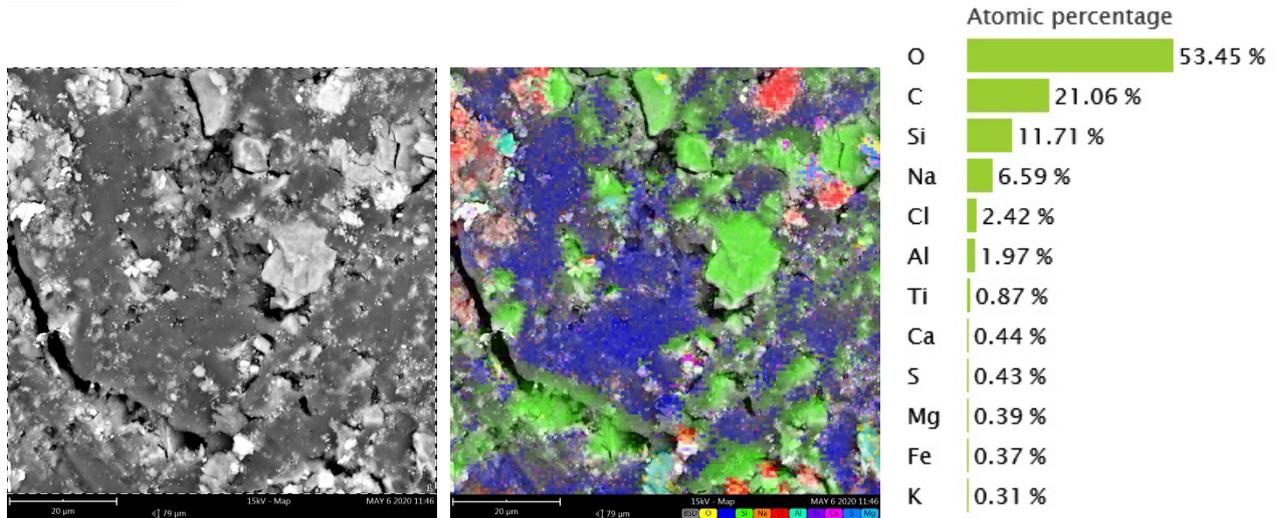


Abbildung 22: REM/EDX-Untersuchung Feldprobe 2 Probe 2

Die REM/EDX-Untersuchung der Feldprobe 2 Probe 2 (Abbildung 22) zeigt diverse Verunreinigungen (Natrium, Chlor, etc.) und einige typische Bestandteile von Beschichtungen (Sauerstoff, Kohlenstoff, Silicium, Calcium, etc.).

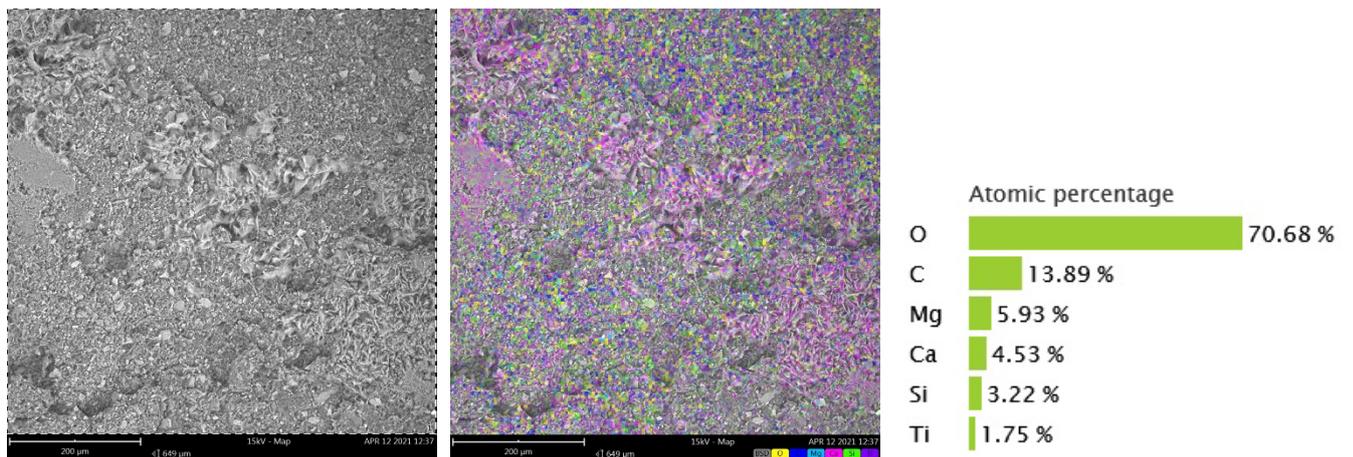


Abbildung 23: REM/EDX-Untersuchung Feldprobe 3 Probe 6

Die REM/EDX-Untersuchung der Feldprobe 3 Probe 6 (Abbildung 23) zeigt kaum Verunreinigungen. Die detektierten Elemente sind wahrscheinlich der Beschichtung zuzuordnen.

Feldproben 4

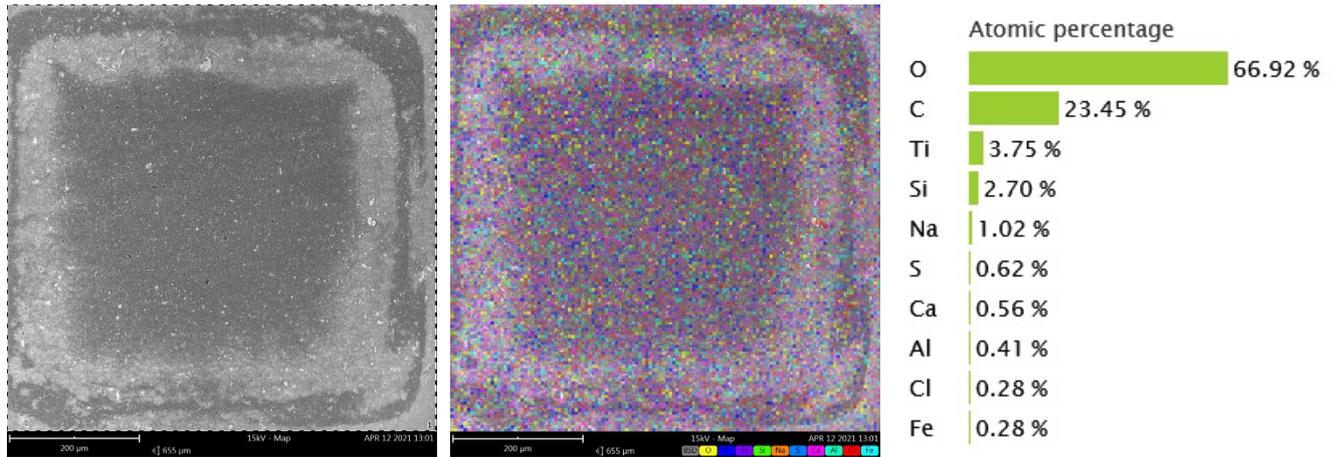


Abbildung 24: REM/EDX-Untersuchung Feldprobe 4 Probe 1

Die REM/EDX-Untersuchung der Feldprobe 4 Probe 1 (Abbildung 24) zeigt diverse Verunreinigungen (Natrium, Chlor, etc.) und einige typische Bestandteile von Beschichtungen (Sauerstoff, Kohlenstoff, Silicium, Calcium, Titan, etc.).

Anmerkung: Die rechteckige Struktur auf den oben gezeigten Aufnahmen kommt durch eine Aufladung der Probe im REM zustande, hat aber auf die Messergebnisse keinen Einfluss.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus den Ergebnissen der REM/EDX-Untersuchungen der Feldproben (Abbildungen 20 - 24) konnten lediglich Oberflächenveränderungen (Risse) und Verunreinigungen nachgewiesen werden. Rückschlüsse auf Schädigungsursachen und -mechanismen konnten anhand dieser Ergebnisse nicht gezogen werden.

Um Rückschlüsse auf Schädigungsursachen und -mechanismen der Beschichtungsmaterialien aus dem Feld ziehen zu können, muss ein Vergleich mit unbewittertem Material erfolgen. Da dies aufgrund der zweifelhaften Identität der Feldproben bzw. dem Mangel an unbewitterten Beschichtungsmaterialien nicht möglich war, können die Schäden nicht aufgeklärt werden.

6.3 Auswertung der analytischen Untersuchungen der im Rahmen des Projektes ausgelagerten Proben

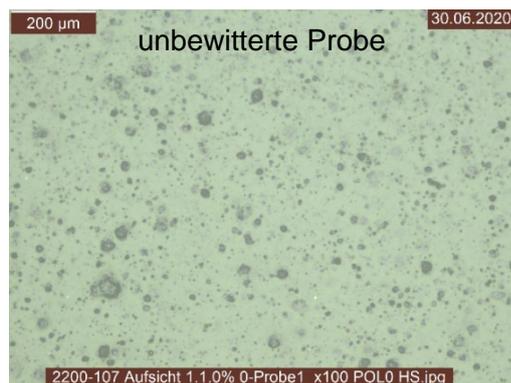
Tabelle 4 Probenübersicht und Kurzbezeichnungen

| Bewitterung | Kurzbezeichnung |
|--|----------------------|
| Unbewitterte Probe | 0-Probe |
| 1500 / 3000 h künstliche Bewitterung DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1, DIN EN ISO 4892-2 Zyklus 1 | 1500 bzw. 3000 Xenon |
| 1500 / 3000 h künstliche Bewitterung DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2 | 1500 bzw. 3000 UV |
| 25 Zyklen künstliche Bewitterung DIN EN ISO 12944-9 | 12944 |
| 12 / 24 Monate Außenbewitterung Stadtklima | Dach 12 bzw. 24 |
| 12 / 24 Monate Außenbewitterung Florida | Florida 12 bzw. 24 |
| 12 / 24 Monate Außenbewitterung Helgoland | Helgo 12 bzw. 24 |

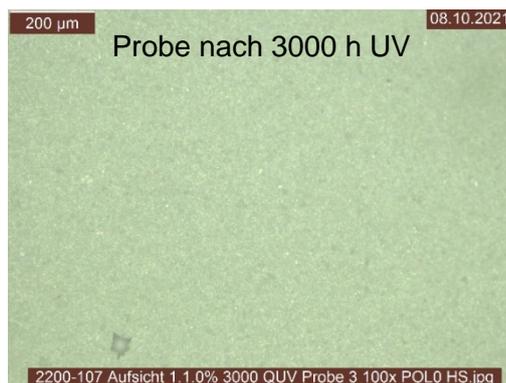
6.3.1 Lichtmikroskopische Untersuchungen

Zur Untersuchung der Oberflächen der Proben auf strukturelle Veränderungen, wie z.B. Risse, wurden die im Rahmen des Projektes bewitterten Proben lichtmikroskopisch in 50-facher und 100-facher Vergrößerung untersucht und mit den Proben ohne Beanspruchung verglichen. Insgesamt wurden 504 lichtmikroskopische Aufnahmen erstellt.

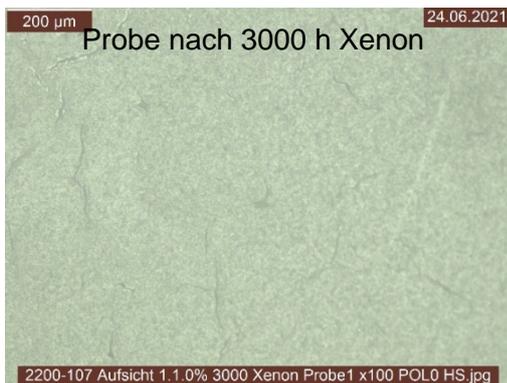
Beispielhaft werden hier die lichtmikroskopischen Untersuchungen des Systems 2 (ohne UV-Absorber) dargestellt.



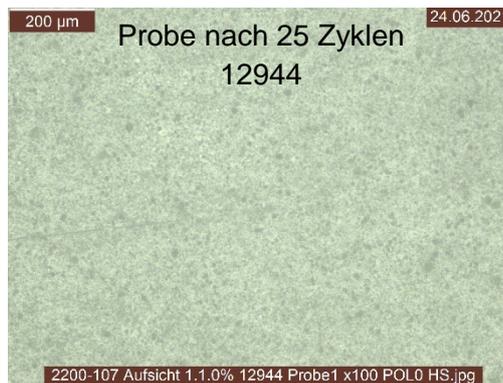
a) System 2, unbewittert



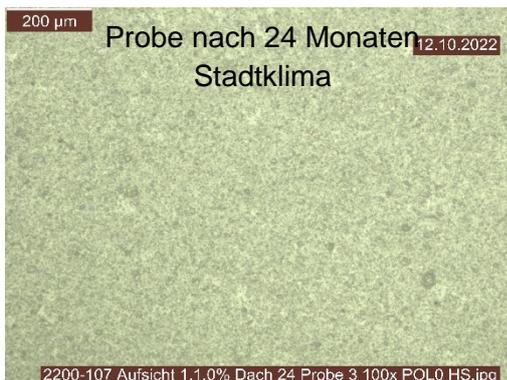
b) System 2 nach 3000 h UV



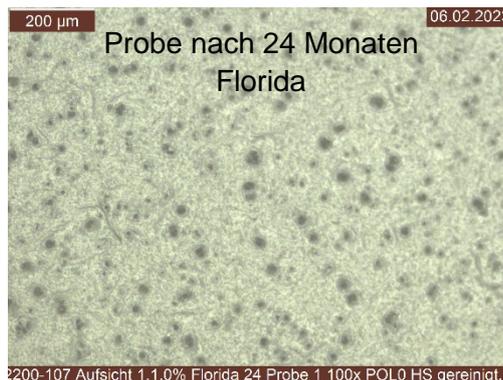
c) System 2 nach 3000 h Xenon



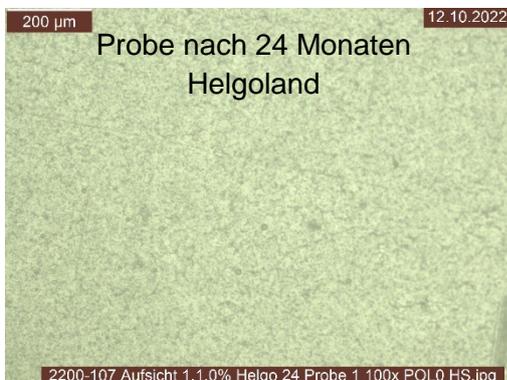
d) System 2 nach 25 Zyklen 12944



e) System 2 nach 24 Monaten
Stadtklima



f) System 2 nach 24 Monaten
Florida



g) System 2 nach 24 Monaten
Helgoland

Abbildung 25 a- g: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Oberflächen des Systems 2

Der Vergleich der lichtmikroskopischen Bilder (Abbildungen 25 a-g) zeigte starke Blasenbildung bei der unbewitterten Probe (Abbildung 25 a). Aufgrund der händischen Applikation des Beschichtungsmaterials auf das Substrat kam es bei einigen Proben zu Blasenbildung und zu Schwankungen in der Schichtdicke. Nach 3000 h Xenon-Bewitterung (DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1, DIN EN ISO 4892-2 Zyklus 1) ist bei System 2 eine Rissbildung sichtbar (Abbildung 25 c), die durch REM-Aufnahmen bestätigt werden konnte. Die REM/EDX Untersuchung aller Beschichtungssysteme nach den Xenonbewitterungen zeigte, dass es sich bei anderen Systemen nicht um Risse in der Beschichtung handelte,

sondern um Risse in einem anorganischen Belag. Die nähere Erläuterung erfolgt in Kapitel 6.3.3.

Einige Systeme zeigten nach 12 und 24 Monaten Außenbewitterung in Florida starke Verunreinigungen (z.B. Abbildung 25 f), die sich durch eine Reinigung mit entionisiertem Wasser nicht ausreichend entfernen ließen. Die REM/EDX-Untersuchung (z.B. Abbildungen 26 und 27) in Zusammenhang mit den lichtmikroskopischen Untersuchungen ergab, dass es sich hierbei um organische Verunreinigungen handelt, die im Rahmen des Projektes nicht weiter identifiziert wurden, jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit auf pflanzlichen Bewuchs oder Pilzbewuchs zurückzuführen sind.

REM/EDX-Untersuchung der organischen Verunreinigungen

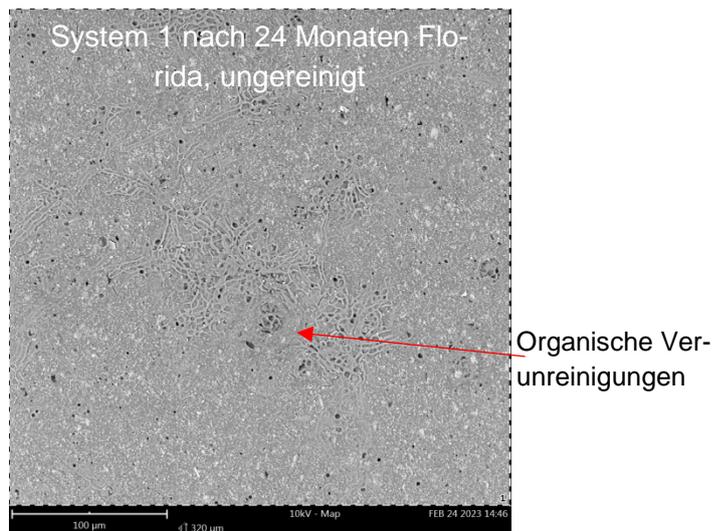


Abbildung 26: REM-Aufnahme des Systems 1 nach 24 Monaten Florida mit organischen Verunreinigungen

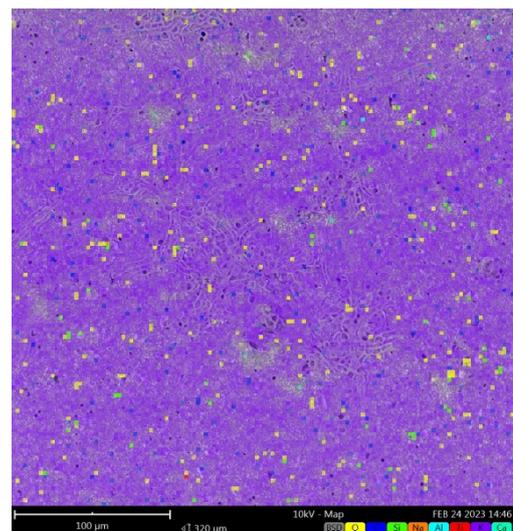


Abbildung 27: EDX-Mapping des Systems 1 über den Bereich der organischen Verunreinigungen

Mittels EDX-Mapping über den Bereich der organischen Verunreinigungen (Abbildung 27) ließen sich keine Fremdelemente detektieren. Die organischen Verunreinigungen haben jedoch einen Einfluss auf die bei den REM/EDX-Untersuchungen der Proben nach 24 Monaten Lagerung in Florida ermittelten Kohlenstoffgehalte in Prozent bezogen auf die Fläche. Die Ergebnisse wurden dennoch in die graphische Darstellung der Kohlenstoff- (%C) und Titangehalte (%Ti) mit aufgenommen (Kapitel 6.3.4).

Um Auswirkungen auf die IR-Ergebnisse auszuschließen, wurden die visuell dunklen und visuell hellen Bereiche mit entionisiertem Wasser gereinigt und vergleichend untersucht.

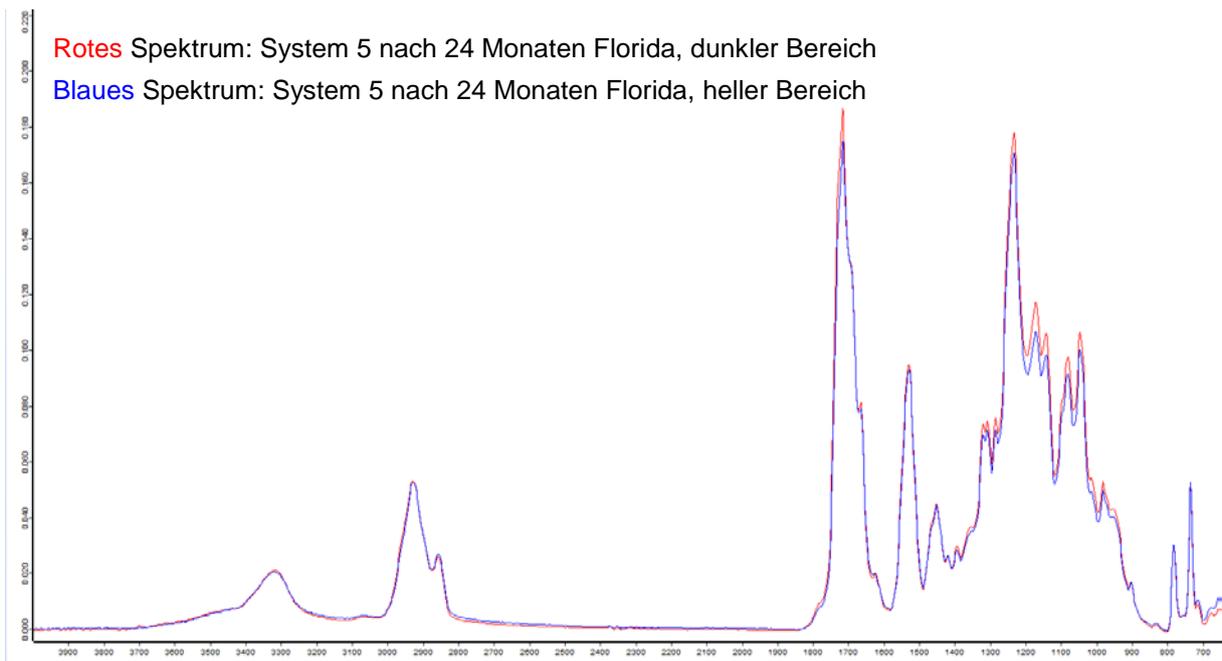


Abbildung 28: Vergleich der IR-Spektren der dunklen und hellen Bereiche des Systems 5 nach 24 Monaten Florida

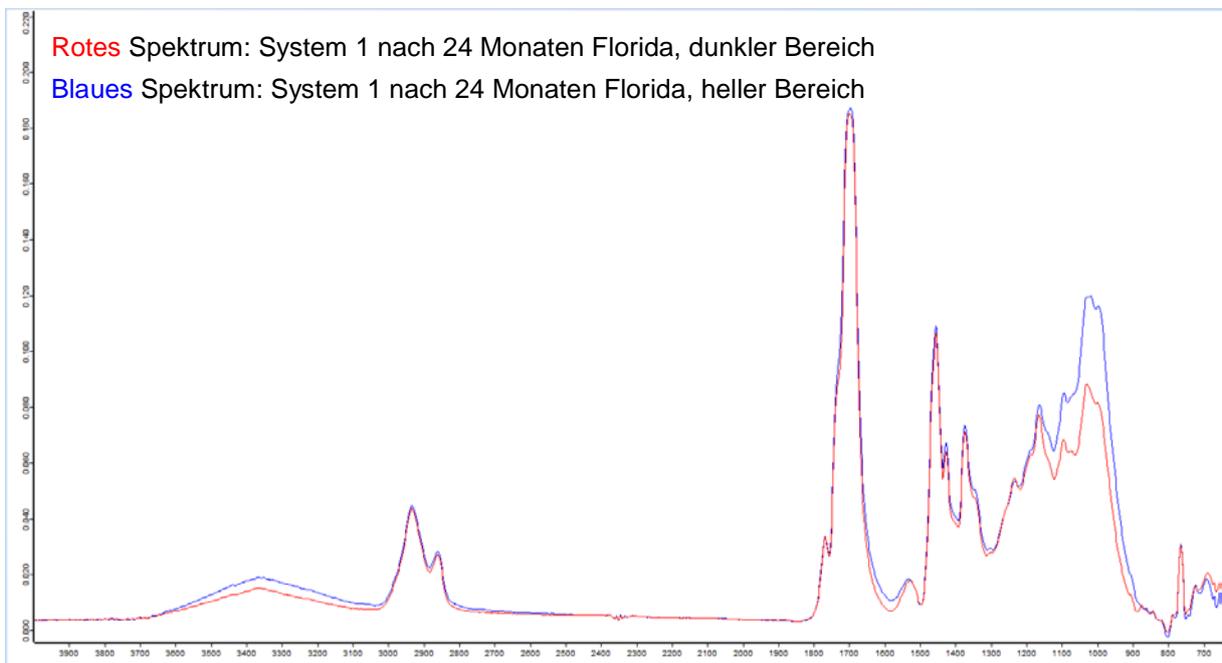


Abbildung 29: Vergleich der IR-Spektren der dunklen und hellen Bereiche des Systems 1 nach 24 Monaten Florida

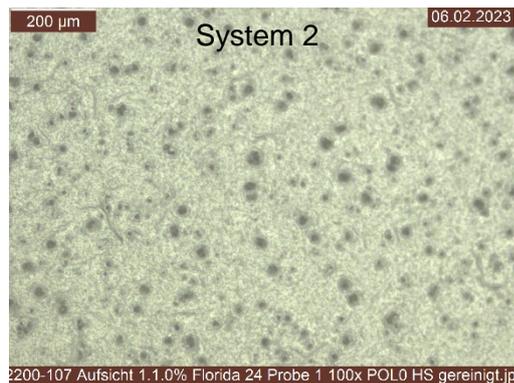
Ein wesentlicher Einfluss des organischen Belages auf die IR-Spektroskopischen Ergebnisse war nicht nachzuweisen (Abbildungen 28 und 29). Das lässt auf einen sehr dünnen Belag schließen, der bei der IR-Spektroskopie nur in sehr geringem Maße zum resultierenden Messspektrum beiträgt bzw. vollständig vom Spektrum der Beschichtung überlagert wird.

Grund dafür könnte sein, dass das verwendete IR-Spektroskop mit der hier angewendeten ATR-Methode immer ein gewisses Probenvolumen von ca. 1 μm auch in die Tiefe der Probe vermisst.

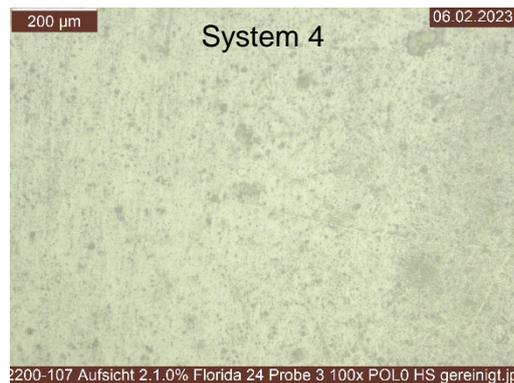
Weitergehende Reinigungsversuche wurden nicht getätigt, um die Oberfläche der Beschichtungen nicht zu verletzen oder die oberste Schicht abzutragen. Auffällig ist, dass der Grad der organischen Verunreinigung vom Beschichtungssystem abhängig ist.

Beispielhaft werden hier die lichtmikroskopischen Untersuchungen verschiedener Systeme nach der Außenbewitterung für 24 Monate in Florida dargestellt.

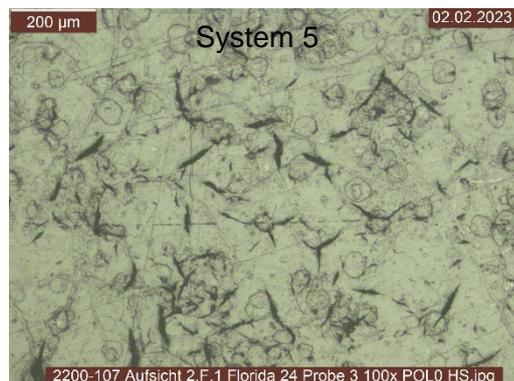
Grad der organischen Verunreinigung bei unterschiedlichen Beschichtungssystemen nach 24 Monaten Florida



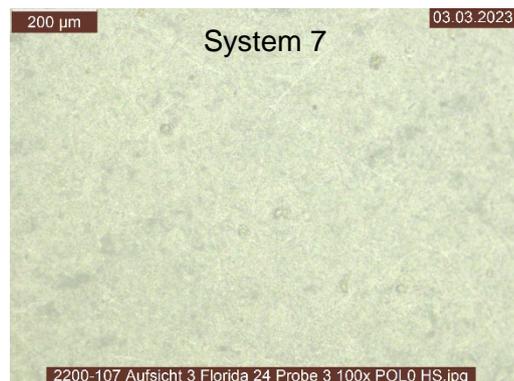
a) System 1 nach 24 Monaten Florida



b) System 4 nach 24 Monaten Florida



c) System 5 nach 24 Monaten Florida



d) System 7 nach 24 Monaten Florida

Abbildung 30: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Oberflächen verschiedener Systeme nach 24 Monate Florida

Zusammenfassung der Ergebnisse

Lichtmikroskopisch konnten an unbewitterten und bewitterten Proben Blasen an der Oberfläche nachgewiesen werden (z.B. Abbildung 25 a), die wahrscheinlich durch die händische Applikation des Beschichtungsmaterials auf das Substrat zu Stande kamen. Aus diesem Grund wurden die Blasen bei den weiteren Untersuchungen nicht berücksichtigt. Weiterhin wurden Verunreinigungen und strukturelle Veränderungen festgestellt (Abbildungen 26 b-g). Auffällig war die organische Verunreinigung nach der Außenbewitterung für 24 Monate in Florida in Abhängigkeit vom Beschichtungsmaterial (Abbildungen 30 a-d).

Da entsprechende Feldproben nicht vorliegen, konnten keine Rückschlüsse auf Schädigungsursachen und -mechanismen der Beschichtungsmaterialien aus dem Feld gezogen werden.

6.3.2 REM-Untersuchungen

Zur genaueren Untersuchung der Oberflächen der Proben auf strukturelle Veränderungen, wie z.B. Risse, wurden von den im Rahmen des Projektes bewitterten Proben REM-Aufnahmen erstellt. Es wurden von jeder Probe jeweils eine Aufnahme mit den Beschleunigungsspannungen 10 kV und 15 kV aufgenommen. Insgesamt wurden 504 REM-Aufnahmen aufgenommen.

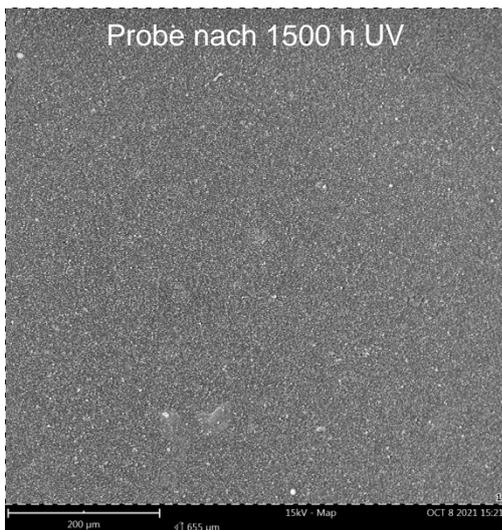
Beispielhaft werden hier die Aufnahmen bei 15 kV des Systems 4 (ohne UV-Absorber) dargestellt.



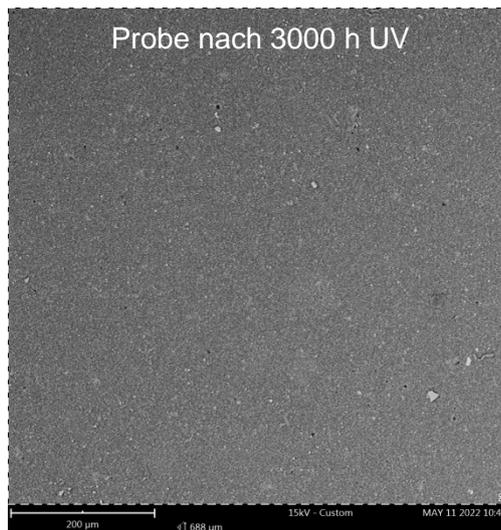
a) System 4, unbewittert



b) System 4 nach 25 Zyklen 12944

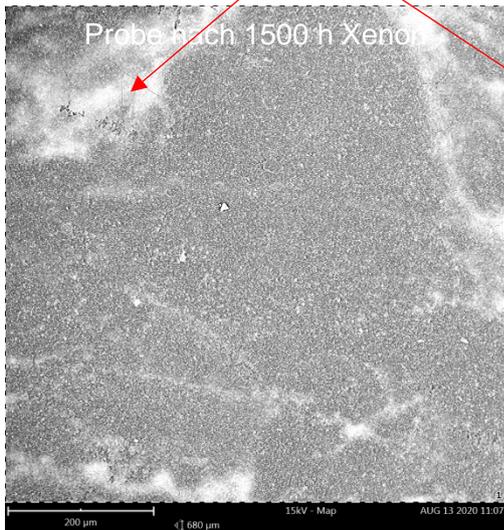


c) System 4 nach 1500 h UV

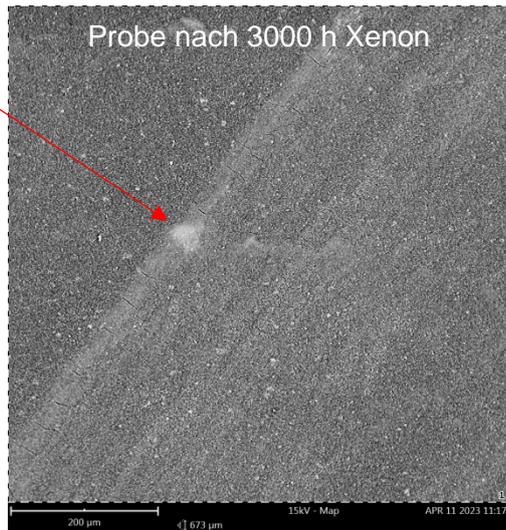


d) System 4 nach 3000 h UV

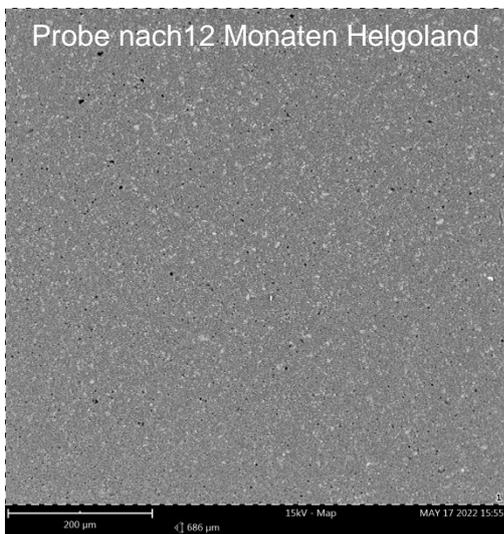
SiO₂-Belag



e) System 4 nach 1500 h Xenon



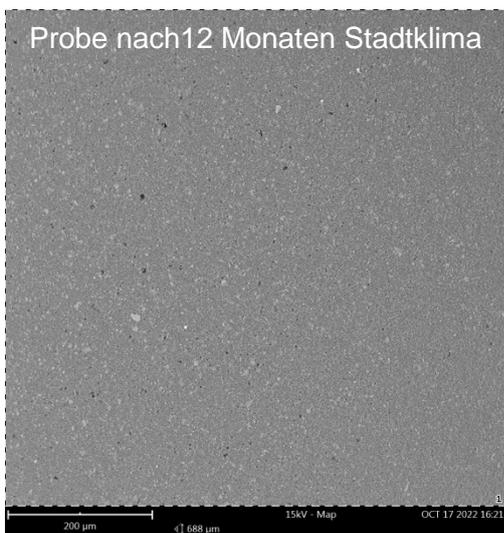
f) System 4 nach 3000 h Xenon



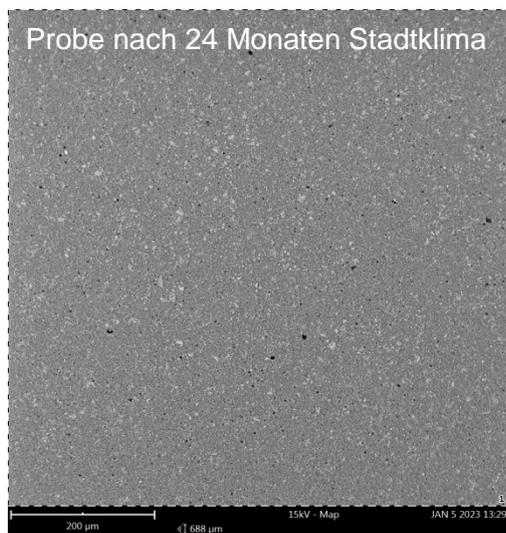
g) System 4 nach 12 Monaten Helgoland



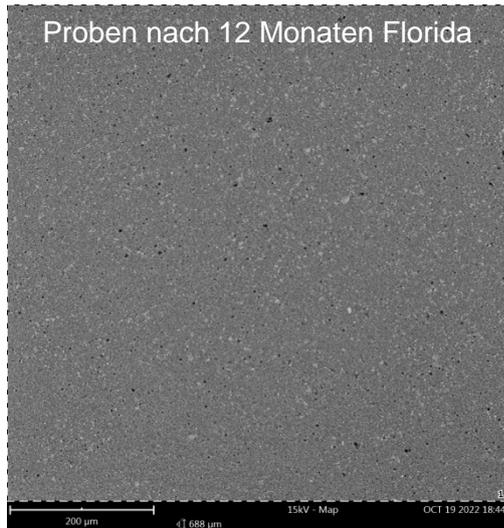
h) System 4 nach 24 Monaten Helgoland



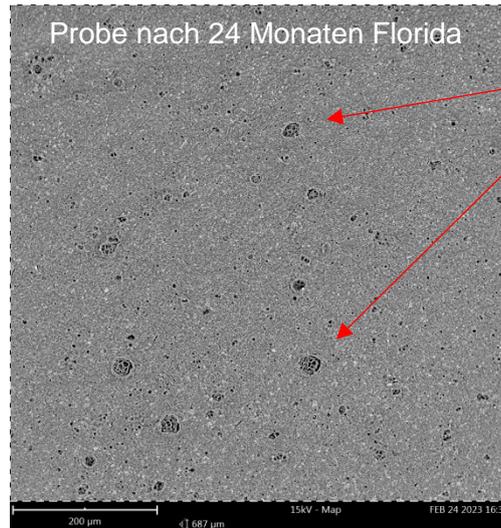
i) System 4 nach 12 Monaten Stadtklima



j) System 4 nach 24 Monaten Stadtklima



k) System 4 nach 12 Monaten Florida



l) System 4 nach 24 Monaten Florida

Organische Verunreinigungen nach der Reinigung mit entionisiertem Wasser

Abbildung 31: REM-Aufnahmen der Oberfläche des Systems 4 unbewittert (a) und nach verschiedenen Bewitterungen (b-l)

Die Aufnahmen bei 15 kV des Systems 4 ohne UV-Absorber (Abbildungen 31 b-l) zeigten nur leichte strukturelle Veränderungen. System 5 (Abbildung 32) zeigte jedoch nach 24 Monaten Florida eine starke Rissbildung, System 2 (Abbildung 33) zeigte eine strukturelle Veränderung nach 3000 h UV. Bei der Auswertung aller REM-Aufnahmen der verschiedenen Systeme konnten keine vergleichbaren Veränderungen bei einer bestimmten Bewitterung festgestellt werden. Die Veränderungen bei den verschiedenen Bewitterungen sind vom Beschichtungsmaterial abhängig.

Rissbildung bei System 5 nach 24 Monaten Florida

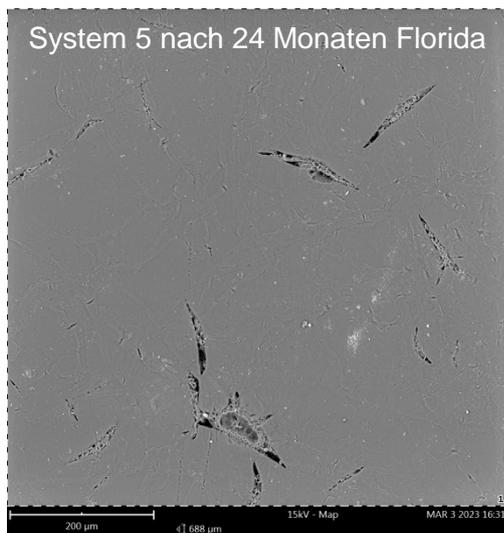


Abbildung 32: System 5 nach 24 Monaten Florida

strukturelle Veränderung (Löcher) bei System 2 nach 3000 h UV

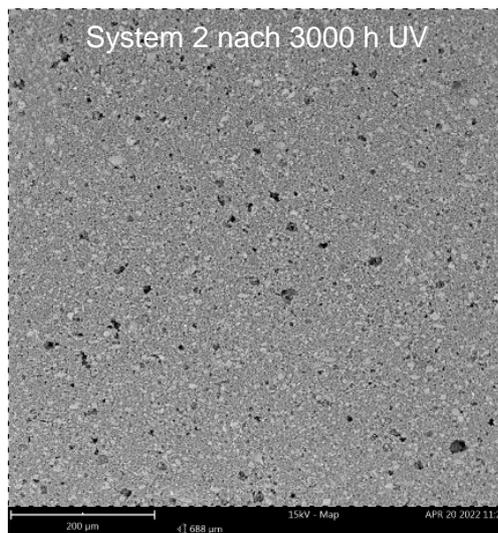


Abbildung 33: System 2 nach 3000 Stunden UV Beanspruchung

Zusammenfassung der Ergebnisse

Mittels REM-Aufnahmen konnten bei den bewitterten Proben von einigen Systemen keine signifikanten strukturellen Veränderungen festgestellt werden. Bei einigen Systemen ließen sich Risse oder Löcher nachweisen. Die organischen Verunreinigungen nach der Außenbewitterung für 24 Monate in Florida konnten auch durch die REM-Aufnahmen bestätigt werden. Die Veränderungen bei den verschiedenen Bewitterungen sind vom Beschichtungsmaterial abhängig und schwanken stark, so dass von den ausgewählten Bewitterungsarten keine Bewitterung als die objektiv am stärksten schädigende Bewitterung ausgewählt werden kann.

Da entsprechende Feldproben nicht vorliegen, konnten auch keine Rückschlüsse auf Schädigungsursachen und -mechanismen der Beschichtungsmaterialien aus dem Feld gezogen werden.

6.3.3 Problematik und Herkunft der SiO₂-Ablagerungen auf den Proben nach dem Xenontest (DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1/ DIN EN ISO 4892-2 Zyklus)

Bei der REM/EDX Untersuchung der Proben nach der Laborbewitterung gemäß DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1/ DIN EN ISO 4892-2 Zyklus und deren Vergleich mit den unbewitterten Proben stellte sich heraus, dass sich auf den künstlich bewitterten Proben eine Siliciumdioxid-Schicht gebildet hatte. Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Ursache für die Bildung dieser Schicht im verwendeten Wasser für den Xenontest (DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1/ DIN EN ISO 4892-2 Zyklus) lag. Ohne die Oberfläche der bewitterten Proben zu verändern, lässt sich diese Siliciumdioxid-Schicht auch durch verschiedene Verfahren nicht entfernen. Da sich das detektierte Silicium auf die Messergebnisse auswirkt und ein prozentualer Vergleich z.B. des Kohlenstoff- oder Titangehalts mit anderen

Proben verfälscht, wurden die REM/EDX-Ergebnisse der Xenonproben bei den weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt.

Beispielhaft werden hier die REM-Aufnahmen des Systems 4 vor der Reinigung (Abbildungen 34 und 35) und nach einem Reinigungsversuch mittels Mikrofasertuch (Abbildungen 36 und 37) dargestellt. Das Mapping über einen Bereich mit SiO_2 -Ablagerung zeigte nach der Reinigung keine Veränderung.

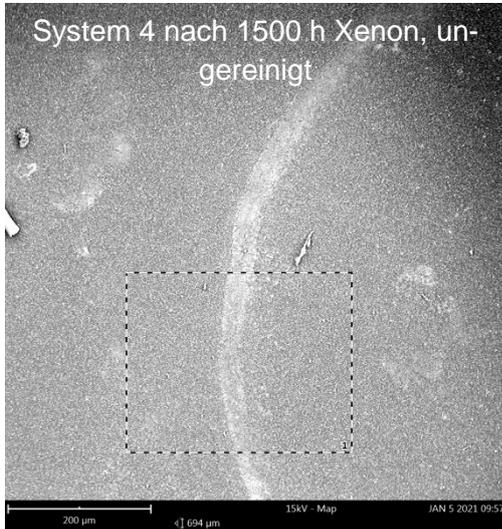


Abbildung 34: REM-Aufnahme System 4 nach 1500 Stunden Xenon, ungereinigt

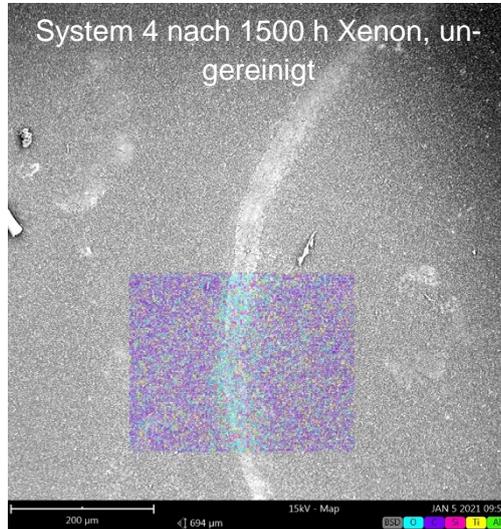


Abbildung 35: EDX-Mapping System 4 nach 1500 Stunden Xenon, ungereinigt

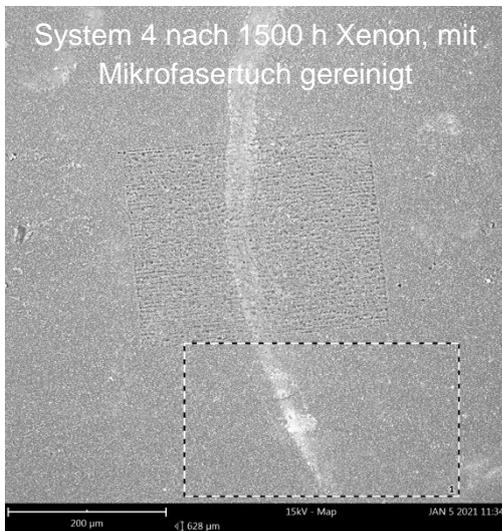


Abbildung 36: REM-Aufnahme System 4 nach 1500 Stunden Xenon, mit Mikrofasertuch gereinigt

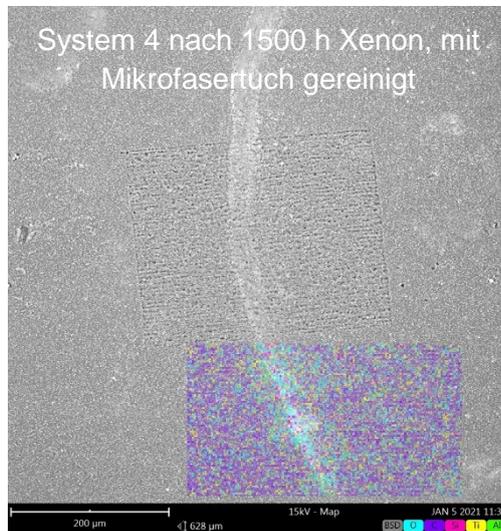


Abbildung 37: EDX-Mapping System 4 nach 1500 Stunden Xenon, mit Mikrofasertuch gereinigt

Im Folgenden werden zwei weitere Bilder verschiedener Systeme dargestellt, um die Problematik des SiO₂-Belages darzustellen.

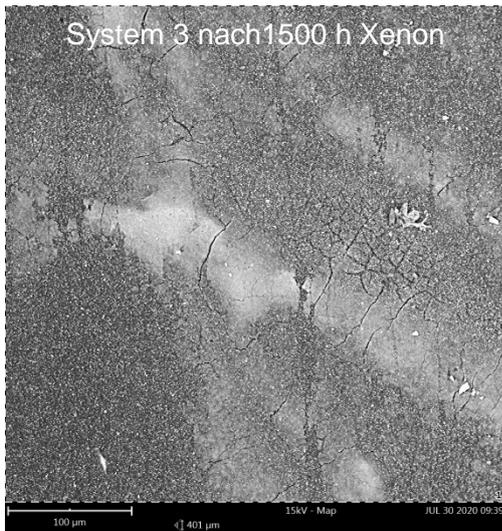


Abbildung 38: REM-Aufnahme System 3 nach 1500 Stunden Xenon

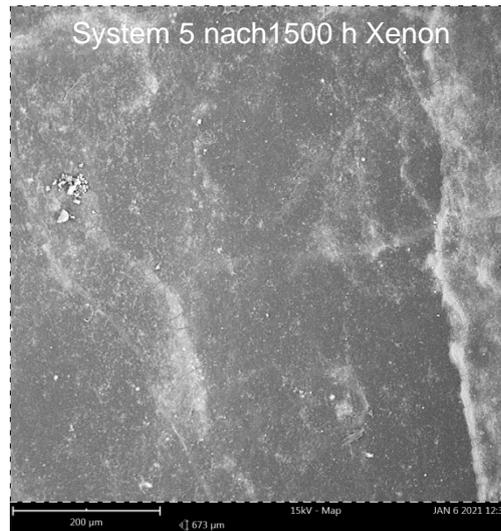


Abbildung 39: REM-Aufnahme System 5 nach 1500 Stunden Xenon

6.3.4 REM/EDX-Untersuchungen

Um Untersuchung der anorganischen Veränderungen wie Bindemittelabbau (insbesondere durch Auskreiden), Pigmentabbau oder Einlagerungen von Fremdpartikeln auf den Probenoberflächen nachzuweisen, wurden Flächenscans (Mappings) mit den Beschleunigungsspannungen 10 kV und 15 kV durchgeführt.

Insgesamt wurden 504 Mappings durchgeführt. Um einen Bindemittelabbau nachzuweisen, wurde der Kohlenstoffgehalt in Prozent bezogen auf die Fläche ausgewertet. Um einen Pigmentabbau nachzuweisen, wurde der Titangehalt in Prozent bezogen auf die Fläche ausgewertet. Das EDX-Mapping zeigt die Elementverteilung der ausgewählten Elemente Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O), Silicium (Si) und Titan (Ti) an der Oberfläche der Proben in Falschfarben (Abbildung 41 und 43).

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Proben (Folien) ohne Füllstoffe und Pigmente bewittert, hier ist eine Auswertung des Bindemittel- und Pigmentabbaus mittels EDX nicht möglich, da zum einen bei Fehlen von Pigmenten kein Titan detektiert werden kann und zum anderen aus dem gleichen Grund kein Kontrast zum Bindemittel hergestellt werden kann, da die Auswertung auf dem Verhältnis Pigment/Bindemittel beruht. Durch einen Bindemittelabbau würde der Pigmentanteil automatisch erhöht. Fehlt dieser Kontrast, wäre selbst bei Bindemittelabbau mittels EDX keine relevante Veränderung des Kohlenstoffgehalts zu erwarten.

Beispielhaft werden die REM/EDX-Untersuchungen des Systems 2 (ohne UV-Absorber) unbewittert und nach 3000 h UV Bewitterung dargestellt.

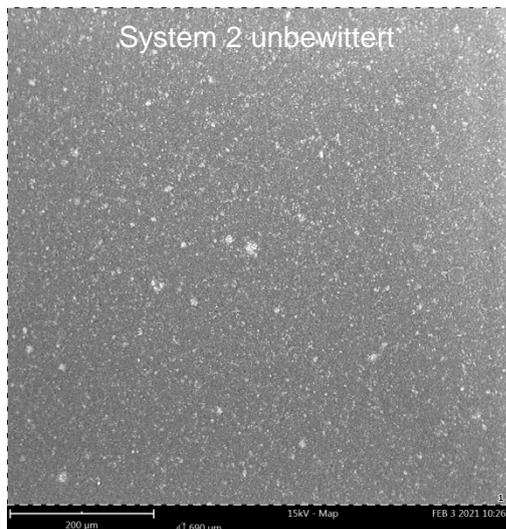


Abbildung 40: REM-Aufnahme System 2 ohne Beanspruchung bei 15 kV

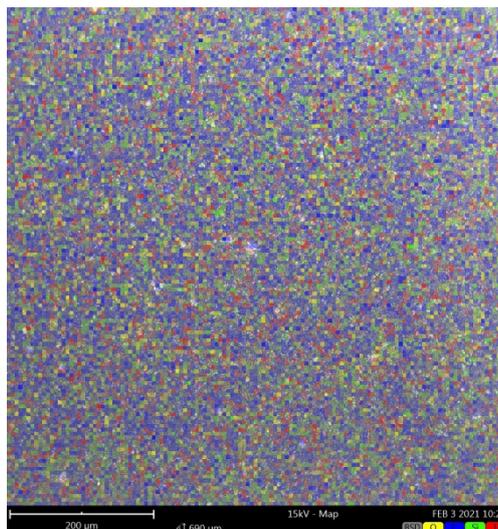


Abbildung 41: EDX-Mapping System 2 ohne Beanspruchung bei 15 kV

Elementzusammensetzung

| | Atomic percentage |
|----|-------------------|
| O | 58.80 % |
| C | 27.51 % |
| Si | 5.16 % |
| Na | 2.93 % |
| Al | 2.56 % |
| Ti | 2.20 % |
| Ca | 0.50 % |
| K | 0.33 % |

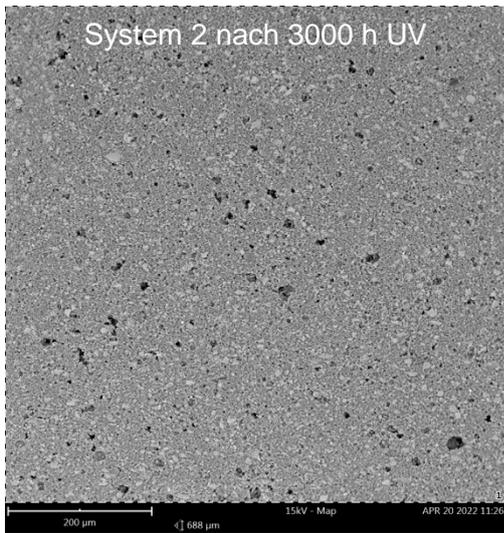


Abbildung 42: REM-Aufnahme System 2 nach 3000 Stunden UV bei 15 kV

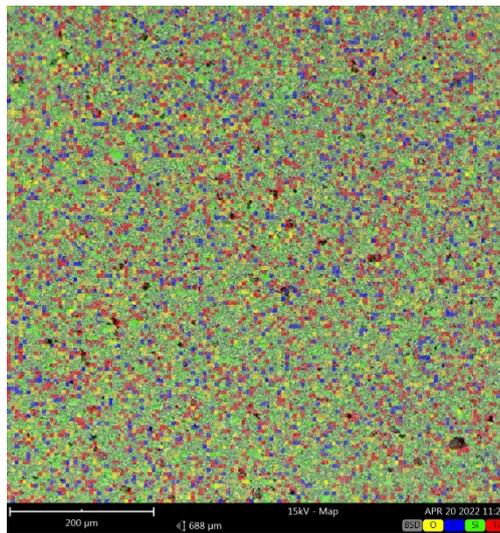


Abbildung 43: EDX-Mapping System 2 nach 3000 Stunden UV bei 15 kV

Elementzusammensetzung

Atomic percentage

| | |
|----|---------|
| O | 67.77 % |
| C | 10.47 % |
| Si | 8.59 % |
| Na | 4.15 % |
| Al | 4.13 % |
| Ti | 3.88 % |
| K | 0.61 % |
| Ca | 0.39 % |

Der prozentuale Bindemittel- und Pigmentabbau wurde mittels Dreifachbestimmung (N = 3) ermittelt, die Kohlenstoff- und Titangehalte bestimmt und anschließend graphisch dargestellt.

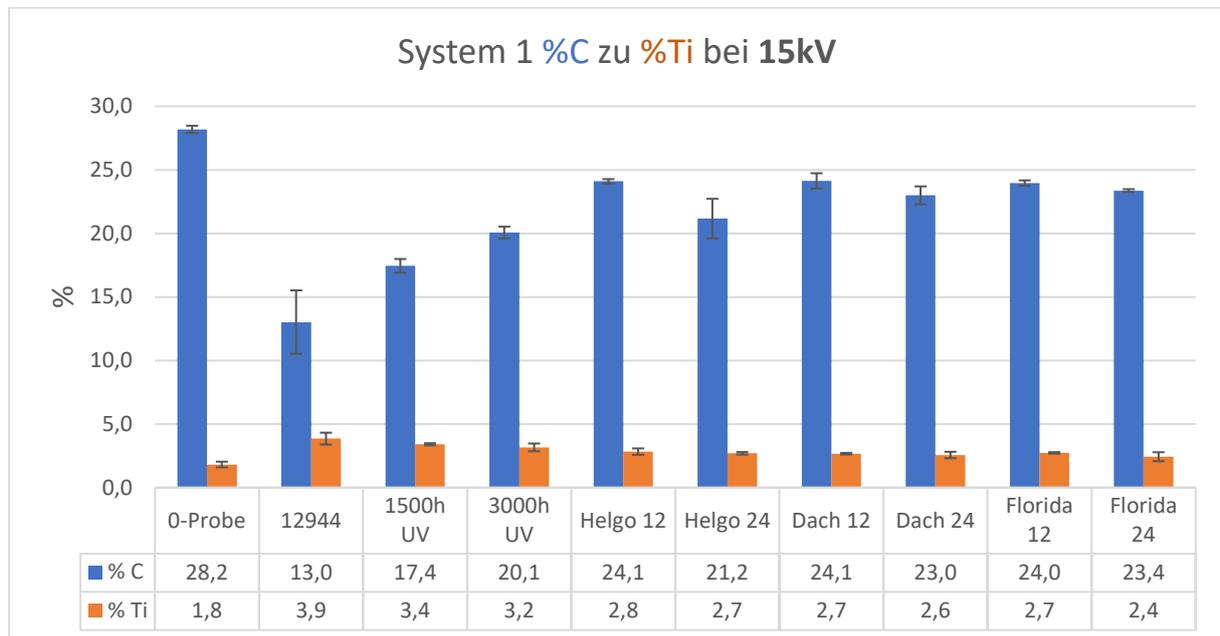


Abbildung 44: Graphische Darstellung der Kohlenstoff- (%C) und Titangehalte (%Ti) des Systems 1 unbewittert und nach den verschiedenen Bewitterungen

Der Vergleich der mittels REM/EDX-Mappings ermittelten Kohlenstoffgehalte des Systems 1, der bewitterten Proben und der unbewitterten Proben (Abbildung 44) zeigt nach allen Bewitterungen einen Rückgang des Kohlenstoffgehaltes im Vergleich zur Nullprobe. Der stärkste Bindemittelabbau zeigt sich nach der Lagerung gemäß DIN EN ISO 12944-9. Der Titangehalt zeigt nach allen Bewitterungen eine Zunahme, da dieser bei einem Bindemittelabbau im Verhältnis zum Gesamtaufbau steigt.

Der stärkste Bindemittelabbau zeigt sich nach der Lagerung gemäß DIN EN ISO 12944-9.

Die Systeme 3 (Abbildung 45) und 7 (Abbildung 46) zeigen nur einen minimalen Rückgang des Kohlenstoffgehaltes.

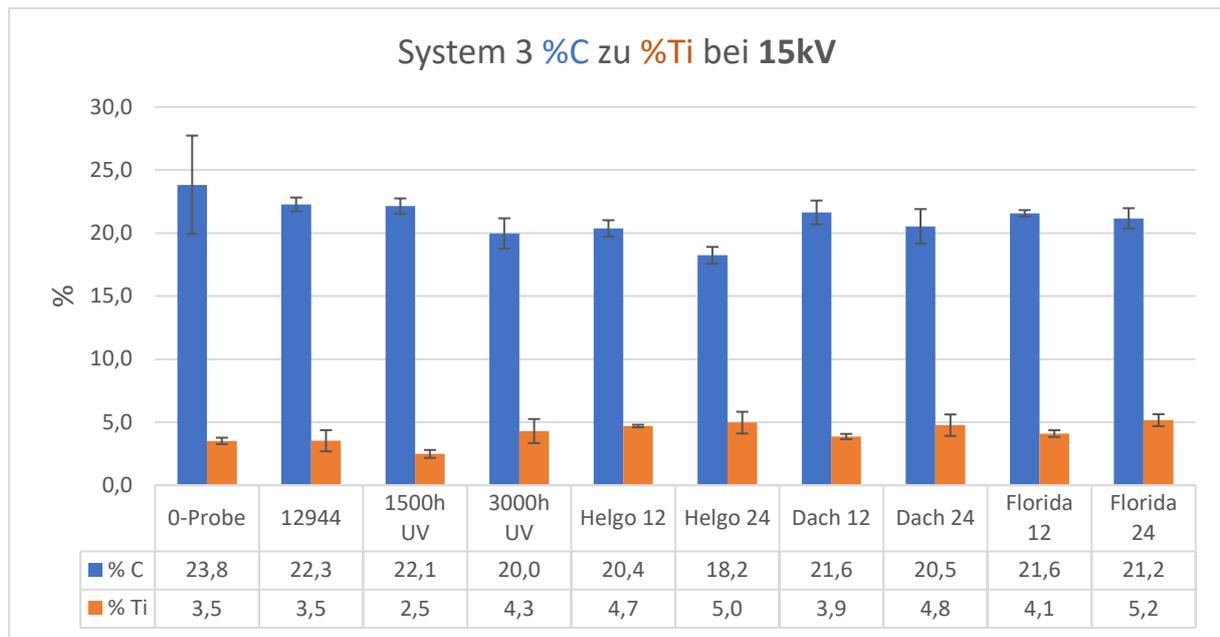


Abbildung 45: Graphische Darstellung der Kohlenstoff-(%C) und Titangehalt (%Ti) des Systems 3 unbewittert und nach den verschiedenen Bewitterungen

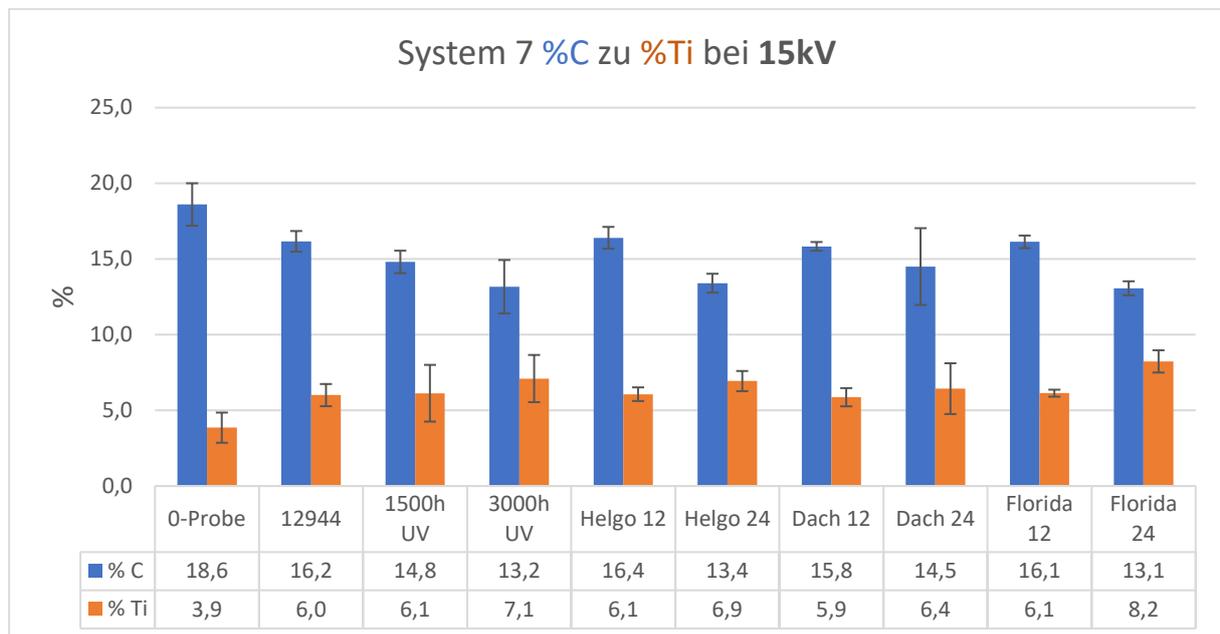


Abbildung 46: Graphische Darstellung der Kohlenstoff-(%C) und Titangehalt (%Ti) des Systems 7 unbewittert und nach den verschiedenen Bewitterungen

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Veränderungen der Kohlenstoff- und Titangehalte nach den verschiedenen Bewitterungen sind vom Beschichtungsmaterial abhängig, so dass von den ausgewählten

Bewitterungsarten keine Bewitterung als die objektiv am stärksten schädigende Bewitterung ausgewählt werden kann.

Auch hier konnten keine Rückschlüsse auf Schädigungsursachen und -mechanismen der Beschichtungsmaterialien aus dem Feld gezogen werden, da entsprechende Feldproben nicht vorliegen.

6.3.5 Infrarot-Spektroskopie

Um die organischen Veränderungen, also die chemische Struktur der Bindemittelmatrix der Proben zu untersuchen, wurden IR-spektroskopische Flächenscans (Mappings) durchgeführt. Über einen ausgewählten Bereich jeder Probe wurden 154 Einzelspektren gemessen. Beschichtungssysteme bestehen aus einer Vielzahl von (organischen) Inhaltsstoffen, die anhand der Spektren nicht immer einzeln eindeutig identifiziert bzw. differenziert werden können. Somit wird bei komplexen Gemischen vielmehr vergleichend geprüft. Folglich werden die Spektren von unbewitterten Proben mit den Spektren der bewitterten Proben vergleichend geprüft.

Insgesamt wurden 252 Mappings gemessen, bestehend aus insgesamt 38808 Einzelspektren.

Von insgesamt je 154 Einzelspektren wurden 20 Spektren ausgewählt, um die Homogenität der einzelnen Spektren darzustellen (Abbildung 47). In den weiterführenden Auswertungen, wurden zur übersichtlichen Darstellung repräsentative Einzelspektren aus den Mappings ausgewählt.

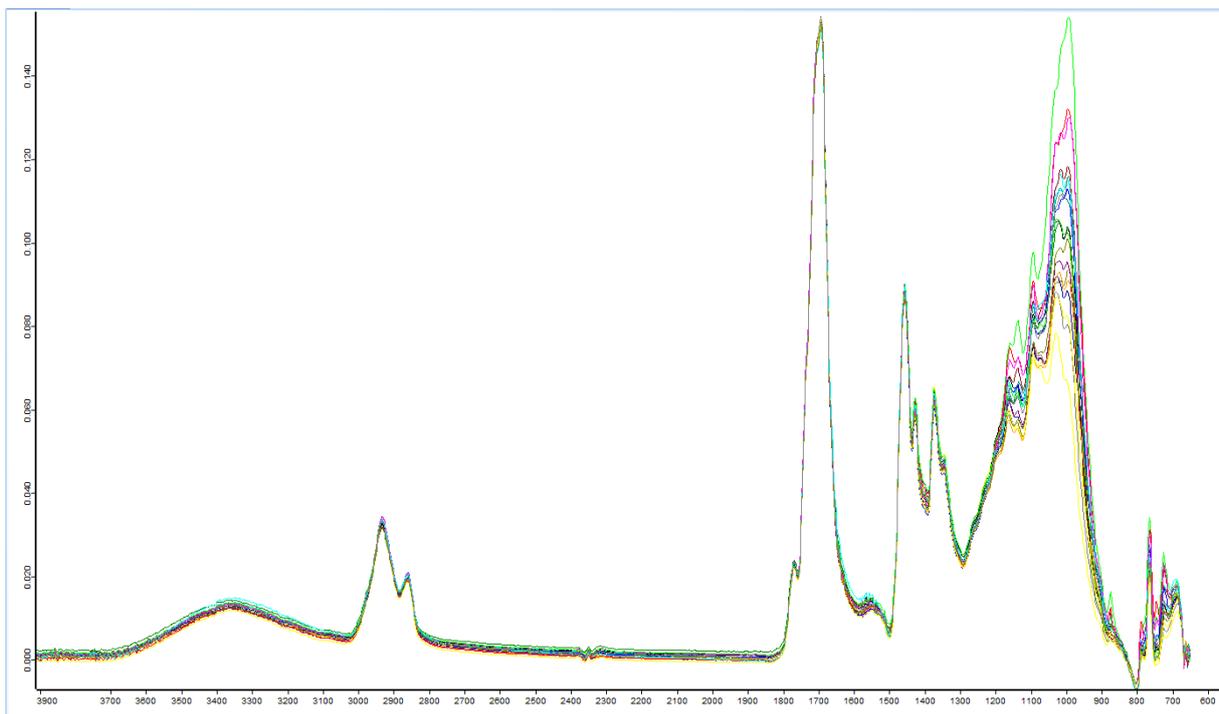


Abbildung 47: Darstellung der Spektrenhomogenität innerhalb der Mappings, Beispiel nach 12 Monaten Florida

Es wurden 2 Systeme jeweils mit der Standardrezeptur und der Rezeptur ohne UV-Absorber in die Probenmatrix aufgenommen. Laut Beschichtungshersteller beinhalten die Standardrezepturen immer einen Überschuss an UV-Absorbern. Somit wurde vermutet, dass es bei diesen Proben nach den im Rahmen des Projektes gewählten Lagerungsbedingungen zu keinem chemischen Abbau kommen wird. Mittels IR-Spektroskopie

konnten den UV-Absorbern keine signifikanten Peaks zugeordnet werden, da es durch die große Anzahl von Inhaltsstoffen in den Beschichtungssystemen zu einer Überlagerung der entsprechenden Peaks kommt (siehe Kapitel 6.1.2).

IR-Spektroskopischer Vergleich der unbewitterten Systeme 1 und 2, mit und ohne UV-Absorber

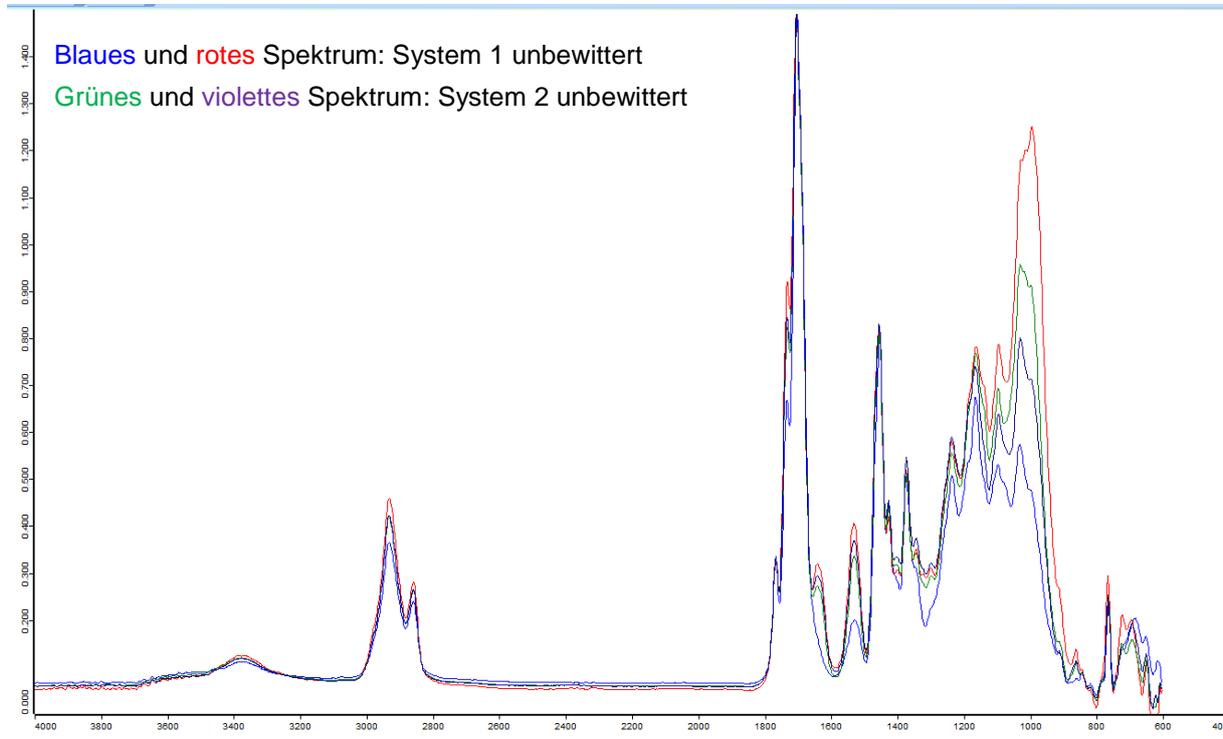


Abbildung 48: Vergleich der IR-Spektren der unbewitterten System 1 und 2, mit und ohne UV-Absorber

IR-Spektroskopischer Vergleich der unbewitterten Systeme 3 und 4, mit und ohne UV-Absorber

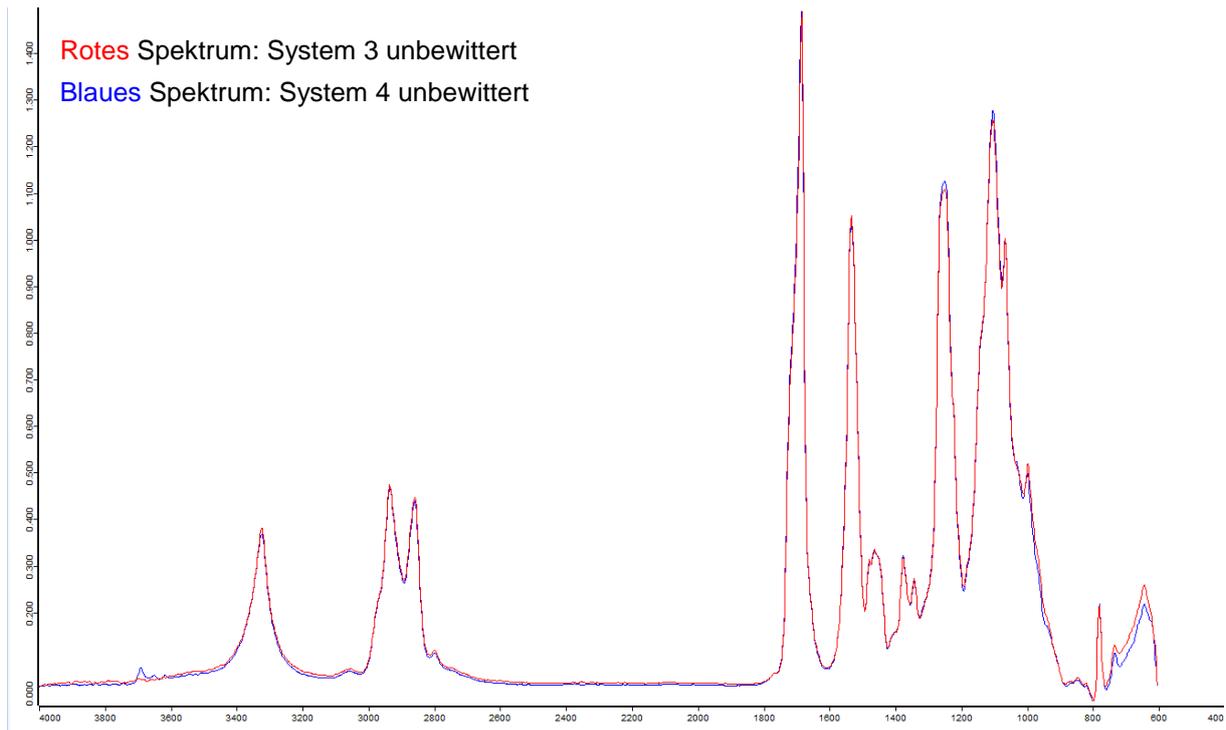


Abbildung 49: Vergleich der IR-Spektren der unbewitterten System 3 und 4, mit und ohne UV-Absorber

Der IR-spektroskopische Vergleich der Spektren der Standardrezeptur und der Proben ohne UV-Absorber (Abbildungen 48 und 49) zeigt minimale Unterschiede in den Intensitäten. IR-spektroskopisch lässt sich kein signifikanter Peak dem UV-Absorber zuordnen.

Der IR-spektroskopische Vergleich der verschiedenen Systeme nach den verschiedenen Bewitterungen zeigte jedoch Veränderungen in den Spektren.

Beispielhaft werden die IR-spektroskopischen Untersuchungen des Systems 6 dargestellt.

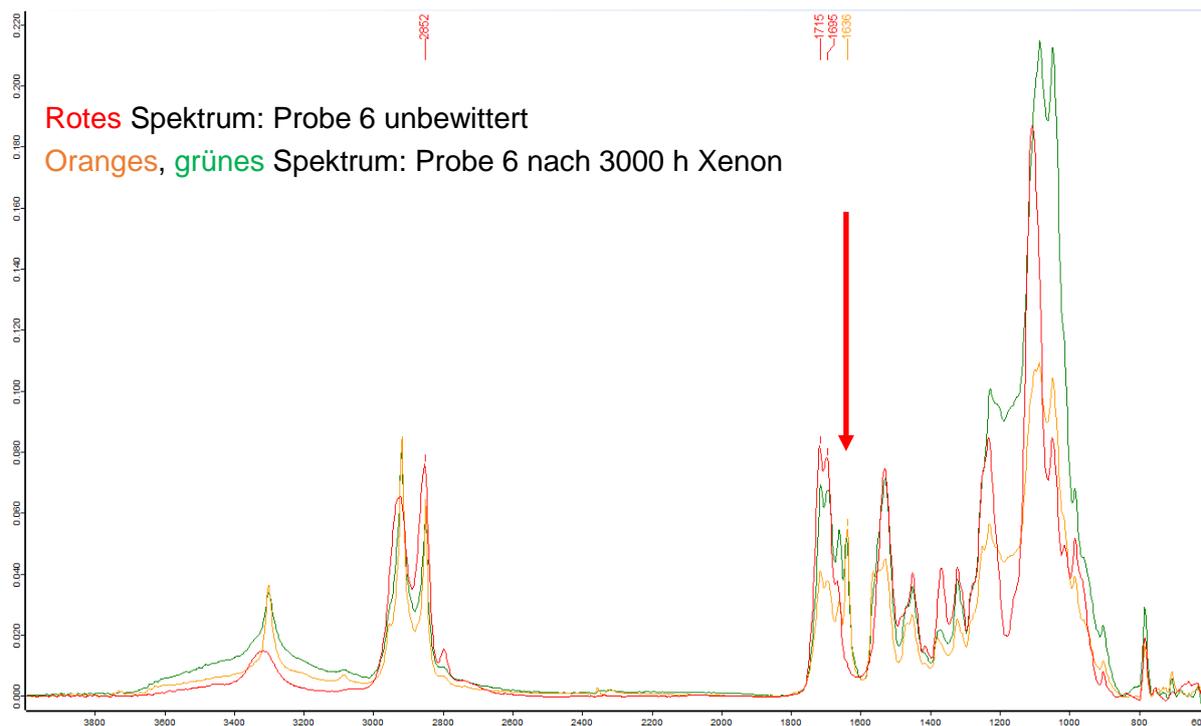


Abbildung 50: Vergleich der IR-Spektren des Systems 6 unbewittert und nach 3000 Stunden Xenon (DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1 / DIN En ISO 4892-2 Zyklus 1)

Der IR-spektroskopische Vergleich der bewitterten (DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1 / DIN EN ISO 4892-2 Zyklus 1) und unbewitterten Proben des Systems 6 (Abbildung 50) zeigt Unterschiede in den Intensitäten. Die Spektren der bewitterten Proben weisen einen in den Spektren der unbewitterten Proben nicht vorliegenden Peak bei 1636 cm^{-1} auf. Zusätzlich zeigen die PU-Banden (1715 cm^{-1} und 1695 cm^{-1}) eine geringere Intensität. Es zeigt sich auch eine Veränderung im Bereich der CH-Banden ($2800\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$). Dies könnte ein Hinweis auf einen chemischen Abbau sein.

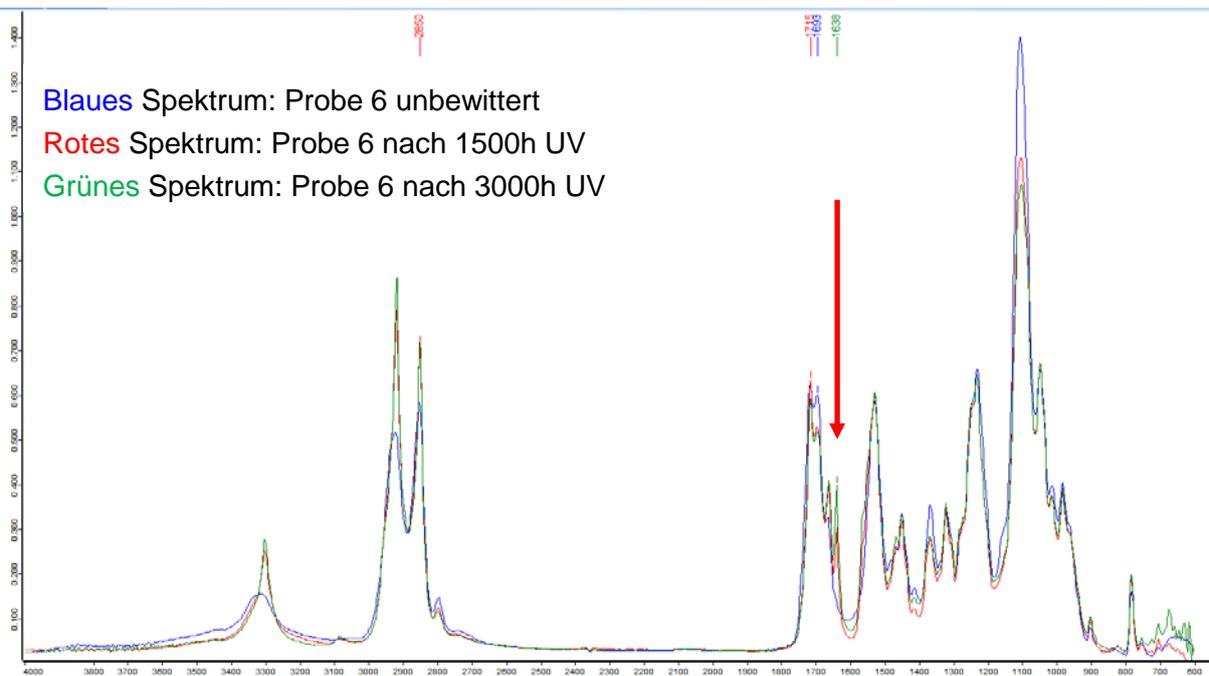


Abbildung 51: Vergleich der IR-Spektren des Systems 6 unbewittert und nach 1500 Stunden und 3000 Stunden Fluoreszenztest (DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2)

Auch der IR-spektroskopische Vergleich der bewitterten (DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2) und unbewitterten Proben des Systems 6 (Abbildung 51) zeigt Unterschiede in den Intensitäten und einen im Spektrum der unbewitterten Probe nicht vorliegenden Peak bei 1638 cm^{-1} auf. Zusätzlich zeigen die PU-Banden (1715 cm^{-1} und 1695 cm^{-1}) eine leicht geringere Intensität. Es zeigt sich auch hier eine Veränderung im Bereich der CH-Banden ($2800\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$). Dies könnte ein Hinweis auf einen chemischen Abbau sein.

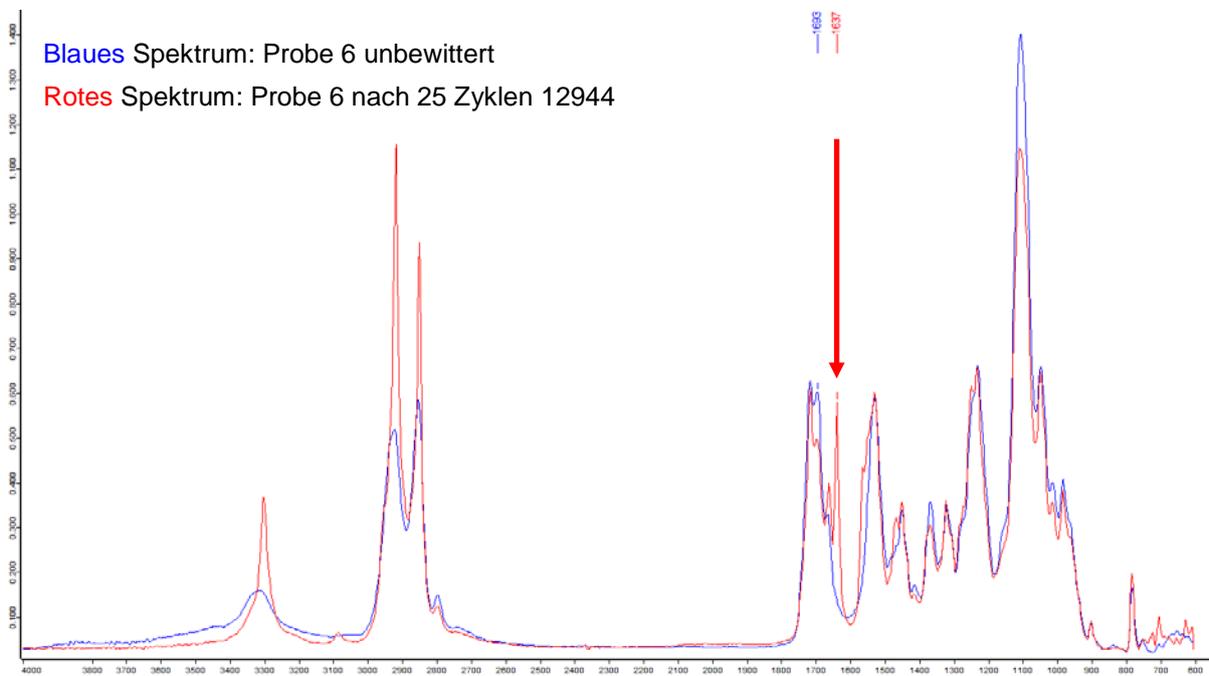


Abbildung 52: Vergleich der IR-Spektren des System 6 unbewittert und nach 25 Stunden Zyklen Offshorettest (DIN EN ISO 12944-9)

Auch die Spektren nach 25 Zyklen 12944 (Abbildung 52) weisen einen in den Spektren der unbewitterten Proben des Systems 6 nicht vorliegenden Peak bei 1637 cm^{-1} auf und die PU-Banden (1715 cm^{-1} und 1695 cm^{-1}) zeigen eine leicht geringere Intensität. Es zeigt sich auch eine Veränderung im Bereich der CH-Banden ($2800\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$). Dies könnte ebenfalls ein Hinweis auf einen chemischen Abbau sein.

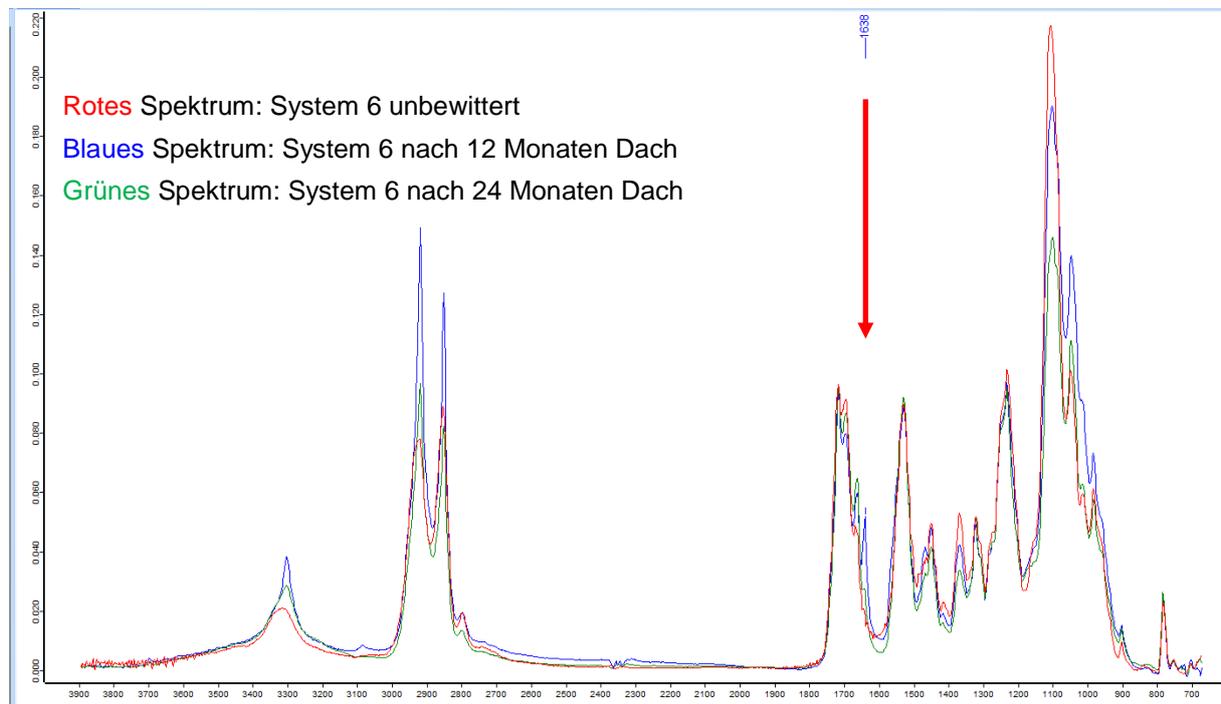


Abbildung 53: Vergleich der IR-Spektren des Systems 6 unbewittert und nach 12 und 24 Monaten Stadtklima

Auch die Spektren nach 12 und 24 Monaten Stadtklima (Abbildung 53) zeigen die gleichen Veränderungen, wie die vorhergehenden Bewitterungen. Die Spektren der bewitterten Proben (12 und 24 Monate Stadtklima) weisen einen in den Spektren der unbewitterten Proben des Systems 6 nicht vorliegenden Peak bei 1638 cm^{-1} auf und die PU-Banden (1715 cm^{-1} und 1695 cm^{-1}) zeigen eine leicht geringere Intensität. Es zeigt sich auch eine Veränderung im Bereich der CH-Banden ($2800\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$). Die Veränderungen könnten ebenfalls ein Hinweis auf einen chemischen Abbau sein.

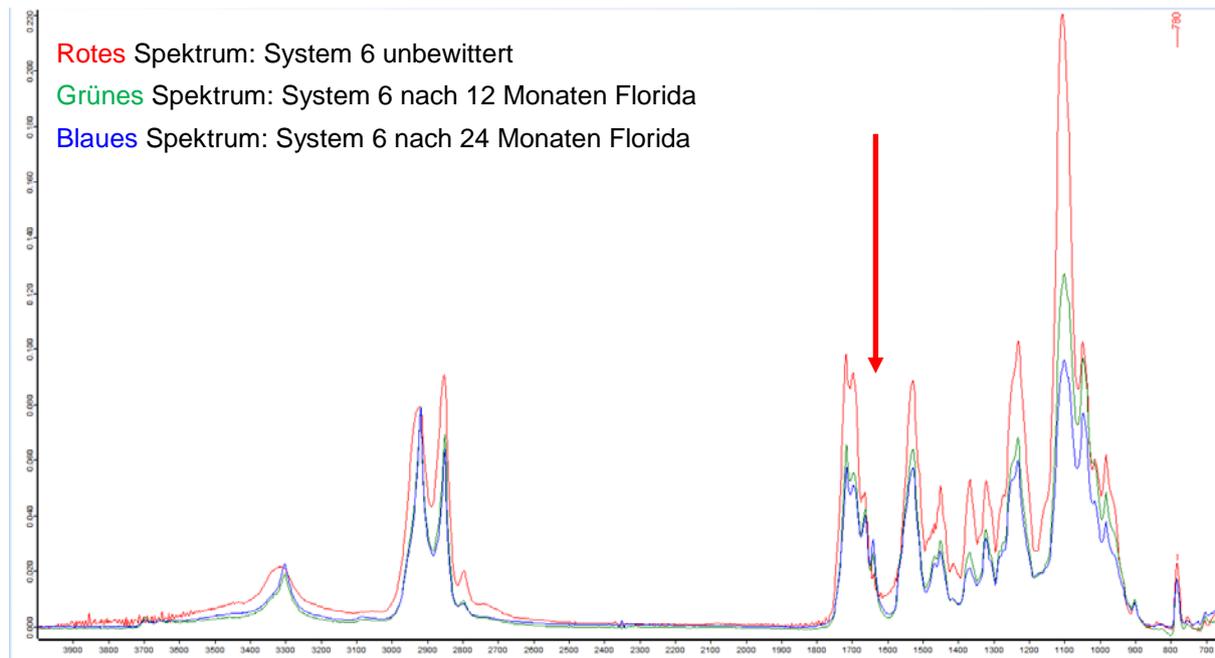


Abbildung 54: Vergleich der IR-Spektren des Systems 6 unbewittert und nach 12 und 24 Monaten Florida

Auch die Spektren nach 12 und 24 Monaten Florida (Abbildung 54) zeigen die gleichen Veränderungen, wie die vorhergehenden Bewitterungen. Die Spektren der bewitterten Proben (12 und 24 Monate Florida) weisen einen in den Spektren der unbewitterten Proben des Systems 6 nicht vorliegenden Peak bei 1638 cm^{-1} auf und die PU-Banden (1715 cm^{-1} und 1695 cm^{-1}) zeigen eine geringere Intensität. Es zeigt sich auch eine Veränderung im Bereich der CH-Banden ($2800\text{-}3000\text{ cm}^{-1}$). Die Veränderungen könnten ebenfalls ein Hinweis auf einen chemischen Abbau sein.

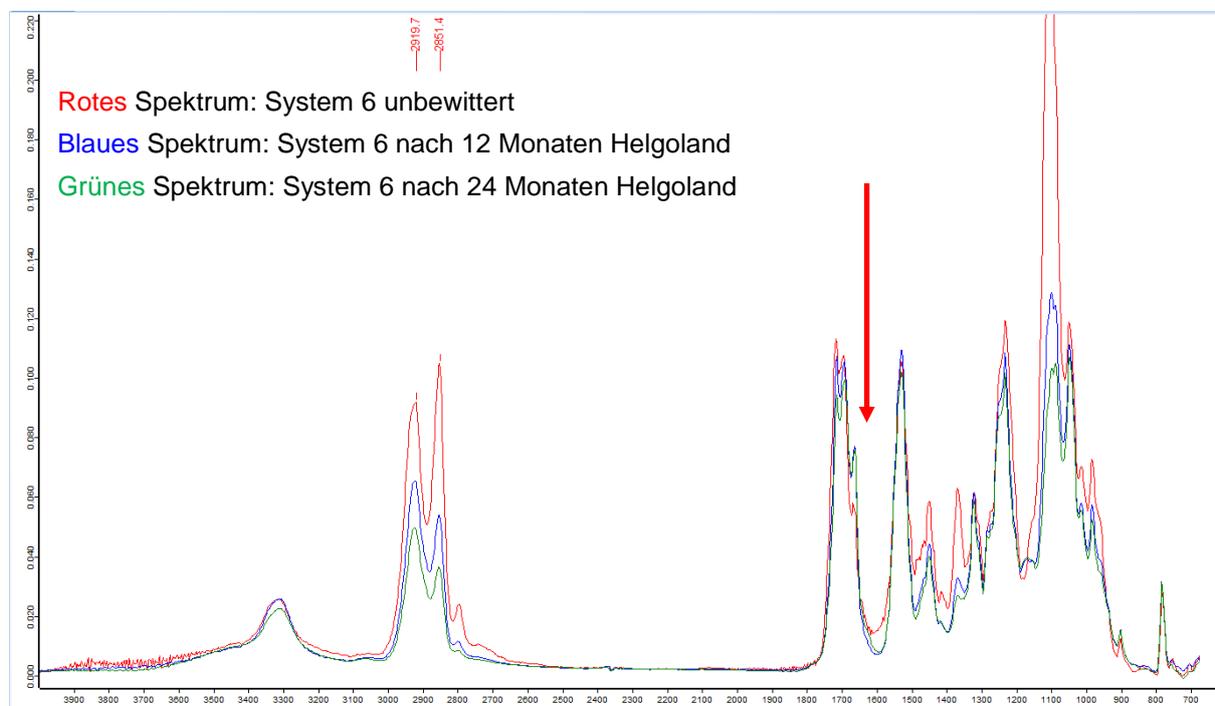


Abbildung 55: Vergleich der IR-Spektren des Systems 6 unbewittert und nach 12 und 24 Monaten Helgoland

Die Spektren nach 12 und 24 Monaten Helgoland (Abbildung 55) zeigen nicht die gleichen Veränderungen, wie die Spektren der übrigen Bewitterungsproben. Der in den übrigen Spektren der bewitterten Proben des Systems 6 vorliegende Zusatzpeak bei 1633 cm^{-1} bzw. 1637 cm^{-1} liegt in den Spektren der Proben nach 12 und 24 Monaten Helgoland nicht vor. Die Veränderungen bei den PU-Banden (1715 cm^{-1} und 1695 cm^{-1}) sind mit den Veränderungen der übrigen bewitterten Proben vergleichbar. Es zeigt sich auch eine Veränderung im Bereich der CH-Banden (2800-3000 cm^{-1}).

Zusammenfassend konnten folgende IR-spektroskopische Veränderungen festgestellt werden.

Tabelle 5 Tabellarische Übersicht der markantesten IR-spektroskopischen Veränderungen der Systeme nach den verschiedenen Bewitterungen

| Beschichtungssystem | 1500h Xenon DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1 / DIN EN ISO 4892-2 Zyklus 1 | 3000h Xenon DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1 / DIN EN ISO 4892-2 Zyklus 1 | 1500h Fluoreszenz DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2 UV | 3000h Fluoreszenz DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2 UV | 25 Wochen/Zyklen Offshore Test DIN EN ISO 12944-9 | 12 Monate Helgoland | 24 Monate Helgoland | 12 Monate Dach IFAM | 24 Monate Dach IFAM | 12 Monate Florida | 24 Monate Florida |
|---------------------|--|--|---|---|---|------------------------|---|--|------------------------|----------------------|--|
| 1 | Verringerung Peak bei ca. 1529 cm^{-1} | | | | | | | | | | Verringerung Peak bei ca. 1529 cm^{-1} |
| 2 | Verringerung Peak bei ca. 1529 cm^{-1} | | | | | | | | | | Peak bei ca. 1529 cm^{-1} nicht vorhanden, Zusatzpeak bei 1557 cm^{-1} |
| 3 | keine Veränderung | | | | | | | | | | |
| 4 | keine Veränderung | | | | | | | | | | |
| 5 | keine Veränderung | keine Veränderung | Verringerung Peak bei ca. 730 cm^{-1} | keine Veränderung | Verringerung Peak bei ca. 730 cm^{-1} | | | | | | |
| 6 | Zusatzpeak bei ca. 1638 cm^{-1} | | | | | keine Veränderung | keine Veränderung | Zusatzpeak bei ca. 1638 cm^{-1} | | | |
| 7 | Verringerung Peak bei ca. 1538 cm^{-1} | | | | | keine Veränderung | Verringerung Peak bei ca. 1538 cm^{-1} | | | | |

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die tabellarische Übersicht der IR-spektroskopischen Veränderungen der Systeme nach den verschiedenen Bewitterungen (Tabelle 5) zeigt, dass die Veränderungen vom Beschichtungsmaterial abhängig sind und stark variieren, so dass von den ausgewählten Bewitterungsarten keine Bewitterung als die am stärksten schädigende Bewitterung ausgewählt werden kann.

Auch hier konnten keine Rückschlüsse auf Schädigungsursachen und -mechanismen der Beschichtungsmaterialien aus dem Feld gezogen werden, da entsprechende Feldproben nicht vorliegen.

6.4 Auswertung der mechanischen und optischen Untersuchungen der im Rahmen des Projektes ausgelagerten Proben

6.4.1 Medienaufnahme

Von den einzelnen Beschichtungssystemen wurden freie Filme erzeugt, für 1000h im Fluoreszenztest (DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2) bewittert und danach für bis zu 1.000 Stunden entweder in demineralisiertem Wasser oder in einer 3,5 %igen Kochsalz (NaCl)-Lösung eingetaucht. Die prozentuale Medienaufnahme wurde bis zur Gewichtskonstanz bestimmt. Die Werte sind in Abbildung 56 zusammengefasst.

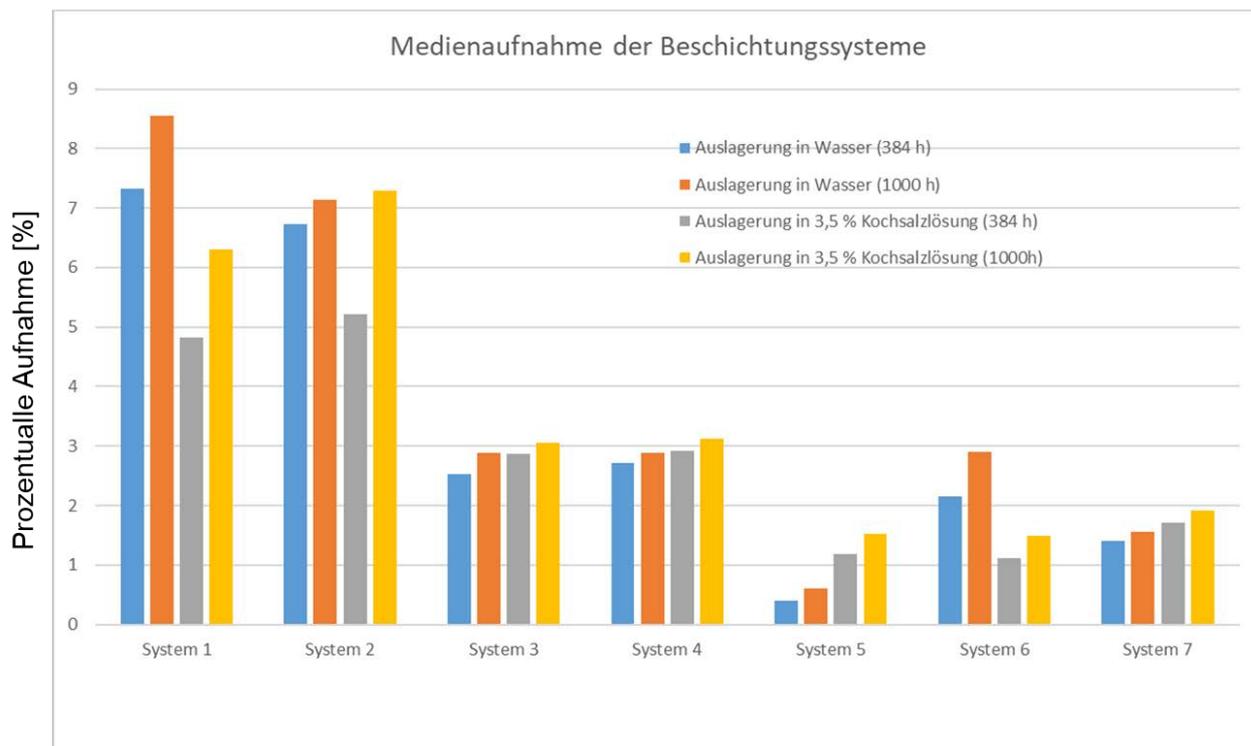


Abbildung 56: Medienaufnahme der einzelnen Beschichtungen nach 1000 Stunden Fluoreszenztest (DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2)

Bei allen untersuchten Beschichtungssystemen wurde eine geringfügige Aufnahme von Wasser bzw. Kochsalzlösung festgestellt. System 1 und 2 wiesen die höchste Medienaufnahme auf und die Werte lagen bei max. 8,5 %. Die Systeme 5 und 6 (Folie) und die Sonderbeschichtung für Rotorblätter (System 7) wiesen eine deutlich geringere Medienaufnahme als die organischen Beschichtungssysteme 1 bis 4 auf. Aus den Diskussionen des pbA ging hervor, dass erfahrungsgemäß eine untypische und damit potenziell kritische zu erwartende Medienaufnahme ab 10-15% zu erwarten wäre.

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Die These, dass die Medienaufnahme bei Beschichtungen nach einer Bewitterung deutlich oberhalb von 15 % betragen kann, konnte durch diese Prüfung nicht bestätigt werden. Bei der Medienaufnahme der Beschichtungen konnte nur ein geringer Unterschied zwischen den Medien (dem. Wasser und 3,5 %-iger Kochsalzlösung) festgestellt werden.

6.4.2 Gitterschnittprüfung vor und nach Beanspruchung

An den beanspruchten Beschichtungsproben wurde neben der Gitterschnittprüfung (Schnittabstand 2 Millimeter) nach DIN EN ISO 2409 auch ein zusätzlicher Andreaskreuzschnitt durchgeführt. Die beanspruchten Proben wurden vor der Prüfung nochmals für 24 Stunden unter Normbedingungen konditioniert und dann erfolgte die Prüfung. Bei allen Gitterschnittprüfungen wurde ein zusätzlicher Klebebandabzug durchgeführt.

Zur besseren Bewertung wurde der Gitterschnittkennwert unter einem Lichtmikroskop bestimmt. Die folgende Abbildung zeigt die Gitterschnittkennwerte vor und nach der Beanspruchung.

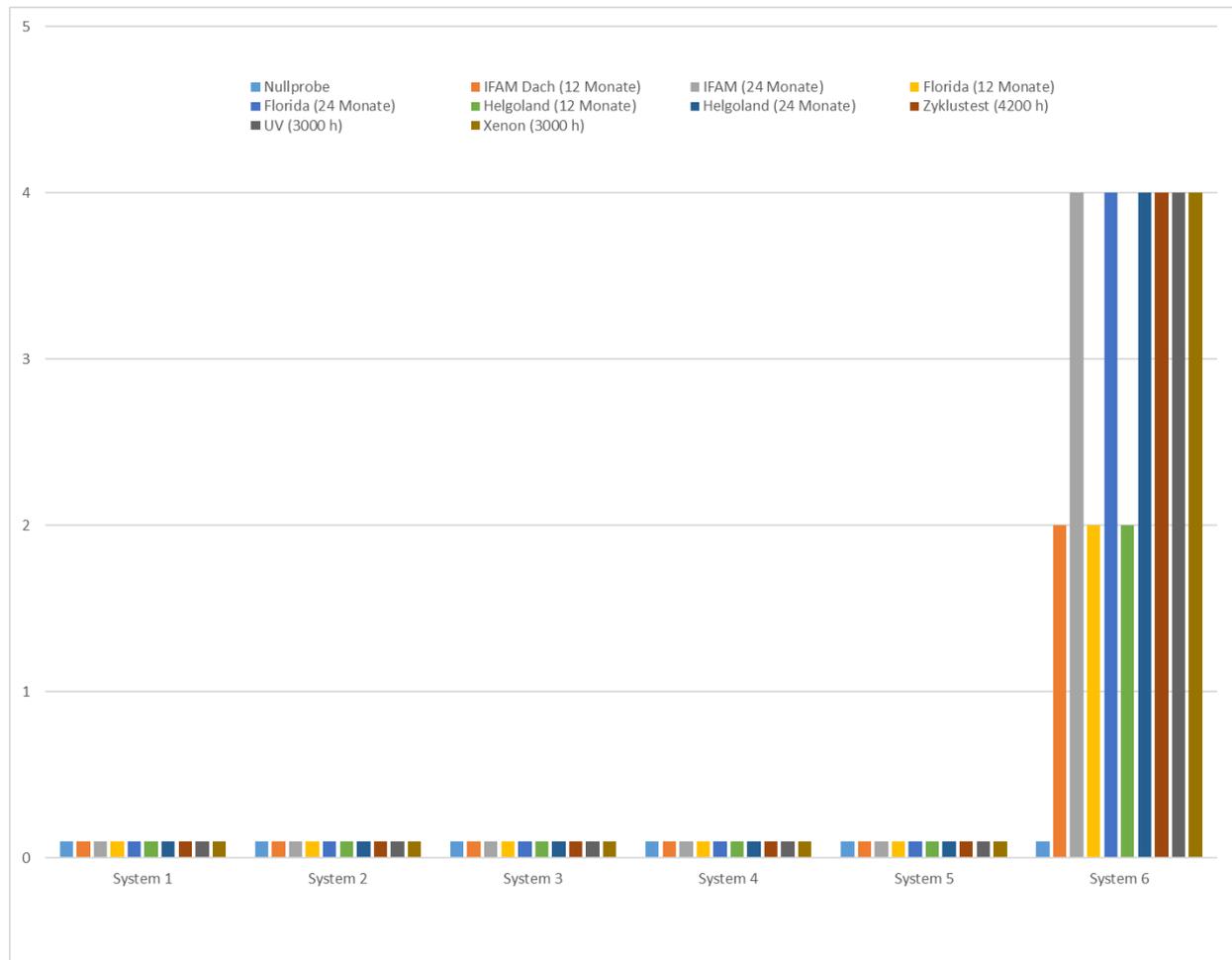


Abbildung 57: Gitterschnittkennwert vor und nach Beanspruchung der Beschichtungssysteme

Bei den geprüften Systemen 1-5 sind die Gitterschnittkennwerte vor und nach Beanspruchung mit GT 0 bewertet worden. Ebenfalls wurden keine Abplatzungen beim Andreaskreuz festgestellt. System 6 weist nach der künstlichen Beanspruchung beim Zyklustest 12944-9, UV- und Xenontest und nach 24 Monaten Außenbewitterung mangelhafte Haftfestigkeit auf.

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Ein signifikanter Einfluss der verschiedenen Bewitterungsprüfungen bzgl. des Gitterschnittkennwertes bei den Systemen 1-5 konnte nicht nachgewiesen werden. Einzig System 6 zeigt nach der Bewitterung mangelhafte Gitterschnittkennwerte auf.

6.4.3 Stirnabzugstests vor und nach Beanspruchung

Die Haftfestigkeit wurde nach den unterschiedlichen Bewitterungsprüfungen und Freilandauslagerungen durch den Stirnabzugstest nach DIN EN ISO 4624 bestimmt. Neben der Bestimmung der Abzugskraft wurde auch das visuelle Bruchbild bestimmt. In der nachfolgenden Graphik sind die Messwerte der einzelnen Systeme vor und nach der Beanspruchung dargestellt.

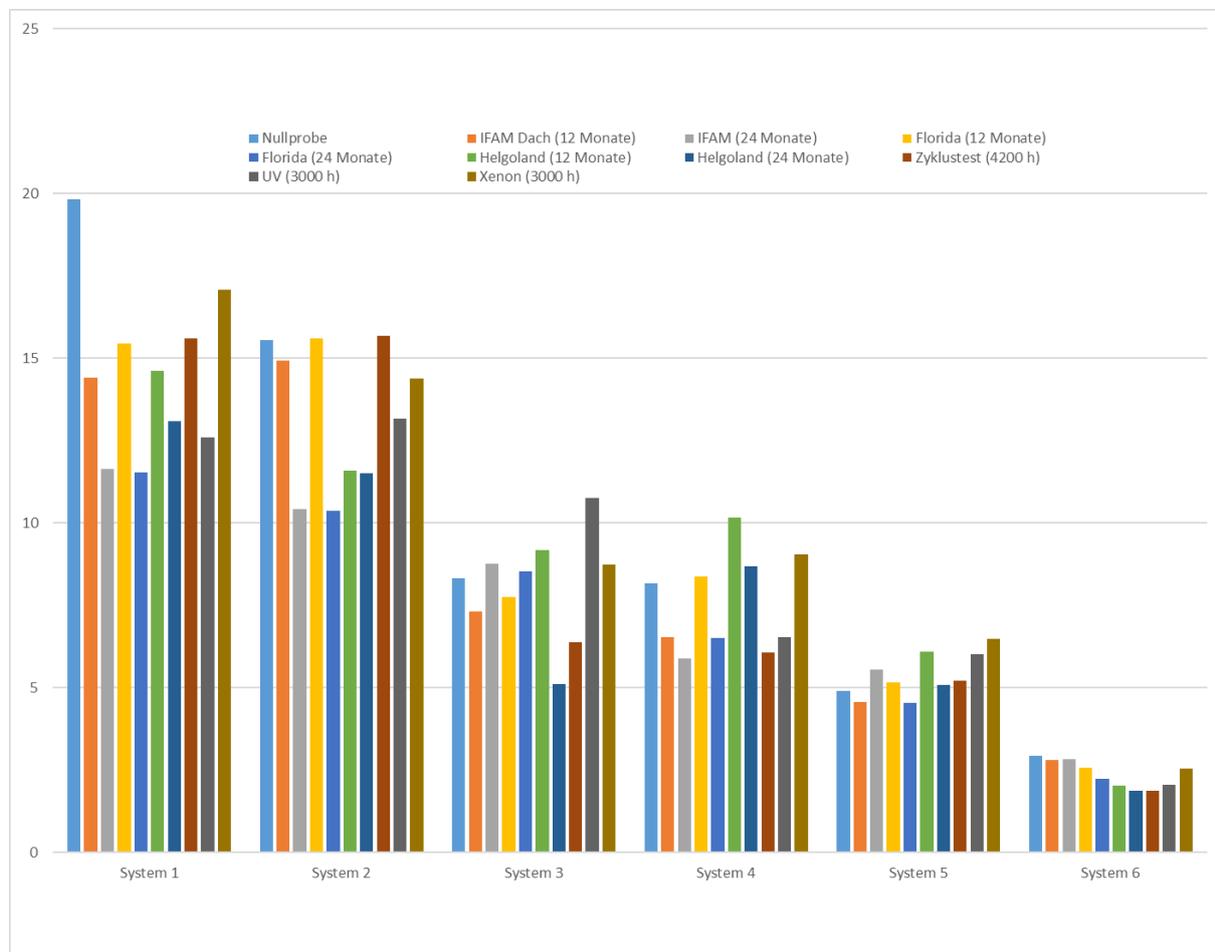


Abbildung 58: Bestimmung der Haftfestigkeit durch Stirnabzugstest nach DIN EN ISO 4624 vor und nach Bewitterungsprüfungen

Die ermittelten Abzugswerte sind bei den einzelnen Systemen vor und nach der Beanspruchung nicht signifikant unterschiedlich. Zwischen den Systemen 1 und 6 sind die Stirnabrisswerte deutlich unterschiedlich, es wurden jedoch nur die unterschiedlichen Bewitterungsprüfungen und Freilandauslagerungen miteinander verglichen. Einen Einfluss der verschiedenen Bewitterungsverfahren auf die Haftfestigkeit konnte nicht festgestellt werden.

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Bruchbild bei dem Beschichtungssystem 1 nach verschiedenen Beanspruchungen.

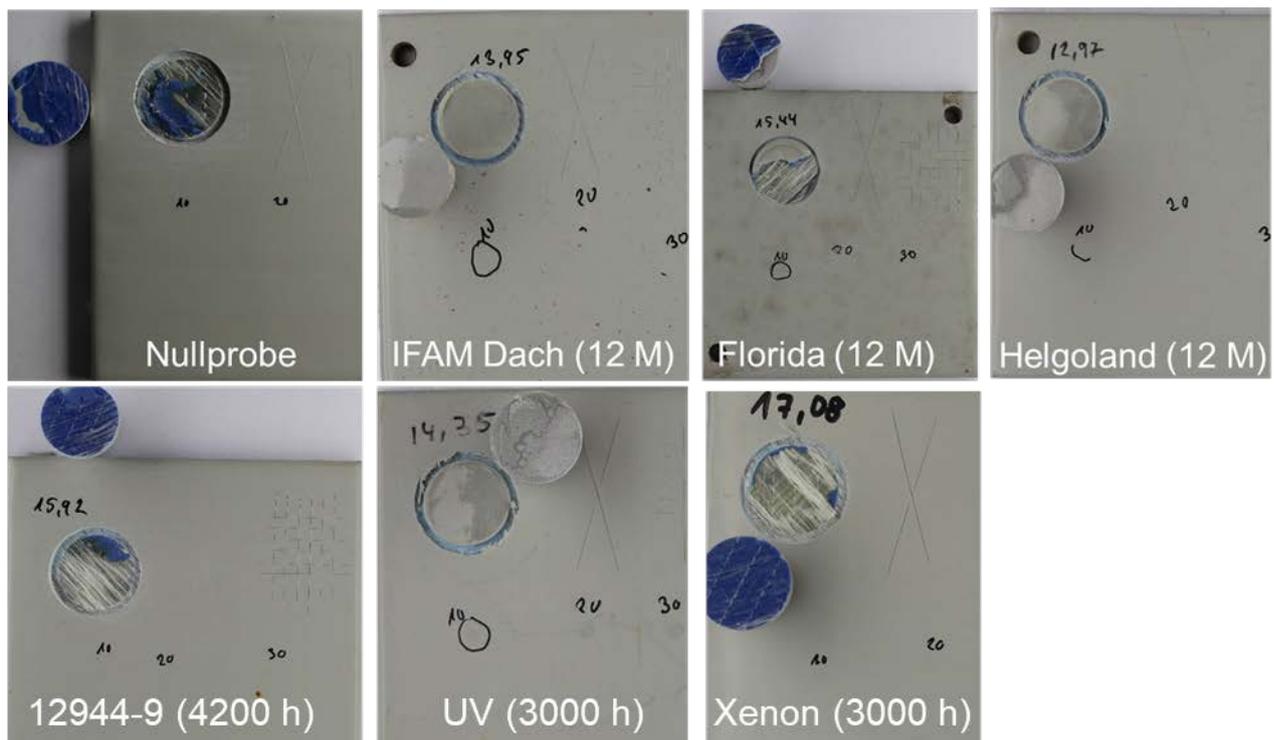


Abbildung 59: Beurteilung des Bruchbildes exemplarische an System 1

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Die Stirnabzugswerte liegen bei allen Proben deutlich über 5 MPa und ein signifikanter Unterschied zwischen den verschiedenen Beanspruchungen ist nicht erkennbar. Das Bruchbild zeigt nach den unterschiedlichen Beanspruchungen geringfügige Unterschiede auf, diese sind aber zu vernachlässigen.

6.4.4 Bestimmung der optischen Eigenschaften vor und nach Beanspruchung

Der Glanzverlust und die Farbabweichung wurden nach der Beanspruchung der Proben gemessen. Die Prüfung der beanspruchten Proben erfolgte nach der Reinigung mit destilliertem Wasser. Aufgrund der Beläge, wie in den Kapiteln 6.3.1 und 6.3.3 erwähnt, konnten die Messwerte nur teilweise verwendet werden.

Nachfolgend werden nur die visuellen Erscheinungen nach der Beanspruchung der Freibewitterungsproben vorgestellt.

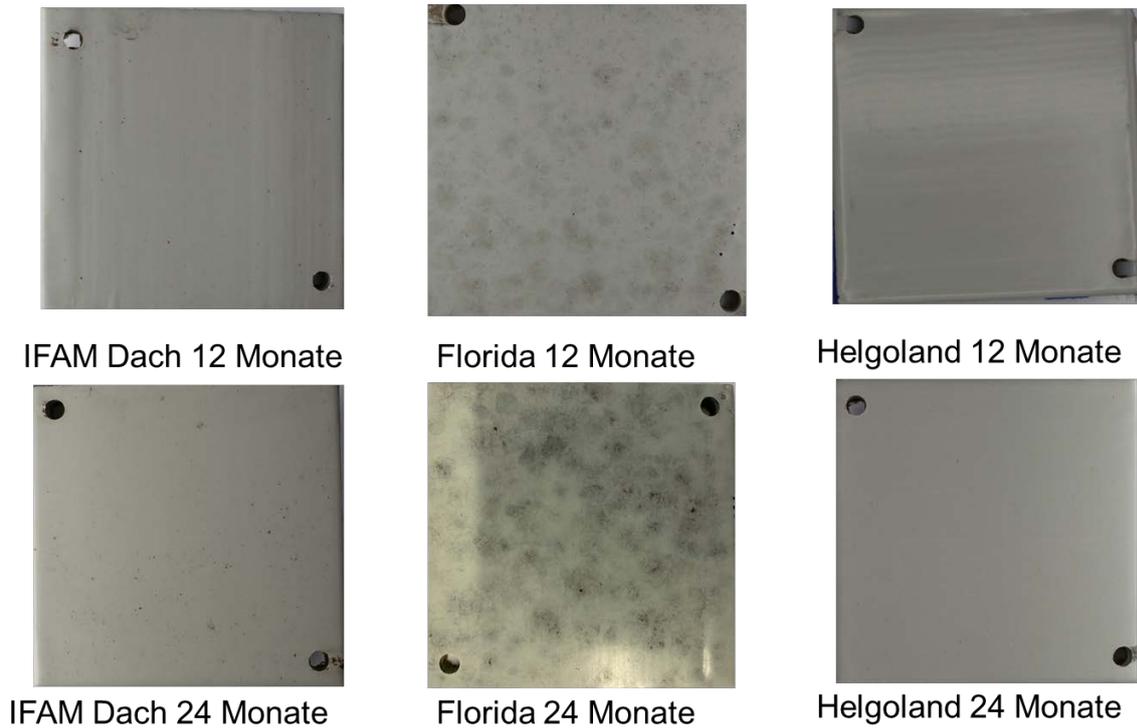


Abbildung 60: visueller Eindruck System 1 nach unterschiedlicher Beanspruchung und Auslagerung

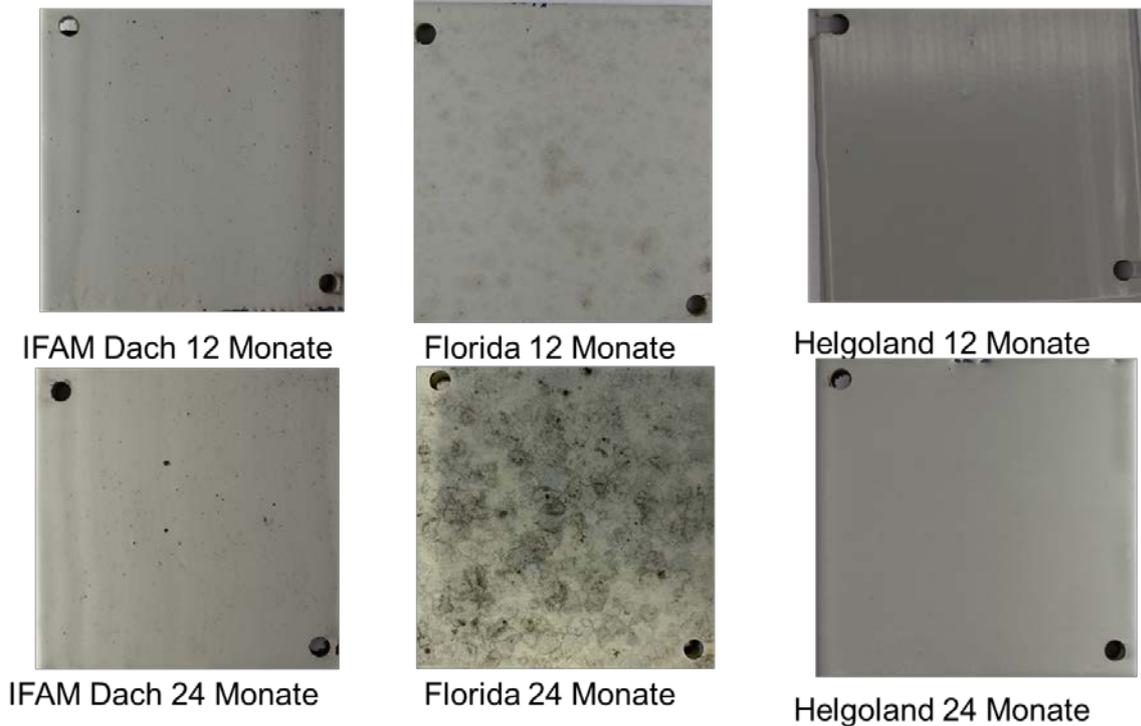


Abbildung 61: visueller Eindruck System 2 nach unterschiedlicher Beanspruchung und Auslagerung

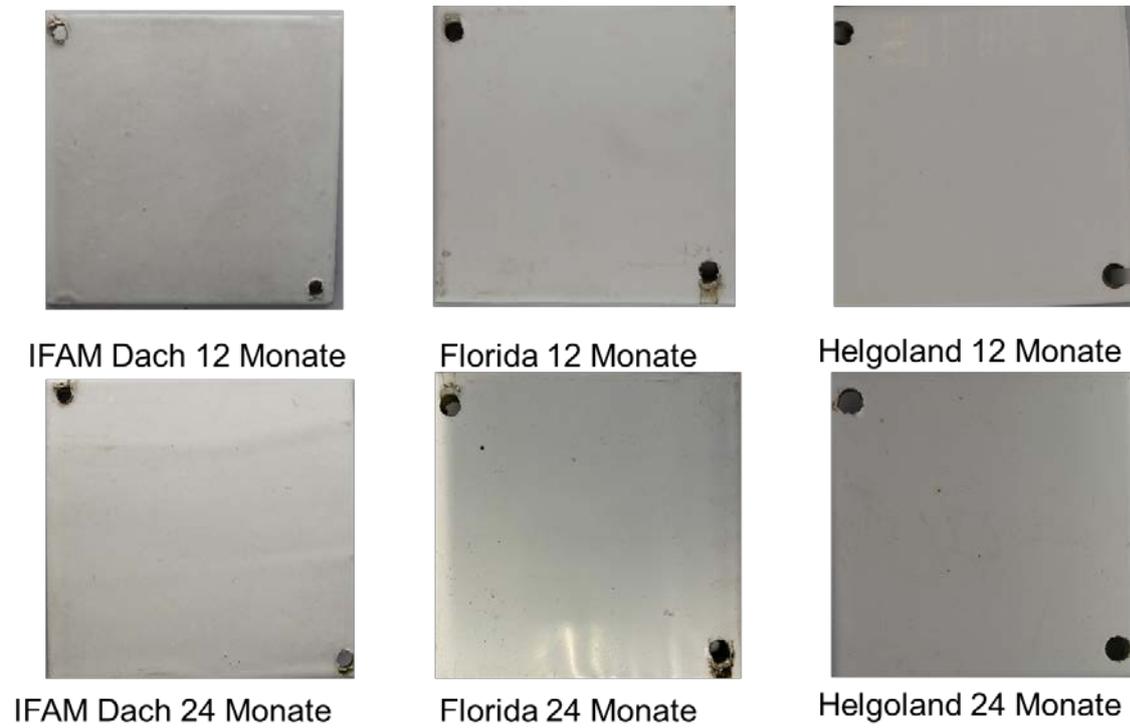


Abbildung 62: visueller Eindruck System 3 nach unterschiedlicher Beanspruchung und Auslagerung

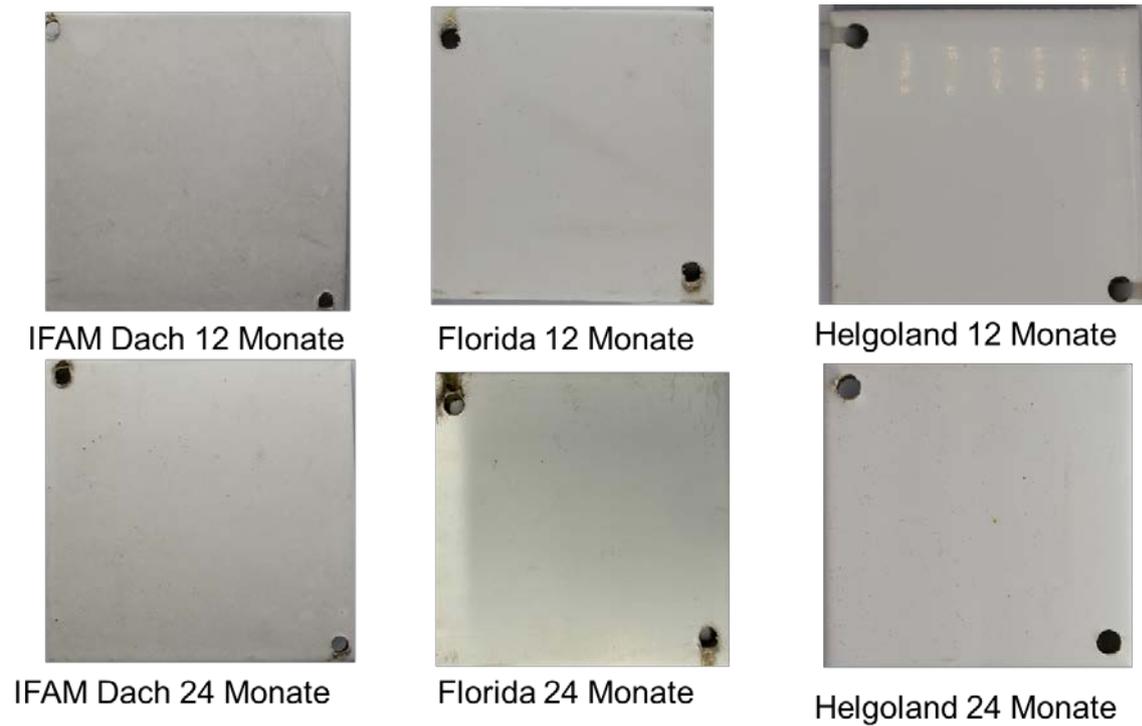
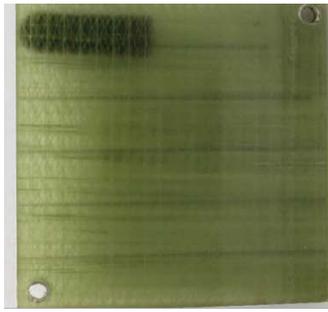
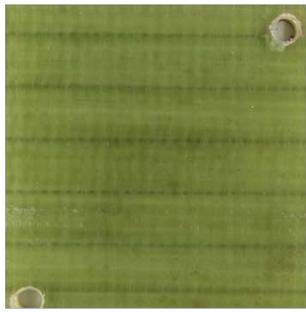


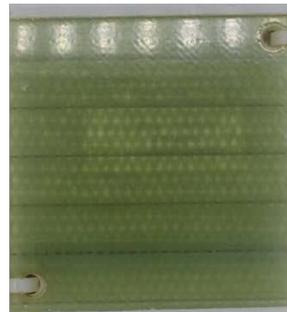
Abbildung 63: visueller Eindruck System 4 nach unterschiedlicher Beanspruchung und Auslagerung



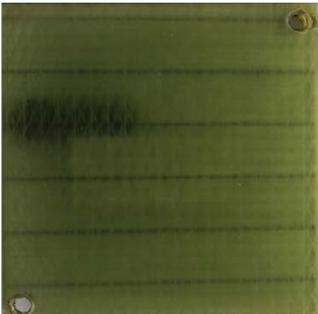
IFAM Dach 12 Monate



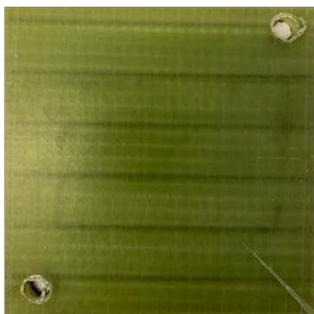
Florida 12 Monate



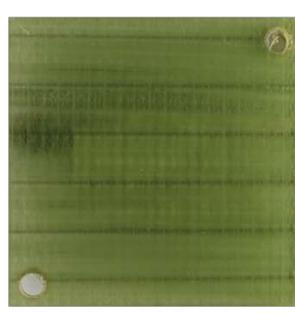
Helgoland 12 Monate



IFAM Dach 24 Monate

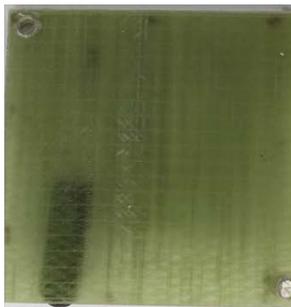


Florida 24 Monate

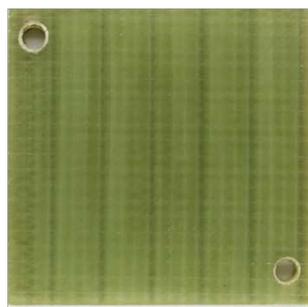


Helgoland 24 Monate

Abbildung 64: visueller Eindruck System 5 nach unterschiedlicher Beanspruchung und Auslagerung



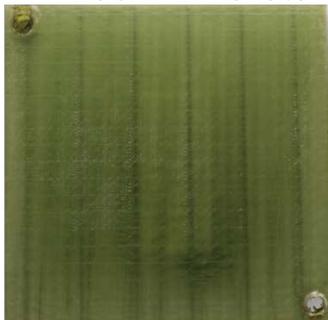
IFAM Dach 12 Monate



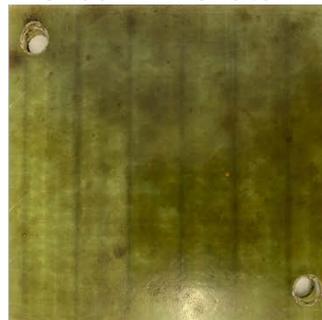
Florida 12 Monate



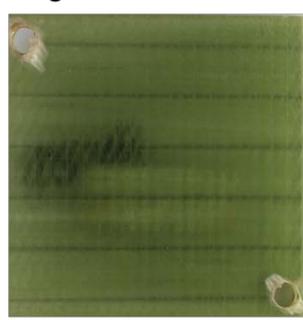
Helgoland 12 Monate



IFAM Dach 24 Monate



Florida 24 Monate



Helgoland 24 Monate

Abbildung 65: visueller Eindruck System 6 nach unterschiedlicher Beanspruchung und Auslagerung

Nach 24 Monaten Auslagerung in Florida war bei einzelnen Proben ein beschichtungsfremder Belag (vermutlich Algen, Bakterien oder Ähnliches) zu beobachten und dieser musste vor der Messung heruntergewaschen werden. Zum Teil verblieben die bräunlichen Rückstände auf der Oberfläche. Daher war es nicht möglich, bei allen Proben den Glanzabfall bzw. die Farbe zu bestimmen.

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Bei allen Proben konnten ein nur leichter Glanzverlust und eine geringfügige Veränderung der Farbe festgestellt werden. Die vorliegenden braunen Rückstände auf den ausgelagerten Floridaprobe wurden nicht weiter untersucht. Ein Rückschluss von der Glanzgrad- und Farbveränderung auf die Beständigkeit oder den Bewitterungsgrad war aufgrund der geringen Ausprägung und Differenzierbarkeit nicht ableitbar.

6.4.5 Bestimmung des E-Moduls vor und nach Beanspruchung

An den ausgelagerten Schulterstab S2 Proben wurde die Zugfestigkeit (σ) und Reißdehnung (ϵ) durch Zugversuch gemäß Norm DIN 53504 bestimmt. Diese Untersuchungen erfolgten an den freien Filmen der jeweiligen Beschichtungssysteme. In den folgenden Tabellen sind die entsprechenden Werte und das ermittelte E-Modul (E) dargestellt.

Tabelle 6 Tabellarische Übersicht der Zugwerte und E-Module des Systems 1 vor und nach Beanspruchung

| System 1 | σ | ϵ | E |
|--------------------------------------|----------------------|--------------|----------------------|
| | [N/mm ²] | [%] | [N/mm ²] |
| 0-Probe | 20,70 | 66,70 | 0,31 |
| IFAM Dach 12 Monate | 19,10 | 82,60 | 0,23 |
| IFAM Dach 24 Monate | 22,30 | 70,30 | 0,32 |
| Florida 12 Monate | 22,10 | 63,60 | 0,35 |
| Florida 24 Monate | 23,90 | 4,10 | 5,83 |
| Helgoland 12 Monate | 19,90 | 64,00 | 0,31 |
| Helgoland 24 Monate | 23,20 | 74,00 | 0,31 |
| Zyklustest 12944-9 4200 h | 30,10 | 3,40 | 8,85 |
| UV 1500 h | 21,10 | 51,10 | 0,41 |
| UV 3000 h | 22,90 | 11,60 | 1,97 |
| Xenon 1500 h | 20,70 | 48,80 | 0,42 |
| Xenon 3000 h | 22,20 | 10,00 | 2,22 |

Die Abbildungen 66 und 67 zeigen das Spannungsdehnungsdiagramm der Nullprobe, Floridabeanspruchung nach 24 Monaten sowie nach künstlicher Bewitterung durch Zyklustest 12944-9 und nach 3.000 Stunden UV Auslagerung.

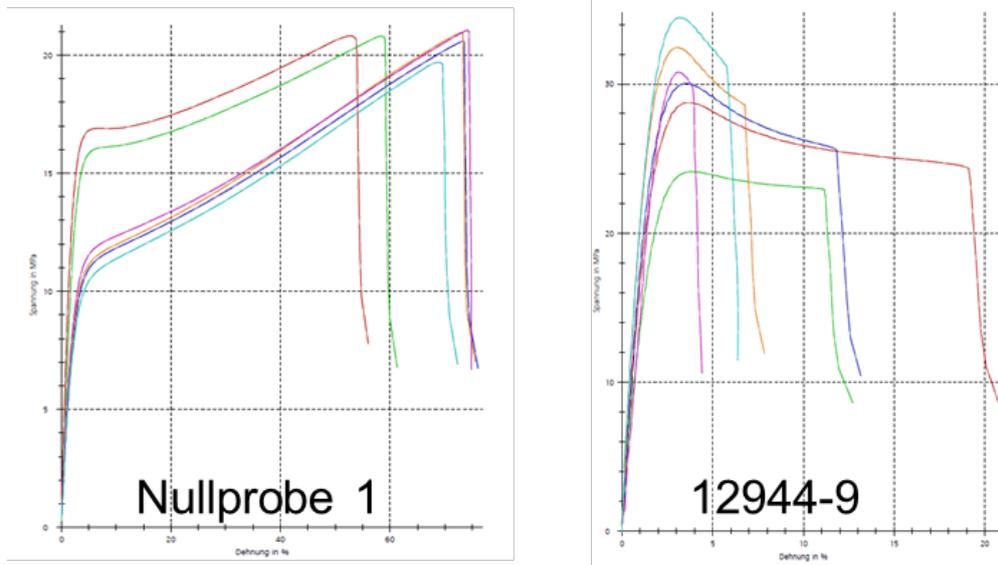


Abbildung 66: Spannungsdehnungsdiagramm System 1 unbeansprucht und nach Zyklustest 12944-9

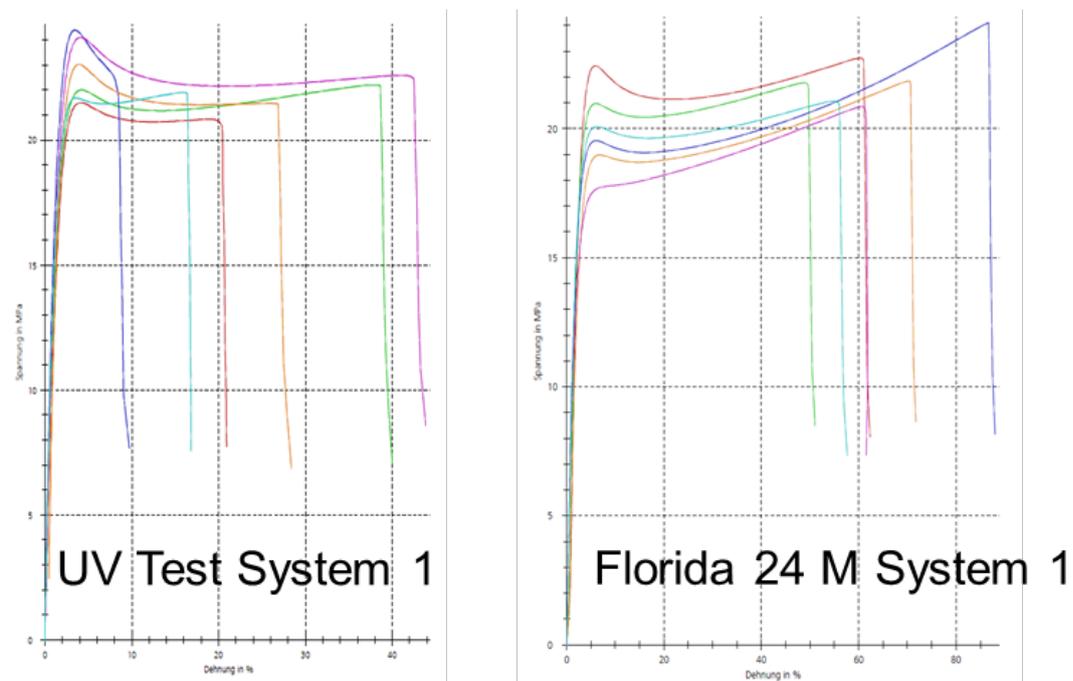


Abbildung 67: Spannungsdehnungsdiagramm System 1 nach UV Beanspruchung und nach 24 Monaten Floridaauslagerung

System 7 zeigt nach den unterschiedlichen Beanspruchungen einen komplett anderen Verlauf und die Werte weichen von den unbeanspruchten Proben sehr stark ab. Die Werte sind in der Tabelle 8 und die Spannungs-Dehnungs-Diagramme in den Abbildungen 68 und 69 dargestellt.

Tabelle 7 Tabellarische Übersicht der Zugwerte und E-Module des Systems 7 vor und nach Beanspruchung

| System 7 | | | |
|------------------------------|----------------------|---------------|----------------------|
| | σ | ε | E |
| | [N/mm ²] | [%] | [N/mm ²] |
| 0-Probe | 22,00 | 0,50 | 44,00 |
| IFAM Dach 12 Monate | 14,10 | 0,60 | 23,50 |
| IFAM Dach 24 Monate | 14,80 | 0,70 | 21,14 |
| Florida 12 Monate | 6,30 | 0,50 | 12,60 |
| Florida 24 Monate | 9,50 | 0,80 | 11,88 |
| Helgoland 12 Monate | 15,50 | 0,70 | 22,14 |
| Helgoland 24 Monate | 10,10 | 0,50 | 20,20 |
| Zyklustest 12944-9 4200 h | 15,10 | 0,50 | 30,20 |
| UV 1500 h | 14,30 | 0,70 | 20,43 |
| UV 3000 h | 13,50 | 0,40 | 33,75 |
| Xenon 1500 h | 19,70 | 0,60 | 32,83 |
| Xenon 3000 h | 13,10 | 0,70 | 18,71 |

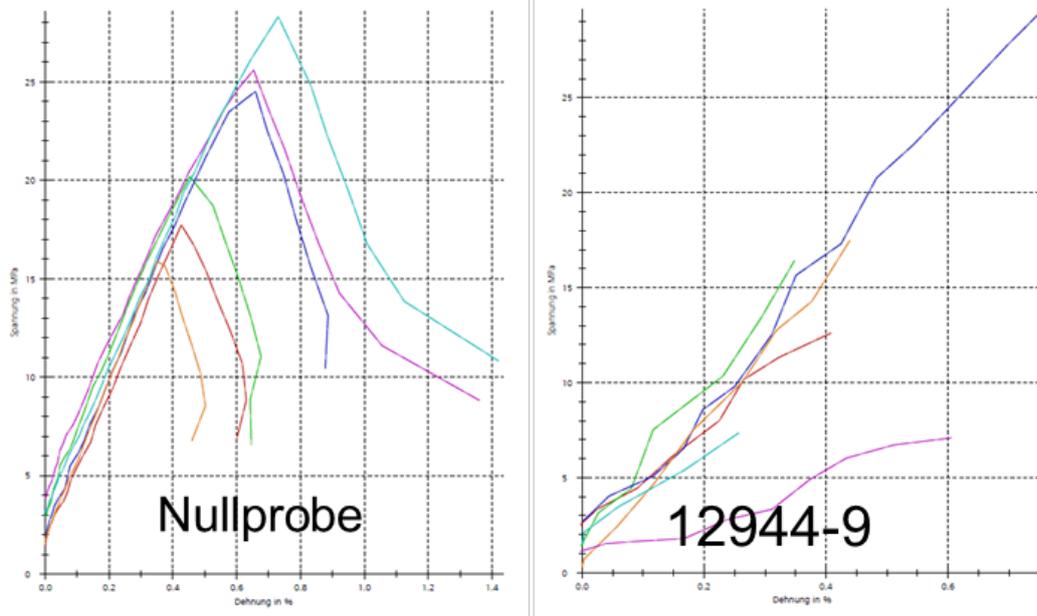


Abbildung 68: Spannungsdehnungsdiagramm System 7 unbeanspruch und nach Zyklustest 12944-9

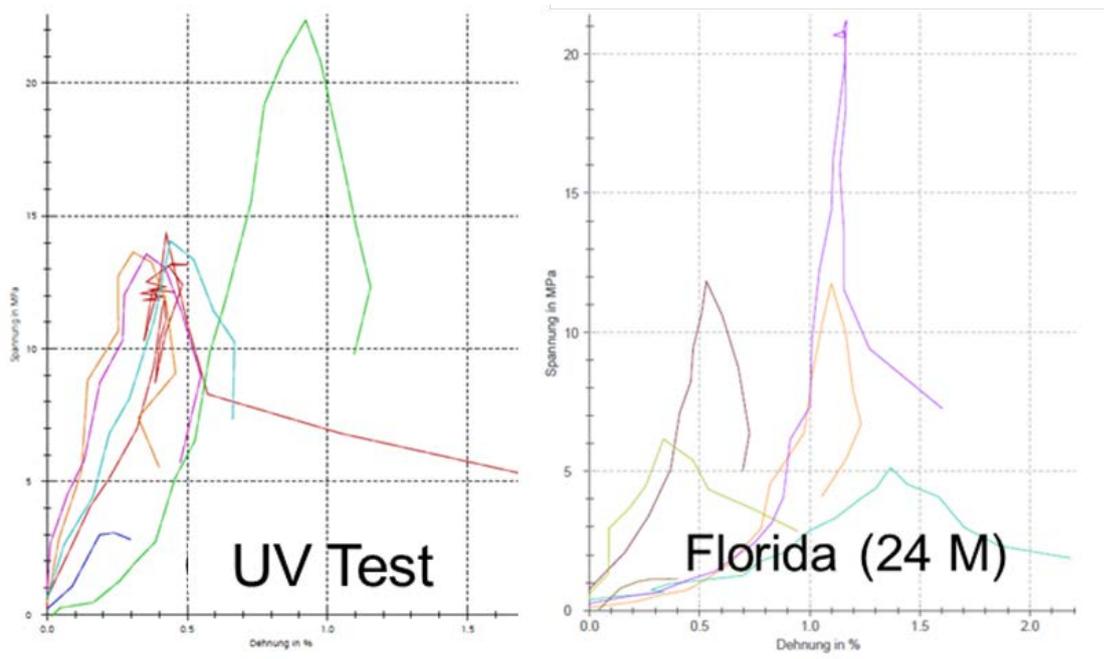


Abbildung 69: Spannungsdehnungsdiagramm System 7 nach UV Beanspruchung und nach 24 Monaten Floridaauslagerung

Die weiteren Ergebnisse der geprüften Systeme sind in einer Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 8 Tabellarische Übersicht der Werte des E-Moduls [N/mm²] System 1 bis 7 vor und nach Beanspruchung

| Beanspruchung | System 1 | System 2 | System 3 | System 4 | System 5 | System 6 | System 7 |
|--------------------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| 0-Probe | 0,31 | 0,26 | 0,05 | 0,06 | 0,13 | 0,06 | 44,00 |
| IFAM Dach 12 Monate | 0,23 | 0,19 | 0,04 | 0,05 | 0,12 | 0,06 | 23,50 |
| IFAM Dach 24 Monate | 0,32 | 0,27 | 0,03 | 0,04 | 0,10 | 0,04 | 21,14 |
| Florida 12 Monate | 0,35 | 0,77 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,05 | 12,60 |
| Florida 24 Monate | 5,83 | 8,46 | 0,03 | 0,04 | 0,07 | 0,04 | 11,88 |
| Helgoland 12 Monate | 0,31 | 0,51 | 0,03 | 0,05 | 0,09 | 0,04 | 22,14 |
| Helgoland 24 Monate | 0,31 | 0,44 | 0,03 | 0,05 | 0,10 | 0,04 | 20,20 |
| 12944-9 4200 h | 8,85 | 8,16 | 0,04 | 0,05 | 0,07 | 0,06 | 30,20 |
| UV 1500 h | 0,41 | 0,31 | 0,04 | 0,05 | 0,10 | 0,07 | 20,43 |
| UV 3000 h | 1,97 | 7,09 | 0,04 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 33,75 |
| Xenon 1500 h | 0,42 | 0,37 | 0,03 | 0,05 | 0,12 | 0,05 | 32,83 |
| Xenon 3000 h | 2,22 | 2,15 | 0,03 | 0,04 | 0,08 | 0,04 | 18,71 |

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Es konnte nachgewiesen werden, dass sich die E-Module bei den Systemen 1, 2 und 7 bei einer höheren Sonnenbeanspruchung durch Freibewitterung bzw. künstliche Bewitterung durch UV bzw. Xenon deutlich verändern. Die Systeme 3 bis 6 weisen nach den unterschiedlichen Beanspruchungen keine signifikanten Änderungen auf und die Werte unterscheiden sich kaum von der unbeanspruchten Probe. Bei dieser Untersuchungsmethode konnte nachgewiesen werden, dass sowohl die künstliche Bewitterung als auch die intensive Sonneneinstrahlung in Florida einen gravierenden Einfluss auf das E-Modul der Systeme 1, 2 und 7 haben.

Die Veränderung des E-Moduls stellt sehr wahrscheinlich einen Hinweis auf die Regenerosionsbeständigkeit dar und stellt einen möglichen Indikator für eine Qualitätsprüfung und -überwachung bei Bewitterungsprüfungen dar

6.4.6 Auswertung der Regenerosionsprüfungen vor und nach der Beanspruchung

Die Regenerosionsprüfungen erfolgten auf dem Versuchsstand des Fraunhofer Institutes in Bremerhaven gemäß ISO/TS 19392-2. Jede halbe Stunde erfolgte eine visuelle Beurteilung des Schädigungsgrades der beanspruchten Systeme.

In Vorversuchen wurde zunächst der Schädigungsmechanismus ermittelt, um so eine Aussage für die Hauptversuche zu bekommen. Dabei wurden einzelne beschichtete und ungealterte Prüfkörper im Regenerationstest geprüft und die Standzeit ermittelt.

Die folgende Abbildung zeigt das Schadensbild.

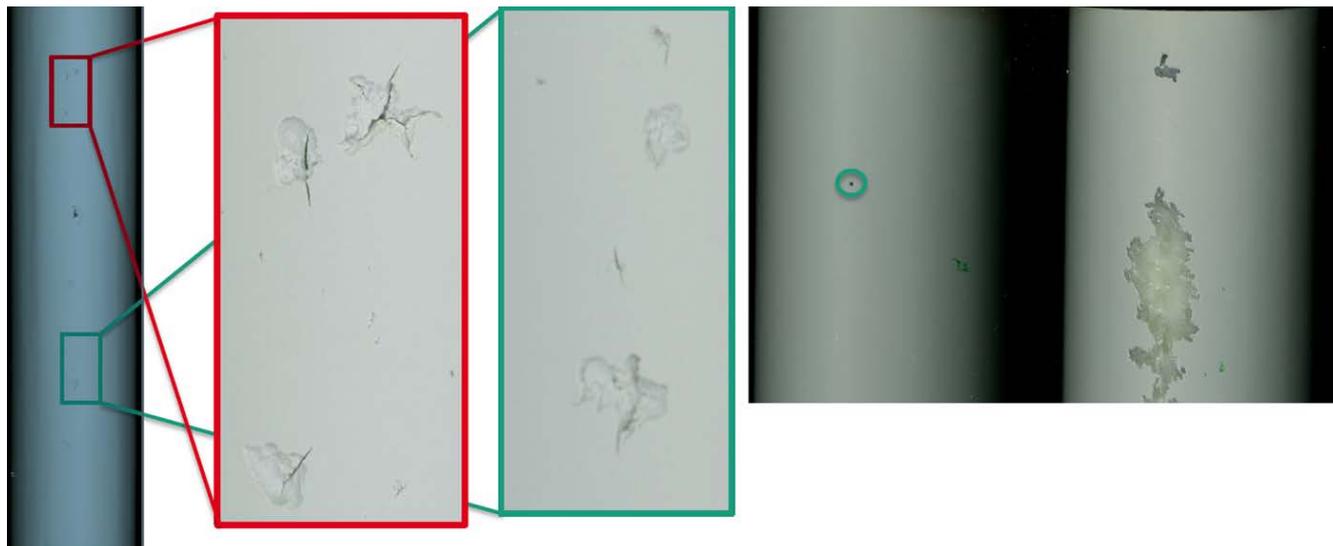


Abbildung 70: Schadensbild nach Regenerosionsprüfung, grün noch akzeptabel, rot inakzeptabel

Die Regenerosionsprüfung erfolgte nach der Durchführung der folgenden Bewitterungen:

- Keine Bewitterung
- 25 Zyklen DIN EN ISO 12944-9 (Wechselprüfung für Offshore-Bereich)
- 3000 Stunden Laborbewitterung DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2 (Fluoreszenz-Bewitterung)
- 3000 Stunden Laborbewitterung DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1 / DIN EN ISO 4892-2 Zyklus 1 (Xenon-Bewitterung)
- 24 Monate Helgoland
- 24 Monate Florida

Nach der Beanspruchung und Auslagerung der beschichteten Regenerosionsprüfkörper erfolgte die Regenerosionsprüfung nach den ausgewählten Parametern beim Fraunhofer IWES.

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Regenerosionsprüfung dargestellt.

Tabelle 9 Tabellarische Übersicht Standzeit [h] Regenerosionsprüfung vor und nach Beanspruchung

| | System 1 | System 2 | System 3 | System 4 | System 5 | System 6 | System 7 |
|----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Ohne Beanspruchung | 3,7±0,3 | 4,7±0,3 | 12,2±0,8 | 12,8±2,3 | 6,8±2,3 | 2,3±1,6 | 3,2±0,3 |
| 12944-9 Zyklustest 4.200 h | 2,3±0,4 | 2,0±0,0 | 15,0±5,7 | 5,5±2,1 | 3,0±0,7 | 2,8±0,4 | 1,3±0,4 |
| Fluoreszenz 3.000 h | 1,8±0,4 | 3,3±0,4 | 3,5±2,1 | 6,0±0,0 | 11,0±7,1 | 1,5±0,0 | 3,5±2,1 |
| Xenon 3.000 h | 3,0±1,4 | 3,0±0,0 | 6,3±2,5 | 10,5±1,8 | 1,3±0,7 | 1,1±0,2 | 3,8±0,4 |
| Helgoland 24 Monate | 4,0±0,0 | 3,7±0,6 | 9,3±2,5 | 7,3±2,1 | 6,3±1,2 | 8,3±5,8 | 3,7±1,2 |
| Florida 24 Monate | 2,5±0,0 | 3,5±0,0 | 7,3±0,8 | 6,5±0,5 | 0,7±0,3 | 3,8±1,6 | 3,2±1,2 |

Die Zahlenwerte geben die Dauer bis zum Ausfall der jeweiligen Probe (Schädigung der Beschichtung bis zum Substrat) in Stunden wieder und werden als Standzeit bezeichnet.

Zum besseren Verständnis sind die Werte graphisch in der Abbildung 71 zusammengefasst.

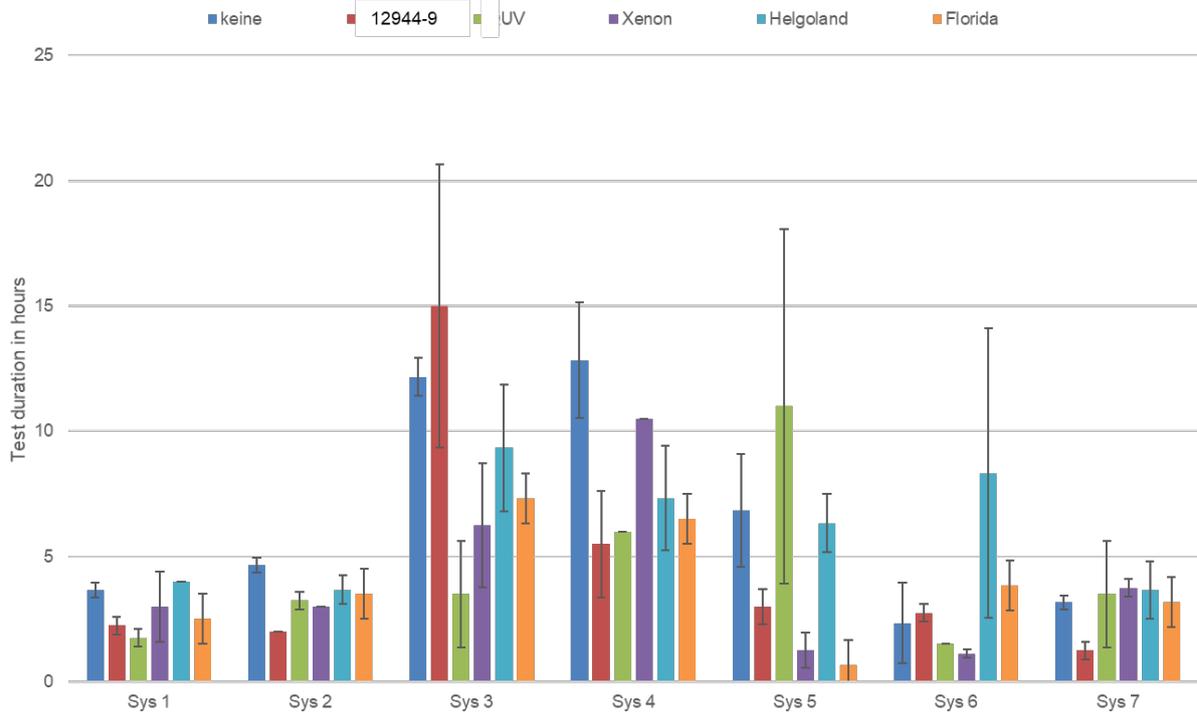


Abbildung 71: Regenerosionsprüfung Standzeit in Stunden vor und nach Beanspruchung

Es ist zu beobachten, dass bei einigen Messergebnissen hohe Streuungen vorliegen. Dies ist im Wesentlichen auf die Auswertemethode zurückzuführen, bei der die Prüfzeit bis zu einer Schädigung der Beschichtung bis zum Substrat als Ergebnis angegeben wird. Die entsprechende Beurteilung erfolgt visuell in definierten Zeitintervallen. Der Schädigungsverlauf, der Schädigungsmechanismus und die Relevanz der Schädigung für die Funktion der Beschichtung wird nicht oder nur unzureichend in das Resultat mit aufgenommen, da über die Standzeit hinaus in der Praxis maximal ein zusätzliches Rating in 6 verschiedenen Stufen zur Einschätzung der Funktionalität auf Basis einer Sichtprüfung durchgeführt wird.

Die Auswertung der Ergebnisse führt jedoch zu der Schlussfolgerung, dass für eine praxisrelevante Evaluation der zeitliche Verlauf der Schädigung sowie die Schädigungsart von großer Bedeutung für die Beurteilung einer Beschichtung hinsichtlich der Regenerosionsbeständigkeit sind. Die bislang pauschale Auswertung kann zu Fehlinterpretationen der Ergebnisse führen.

Bei der zyklischen Beanspruchung nach DIN EN ISO 12944-9 und nach der Fluoreszenz-Beanspruchung verkürzen sich die Regenerosionsstandzeiten. Bei den ausgelagerten Proben in Florida ist dies ebenfalls zu erkennen.

Bei der visuellen Beurteilung der Schäden konnte festgestellt werden, dass z.T. unterschiedliche Schadensarten vorlagen. Die Abbildung zeigt als Beispiel unterschiedliche Schädigungsbilder.

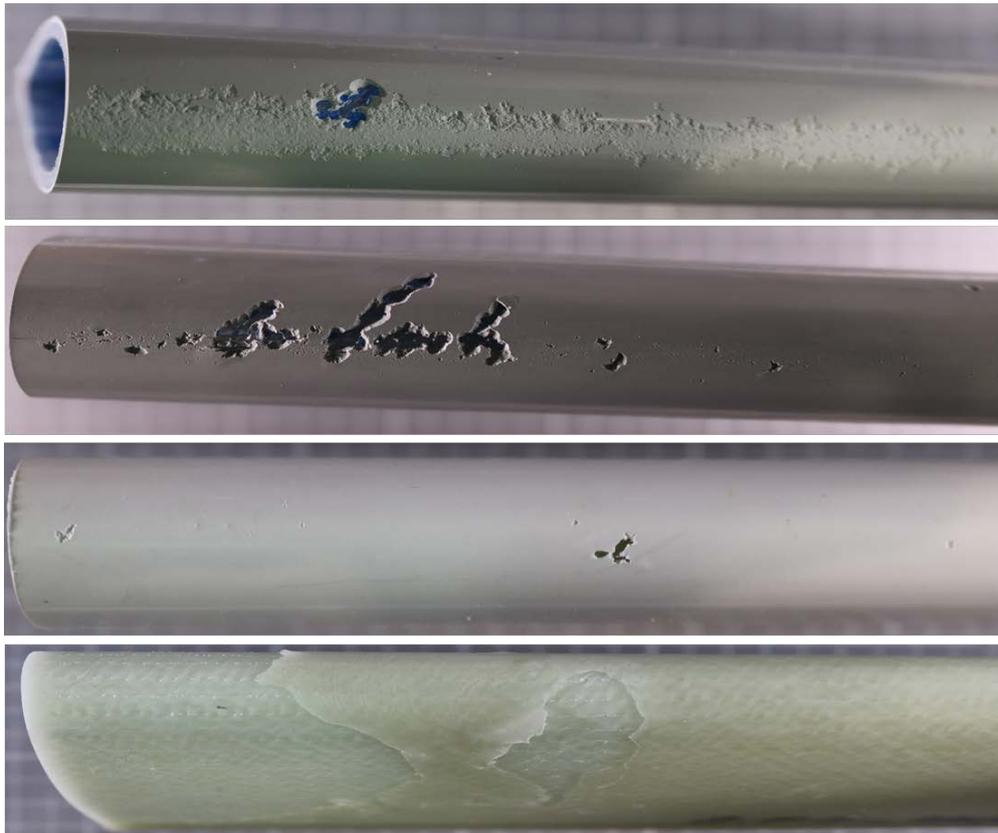


Abbildung 72: Unterschiedliche Schadensbilder nach der Prüfung

Im Rahmen des Projektes wurde gemäß der Beurteilung in ISO 19392-2 vereinbart, dass die Prüfung abgebrochen wird, wenn ein Schaden bis zum Substrat vorliegt. Anhand der vorliegenden Bilder in Abbildung 72 kann das Schadensbild nur bedingt zugeordnet werden. Bei der obersten Probe liegt ein abrasives Schadensbild vor. Bei der zweiten und dritten Probe sind partielle Durchschläge zu erkennen, die unterschiedlich groß sind.

Die unterste Probe weist eine Ablösung der Folie auf und keine weiteren Schäden. Bedingt durch die unterschiedlichen Schadensbilder wurden von ausgewählten Proben Topographieaufnahmen und Röntgen- μ -CT Aufnahmen erstellt.

Zunächst wurde die Probe System 1 ohne Beanspruchung untersucht.

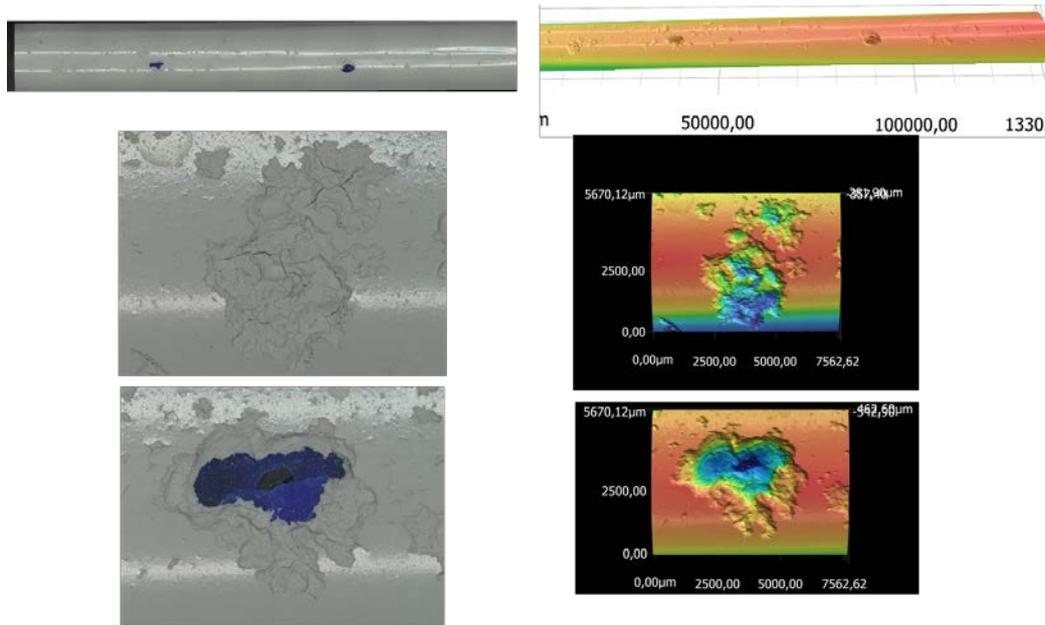


Abbildung 73: Topografie an System 1 ohne Beanspruchung

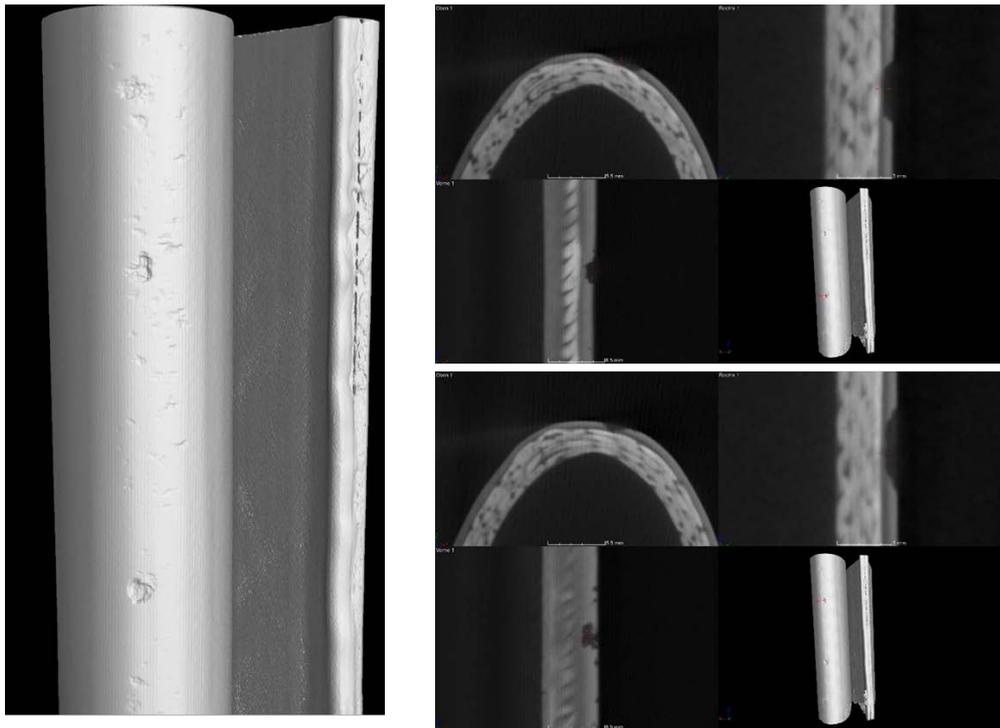


Abbildung 74: Röntgen- μ -CT Analyse an System 1 ohne Beanspruchung

Es konnte nachgewiesen werden, dass der entstandene Schaden bis zum Substrat vorlag und keine Risse in der Beschichtung.

Ebenso wurden von der Probe System 1 nach Zyklustest DIN EN ISO 12944-9 die entsprechenden Aufnahmen erstellt.

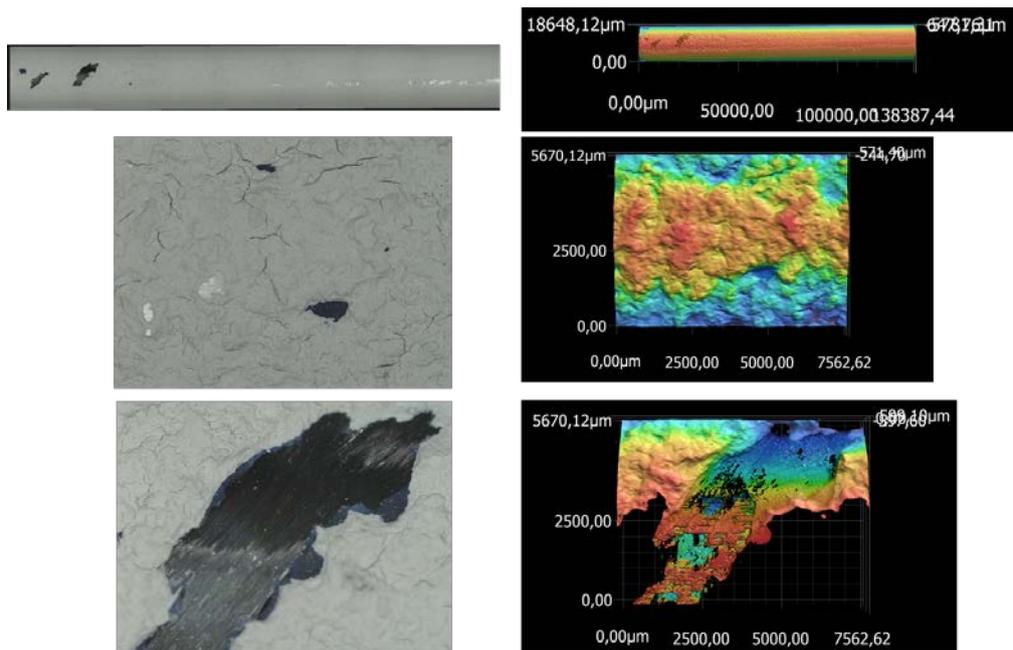


Abbildung 75: Topografie an System 1 nach Zyklustest (DIN EN ISO 12944-9)

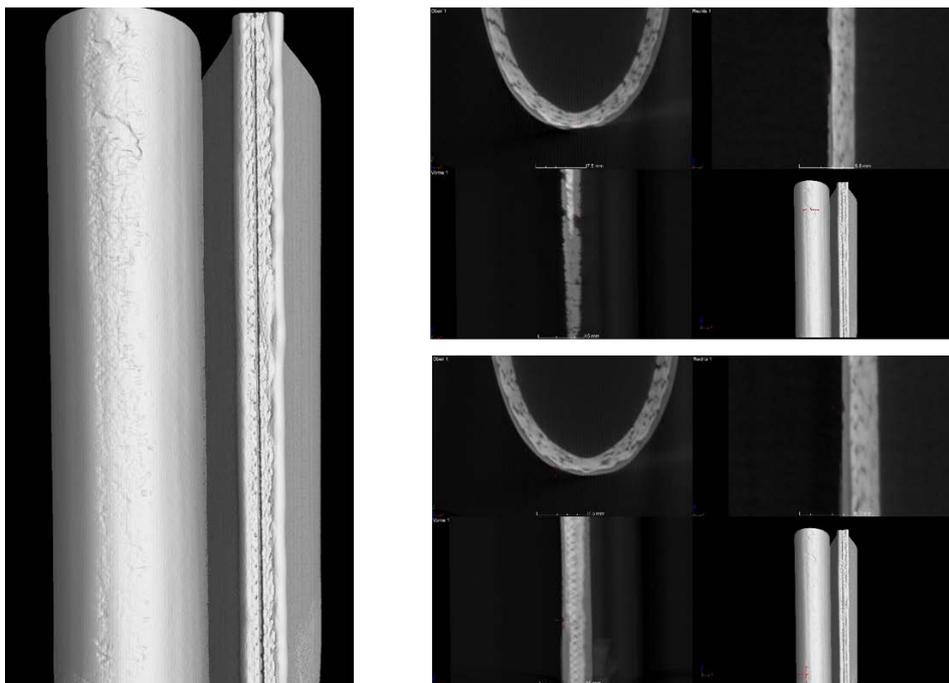


Abbildung 76: Röntgen-µ-CT Analyse an System 1 nach Zyklustest

Bei der untersuchten Probe liegt ein anderes Schadensbild als bei der unbeanspruchten Probe vor. In der Beschichtung sind Risse erkennbar und im Grundwerkstoff ist eine Schädigung zu beobachten.

Zusammenfassung der Ergebnisse:

Anhand der vorliegenden Untersuchungen kann kein eindeutiges Fazit aus den Regenerationsprüfungen erstellt werden. Inwieweit die Alterung einen Einfluss auf die Regenerationsbeständigkeit hat, ist nicht eindeutig nachzuweisen und die visuelle Auswertung ist für das Projekt nur bedingt geeignet.

6.5 Normative Vorgaben zur Beanspruchung von Regenerosionsprüfungen

Im Rahmen des Projektes wurde geprüft, welche Richtlinien und Normen im Bereich der Regenerosionsprüfung und zusätzlicher Beanspruchung gelten. Im europäischen Raum gibt es wenige Richtlinien zur Regenerosionsprüfung mit einer vorgeschalteten Alterungsprüfung. Einzig die Norsok-Vorschriften DNVGL-RP-0573 und DNVGL-CP-0424 enthalten eine Alterungsprüfung und verweisen bei einer künstlichen Beanspruchung hauptsächlich auf:

1. DIN EN ISO 12944-9, 25 Zyklen (4.200 Stunden)
2. ISO 16474-3 Teil 3, Type 1A (3.000 Stunden)

Im Rahmen des Projektes wurde die Laborbewitterung gemäß DIN EN ISO 12944-9 angewandt und ergänzt durch die Laborbewitterungen gemäß DIN EN ISO 4892-3 Zyklus 2 (Fluoreszenz-Bewitterung), DIN EN ISO 16474-2 Zyklus 1 / DIN EN ISO 4892-2 Zyklus 1 (Xenon-Bewitterung) und die Freibewitterungsprüfungen auf Helgoland (offshore Bedingungen), in Bremen (Stadtklima) und in Florida.

7 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit der Zielsetzung des Antrags

Das Ziel des Projekts RotorBewi

- die Aufklärung der Schädigungs**ursache** und-mechanismen für Feldschäden von Rotorblattvorderkantenbeschichtungen von WEA
- die **Entwicklung** eines künstlichen **Bewitterungsverfahrens**, welches die Materialalterung aus dem Feld die zu einer Schwächung gegen Regenerosion führt in einer Laborprüfung nachstellt und eine Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattvorderkantenbeschichtungen ermöglicht
- Die Projektergebnisse dienen direkt der Ausarbeitung einer neuen **internationalen Norm** zur Qualitätsbewertung von Rotorblattbeschichtungen

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene ausgewählte Beschichtungssysteme in künstlichen Laborauslagerungen, wie DIN EN ISO 12944-9 für 4.200 Stunden, UV- und Xenontest für 3.000 Stunden und in äußerer Bewitterung wie Helgoland, Stadtklima oder Florida für 2 Jahre ausgelagert. Die Beschichtungen wurden vor und nach der Beanspruchung untersucht und der Einfluss der Bewitterung sollte ermittelt werden.

Die Gesamtauswertung der Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchungen, der REM/EDX-Analysen und IR-spektroskopischen Untersuchungen zeigt, dass die Veränderungen der Systeme nach den verschiedenen Bewitterungen vom Beschichtungsmaterial abhängig sind und zusätzlich je nach Untersuchungsmethode stark streuen, so dass von den ausgewählten Bewitterungsarten keine Bewitterung als die objektiv am stärksten schädigende Bewitterung ausgewählt werden kann.

Ein Vergleich der Veränderungen der im Rahmen des Projektes untersuchten Proben mit Schädigungsursachen und -mechanismen der Feldproben kann nicht erfolgen, da entsprechende Feldproben nicht zur Verfügung gestellt werden konnten.

Es hat sich ebenfalls gezeigt, dass die Haftfestigkeit (Gitterschnittprüfung und Stirnabzugstest) bei fast allen Beschichtungen vor und nach Beanspruchung mit sehr gut bewertet wurde. Einen direkten Einfluss der Bewitterung auf die Haftfestigkeit wurde somit nicht festgestellt. Bedingt durch die künstliche Bewitterung und natürliche Bewitterung wurde ein Abfall des Glanzgrades und der Farbe festgestellt; diese Veränderungen haben jedoch keine signifikante Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften der Beschichtung zur Folge. Bei den ausgelagerten Proben in Florida wurden teilweise auf den Oberflächen fremdartige Bestandteile festgestellt, die vermutlich auf Algen-, Bakterien- und/oder Pilzbewuchs zurückzuführen sind. Eine aussagekräftige Auswertung war bei diesen Proben nur bedingt möglich.

Bei einigen Beschichtungssystemen war eine deutliche Veränderung des E-Moduls durch die künstliche Bewitterung und durch die Freibewitterung zu beobachten. Ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen der Veränderung des E-Moduls und der Regenerosionsbeständigkeit war allerdings nicht zu ermitteln, da die Auswertemethode nach der Regenerosionsprüfung für dieses Projekt nur bedingt geeignet war. Der Grund dafür waren unterschiedliche Schadensbilder und -ausmaße, die nicht miteinander verglichen werden können.

Eine unmittelbare Ableitung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens, welches die Materialalterung aus dem Feld nachstellt und so Rückschlüsse auf die Regenerosionsbeständigkeit ermöglicht, ist nicht möglich und aufgrund der Erkenntnisse dieses Projekts nicht zweckmäßig.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Forschungseinrichtung 1 (IFAM)

Das Forschungsprojekt ist durch wissenschaftlich-technisches Personal im zeitlichen Gesamtumfang von 19,74 PM (HPA A1) sowie 11,53 PM (HPA 2) bearbeitet worden.

Forschungseinrichtung 2 (DFO)

Das Forschungsprojekt ist durch wissenschaftlich-technisches Personal im zeitlichen Gesamtumfang von 7,47 PM (HPA A1) sowie 18,66 PM (HPA 2) bearbeitet worden. Aufgrund von erhöhtem wissenschaftlichem Aufwand bei der Auswertung der Ergebnisse wurde der Ansatz A1 um 0,27 PM überschritten.

Zu erwähnen ist auch die ausgabeneutrale Verlängerung des Projektes um 12 Monate.

9 Schlussfolgerungen und Resümee

Das Projekt RotorBeWi brachte zwei wesentliche Erkenntnisse hervor, die folgende Schlussfolgerungen erlauben:

1. Die Auswirkungen durch Bewitterungseinflüsse, die als eine Kombination aus UV-Licht-Bestrahlung, Temperatur, Feuchtigkeit, sowie bei Offshore Anwendungen hohem Salzgehalt in der Luft angenommen werden, auf mechanisch-technologische und optische Eigenschaften sowie die chemische Degradation der Beschichtungen, weichen deutlich von bisherigen Annahmen ab. Die Haftfestigkeit der Beschichtung, der Glanzgrad, die Farbe, die Medienaufnahme und die chemische Degradation zeigen teilweise keine bis nur sehr schwach ausgeprägte Veränderungen auf und haben folglich nur eine untergeordnete Rolle bei eventuellen Unterschieden in der Regenerosionsbeständigkeit. Deutliche und unterschiedliche Veränderungen können hingegen bei den Messwerten des E-Moduls detektiert werden.

Das E-Modul eines Materials bzw. dessen Veränderung durch Bewitterung hat potenziell direkte Auswirkungen auf die Regenerosionsbeständigkeit, da bei dieser Beanspruchung der Beschichtung von einer dynamischen plastischen Verformung der Beschichtung ausgegangen werden kann, die naturgemäß eine Korrelation zum E-Modul aufweist.

2. Die Regenerosionsprüfung gemäß ISO TS 19392-2 ist zwar die bislang etablierte und in der Branche geforderte Prüfung zur Bestimmung der Regenerosionsbeständigkeit, wies jedoch im Rahmen dieses Projektes eine geringe Aussagekraft auf und führte teils sogar zu irreführenden Interpretationen. Das Prüf- bzw. Auswerteverfahren legt fest, dass die Prüfzeit abgeschlossen ist, sobald eine Schädigung der Beschichtung bis zum Substrat erkennbar ist. Die Beurteilung erfolgt visuell in definierten Zeitintervallen. Der Schädigungsverlauf, der Schädigungsmechanismus und die Relevanz der Schädigung für die Funktion der Beschichtung wird gar nicht oder nur unzureichend in das Resultat mit aufgenommen. Als Ergebnis wird lediglich die Dauer angegeben, bis es zur genannten Schädigung kommt sowie ein Rating in 6 verschiedenen Stufen zur Einschätzung der Funktionalität auf Basis einer Sichtprüfung. In der Praxis ist jedoch auch der zeitliche Verlauf der Schädigung sowie die Schädigungsart von großer Bedeutung für die Beurteilung einer Beschichtung hinsichtlich der Regenerosionsbeständigkeit.

Die bislang pauschale Auswertung kann zu Fehlinterpretationen der Ergebnisse führen. Eine Anpassung der Auswertemethode wird eine deutlich höhere Differenzierbarkeit im Schädigungsverlauf, dessen Mechanismus und der Relevanz für die Funktionalität von Rotorblattbeschichtungen ermöglichen. Dabei lassen sich auch Aussagen über notwendige Wartungs- bzw. Reparaturintervalle im Feld ableiten, die einen wesentlichen Kostenfaktor ausmachen, wie in Abschnitt 1 dieses Berichts erläutert wurde.

Aus diesen beiden Schlussfolgerungen ist wiederum abzuleiten, dass eine bislang unerkannte, erhebliche Unsicherheit über die Aussagekraft der bisherigen Vorgehensweise zur Prüfung der Regenerosionsbeständigkeit besteht.

Die Erkenntnis, dass das E-Modul abhängig vom Beschichtungssystem und der Bewitterungsart sehr unterschiedlich stark beeinflusst wird und andere für die Regenerosionsbeständigkeit als relevant angenommene Eigenschaften dabei nicht oder nur geringfügig variieren, lässt auf einen ausschlaggebenden Einfluss der Bewitterung auf die Ergebnisse des Regenerosionstests schließen, da von einem starken Einfluss des E-Moduls und damit der Elastizität der Beschichtung auf das Ergebnis der Prüfung ausgegangen werden kann.

Die mangelhafte Korrelation der Ergebnisse der bisherigen Laborprüfungen (Prüfungen an bewitterten Proben und separate Regenerosionsprüfung an unbewitterten Proben) ist somit hauptsächlich auf das nicht ausreichend praxisrelevante Prüfverfahren zur Bestimmung der Regenerosionsbeständigkeit bzw. dessen Auswertemethode und die Prüfung an unbewitterten Proben zurückzuführen. Das heißt, dass nicht die Art der Bewitterung problematisch ist, sondern die Tatsache, dass die Regenerosionsprüfung bislang an ungeeigneten (unbewitterten) Proben durchgeführt wurde und das etablierte Auswerteverfahren der Regenerosionsprüfung nicht ausreichend praxisrelevant ist. Letzteres ist zugleich die Begründung dafür, dass aus den Ergebnissen der Regenerosionsprüfungen im Rahmen dieses Projekts keine verlässlichen Schlussfolgerungen gezogen werden konnten, auch wenn in diesem Fall bewitterte Proben geprüft wurden.

Abschließend ist hierzu festzuhalten, dass in zahlreichen Diskussionen in und außerhalb der Projektsitzungen im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses der deutliche Bedarf klar wurde, insbesondere die Regenerosionsprüfung in Bezug auf die im Rahmen dieses Projektes erarbeiteten Erkenntnisse und Optimierungspotenziale zur Bewitterungsprüfung von Rotorblattbeschichtungen zu überarbeiten. Somit ist nicht die Entwicklung eines neuen künstlichen Bewitterungsverfahrens, sondern die Kombination bestehender Bewitterungsverfahren, wie z.B. nach DIN EN ISO 12944-9, mit einer praxisorientiert weiterentwickelten und optimierten Regenerosionsprüfung der richtige Weg für die Realisierung eines aussagekräftigeren Prüfverfahrens.

10 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für kleinere und mittlere Unternehmen

10.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Nutzung der erzielten Forschungsergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen

Die im Rahmen des Projekts erzielten Erkenntnisse über die Auswirkungen der unterschiedlichen Bewitterungstests auf die chemischen, physikalischen und optischen Eigenschaften von Rotorblattbeschichtungen ermöglichen zukünftig ein gezielteres Setzen von Schwerpunkten bei der Entwicklung von Rotorblattbeschichtungsstoffen. Dadurch lassen sich Entwicklungszeiten und somit -kosten reduzieren. Aufgrund von Gesetzesvorgaben notwendige Rezeptanpassungen können schneller und kostengünstiger umgesetzt werden. Durch die langfristige Vermeidung bzw. Verzögerung von Erosionsschäden durch entsprechend optimierte Beschichtungsstoffe wird eine verbesserte Ertragsicherheit sowie die Senkung von Wartungs- und Reparaturkosten für Anlagenbetreiber gewährleistet.

Zusätzlich machen die Erkenntnisse über die tatsächliche Aussagekraft der bislang gängigen Regenerosionsprüfung, insbesondere der etablierten Auswertemethoden, eine

neue Betrachtungsweise und Überlegungen zu Verfahrensanpassungen notwendig. Auf Basis der Schlussfolgerungen der Ergebnisse der in diesem Projekt durchgeführten Regenerosionsprüfungen ist davon auszugehen, dass sich mit relativ geringem Aufwand eine in puncto Praxisrelevanz angepasste Prüf- und Auswertemethode entwickeln lässt, die den Erkenntnisgewinn und damit den Nutzen dieser Prüfung signifikant erhöht.

Eine derartige Anpassung der Regenerosionsprüfung stellt in Kombination mit ausgewählten Bewitterungsprüfungen eine deutlich genauere, praxisnähere und gesamtheitliche Prüfmethode dar und stellt deshalb die Grundvoraussetzung für eine auf den Ergebnissen dieses Projekts langfristig angestrebten Entwicklung einer Laborprüfung, die künstliche Bewitterungsverfahren mit einer Regenerosionsprüfung kombiniert, um insbesondere die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattvorderkantenbeschichtungen zu ermöglichen.

Potenzieller Nutzerkreis vor dem Hintergrund der adressierten Zielgruppe (KMU)

- Beschichtungsstoffhersteller – Im Bereich der Lackhersteller (insgesamt ca. 250 KMU in Deutschland) stellen für diese Anwendung derzeit 4 KMU Beschichtungsstoffe her. Weitere Lackhersteller sind interessiert, diese Branche zu beliefern und arbeiten an entsprechenden Entwicklungen. Das Erosionsschutzmaterial ist ein hoch spezialisierter Lack, der nur auf kleinen Flächen (Blattvorderkante) angewendet wird. Derartige Nischenprodukte sind speziell für kleinere, spezialisierte Lackhersteller (KMU) interessant. Der zu erwartende reduzierte Prüfaufwand ist v.a. für KMU-Lackhersteller von Vorteil.
- Prüfgerätehersteller und Beratungsunternehmen für Bewitterungsprüfungen – In diesem Marktsegment sind mehrere KMU aktiv, dies betrifft die Beratung und den Vertrieb von Bewitterungsgeräten, bzw. Anbieter von entsprechenden Prüfdienstleistungen. Dazu kommen Firmen, die in Kleinserie Prüfgeräte für die Regenerosionsprüfung herstellen.
- Anlagenbetreiber – Aktuell sind etwa 2000 Betreiber von Windenergieanlagen im Bundesverband WindEnergie (BWE) organisiert, die Mehrheit davon sind KMU.

Die im Projekt erfolgreich gewonnen Erkenntnisse insbesondere für den Regenerosionstest können von Unternehmen aus verschiedenen Branchen aufgegriffen und genutzt werden.

10.2 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Der Umfang und die erzielte Tiefe im Verständnis der chemisch-physikalischen Veränderungen bewitterter Rotorblattbeschichtungen wurde auf einem bislang unerreichten Niveau durchgeführt. Dies zeigt sich beispielhaft in der Erkenntnis, dass die Haftfestigkeit der Beschichtung oder deren chemische Degradation durch die unterschiedlichen Bewitterungsarten in einem kaum relevanten Maße beeinträchtigt werden und entsprechend auf einen nur geringen Einfluss dieser Eigenschaften auf die Regenerosionsbeständigkeit zu schließen ist. Im Gegensatz dazu sind teils deutliche Unterschiede im E-Modul messbar, was eine Neuausrichtung bzw. Schwerpunktverlagerung der Entwicklungsarbeit von Rotorblattbeschichtungsstoffen zur Folge haben wird.

Die kritische Betrachtung der Ergebnisse des Regenerosionstests stellt die bisherige Vorgehensweise zur diesbezüglichen Qualitätssicherung in Frage, die zu einer Anpassung des gesamten Prüfverfahrens und dadurch zu einem neuartigen Erkenntnisgewinn

durch die resultierenden Prüfergebnisse führen wird. Es ist davon auszugehen, dass dieser zusätzliche Erkenntnisgewinn eine deutlich genauere, differenzierte und somit praxisrelevantere Aussage über das Verhalten von Rotorblattbeschichtungen in Bezug auf die Beanspruchung und Regenerosion im Feld erlaubt.

10.3 Einschätzung der Realisierbarkeit einer industriellen Umsetzung

Die abschließenden Schlussfolgerungen des Projekts konnten zwar erst im letzten Drittel der Projektlaufzeit gezogen werden, dennoch kam es zügig zu konstruktiven Diskussionen und Überlegungen, insbesondere bei den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses, wie eine Anpassung des Regenerosionstests aussehen könnte und anzugehen wäre. Es kann entsprechend davon ausgegangen werden, dass der Großteil der Industrieunternehmen des potenziellen Nutzerkreises der Notwendigkeit einer Anpassung des gesamten Prüfverfahrens und der zugehörigen Norm ISO TS 19392-2, zustimmt. Als zielführend ist in diesem Zusammenhang eine gemeinschaftliche Entwicklung eines entsprechend optimierten Verfahrens unter Einbeziehung des entsprechenden Normausschusses, von Unternehmen sowie Instituten und universitären Einrichtungen aus dem potenziellen Nutzerkreis.

Eine sofortige Berücksichtigung der weiteren Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt, insbesondere die Prüfergebnisse der chemischen, physikalischen und optischen Eigenschaften, ist z.B. im Bereich der Entwicklung von Beschichtungsstoffen uneingeschränkt möglich. In den nächsten Jahren kann die Entwicklung von Beschichtungsstoffen hinsichtlich der betrachteten Eigenschaften angepasst werden. Somit wird die Entwicklung systematischer gestaltet und kann damit schneller, effizienter und prozesssicherer durchgeführt werden.

10.4 Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projektes wurden die Ergebnisse des Forschungsprojekts in Fachzeitschriften und auf verschiedenen nationalen und internationalen Fachtagungen präsentiert.

- H. Schuster, S. Buchbach: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (Rotor-BeWi); DFO Information Ausgabe 01/2019
- H. Schuster, S. Buchbach: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (Rotor-BeWi); Fachzeitschrift besser lackieren Ausgabe 18, 11/2019
- S. Buchbach, H. Schuster: Polymer degradation due to UV aging and its effect on the strength of polyurethane based leading edge protection coatings; 3rd International Symposium on LeadingEdge erosion of Wind Turbine Blades, 09.02.2022, Roskilde, Denmark

- H. Schuster, S. Buchbach: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (Rotor-BeWi); Paint Expo 26.-29.04.2022, Karlsruhe
- H. Schuster, S. Buchbach: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (Rotor-BeWi); Innovationstag Mittelstand 23.06.2022, Berlin
- S. Buchbach, H. Schuster: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen Bewitterung von Kunststoffen, SKZ Veranstaltung, 06.07.2022 Rottendorf
- S. Buchbach, H. Schuster: Alterungseinflüsse auf die Erosionsbeständigkeit von LEP Beschichtungen im Bereich Rotorblätter, GdCHTagung 14.-16.09.2022 Würzburg
- Dr. K. Koschek: New Materials, Recycling and Future Perspectives, Materials and Technologies for Sustainable Wind Turbine Blade Production, 22.11.2022, Roskilde, Denmark
- S. Buchbach, H. Schuster: Polymer degradation due to UV aging and its effect on the strength of polyurethane coating for leading edge protection, European Coatings Show 27.-30.03.2023, Nürnberg
- S. Buchbach, H. Schuster: Beanspruchungsszenarien und Bewitterung hochbeanspruchbarer Rotorblattvorderkantenbeschichtungen und der Einfluss auf die Regenererosionsbeständigkeit; 51. Jahrestagung der Gesellschaft für Umweltsimulation e.V., 29.-30.03.2023, Stutensee
- T. Braams: Lichtschutz für Windräder, Farbe & Lack 07.2020

10.5 Transfermaßnahmen

Tabelle 10 Maßnahmen während der Laufzeit des Projektes

| Bereits durchgeführter Ergebnistransfer | | |
|---|---|---|
| Diskussionen im Projektbegleitenden Ausschuss | Fortlaufende Projektbesprechungen und Anwendung der Zwischenergebnisse | Abschlussveranstaltung 23.02.2023 11.01.2023 14.11.2022 19.07.2022 24.02.2022 01.09.2021 01.03.2021 31.08.2020 28.01.2020 05.11.2019 Aufaktveranstaltung 11.04.2019 |
| Statusberichte während der Projektlaufzeit | Aktueller Stand des Projektes und Informationen an den PbA | Erster Zwischenbericht 01.03.2020-31.12.2020 Zweiter Zwischenbericht 01.01.2021-31.12.2021 Dritter Zwischenbericht 01.01.2022-31.12.2022 |
| Statusberichte in Gremien | H. Schuster, S. Buchbach: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (RotorBeWi); DFO Fachgremium „Qualitätssicherung und Prüfverfahren“, 2-mal jährliche Statusberichte H. Schuster, S. Buchbach: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung | 26.09.2023 07.03.2023 20.09.2022 03.05.2022 24.09.2021 02.03.2021 08.09.2020 06.10.2020 10.09.2019 12.03.2019 13.06.2023 21.09.2021 |

| | | |
|--|--|---|
| | <p>hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (RotorBeWi); DFO Fachgremium „Oberflächenbehandlung von Stahl und Multisubstrate“, Statusberichte</p> <p>H. Schuster, S. Buchbach: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (RotorBeWi); DFO Fachgremium „Beschichtung von Kunststoffen“, Statusberichte</p> | <p>15.11.2023</p> <p>22.09.2021</p> |
| <p>Statusberichte in Normausschüssen</p> | <p>H. Schuster, S. Buchbach: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (RotorBeWi); DIN-Normausschuss NA 002-00-07 AA „Allgemeine Prüfverfahren für Beschichtungsstoffe und Beschichtungen“, Statusbericht</p> <p>H. Schuster, S. Buchbach: Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (RotorBeWi); DIN-Normausschuss NA 002-00-16 AA „Beschichtungen an Rotorblättern für Windenergieanlagen“, jährliche Statusberichte</p> <p>H. Schuster, S. Buchbach: Development of an artificial weathering method for the quality assurance of highly stressable rotor blade leading edge coatings under evaluation of weathering-induced mechanical property changes (RotorBeWi); ISO-Normausschuss ISO/TC 35/SC 9/WG 32 „General test methods for paints and varnishes“, Statusbericht</p> | <p>08.04.2022</p> <p>24.03.2023</p> <p>29.03.2022</p> <p>20.04.2021</p> <p>23.03.2020</p> <p>11.04.2019</p> <p>13.06.2023</p> |

| | | |
|--|--|------------------------------|
| Vorstellung des Projektes auf der Webseite | https://www.dfo.info/de/forschungsprojekte/rotorbewi/ Entwicklung eines künstlichen Bewitterungsverfahrens für die Qualitätssicherung hochbeanspruchbarer Rotorblattvorderkantenbeschichtungen unter Bewertung witterungsbedingter mechanischer Eigenschaftsänderungen (Rotor-BeWi) (fraunhofer.de) | |
| Masterarbeit | T. Braams: Untersuchung des Einflusses von Lichtschutzmitteln auf das Degradations- und Elastizitätsverhalten von Polyurethanbeschichtungen | Juni 2021 |
| Vorlesung Prof. Mayer und Stenzel | Vorlesung Oberflächentechnik und Beschichtungen | Sommersemester 2021 und 2022 |

Tabelle 11 Geplante Maßnahmen nach Abschluss des Projektes

| | | |
|---|--|--|
| Geförderte EU Projekte | EU Projekt: Carbo4Power – New generation of offshore turbine blades with intelligent architectures of hybrid, nano enabled Multi-Materials advanced Manufacturing CleanAviation-Luftfahrt: Entwicklung und Charakterisierung organischer Beschichtungen für die Regenerationsbeschichtung für die Luftfahrt | Verwendung der Projektergebnisse für Datensammlung, Erkenntnisgewinn Erosionsprüfung und Schadensbild und Übertragung Prüfmethode. |
| Gefördertes nationales Projekt vom BMWK | MARiLEP – Material- und Reparaturinnovationen für Offshore Leading Edge Protection Systeme | Verwendung der Projektergebnisse für Datensammlung, Erkenntnisgewinn Erosionsprüfung und Schadensbild und Übertragung Prüfmethode. |
| Vorlesung Prof. Mayer und Stenzel | Vorlesung Oberflächentechnik und Beschichtungen | Sommersemester 2023ff |
| Messen | Paintexpo 2024 ECS 2025 | 09.-12.04.2024 2025 |
| Gremien | Vorstellung des Projektes und Ergebnisse im AK Windenergie-Agentur e.V. (WAB) | 10/2023 |

| | | |
|----------------|--|---------|
| | Vorstellung des Projektes und Ergebnisse im Arbeitskreis Windenergieanlagen bei der GfKORR | 03/2024 |
| WiPano Projekt | Nachfolgeprojekt zu RotorBeWi geplant | |

11 Durchführende Forschungseinrichtungen

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung (IFAM)

-Klebertechnik und Oberflächen-

Wiener Straße 12-

28359 Bremen

Tel.: 0421 2246 497

Prof. Dr. Bernd Mayer

Dipl. Ing. Sascha Buchbach

Deutsche Forschungsgesellschaft für

Oberflächenbehandlung e.V. (DFO)

Hammfelddamm 10

41460 Neuss

Tel.: 02131 40811 28

Herr Ernst-Hermann Timmermann

Herr David Hoffmann

Frau Heike Schuster

Laufzeit

01.03.2019-28.02.2023

Literaturverzeichnis

- [1] <http://www.offshorewind.biz/2016/08/15/blade-erosion-repair-can-up-annual-energy-production-by-2/> (2016); Download: January 2021
- [2] GigueÁre, P.; Selig, M.: Aerodynamic Effects of Leading edge Tape on Aerofoils at Low Reynolds Numbers, WIND ENERGY Wind Energ., 2, 125±136 (1999)
- [3] Weber, B.; Symposium Der Einfluss von Erosion auf die Effizienz von Windenergieanlagen und innovative Ansätze zur Vermeidung von Erosionsschäden 11.11.2011 in Hamburg
- [4] Raimund, W.: VDI-Konferenz Rotoren von Rotorblättern, Vortrag von Areva, 2011
- [5] <http://renews.biz/83121/dong-maps-horns-rev-overhaul/>
- [6] <http://nawindpower.com/siemens-takes-big-loss-due-to-wind-turbine-issues> (2014), Download: January 2021
- [7] Gohardini, O, Impact of erosion testing aspects on current and future flight conditions, Prog. Aerosp. Sci., 47, 2011, 280-303
- [8] <https://www.wind-energie.de/infocenter/technik/betrieb/wartung-und-instandhaltung>
- [9] <http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Technologien/Windenergie-auf-See/Technik/Wartung/wartung.html>
- [10] Konradin Kaiser, M Guttman, C Mehne; Fertigungsverfahren für großformatige, mikrostrukturierte Formeinsätze; Galvanotechnik, 06-2008)
- [11] Paul Dvorak, Windpower Engineering & Development, 4. März, 2016, <http://www.windpowerengineering.com/maintenance/maintenance-operations/easily-applied-covering-fix-leading-edge-erosion/>
- [12] George .S. Springer, Chandrakant B. Baxil, A model for rain erosion of homogeneous materials, ASTM project report 1974
- [13] Norman, E. Wahl, Investigation of the phenomena of rain erosion at subsonic and supersonic speeds, technical report AFML-TR65-330, Bell Aerosystems Company, (1965)
- [14] Alessandro Corsini, Alessio Castorini, Enrico Morei, Franco Rispoli, Fabrizio Sciulli, Paolo Venturini, Modelling of rain drop erosion in a multi-MW wind turbine, Proceedings of ASME Turbo Expo (2015)
- [15] Pesseinformation Fraunhofer IWES
- [16] Mishnaevsky, L.: Toolbox for optimization anti-erosion protective coatings of wind turbine blades: Overview of mechanisms and technical solutions, Wind Energy, 22, (2019) 1636-1653
- [17] Cordier, P., Tournilhac, F., Soulié-Ziakovic, C., Leibler. L.: Self-healing and thermoreversible rubber from supermolecular assembly. Nature 451 (2008), 977–980.
- [18] Burattini, S., Colquhoun, H.M., Greenland, B.W., Hayes, W.: A novel self-healing supramolecular polymer system. Faraday Discuss 143 (2009), 251–264.
- [19] Markus, Wilke, Neue Möglichkeit zur Erosionsprüfung von Rotorblattbeschichtungen {Besser lackieren!}, {Hannover}, {Bd. 21.2012, 12, S. 8}
- [20] ISO/TS 19392-1 Paints and varnishes — Coating systems for wind-turbine rotor blades – Part 1: Minimum requirements and weathering

[21] ISO/TS 19392-1 Paints and varnishes — Coating systems for wind-turbine rotor blades – Part 1: Determination and evaluation of resistance to rain erosion using rotating arm

[22] DNVGL RP-0171. “Evaluation of erosion and delamination for leading edge protection systems of rotor blades” Edition December 2020