ISBN 978-3-7388-0626-7

F 3219

Gefördert mit Mitteln des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung

FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

Wolfgang Breit, Eva-Maria Ladner, Joachim Schulze,
Sara Blietschau, Melanie Merkel, Frank Schuler

Untersuchungen zu Umwelteinflüssen auf die Dauerhaftigkeit und Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen während der Applikations- und Nutzungsphase

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 3219

Wolfgang Breit, Eva-Maria Ladner, Joachim Schulze,
Sara Blietschau, Melanie Merkel, Frank Schuler

Untersuchungen zu Umwelteinflüssen auf die Dauerhaftigkeit und Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen während der Applikations- und Nutzungsphase

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 3219

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2021

ISBN 978-3-7388-0626-7

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

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN

FACHBEREICH BAUINGENIEURWESEN
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

Gebäude 60
Gottlieb-Daimler-Straße
67663 Kaiserslautern
Telefon: (0631) 2 05 – 22 97
Telefax: (0631) 2 05 – 31 01
E-Mail: wolfgang.breit@bauing.uni-kl.de
www.bauing.uni-kl.de/fwb

ENDBERICHT

FWB-9201551

vom 18. Februar 2020

SWD-10.08.18.7-17.16

Untersuchungen zu Umwelteinflüssen auf die Dauerhaftigkeit und Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen während der Applikations- und Nutzungsphase

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-17.16)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Dieser Bericht umfasst 64 Seiten (inkl. Deckblatt).

Wiedergabe, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung des Fachgebiets Werkstoffe im Bauwesen der Technischen Universität Kaiserslautern gestattet. Jede Haftung des Fachgebiets und seiner Mitarbeiter aus mündlichen oder schriftlichen Auskünften, Beratungen oder Gutachten ist, soweit gesetzlich zulässig, ausgeschlossen. Von Ansprüchen Dritter sind wir freizustellen.

FWB
FACHGEBIET WERKSTOFFE IM BAUWESEN

Inhaltsverzeichnis

Seite

Übersicht ... 3
1. Ausgangssituation ... 4
1.1 Kurzbeschreibung ... 4
1.2 Beschreibung der zu lösenden Probleme ... 4
1.3 Begründung des Forschungsvorhabens ... 5
1.4 Forschungsverbund / Projektbegleitung / Beratergruppe ... 5
1.5 Ausgangsbasis ... 6
2. Aufbau des Forschungsvorhabens ... 7
2.1 Schwerpunkt 1: Untersuchungen zu Einflüssen während der Applikation ... 7
2.2 Schwerpunkt 2: Untersuchungen zu Einflüssen während der Nutzung ... 8
2.3 Schwerpunkt 3: Maßnahmen zur Reduzierung umweltbedingter Einflüsse ... 8
3. Durchführung und Ergebnisse ... 9
3.1 Schwerpunkt 1 ... 9
3.1.1 Feuchte ... 10
3.1.2 UV-Strahlung ... 23
3.1.3 Zusammenfassung ... 27
3.2 Schwerpunkt 2 ... 31
3.2.1 Wassersättigung ... 31
3.2.2 Splittbeanspruchung ... 42
3.2.3 Zusammenfassung ... 51
3.3 Schwerpunkt 3 ... 55
3.3.1 Allgemeines ... 55
3.3.2 Maßnahmen während der Applikation ... 55
3.3.3 Maßnahmen während der Nutzung ... 57
4. Zusammenfassung ... 59
Literatur ... 61
Abbildungsverzeichnis ... 62
Tabellenverzeichnis ... 63

Übersicht

BBR-Bericht:	SWD-10.08.18.7-17.16
Titel:	Untersuchungen zu Umwelteinflüssen auf die Dauerhaftigkeit und Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen während der Applikations- und Nutzungsphase
Zuwendungsgeber:	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) Zukunft BAU Deichmanns Aue 31-37 D- 53179 Bonn
Zuwendungsgeber, vertreten durch:	Herr Dipl.-Ing. Steffen Kisseler
Bearbeiter:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit (TU Kaiserslautern) Dipl.-Ing. Eva-Maria Ladner (TU Kaiserslautern) Dr. rer. nat. Joachim Schulze (TU Kaiserslautern) Sara Blietschau, M. Sc. (TU Kaiserslautern) Melanie Merkel, M. Eng. (TU Kaiserslautern) Dipl.-Ing. (FH) Frank Schuler, M. Eng. (TU Kaiserslautern)
Interne Forschungsnummer:	FWB-9201551
Ausgestellt am:	18.02.2020
Berichtsumfang:	64 Seiten

1. Ausgangssituation

1.1 Kurzbeschreibung

Befahrene Oberflächenschutzsysteme (OS-Systeme), deren Aufgabe und Funktion der dauerhafte Schutz der Konstruktion gegenüber Beton und Stahlbetonbewehrung angreifenden Medien ist, werden vorwiegend in Stahlbeton-Parkbauten eingesetzt. Die Applikation erfolgt überwiegend händisch, indem mehrere, meist großflächige Schichten auf einer Betonoberfläche aufgetragen werden. Die Aushärtungszeit je Schicht beträgt dabei jeweils einen Tag, sodass für die Applikation eines vollständigen OS-Systems etwa eine Woche benötigt wird. Innerhalb dieses Beschichtungszeitraumes sind Einwirkungen aus Feuchtigkeit, Temperatur und UV-Strahlung bei frei bewitterten Flächen kaum zu vermeiden, was bereits während der Applikation einen wesentlichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und damit auf die geforderte Verschleißbeständigkeit haben kann. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden daher Untersuchungen zu den Einflüssen auf das Verschleißverhalten durchgeführt, die umweltbedingt unter üblichen Praxisbedingungen nicht vermeidbar sind. Ergänzend werden auch die Einflüsse untersucht, die sich durch die anschließende Nutzung ergeben. Wie in Voruntersuchungen festgestellt wurde, hat u. a. auf die Oberflächen eingetragenes Wasser einen erheblichen, bislang kaum untersuchten Einfluss auf die Dauerhaftigkeit. Dieser kann im Winter durch die Kombination mit Chloriden sowie Streugut erheblich zur Herabsetzung der Dauerhaftigkeit beitragen.

1.2 Beschreibung der zu lösenden Probleme

In den vorangegangenen Forschungsvorhaben hat sich in den Diskussionen mit den Projektbeteiligten sowie den Mitgliedern der projektbegleitenden Ausschüsse gezeigt, dass die Beschichtungssysteme unter den Randbedingungen einer labormäßigen Applikation die gewünschten anforderungsbedingten Eigenschaften erfüllen, aber in der Praxis dennoch immer wieder Probleme auftreten. Diese scheinen nach Ansicht der Experten im Wesentlichen auf Umwelteinflüsse (Feuchtigkeit, Temperatur, UV-Strahlung) zurückzuführen zu sein. Da hierzu keine systematischen wissenschaftlichen Untersuchungen vorliegen, konnte diese begründete Vermutung weder bestätigt noch widerlegt werden. OS-Systeme können nur dann zielgerichtet optimiert werden, wenn auch die nachfolgenden Fragestellungen während der Applikation bzw. der späteren Nutzung systematisch untersucht werden:

Während der Applikation:

- Einfluss von ungewollten dünnen Feuchtigkeitsfilmen zwischen den einzelnen Schichtaufbauten
- Einfluss der UV-Einwirkung auf ungeschützte Zwischenschichten von OS-Systemen durch Nachvernetzung

Während der Nutzung:

- Eintrag von Feuchtigkeit in den OS-Systemaufbau (Wasseraufnahme)
- Eintrag von chloridhaltigen Wässern in den OS-Systemaufbau (Wintermonate)
- Verschleiß durch Eintrag von abrasiv wirkendem Streugut (Wintermonate)

1.3 Begründung des Forschungsvorhabens

In den vorangegangenen Untersuchungen wurden die Materialeigenschaften von befahrbaren OS-Systemen unter Laborbedingungen bestimmt. Neben der z. T. herausragenden Leistungsfähigkeit dieser Systeme hat sich gleichwohl im Rahmen von einigen Tastversuchen gezeigt, dass sowohl Feuchtigkeit als auch UV-Einwirkung einen signifikanten Einfluss auf die Beständigkeit von OS-Systemen haben können. Die Untersuchungen zeigten, dass z. B. OS-Systeme bei vollständiger Wassersättigung teilweise nur noch 20 % der Festigkeit gegenüber Normalklima (20 °C, 60 % relative Luftfeuchte) aufweisen. Dies reduziert (ggf. von Anfang an und offensichtlich in erheblichem Umfang) die Verschleißbeständigkeit dieser OS-Systeme. Auch Belastungen infolge Feuchtigkeitseintrag in das OS-System oder erhöhte Verschleißbeanspruchung durch in den Wintermonaten eingetragenes Streugut während der Nutzungsphase wurden bisher nicht systematisch untersucht. Alle vorgenannten Belastungen können dazu führen, dass die Leistungsfähigkeit der OS-Systeme unter den Randbedingungen des Praxiseinsatzes nicht mehr mit den labormäßig überprüften Eigenschaften in Einklang zu bringen ist. Die wissenschaftliche Erarbeitung der wesentlichen beeinflussenden Parameter und daraus abgeleitete Korrekturmaßnahmen können in erheblichem Maße zur Verbesserung der Verschleißbeständigkeit von befahrenen OS-Systemen beitragen. In der Fachwelt wird zwar über diese Einflüsse diskutiert, es liegen jedoch keine belastbaren Untersuchungsergebnisse vor. Für alle beteiligten Kreise (Bauherr, Hersteller, Ausführender) wären wissenschaftlich belastbare Erkenntnisse von hoher Relevanz.

1.4 Forschungsverbund / Projektbegleitung / Beratergruppe

Das Projekt wurde durchgeführt von:

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit

Dipl.-Ing. Eva-Maria Ladner

Dr. rer. nat. Joachim Schulze

Sara Blietschau, M. Sc.

Melanie Merkel, M. Eng.

Dipl.-Ing. (FH) Frank Schuler, M. Eng.

Technische Universität Kaiserslautern
Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen
Gottlieb-Daimler-Straße, Geb. 60
D-67663 Kaiserslautern

Das Projekt wurde seitens des BBR begleitet von:

Dipl.-Ing. Steffen Kisseler
KISSELER ING
i.A. des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Prälat-Marschall-Str. 95
D-42784 Haan-Gruiten

1.5 Ausgangsbasis

Ausgangsbasis für dieses Forschungsvorhaben sind die vorangegangenen BBR-Vorhaben „Nachweis der Verschleißfestigkeit von Parkhausbeschichtungssystemen unter realitätsnahen Prüfbedingungen“ (SF-10.08.18.7-11.26) [1] und „Dauerhaftigkeit von rissüberbrückungsfähigen Beschichtungssystemen unter realitätsnaher Beanspruchung“ (SWD-10.08.18.7-14.03) [2], die im Rahmen der Forschungsinitiative Zukunft BAU gefördert wurden.

In den vorgenannten Vorhaben wurden mit Hilfe der neu entwickelten Prüfstände Parking Abrasion Test (PAT) und Driving Abrasion Test (DAT) verschiedene Oberflächenschutzsysteme (OS 8, OS 10, OS 11 und OS 13) hinsichtlich des Verschleißverhaltens untersucht. Es zeigte sich, dass der Verschleiß von Oberflächenschutzsystemen deutlich realitätsnaher bestimmt werden kann, die Verschleißmuster denen der Praxis entsprachen und verwertbare Resultate im Bereich von Parkhausbeschichtungen erzielt werden konnten. Die Prüfverfahren wurden hinsichtlich der Erfassung und Auswertung der Messdaten weiterentwickelt und modifiziert. Somit ist es nun möglich den Abrieb bzw. Verschleiß zerstörungsfrei mit einem Laser zu dokumentieren. Die Forschungsergebnisse beider Forschungsvorhaben mündeten in die Erarbeitung eines Prüfverfahrens mit Normcharakter, welches in das in Überarbeitung befindliche DAfStb-Heft 422 mit aufgenommen werden soll. In Gesprächen mit der Beratergruppe und Ausführenden wurde deutlich, dass noch Forschungsbedarf bezüglich der Umwelteinflüsse auf die Verschleißbeständigkeit notwendig ist.

2. Aufbau des Forschungsvorhabens

2.1 Schwerpunkt 1: Untersuchungen zu Einflüssen während der Applikation

Schwerpunkt 1 beinhaltet die Untersuchung von Einflussfaktoren während der Applikation. Für die damit verbundenen aufgelisteten Fragestellungen wurde nachfolgendes Untersuchungsprogramm (z. B. UV-Strahlung, Feuchtigkeit und Streugut hinsichtlich Intensität und Dauer) festgelegt.

Zu klärende Fragestellungen:

- Welche OS-Systeme sollen geprüft werden?
- Wie erfolgt die Applikation?
- Mit welcher Menge und über welchen Zeitraum kann die Einwirkung von Feuchtigkeit auf die Oberfläche während der Applikation erfolgen?
- Welchen Einfluss hat das Eindringen von Wasser in die einzelnen Schichten?
- Wie verändert sich die Haftung der einzelnen Schichten aufeinander?
- Welchen Einfluss hat die Variation von Temperaturen auf die Erhärtungsgeschwindigkeit und den Vernetzungsgrad?
- Mit welcher Intensität und über welchen Zeitraum erfolgt eine UV-Bestrahlung während der Applikation?
- Wie stark vernetzen sich die OS-Systeme nach?
- Hat dies einen Einfluss auf die Haftung der einzelnen Schichten?

Experimenteller Anteil:

- Herstellung von Betongrundkörpern (Referenzbeton) und Applikation von Oberflächenschutzsystemen
- Durchführung von Verschleißuntersuchungen (mit dem PAT-Verfahren)
- Behandlung der Probekörper zwischen den einzelnen Applikationsschritten mit Feuchtigkeit, Temperatur und UV-Strahlung wie festgelegt
- Ermittlung des Verschleißes
    - Gegebenenfalls zerstörend (Bohrkernentnahme zu Beginn und Ende der Verschleißprüfung) und
    - zerstörungsfrei (Laserscanning in definierten Zyklenabständen)

Auswertung der Verschleißuntersuchungen:

- Bestimmung der Stärke des Umwelteinflusses auf das Verschleißverhalten
- Auswertung hinsichtlich Dauer und Intensität der einwirkenden Umgebungsbedingungen auf die Prüffläche

2.2 Schwerpunkt 2: Untersuchungen zu Einflüssen während der Nutzung

Schwerpunkt 2 beinhaltet die Untersuchung der Einflüsse von Feuchte und eingetragenem Streugut während der Nutzung. Für die damit verbundenen aufgelisteten Fragestellungen wurde nachfolgendes Untersuchungsprogramm (z. B. Feuchtigkeit und Streugut hinsichtlich Intensität und Dauer) festgelegt.

Zu klärende Fragestellungen:

- Mit welcher Menge und über welche Zeiträume erfolgt die Einwirkung von Feuchtigkeit auf die Oberfläche während der Nutzung?
- Welchen Einfluss hat das Eindringen von Wasser in die einzelnen Schichten?
- Wie verändert sich die Haftung der einzelnen Schichten untereinander?
- Mit welcher Menge erfolgt die Einwirkung von Streugut auf die Oberfläche während der Nutzung?

Experimenteller Anteil:

- Herstellung von Betongrundkörpern (Referenzbeton) und Applikation von Oberflächenschutzsystemen durch Hersteller
- Durchführung von Verschleißuntersuchungen (mit dem PAT-Verfahren)
- Behandlung der Probekörper mit Feuchtigkeit sowie Streugut
- Ermittlung des Verschleißes
    - zerstörend (Bohrkernentnahme zu Beginn und Ende der Verschleißprüfung) und
    - zerstörungsfrei (Laserscanning in definierten Zyklenabständen)

Auswertung der Verschleißuntersuchungen:

- Bestimmung der Stärke des Umwelteinflusses auf das Verschleißverhalten
- Auswertung hinsichtlich Dauer und Intensität der einwirkenden Umgebungsbedingungen auf die Prüffläche

2.3 Schwerpunkt 3: Maßnahmen zur Reduzierung umweltbedingter Einflüsse

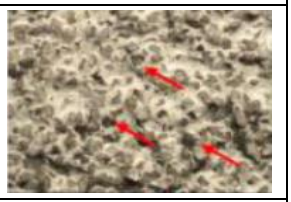
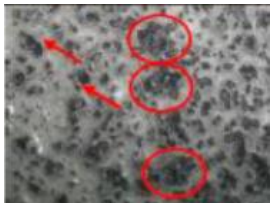
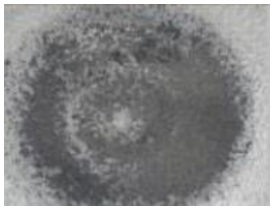
Ziel von Schwerpunkt 3 ist das Aufzeigen von Maßnahmen durch welche die Einflüsse bereits während der Applikation reduziert werden können. Ebenfalls sollen Maßnahmen aufgezeigt werden, die während der Nutzung des Parkbaus zur Reduzierung der Schäden ergriffen werden können. Bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen sollen die in Schwerpunkt 1 und Schwerpunkt 2 gewonnenen Erkenntnisse mit einbezogen werden.

3. Durchführung und Ergebnisse

3.1 Schwerpunkt 1

Schwerpunkt 1 umfasst die Prüfreihen, in denen die umweltbedingten Einflüsse während der Applikationsphase von Oberflächenschutzsystemen auf die Dauerhaftigkeit und Verschleißbeständigkeit untersucht werden. Dabei sind die zwischen den Beschichtungsschritten auf der Oberfläche auftretende Feuchte sowie die Einwirkungen von UV-Strahlung von besonderem Interesse.

Tabelle 1: Klassifizierung der Oberflächen nach der Verschleißbeanspruchung [2]

Verschleiß-klasse	Einstufung	Beschreibung	Beispiel
VK 1	Sehr geringe Abnutzung	Deckversiegelung über Kornspitzen abgefahren bzw. vereinzelte Quarzsandkörner herausgebrochen	
VK 2	Geringe Abnutzung	Deckversiegelung über Kornspitzen abgefahren und punktuell beschädigt bzw. Quarzsandkörner kleinflächig bis Ø 10 mm zusammenhängend herausgebrochen	
VK 3	Mittlere Abnutzung	Deckversiegelung großflächig abgefahren bzw. Quarzsandkörner kleinflächig bis Ø 30 mm zusammenhängend herausgebrochen	
VK 4	Starke Abnutzung	Abtrag der Deckversiegelung und Verschleißschicht mit Abtragstiefen ≤ 50% der ursprünglichen Schichtdicke der Verschleißschicht	
VK 5	Sehr starke Abnutzung	Sehr starker Abtrag der Verschleißschicht mit Abtragstiefen > 50 % der ursprünglichen Schichtdicke der Verschleißschicht	
VK 6	System-ausfall	Beschädigung der Abdichtungsschicht	

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit wird der Parking Abrasion Test durchgeführt, die Oberflächen in festgelegten Intervallen optisch bewertet und mittels Laserscanning vermessen. Die Klassifizierung aufgrund der optischen Bewertung erfolgt nach den in [2] aufgeführten Verschleißklassen, welche in Tabelle 1 aufgelistet sind.

In den Versuchsreihen wurden verschiedene, befahrbare Oberflächenschutzsysteme nach Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungsrichtlinie)“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (RL SIB) [3] sowie 2. Berichtigungsblatt (OS 8) geprüft, um die umweltbedingten Einflüsse auf die verschiedenen Systemaufbauten herauszuarbeiten. Neben einem starren OS 8-System, das als stark mechanisch belastbar gilt und sich aus einer abgestreuten Grundierung, der hauptsächlich wirksamen Oberflächenschutzschicht (hwO) und einer Deckversiegelung zusammensetzt, wurde ebenfalls das in OS 11a und OS 11b unterteilte OS 11-System herangezogen. Dieses System wird durch die dynamische Rissüberbrückungsfähigkeit charakterisiert und kann entweder einen ein- (OS 11b) oder zweischichtigen (OS 11a) Aufbau haben. Die Systeme setzen sich aus einer abgestreuten Grundierung, einer vorgefüllten und abgestreuten Verschleißschicht (OS 11b) beziehungsweise einer hwO, die aus Schwimm- und Verschleißschicht besteht (OS 11a), sowie einer Deckversiegelung zusammen. Das OS 13-System, das durch eine statische Rissüberbrückungsfähigkeit gekennzeichnet ist, setzt sich aus einer abgestreuten Grundierung, einer gegebenenfalls vorgefüllten und abgestreuten Verschleißschicht und einer Deckversiegelung zusammen. Die Systeme, die in unterschiedlichen Schwerpunkten eingesetzt werden, sind nicht zwingend identische Produkte. Die Systeme wurden ausgewählt, um eine Basis an Vergleichsmessdaten zu schaffen, anhand derer die Umwelteinflüsse auf befahrbare Oberflächenschutzsysteme ausgewertet werden können.

3.1.1 Feuchte

In der Versuchsreihe „Feuchte“ wurde das Verschleißverhalten von beschichteten Probekörpern untersucht, bei denen durch unterschiedliche Lagerungsarten eine oberflächliche Tauwasserbildung zwischen den Applikationsschritten herbeigeführt wurde. Durch diesen Prozess soll der in der Praxis häufig auftretende Fall von Tauwasserausfall auf der Bauteiloberfläche während des Aushärteprozesses einzelner Schichten – hervorgerufen durch Temperaturunterschiede (beispielsweise zwischen Tag und Nacht) – simuliert werden.

<u>Feuchte – OS 8-System</u>

Um die zwischen den Beschichtungsschritten möglicherweise auftretende Feuchte zu simulieren, wurden – zur Untersuchung des OS 8-Systems – neben der Referenzlagerung im Raumklima (RK, Referenzprobekörper, Probekörper 1) zwei weitere Probekörper in jeweils modifizierten Varianten gelagert (Abbildung 1). Probekörper 2 und Probekörper 3 wurden beide zunächst circa zwölf Stun-

den bei -5 °C gelagert. Etwa drei Stunden vor der Applikation wurde ein Probekörper bei Raumklima akklimatisiert (Probekörper 2) beziehungsweise bei 10 °C und einer relativen Raumluftfeuchte von 80 % r. F. gelagert (Probekörper 3). Diese Lagerungsvarianten sollen die in der Baupraxis möglichen Umgebungsbedingungen nachahmen, die auftreten können, wenn Schichten über einen Zeitraum von 24 Stunden aushärten und die Temperaturen währenddessen stark absinken beziehungsweise schwanken.

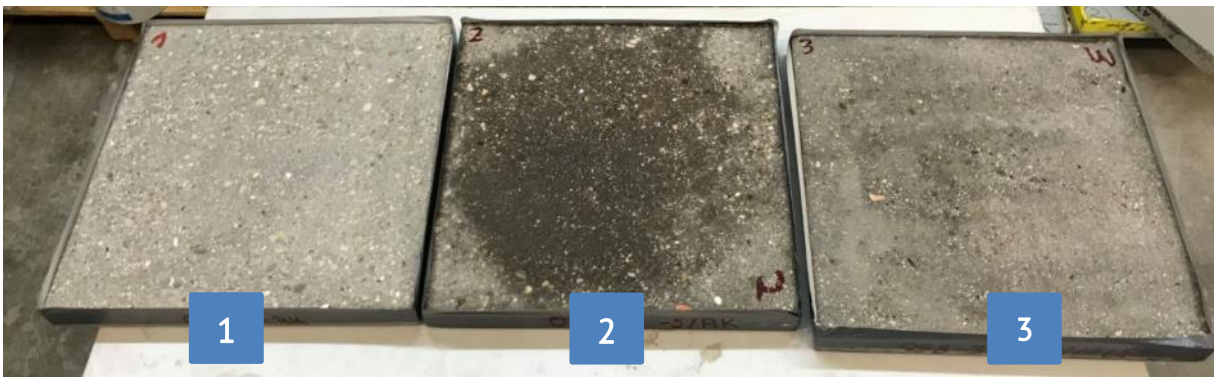


Abbildung 1: Übersicht der drei Probekörper zur Prüfung des Einflusses von Feuchte während der Applikation (hier: vor der Grundierung, mit herbeigeführtem Tauwasserausfall); Probekörper 1: Referenzlagerung bei Raumklima; Probekörper 2: Lagerung bei – 5 °C/Raumklima; Probekörper 3: Lagerung bei -5 °C/ 10 °C / 80 % r. F.

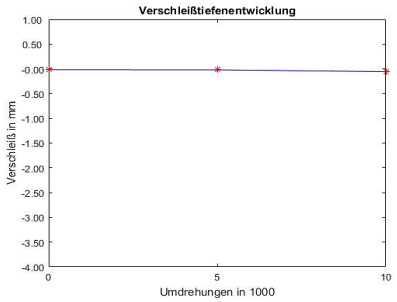
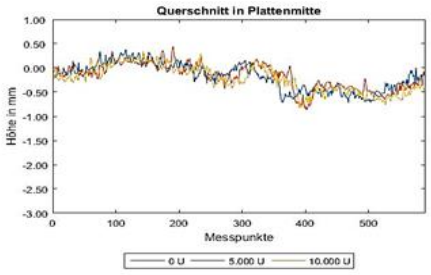
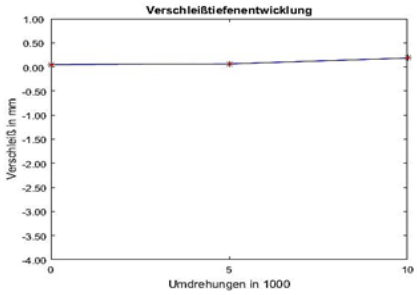
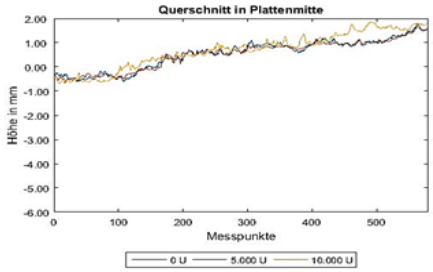
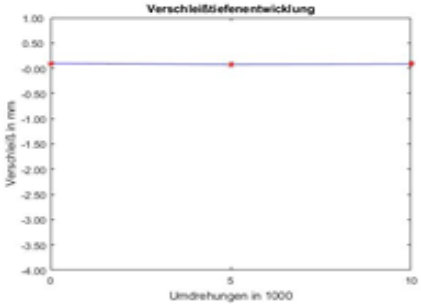
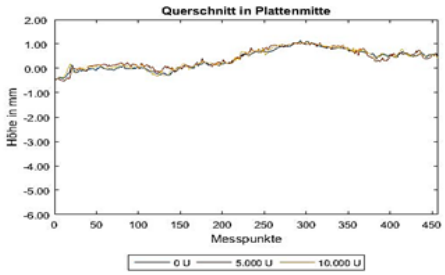
Wie in Abbildung 1 dargestellt, konnte durch die Lagerungsart von Probekörper 2 und 3 eine oberflächliche Feuchteschicht erzielt werden. Die Probekörper wurden dann entsprechend den Herstellervorgaben beschichtet und zwischen den Beschichtungsschritten analog der beschriebenen Varianten gelagert. Bei der Applikation der Deckschicht konnte bei den feuchten Probekörpern 2 und 3 ein geringfügig erhöhter Materialbedarf festgestellt werden. Die nach der Aushärtung der OS-Systeme durchgeführte Prüfung mittels Parking Abrasion Test umfasste insgesamt 10.000 Zyklen, wobei die visuelle, laserbasierte und fotografische Dokumentation und Beurteilung nach jeweils 1.000 Prüfzyklen durchgeführt wurde. Die Ergebnisse der durchgeführten PAT-Prüfung werden im Folgenden erläutert.

Neben den fotografischen Aufnahmen sind die auf den Lasermessdaten basierenden 2D-Modellierungen dokumentiert, um einen optimalen Vergleich zu ermöglichen. Nachfolgend sind die maximalen Verschleißtiefen sowie die Querschnitte in Plattenmitte aufgeführt.

Die Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerungsart zwischen den Applikationsschritten sowie der Querschnitt in Plattenmitte des starren OS 8-Systems sind in Tabelle 2 zusammenfassend dargestellt. Die Entwicklung der Verschleißtiefe während der 10.000 Prüfzyklen am Referenzprobekörper zeigte eine minimale Zunahme innerhalb der ersten 5.000 Zyklen, welche auf anhaftenden Reifenabrieb zurückzuführen ist. Innerhalb der folgenden Zyklen war eine gegen-

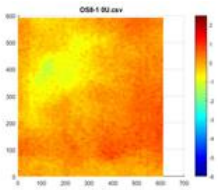
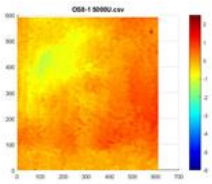
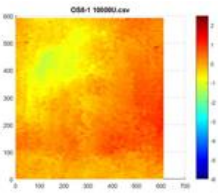
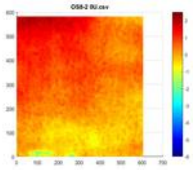
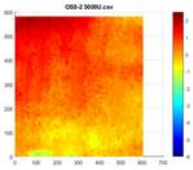
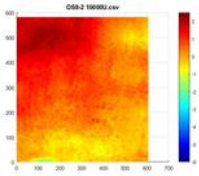
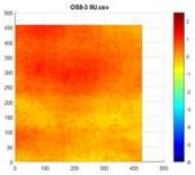
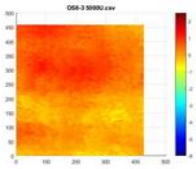
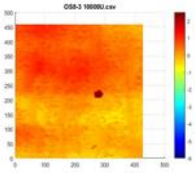
läufige, sehr geringe Abnahme zu beobachten, wodurch jedoch die Materialschichtdicke des Anfangszustandes nicht unterschritten wurde. Der erwartete, gesteigerte Abtrag aufgrund der Applikation der Schichten auf feuchtem Untergrund kann anhand der Verschleißtiefenentwicklung am untersuchten OS 8-System nicht bestätigt werden. Die beiden Systeme, bei denen die Schichten trotz Feuchteausfall aufgetragen wurden, zeigten ebenfalls keine Verschleißerscheinungen. System 2 zeigte sogar einen deutlichen Auftrag ab 5.000 Zyklen, was durch den Reifenabrieb begründet wird. Die beobachtete Entwicklung wird durch die dargestellten Querschnitte in Plattenmitte bestätigt.

Tabelle 2: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des Systems zwischen den Applikationsschritten des OS 8-Systems

OS 8	maximale Verschleißtiefe	Querschnitt in Plattenmitte
Raumklima		
-5°C / Raumklima		
-5 °C/ 10°C/ 80 % r. F.		

Die fotografische sowie die laserbasierte Auswertung sind in Tabelle 3 dargestellt. Diese bestätigen, dass die zwischen den Schichten eingetragene Feuchte die Verschleißbeständigkeit dieses geprüften Systems nicht beeinflussten. Die ermittelten Ergebnisse wurden in nachfolgenden Versuchen an weiteren OS-Systemen geprüft, um zu testen, ob die Ergebnisse auf andere Systemaufbauten übertragbar sind.

Tabelle 3: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 8-Systems

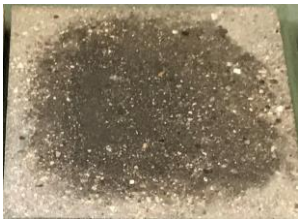
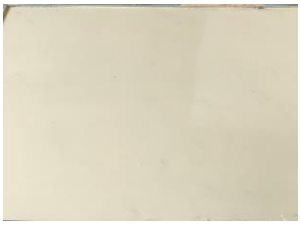
OS 8	0 Zyklen (Ausgangs-zustand)	5.000 Zyklen	10.000 Zyklen
Raumklima			
-5 °C / Raumklima			
-5 °C / 10 °C / 80 % r. F.			

<u>Feuchte – OS 11a-System</u>

In den nachfolgenden Versuchen wurden je drei Prüfplatten eines OS 11a-Systems sowie eines OS 11b-Systems hergestellt. Die Lagerung erfolgte analog zu dem am OS 8-System beschriebenen Verfahren mit der Ausnahme, dass die Lagerung bei -5 °C auf -10 °C geändert wurde, sodass die Extrembedingungen besser simuliert werden konnten. Die Bedingungen wurden jedoch so gewählt, dass zum Zeitpunkt der Beschichtung, die Verarbeitungsbedingungen der Hersteller hin-

sichtlich Untergrund- und Umgebungstemperatur als auch der relativen Luftfeuchtigkeit eingehalten waren, welche bei allen verwendeten Systemkomponenten auf eine maximale relative Feuchte von 80 % und eine Temperatur von mindestens 10 °C beschränkt sind.

Tabelle 4: Übersicht über die Beschichtungsschritte des OS 11a-Systems bei verschiedenen Lagerungsbedingungen

OS 11a	**Raumklima**	**-10 °C / Raumklima**	**-10 °C / 10 °C / 80 % r. F.**
vor der Grundierung			
abgestreute Grundierung			
Dichtungsschicht			
abgestreute Verschleißschicht			
Versiegelung			

Bereits vor dem Aufbringen der Grundierung zeichneten sich die unterschiedlichen Auswirkungen der Lagerungsvarianten auf den Prüfplatten ab, wie in Tabelle 4 gezeigt. Die circa zwölfstündige Lagerung bei -10 °C und die anschließende Akklimatisierung bei Raumtemperatur (Lagerung 2, Probekörper 2) führten dazu, dass sich auf der Prüfkörperoberfläche ein Feuchtigkeitsfilm bildete, der zum Zeitpunkt der Grundierung an den Rändern wieder leicht abgetrocknet, jedoch im Zentrum noch deutlich feucht war. Die dritte Lagerungsvariante, bei der die Probekörper erst bei -10 °C und bis zum Beginn der Grundierung bei 10 °C und 80 % relativer Luftfeuchte gelagert

wurden (Lagerung 3, Probekörper 3), erzeugte einen ähnlich deutlich ausgeprägten Feuchtigkeitsfilm an der Oberfläche, wobei dieser sich über die komplette Platte erstreckte.

Nach dem Aushärten der einzelnen Beschichtungsschichten wurde deutlich, dass die Referenzprobekörper (Lagerung 1, Probekörper 1) keinerlei Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche der jeweiligen Beschichtung aufwiesen. Die beiden Platten mit Feuchtebelastung hingegen zeigten schon vor dem Aufbringen der abgestreuten Verschleißschicht, dass die ausgehärtete Dichtungsschicht durch eine offenporige Struktur mit deutlicher Blasenbildung innerhalb der Schicht gekennzeichnet war. Die darauffolgende, abgestreute Verschleißschicht wies im ausgehärteten Zustand zwar keine offenen Poren mehr auf, jedoch war die Blasenbildung innerhalb dieser Schicht noch deutlicher sichtbar, was sich auch nach dem Aufbringen der Versiegelung zeigte.

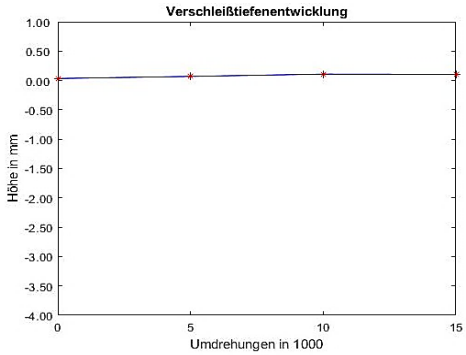
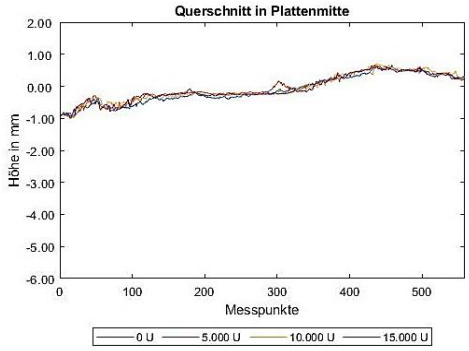
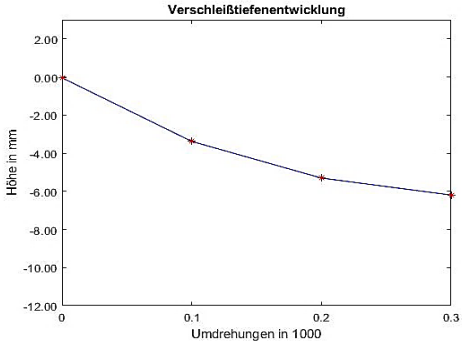
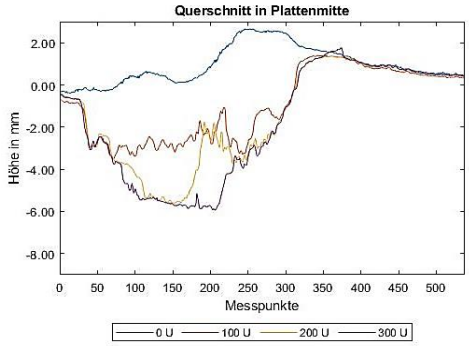
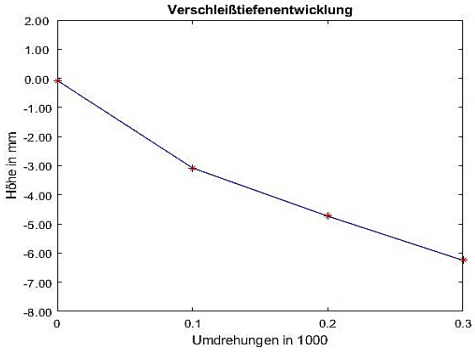
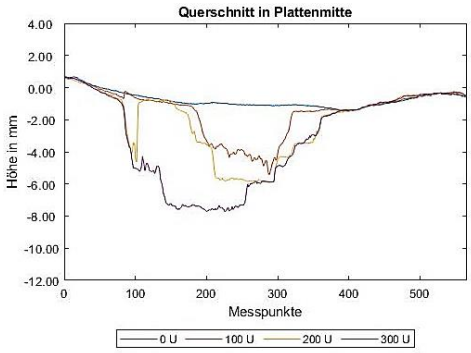
Die Auswirkungen der Lagerungsvariante 2 war etwas weniger ausgeprägt, als es bei der Lagerungsvariante 3 der Fall war. Beide Systeme wären jedoch – ungeachtet von der noch nicht erfolgten Prüfung der Dauerhaftigkeit – alleine aufgrund der optischen Merkmale in der Baupraxis als mangelhaft einzustufen.

Die bereits optisch sichtbaren Mängel der Probekörper, die einer Feuchteeinwirkung zwischen den Beschichtungsschritten ausgesetzt waren, zeigten sich auch in den Ergebnissen der PAT-Prüfung. Die Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerungsart zwischen den Applikationsschritten sowie der Querschnitt in Plattenmitte des OS 11a-Systems sind in Tabelle 5 zusammenfassend dargestellt. Der Referenzprobekörper zeigte auch nach 15.000 Prüfzyklen keine Verschleißerscheinungen, durch den anhaftenden Reifenabrieb wurde sogar eher eine Zunahme gemessen.

Die zweite Prüfplatte des OS 11a-Systems, die bei Lagerungsart 2 gelagert war, zeigte bereits nach 100 PAT-Prüfzyklen eine deutliche Verschleißentwicklung, welche im Laufe der folgenden 200 Zyklen zwar abflachte, aber trotzdem durchgehend an Verschleißtiefe zunahm. Dies verdeutlicht ebenfalls die Entwicklung des Querschnittes in Plattenmitte, der nach jeder Messung einen gesteigerten Materialabtrag aufwies.

An der Prüfplatte 3 konnte nach 300 Prüfzyklen eine mit der Platte nach Lagerungsvariante 2 vergleichbare Verschleißtiefe gemessen werden. Die Feuchtigkeit, die zwischen den Beschichtungsschritten auf der Plattenoberfläche vorhanden war, wirkte sich also maßgeblich auf die Dauerhaftigkeit der OS 11a-Systeme aus. Die an der Referenzprobe geprüften 15.000 Zyklen konnten bei den weiteren Probekörpern nicht annähernd erreicht werden, da das verschleißbedingte Versagen des untersuchten OS 11a-Systems bereits deutlich früher, ab circa 100 Zyklen begann.

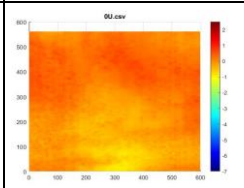
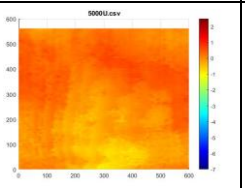
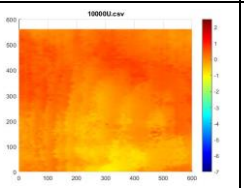
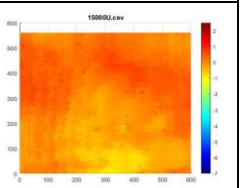
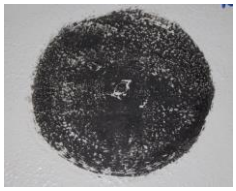
Tabelle 5: Verschleißtiefenentwicklung und Querschnitt in Plattenmitte in Abhängigkeit von der Lagerung des OS 11a-Systems

OS 11a	maximale Verschleißtiefe	Querschnitt in Plattenmitte
Raumklima		
-10 °C / RK		
-10 °C / 10 °C / 80 % r. F.		

Die bereits dargelegten Messergebnisse wurden durch die visuelle Untersuchung der Probenoberfläche sowie die optische Darstellung anhand der Lasermessdaten bestätigt (Tabelle 6, Tabelle 7, Tabelle 8).

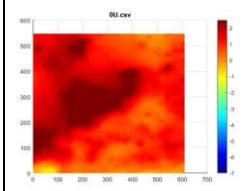
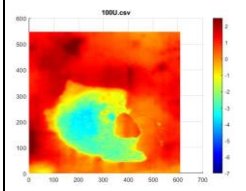
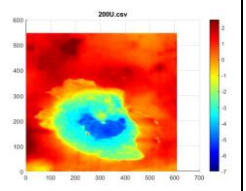
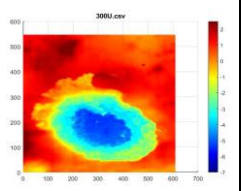
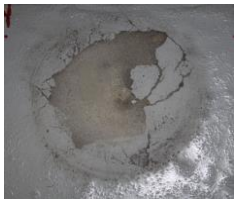
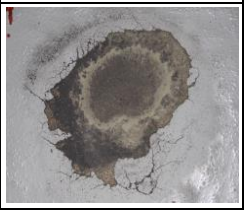
Die Referenzprobe des OS 11a-Systems, die durchgehend unter Raumklimabedingungen gelagert wurde, zeigte sowohl in der fotografischen Dokumentation als auch in der optischen Beurteilung während der 15.000 Zyklen der PAT-Prüfung kaum eine Veränderung. Es wird deutlich, dass der Reifenabrieb, der bereits nach 5.000 Zyklen an der Oberfläche anhaftete, mit den folgenden Prüfzyklen leicht zunahm. An der Deckversiegelung des Systems konnten nur leicht abgefahrene Kornspitzen dokumentiert werden, sodass eine Zuordnung zu Verschleißklasse 1 erfolgte.

Tabelle 6: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems, Lagerungsvariante Raumklima

OS 11a	0 Zyklen (Ausgangszustand)	5.000 Zyklen	10.000 Zyklen	15.000 Zyklen
Raumklima				
				

Die optische Darstellung der Platte, die zunächst bei -10 °C und anschließend im Raumklima gelagert wurde, zeigte bereits im Ausgangszustand deutliche Unebenheiten auf der Systemoberfläche. Unabhängig von der Verschleißbeständigkeit der Deckversiegelung kann es dadurch schon zu Belastungsspitzen kommen, die die Last punktuell einleiten und das System dort stärker belasten.

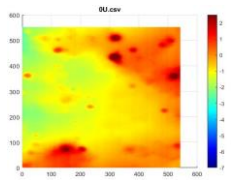
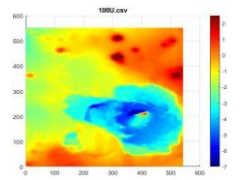
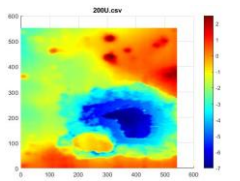
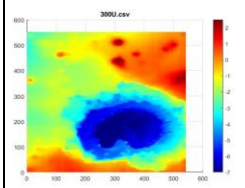
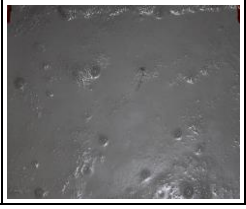
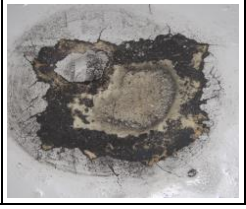
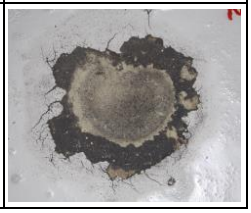
Tabelle 7: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems, Lagerungsvariante – 10 °C / Raumklima

OS 11a	0 Zyklen (Ausgangszustand)	100 Zyklen	200 Zyklen	300 Zyklen
-10 °C / RK				
				

Dass jedoch der Verbund der Systemschichten beziehungsweise die Dauerhaftigkeit des Systemaufbaus grundsätzlich sehr unter der Feuchteeinwirkung zwischen den Beschichtungsschritten gelitten hat, zeigt das Messergebnis schon nach 100 Zyklen. Zu diesem Zeitpunkt waren die Deckversiegelung sowie die Verschleißschicht größtenteils abgetragen beziehungsweise stark beschä-

digt. Im weiteren Prüfverlauf wurde bei 300 Zyklen eine Beschädigung der Dichtungsschicht dokumentiert, wodurch das System unter diesen Lagerungsbedingungen in Verschleißklasse 6 einzuordnen war.

Tabelle 8: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems, Lagerungsvariante -10 °C / 10 °C / 80 % r. F.

OS 11a	0 Zyklen (Ausgangs-zustand)	100 Zyklen	200 Zyklen	300 Zyklen
-10 °C / 10 °C / 80 % r. F.				
				

Auch bei der dritten Lagerungsvariante war die Blasenbildung sowohl bei der optischen Beurteilung als auch der fotografischen Dokumentation deutlich zu erkennen. Der Verschleißverlauf führte auch an diesem System bereits nach 300 Prüfzyklen der PAT-Prüfung (entspricht 2 % der durchgeführten Prüfzyklen an der Referenzplatte) zu einem Systemausfall.

Die Messergebnisse zeigen deutlich, dass auf der Oberfläche vorhandene Feuchte zwischen den Beschichtungsschritten zu erheblichen Einbußen der Dauerhaftigkeit und Verschleißbeständigkeit von OS 11a-Systemen führen kann. Die Tatsache, dass bei sehr geringer Zyklenanzahl bereits größere Flächen der verschiedenen Systemschichten beschädigt wurden und diese teilweise „schollenartig“ (siehe Tabelle 7, 100 Zyklen, Foto) abgetragen wurden, lässt darauf schließen, dass der Verbund zwischen den Schichten gestört wurde.

<u>Feuchte – OS 11b-System</u>

Die Beschichtung des OS 11b-Systems erfolgte zeitgleich mit der Beschichtung des OS 11a-Systems, das in Tabelle 4 fotografisch dargestellt ist. Die Systeme unterscheiden sich darin, dass bei dem OS 11b-System die hauptsächlich wirksame Oberflächenschicht in einer Schicht ausgeführt wird. Die unterschiedlichen Lagerungsvarianten führten auch hier – ausgenommen von der Referenzlagerung im Raumklima – zu einer Blasenbildung innerhalb des Schichtaufbaus. Bei diesem System war die Unebenheit der Oberfläche etwas geringer (Tabelle 9), als es bei dem OS 11a-System zu verzeichnen war, was darauf zurückzuführen ist, dass das System keine Dichtungsschicht hat, in der es (zusätzlich) zur Blasenbildung kommen kann.

Tabelle 9: Übersicht über die Versiegelung des OS 11b-Systems bei verschiedenen Lagerungsbedingungen

OS 11b	Raumklima	-10 °C / Raumklima	-10 °C / 10 °C / 80 % r. F.
Versiegelung			

Die Verschleißtiefenentwicklung und der Querschnitt in Plattenmitte des Referenzprobekörpers des OS 11b-Systems zeigten, dass das System auch nach 10.000 Zyklen keine messbaren Verschleißerscheinungen aufwies, sondern eher, dass durch Reifenabrieb leichte Ablagerungen auf der Oberfläche entstanden, welche erst in den folgenden 5.000 Zyklen wieder abnahmen.

Bei den beiden weiteren Platten wurden die PAT-Messungen an drei (-10 °C / Raumklima) beziehungsweise zwei (-10 °C / 10 °C / 80 % r. F.) Prüfstellen durchgeführt, da zu Beginn eine Zyklenanzahl gewählt wurde (5.000 bzw. 500 Zyklen), bei der die Systeme bereits bei der ersten Messung einen Systemausfall aufwiesen. Um den Verlauf der Verschleißtiefenentwicklung besser bestimmen zu können, wurden in weiteren Messungen weniger Zyklen getestet.

Die Platte, die bereits bei -10 °C und anschließend im Raumklima gelagert wurde, zeigte bereits nach 350 Zyklen eine Abtragstiefe von circa 5 – 6 mm, die sich über die Radaufstandsfläche gleichmäßig verteilte. Auch bei der dritten Prüfplatte wurde in Tabelle 9 die zweite Messstelle aufgelistet, sodass die Messergebnisse von 300 Prüfzyklen aufgeführt sind. Innerhalb der ersten 200 Zyklen legte sich der Reifenabrieb auf die Oberfläche des Oberflächenschutzsystems. Woraufhin jedoch in den letzten 100 Prüfzyklen ein deutlicher Materialabtrag zu dokumentieren war. Die Ergebnisse zeigen, dass bei dem untersuchten OS 11b-System der Verbund zwischen den Schichten durch das Einwirken von Feuchte auf die Beschichtungsoberfläche eine deutliche Verschlechterung der Verschleißbeständigkeit im Vergleich zum Referenzprobekörper erfahren hat. Dies wird zusätzlich durch die optischen Darstellungen der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems (Tabelle 10, Tabelle 11, Tabelle 12) verdeutlicht. Diese Darstellungsform der Messergebnisse zeigt ebenfalls, dass die Referenzoberfläche (Tabelle 9) auch nach 15.000 Prüfzyklen nur geringfügig abgefahrene Kornspitzen und vereinzelt ausgebrochene Quarzkörner aufwies und deshalb Verschleißkategorie 1 angehört.

Tabelle 10: Verschleißtiefenentwicklung und Querschnitt in Plattenmitte in Abhängigkeit von der Lagerung des OS 11b-Systems

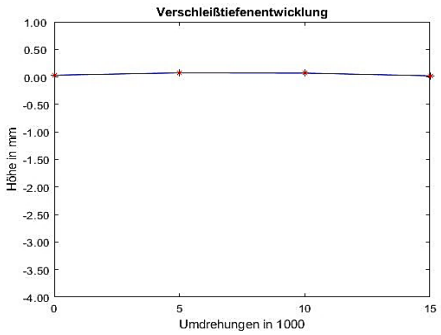
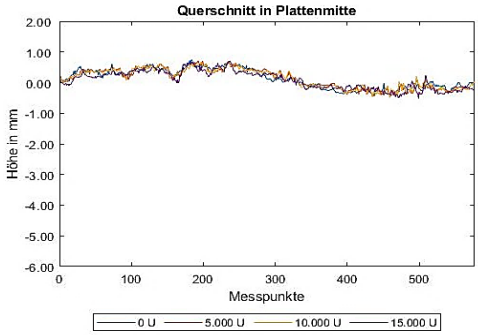
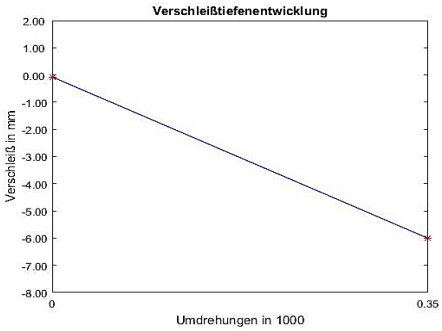
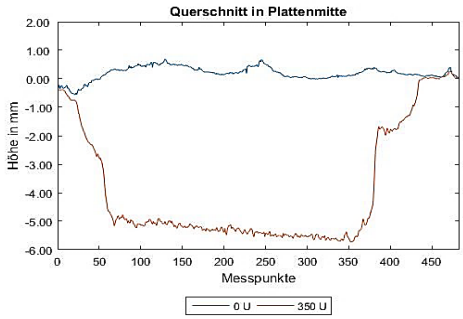
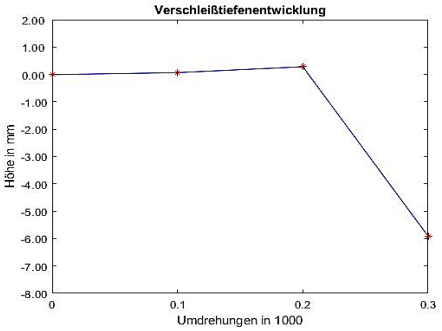
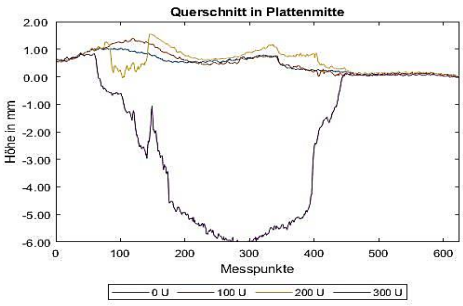
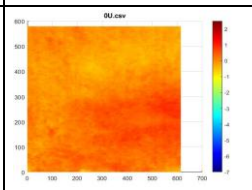
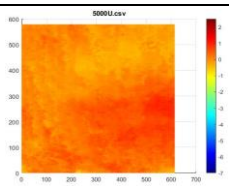
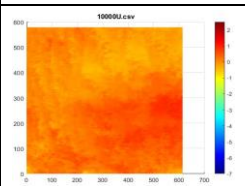
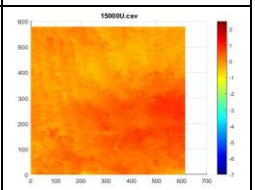
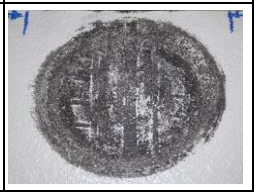
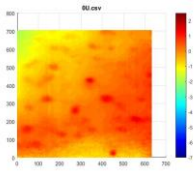
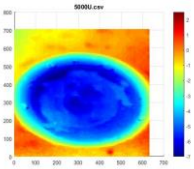
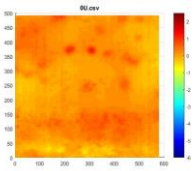
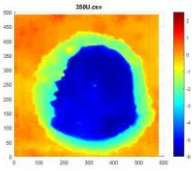
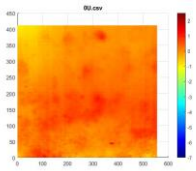
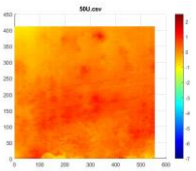
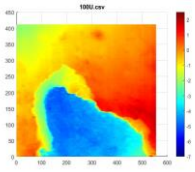
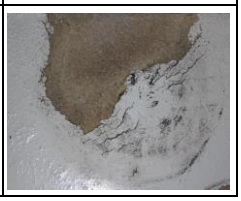
OS 11b	maximale Verschleißtiefe	Querschnitt in Plattenmitte
Raumklima		
-10 °C / RK (Messstelle 2)		
-10 °C / 10 °C / 80 % r. F. (Messstelle 2)		

Tabelle 11: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems, Lagerungsvariante Raumklima

OS 11b	0 Zyklen (Ausgangs-zustand)	5.000 Zyklen	10.000 Zyklen	15.000 Zyklen
Raumklima				
				

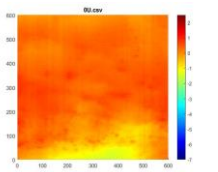
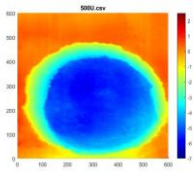
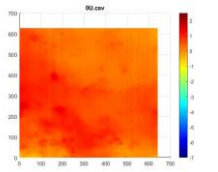
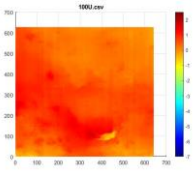
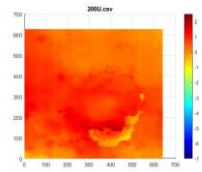
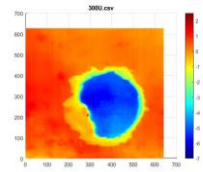
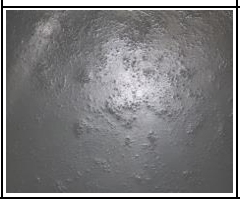
Die Platte, die zunächst bei -10 °C und anschließend im Raumklima gelagert wurde, wurde an drei Messstellen geprüft (Tabelle 12), da bei den ersten beiden Messstellen die Prüfzyklenanzahl mit 5.000 Zyklen und 350 Zyklen zu hoch angesetzt war, sodass das komplette Beschichtungssystem bereits bei der ersten Messung beschädigt war.

Tabelle 12: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems an drei Messstellen, Lagerungsvariante -10 °C / Raumklima

OS 11b	0 Zyklen (Ausgangszustand)	5.000 Zyklen	
-10 °C / RK (Messstelle 1)			
	0 Zyklen (Ausgangszustand)	350 Zyklen	
-10 °C / RK (Messstelle 2)			
	0 Zyklen (Ausgangszustand)	50 Zyklen	100 Zyklen
-10 °C / RK (Messstelle 3)			
			

Die Oberfläche der Platte mit Lagerungsvariante 3 zeigte bereits im Ausgangszustand Unebenheiten in der Oberfläche, die durch den Feuchteeintrag während der Applikation zustande kamen. Bereits nach 100 Zyklen (entspricht lediglich 0,6 % der Zyklen, die am Referenzkörper geprüft wurden) war die Deckversiegelung abgetragen und die Verschleißschicht nahezu abgetragen, sodass das untersuchte OS 11b-System in die Verschleißkategorie 6 einzuordnen war.

Tabelle 13: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems an zwei Messstellen, Lagerungsvariante -10 °C / 10 °C / 80 % r. F.

OS 11b	0 Zyklen (Ausgangs-zustand)	500 Zyklen		
-10 °C / 10 °C / 80 % r. F. (Messstelle 1)				
	0 Zyklen (Ausgangs-zustand)	100 Zyklen	200 Zyklen	300 Zyklen
-10 °C / 10 °C / 80 % r. F. (Messstelle 2)				
				

Die Fotodokumentation der dritten Platte des OS 11b-Systems (Tabelle 13), welche nach dem Herunterkühlen auf -10 °C im Klimaschrank bei 10 °C und 80 % relativer Feuchte gelagert wurde, zeigt, dass auch hier das „schollenartige“ Versagensbild bereits bei 100 Zyklen auftrat. Nach 300 Zyklen war die Deckversiegelung sowie die Verschleißschicht stark beschädigt, weshalb auch dieses System unter diesen Lagerungsbedingungen in Verschleißkategorie 6 einzuordnen war.

3.1.2 UV-Strahlung

Im Rahmen des Prüfprogramms von Schwerpunkt 1 wurden zwei weitere Prüfplatten hergestellt (je eine weitere Platte des OS 11a-Systems und eine des OS 11b-Systems). Die Prüfplatten wurden während des gesamten Beschichtungsprozesses und während der Aushärtezeiten bei Raumklimabedingungen gelagert. Zwischen den Beschichtungsschritten wurden die Platten jedoch einer UV-Bestrahlung unterzogen, um zu prüfen, wie sich der daraus resultierende Prozess der Nachvernetzung auf die Verschleißbeständigkeit und die Optik der einzelnen Systemschichten sowie des Gesamtsystems auswirkt.

Abbildung 2: Aufbau der Prüfung der UV-Bestrahlung von OS 11a- und OS 11b-Systemen

Für die Bestrahlung wurde eine sonnenlichtsimulierende Quecksilberdampflampe verwendet. Diese wurde in einem Abstand von etwa 30 bis 40 cm über den Platten angebracht, sodass auf der Oberfläche 135 - 265 µW/cm² UVB-Strahlung auftraf und eine Temperatur von bis zu 30 °C zu erwarten war. Für die PAT-Prüfung wurde jeweils die Prüfflache verwendet, die der Lampe während der Bestrahlung am nächsten zugewandt war. Die Bestrahlungsdauer wurde auf circa 5,5 Stunden zwischen den einzelnen Beschichtungsschritten festgelegt, da dies laut Deutschem Wetterdienst in etwa der durchschnittlichen Sonnenstundenanzahl pro Tag im Jahr 2018 im Bereich Kaiserslautern entsprach.

<u>UV-Strahlung – OS 11a-System</u>

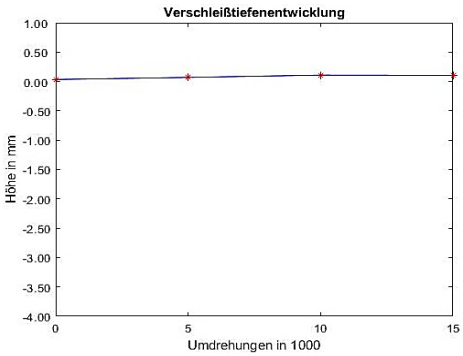
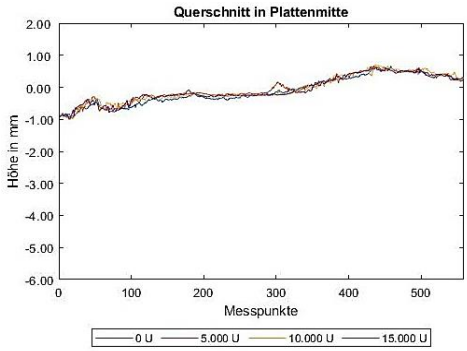
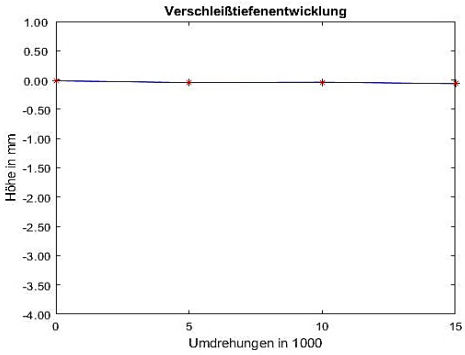
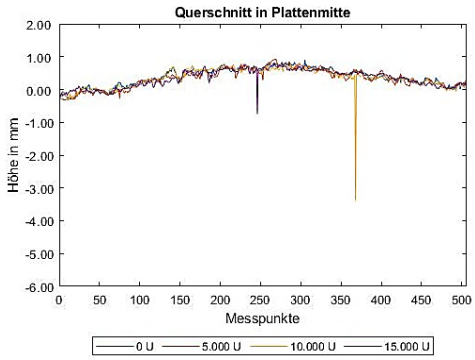
Die Behandlung mit UV-Strahlung zwischen den Beschichtungsschritten des OS 11a-Systems zeigte bereits nach dem Aushärten der Dichtungsschicht, welche bei diesem System nicht abgestreut wurde, die ersten Auswirkungen der auftreffenden UV-Strahlung. In dem Bereich, der der Lampe am nächsten war, zeichnete sich eine kreisförmige, dunklere Färbung des Materials ab (Abbildung 3, links). Dies zeigt, dass auch wenn das verwendete OS 11a-System als UV-beständig

gilt, nicht alle Systemkomponenten UV-beständig zu sein scheinen. Bei der folgenden abgestreuten Verschleißschicht sowie der Deckversiegelung (Abbildung 3, rechts) konnten keine Veränderungen in der Farbe oder der Ebenheit der Oberfläche dokumentiert werden.

Abbildung 3: OS 11a-System nach der UV-Bestrahlung der Dichtungsschicht (links) und der Deckversiegelung (rechts)

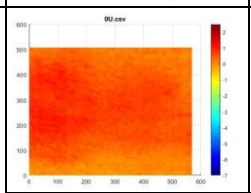
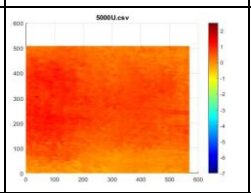
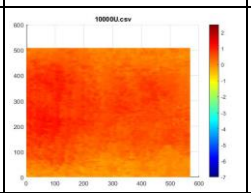
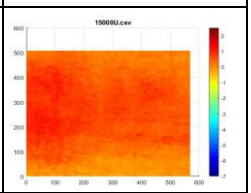
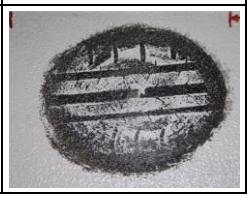
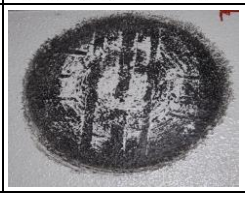
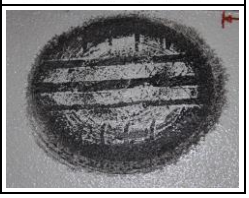
Die Messstelle für die PAT-Prüfung wurde so ausgewählt, dass die Fläche geprüft wurde, die nach der Bestrahlung der Dichtungsschicht als dunkel verfärbt registriert wurde.

Tabelle 14: Verschleißtiefenentwicklung und Querschnitt in Plattenmitte des OS 11a-Systems im Raumklima und bei UV-Bestrahlung

OS 11a	maximale Verschleißtiefe	Querschnitt in Plattenmitte
Raumklima		
UV		

Als Referenz beziehungsweise Vergleich diente auch hier die im Raumklima gelagerte Prüfplatte, die bereits im vorherigen Abschnitt „Feuchte – OS 11a-System“ beschrieben wurde. Die Verschleißtiefenentwicklung als auch der Querschnitt in Plattenmitte in Tabelle 14 zeigen, dass sich innerhalb der 15.000 Zyklen der PAT-Prüfung ein minimaler Verschleiß einstellte. Die im Diagramm des Querschnittes in Plattenmitte abzeichnenden „Spitzen“ starken Verschleißes sind höchstwahrscheinlich auf einen Mess- oder Auswertesoftwarefehler zurückzuführen, da beispielsweise bei 10.000 Zyklen ein sehr starker Verschleiß zwischen Messpunkt 350 und 400 dokumentiert wurde, dieser jedoch nach 15.000 Zyklen nicht erneut bestätigt wurde.

Tabelle 15: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems mit zusätzlicher UV-Bestrahlung

OS 11a	0 Zyklen (Ausgangs-zustand)	5.000 Zyklen	10.000 Zyklen	15.000 Zyklen
UV				
				

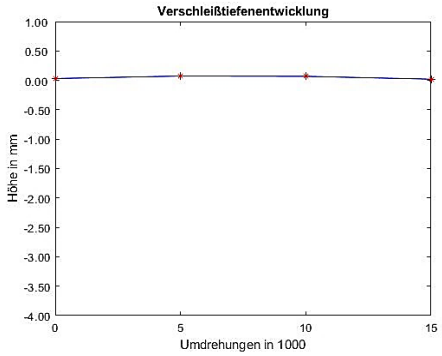
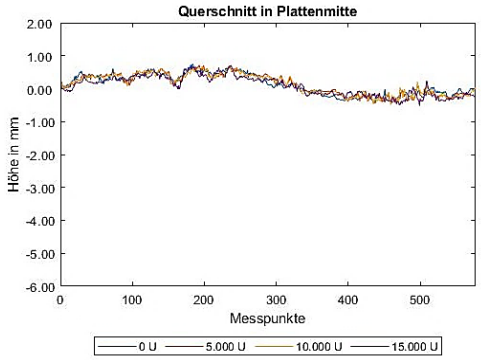
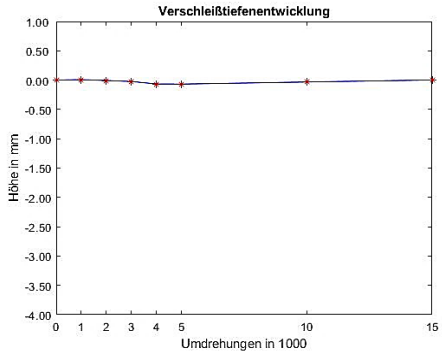
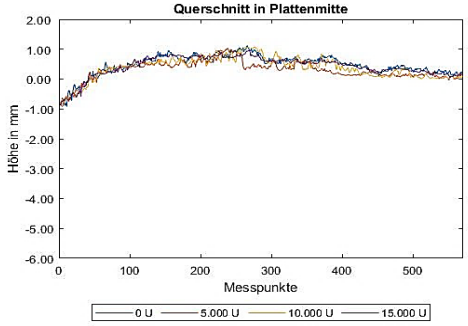
Die fotografische Dokumentation (Tabelle 15) des mit UV-Strahlung behandelten Oberflächenschutzsystems zeigt, dass sich nach 10.000 Prüfzyklen eine leicht abgefahrene Deckversiegelung dokumentieren lies, was sich jedoch im Laufe der folgenden 5.000 Zyklen nur minimal verstärkte und auch kaum ausgebrochene Quarzkörner bewirkte, weshalb das System trotz der Einwirkung in die Verschleißklasse 1 eingeordnet wurde.

<u>UV-Strahlung – OS 11b-System</u>

Die Prüfung des OS 11b-Systems mit UV-Bestrahlung während der Applikationsphase erfolgte analog zu der Prüfung des OS 11a-Systems. Da bei diesem System jedoch keine Dichtungsschicht appliziert wurde und die Grundierung sowie die Verschleißschicht abgestreut wurden, waren während des Beschichtungsprozesses keine optischen Auffälligkeiten zu dokumentieren. Um trotzdem die Auswirkungen der UV-Strahlung zu prüfen, wurde ebenfalls die der Strahlungsquelle zugewandte Fläche als Prüffläche herangezogen. Wie es bei der Auswertung der Ergebnisse des OS 11a-Systems der Fall war, wird auch hier der entsprechende Referenzprobekörper, der in Raumklima gelagert wurde, zum Vergleich herangezogen. Die Darstellung der maximalen Ver-

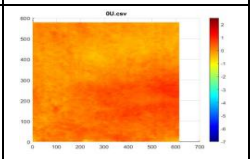
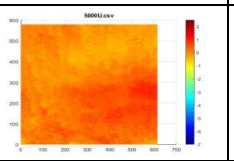
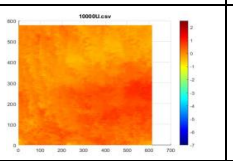
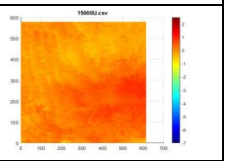
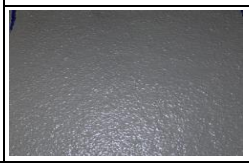
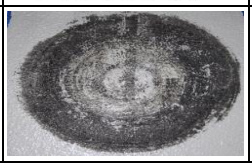
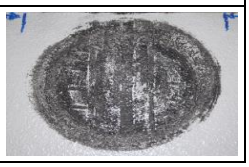
schleißtiefe sowie des Querschnitts in Plattenmitte in Tabelle 16 zeigen, dass innerhalb der ersten 5.000 Zyklen ein geringfügiger Anteil an Material abgetragen wurde, wohingegen es in den folgenden Zyklen eher zu einem leichten Auftrag von fest anhaftendem Reifenabrieb kam.

Tabelle 16: Verschleißtiefenentwicklung und Querschnitt in Plattenmitte des OS 11b-Systems im Raumklima und bei UV-Bestrahlung

OS 11b	maximale Verschleißtiefe	Querschnitt in Plattenmitte
Raumklima		
UV		

Durch visuelle Kontrolle der Systemoberfläche war festzustellen, dass es selbst nach 15.000 Zyklen nur zu vereinzelt ausgebrochenen Quarzkörnern und leicht abgefahrenen Kornspitzen kam, weshalb das System selbst nach UV-Bestrahlung zwischen den Applikationsschritten der Verschleißklasse 1 zugeordnet werden konnte.

Tabelle 17: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems mit zusätzlicher UV-Bestrahlung

OS 11b	0 Zyklen (Ausgangszustand)	5.000 Zyklen	10.000 Zyklen	15.000 Zyklen
Raumklima				
				

An beiden geprüften Systemen (OS 11a und OS 11b) führte die UV-Bestrahlung zwischen den Applikationsschritten zu keiner messbaren Verschlechterung des Haftungsvermögens der Schichten und der Verschleißwiderstandsfähigkeit. Die UV-Bestrahlung zeigte lediglich Auswirkungen auf die Optik von nicht UV-beständigen Schichtkomponenten, was bei der Planung der Systemaufbauten in jedem Fall zu beachten ist.

3.1.3 Zusammenfassung

Die im Untersuchungsschwerpunkt 1 durchgeführten Prüfungen sollten klären, inwieweit die während des Beschichtungsprozesses unvermeidbaren Umwelteinwirkungen einen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen haben. Neben dem Einfluss von UV-Strahlung und der darin begründeten Nachvernetzung wurde zusätzlich durch PAT-Prüfungen der Einfluss von Feuchte während der Applikation untersucht.

Durch verschiedene Lagerungsvarianten wurde ein Tauwasserausfall auf den Probekörperoberflächen herbeigeführt, wodurch die in der Praxis auftretende Feuchte simuliert werden sollte. Dies gelang in zwei Lagerungsvarianten, wodurch der Vergleich zwischen einem Referenzprobekörper und zwei Probekörpern mit angefeuchteter Oberfläche ermöglicht wurde.

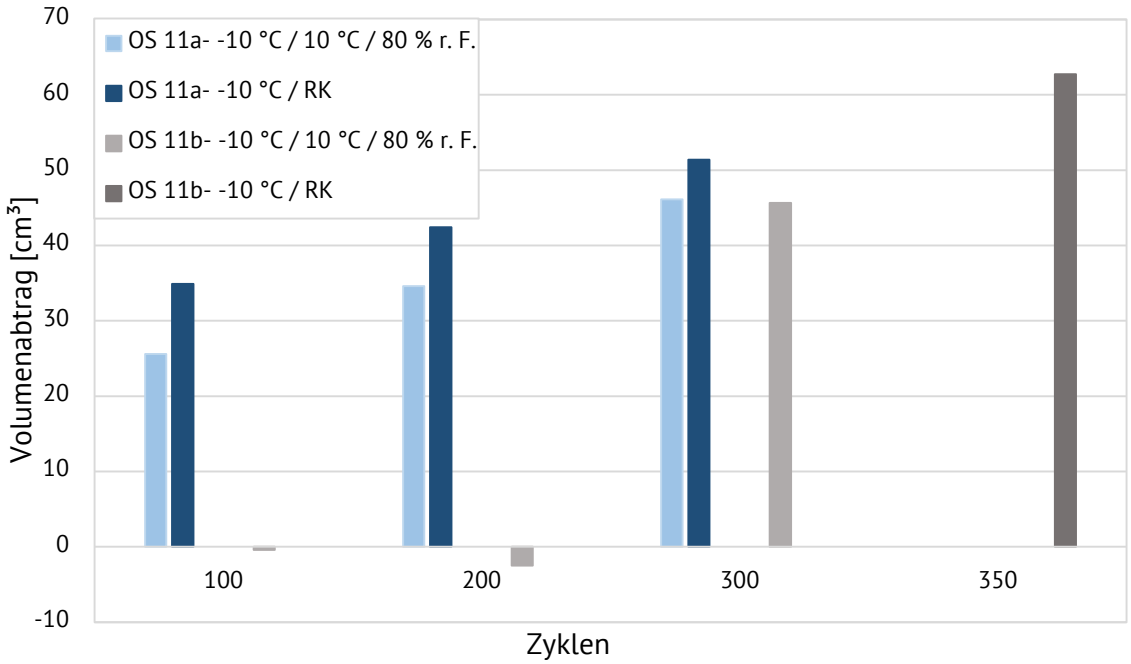


Abbildung 4: Volumenabtrag [cm³] der OS 11a- und OS 11b-Systeme verschiedener Lagerungsbedingungen in einem Bereich von 100 bis 350 Prüfzyklen

Neben der visuellen Begutachtung sowie der laserbasierten Auswertung kann das Verschleißverhalten zusätzlich quantitativ durch die Bestimmung des Volumenabtrags genauer beschrieben werden. Die Ergebnisse des Volumenabtrags der Oberflächenschutzsysteme aus Schwerpunkt 1,

in dem die Einwirkung von Feuchte und UV-Strahlung während der Applikationsphase untersucht wurde, sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt. Die Abbildungen sind in die Prüfzyklenbereiche 100 bis 350 Zyklen und 5.000 bis 15.000 Zyklen unterteilt, da sich die Beträge des Volumenabtrags der Systeme untereinander sehr stark unterscheiden und dadurch die Übersichtlichkeit gewährleistet bleiben soll.

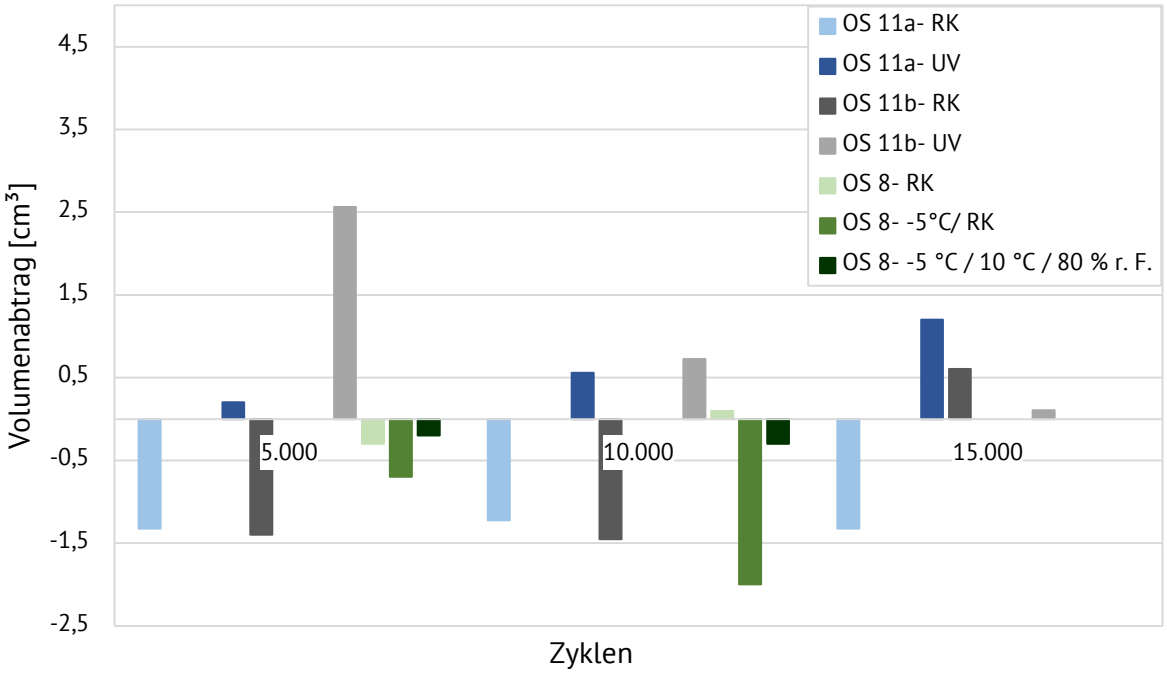


Abbildung 5: Volumenabtrag [cm³] der OS 8-, OS 11a- und OS 11b-Systeme verschiedener Lagerungsbedingungen in einem Bereich von 5.000 bis 15.000 Prüfzyklen

Die Entwicklung des Volumenabtrags bestätigt die vorangegangene Beschreibung der jeweiligen Systeme und liefert eine feste Kenngröße zur Quantifizierung. Die drei Referenzprobekörper zeigten äußerst geringe bis minimale Verschleißerscheinungen. Bei dem starren OS 8-System kam es nach 5.000 Zyklen zu einem Auftrag durch Reifenabrieb, woraufhin nach 10.000 Prüfzyklen ein leichter Volumenabtrag von circa 0,1 cm³ dokumentiert wurde. Der Erwartung entsprechend konnte bei dem rissüberbrückenden und als verschleißfest geltenden OS 11a-System auch nach 15.000 Prüfzyklen kein Volumenabtrag gemessen werden, wohingegen es bei dem OS 11b-System zu einem kontinuierlichen, leichten Volumenabtrag von etwa 0,61 cm³ kam.

Das getestete OS 8-System zeigte, dass das Aufbringen der Schichten auf feuchtem Untergrund keinen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit dieses Systemaufbaus hat. Beim Auftrag konnte jedoch beobachtet werden, dass die Feuchte einen geringfügig erhöhten Materialbedarf (Deckschicht) zur Folge hatte.

Die PAT-Untersuchungen der OS 11a- und OS 11b-Systeme zeigten, dass die Lagerungsbedingungen, die zu einem Tauwasserausfall auf der Bauteiloberfläche führten, verschiedene Auswirkungen auf den Schichtverbund und die Verschleißfestigkeit haben können.

Die Verminderung der Adhäsion zwischen den einzelnen Systemschichten wird in Abbildung 6 deutlich.

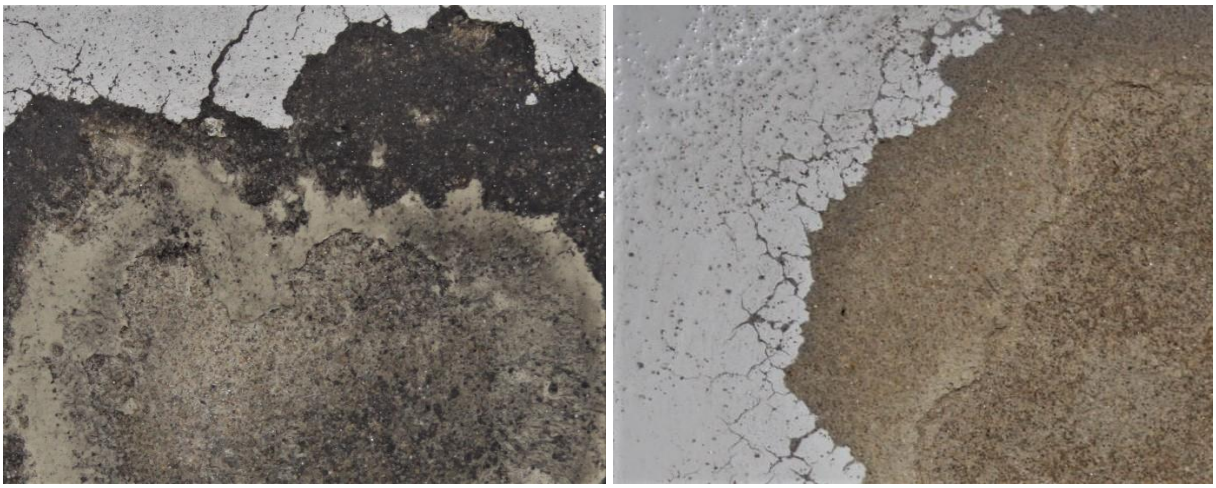


Abbildung 6: Starker Materialabtrag sowie stellenweise Adhäsionsverlust zwischen den Schichten des OS 11a- (links) und OS 11b-Systems (rechts) bei einer Lagerung bei -10 °C / 10 °C / 80 % r. F.

Nach der PAT-Prüfung mit maximal 350 Prüfzyklen zeigte sich, dass es nicht nur zu einem Materialabtrag kam, sondern, dass deutliche Abstufungen der einzelnen Schichten erkennbar sind und an den Rändern der Verbund zur darunterliegenden Schicht geschädigt wurde. Diese Veränderung im Systemgefüge wurde besonders bei der Dichtungs- sowie Verschleißschicht dokumentiert, die in dieser Prüfreihe auf einem zweikomponentigen Polyurethanbindemittel basieren. Diese Bindemittel entstehen meist durch Polyaddition von Polyol und Isocyanat, wobei bei dem Kontakt mit Wasser Kohlendioxid entsteht. Das führt dazu, dass eine porige Struktur entsteht und es zu Blasenbildung kommen kann [4, 5]. Epoxidharze zeichnen sich hingegen dadurch aus, dass sie trotz leichter Oberflächenfeuchte oftmals einen guten Verbund ermöglichen [4], was auch die visuelle Überprüfung der auf Epoxidharzen basierten Grundierung und Deckversiegelung (keine Blasenbildung innerhalb dieser Schichten) der OS 11a- und OS 11b-Systeme zeigte. Das verwendete OS 8-System, das auf Epoxidharz basiert, zeigte sich weniger bis gar nicht anfällig gegen die Oberflächenfeuchte, die durch das Unterschreiten der Taupunkttemperatur herbeigeführt wurde. Trotz der positiven Versuchsergebnisse können auch epoxidharzbasierte Bindemittel auf Feuchteänderungen und Kapillardrücke im Betonuntergrund reagieren und zu einem verminderten Adhäsionsvermögen zwischen Untergrund und Grundierung führen [6], was im folgenden Schwerpunkt 2 teilweise durch Wassersättigung untersucht wird.

Eine weitere Erklärung der Blasenbildung kann auch durch die Temperatur/ Volumen-Zusammenhänge der in den Poren eingeschlossenen Luft (Gasgesetze) gegeben werden. Die zum Beschichtungszeitpunkt heruntergekühlte Luft und Feuchte im Inneren der Probekörper wärmt sich während des Aushärteprozesses bei Raumklimabedingungen wieder auf und dehnt sich infolgedessen

aus. Da die Deckversiegelung als auch die Dichtungsschicht (OS 11a) beziehungsweise die Verschleißschicht (OS 11b) laut jeweiligem Produktdatenblatt als flüssigkeitsdicht ausgezeichnet ist, kann die Feuchte nicht aus dem Schichtaufbau entweichen und führt so zu einer Blasenbildung innerhalb der jeweiligen Schicht. Die Blasen können dabei in der Schicht verbleiben oder sich öffnen, sodass die Dichtigkeit nicht länger gewährleistet ist, was vom jeweiligen Gasdruck in Abhängigkeit der Temperaturdifferenzen innerhalb des Systems abhängt.

Die im Prüfprogramm gewählten Lagerungsbedingungen zur Simulation realistischer Umwelteinflüsse auf die Oberflächenschutzsysteme während der Applikationsphase zeigen, dass sowohl durch die Temperaturunterschiede als auch die an der Oberfläche angelagerte Feuchte in Abhängigkeit der verwendeten Kunststoffe beziehungsweise Kunstharze teilweise erhebliche Gefügeschädigungen ausgelöst wurden, obwohl die Herstellerbedingungen, die die Oberflächen- und Lufttemperatur sowie die relative Luftfeuchte für den Beschichtungsprozess einschränken, eingehalten waren.

Die Auswirkungen von Nachvernetzungen, die durch UV-Strahlung während der Applikationsphase hervorgerufen werden können, wurden ebenfalls in dieser Prüfreihe untersucht. Es wurde ein OS 11a- und ein OS 11b-System einer der Realität (bei freier Bewitterung) nachempfundenen Bestrahlung und anschließend der PAT-Prüfung von 15.000 Prüfzyklen unterzogen. Dabei waren bereits nach dem Aushärten der Dichtungsschicht des OS 11a-Systems Verfärbungen im Bereich des direkt auftreffenden Lichtkegels dokumentiert worden. Diese waren jedoch nicht auf abgestreuten Oberflächen beziehungsweise der Deckversiegelung aufgetreten, weshalb dieser mögliche Mangel am Endprodukt nicht sichtbar war.

Da es neben Verfärbungen durch die UV-Einwirkungen ebenfalls zu Versprödungen kommen kann [4], wurde die Prüfstelle gewählt, an der die Verfärbung auftrat. Bei beiden Oberflächenschutzsystemen konnte im Verlauf der 15.000 Prüfzyklen, verglichen mit den Referenzprobekörpern, zwar ein leicht gesteigerter Volumenabtrag verzeichnet werden, die absolute Abriebsmenge war jedoch auch nach 15.000 Zyklen relativ gering und die visuelle Überprüfung der Oberflächen zeigte zusätzlich, dass die Systeme auch mit zusätzlicher UV-Belastung der Verschleißklasse 1 zuzuordnen sind.

Die Auswirkungen umweltbedingter Einflüsse sind entsprechend der in dieser Versuchsreihe gewonnenen Erkenntnisse durchaus gegeben und bei der Planung nicht zu vernachlässigen, wenn Folgeschäden frühzeitig vermieden werden sollen. Temperaturdifferenzen und feuchte Oberflächen während des Beschichtungsprozesses führen je nach chemischer Basis des verwendeten Produktes zu optischen Abweichungen und Gefügeveränderungen im System, welche eine verminderte Verschleißfestigkeit und Dauerhaftigkeit zur Folge haben können. Belastungen durch UV-Strahlen führten an den untersuchten Systemen zu visuell wahrnehmbaren Veränderungen und nur zu einer minimalen Herabsetzung der Verschleißbeständigkeit.

3.2 Schwerpunkt 2

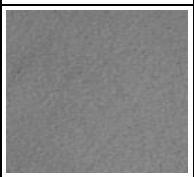
In den Versuchsreihen wurde das Verschleißverhalten an beschichteten Probekörpern untersucht, die mit Wasser beziehungsweise Splitt beaufschlagt wurden. Durch diese Lagerung sollte insbesondere die Wintersituation simuliert werden. Die Durchführung und die Ergebnisse der beiden Prüfreihen werden im Folgenden benannt und erläutert.

3.2.1 Wassersättigung

Pro Radkasten können im Winter ca. 10 Liter Wasser (Schnee) mit in den Parkbau eingetragen werden, was in großen Parkbauten mit einer kurzen Parkzeit (bspw. Einkaufszentrum) zu einem großen Wassereintrag führen kann.

Nach dem vollständigen Aushärten des Oberflächenschutzsystems wurden die Proben für ca. sieben Tage in Wasser bei 21 °C bis zur Massekonstanz gelagert. Es wurden fünf Oberflächenschutzsysteme untersucht (Tabelle 18):

Tabelle 18: In Schwerpunkt 2 untersuchte OS-Systeme

Probenbezeichnung	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**
					
OS-System	8	11a	11b	13	13
Material der hwO	EP	PUR	PUR	PMMA	PMMA

Je Prüfung wurden 15.000 Zyklen veranschlagt, sodass eine Prüfung circa fünf Tage dauert. Dokumentiert wurde der Verschleiß mittels Laserscanning. Auf jeder Prüfplatte sind vier Messstellen verfügbar. Da sich die benachbarten Prüfstellen leicht überlagern, wurde die gegenüberliegende Seite als 2. Prüfstelle gewählt, sodass je Probekörper die Prüfung „nass“ als auch „trocken“ durchgeführt werden konnte.

Bei der Prüfung unter Wassersättigung wurden die Probekörper in einer Edelstahlwanne auch während der Prüfung unter Wasser gelagert. Der Wasserstand lag dabei ca. 0,4-0,6 cm über dem Probekörper. Nach jedem Prüfintervall wurden die Probekörper (bei nasser als auch trockener Prüfung) gereinigt und von lose anhaftenden Reifenresten befreit. In Abbildung 7 ist die Prüfung unter Lagerung bei Normaltemperatur und trockener Bedingung sowie unter Wassersättigung dargestellt.

Abbildung 7: PAT-Prüfung; Links: unter Laborklima (trocken); Rechts: unter Wassersättigung

In Tabelle 19 sind die Verschleißtiefen dokumentiert. Nachfolgend ist in Tabelle 20 Probekörper 1 dargestellt. Bei diesem handelt es sich um ein starres OS 8-System, welches sowohl bei trockenen als auch nassen Prüfbedingungen ein robustes Beschichtungssystem bietet. Die Deckversiegelung war nach 15.000 Zyklen noch intakt und es konnten keine Kornausbrüche festgestellt werden.

Tabelle 19: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des Systems P1 (OS 8)

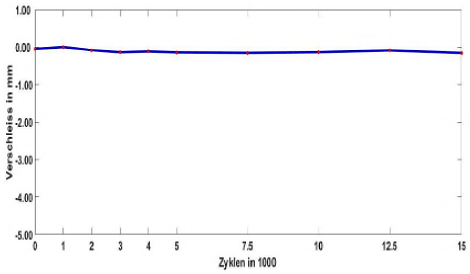
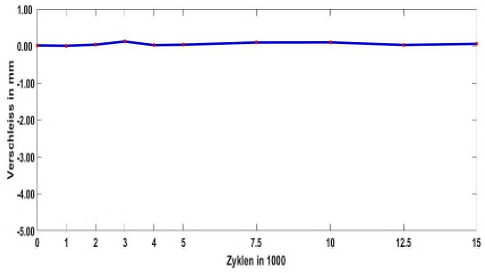
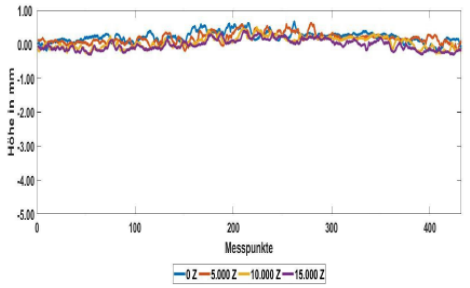
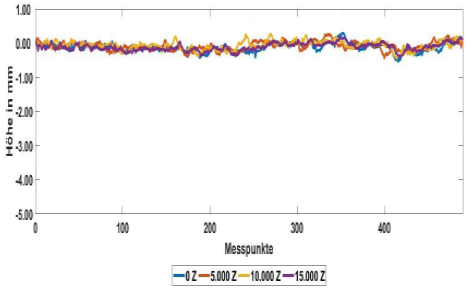
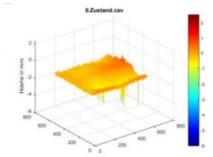
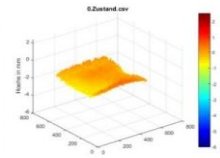
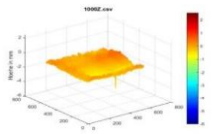
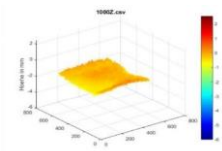
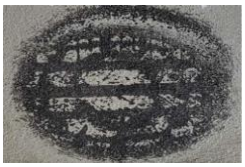
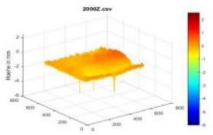
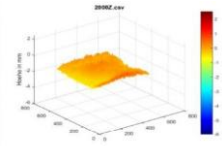
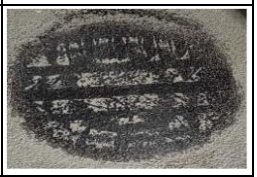
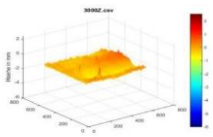
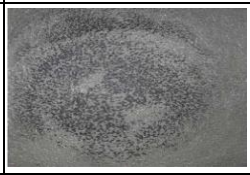
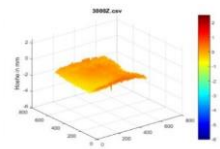
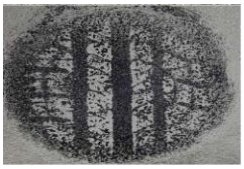
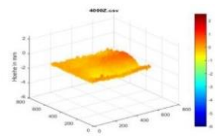
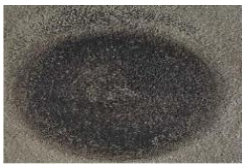
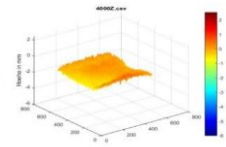
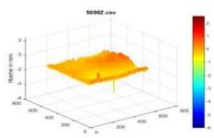
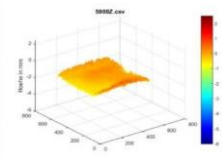
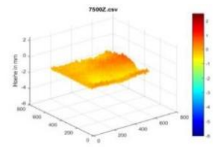
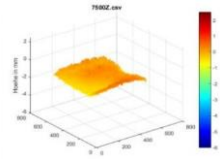
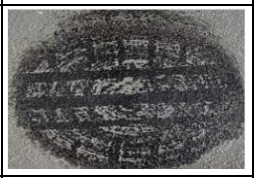
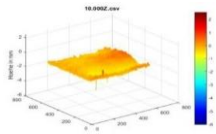
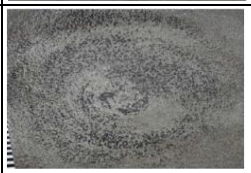
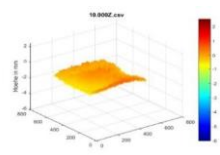
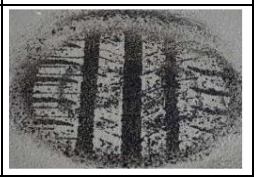
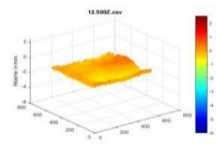
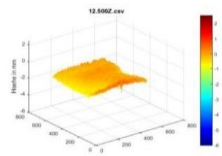
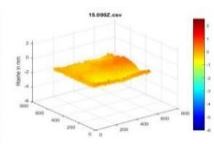
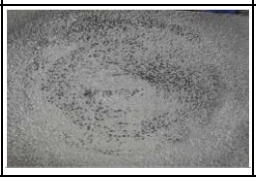
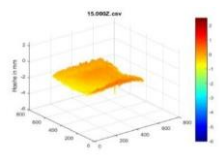
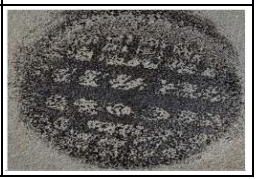
P1 (OS 8)	Laborklima	Wassersättigung
maximale Verschleiß-tiefe		
Querschnitt in Plattenmitte		

Tabelle 20: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 8-Systems (P1)

P1 (OS 8)	Laborklima		Wassersättigung	
Ausgangs-zustand 0 Zyklen				
1.000 Zyklen				
2.000 Zyklen				
3.000 Zyklen				
4.000 Zyklen				
5.000 Zyklen				
7.500 Zyklen				
10.000 Zyklen				
12.500 Zyklen				
15.000 Zyklen				

Bei Probekörper 2 (Tabelle 21, Tabelle 22) traten sowohl bei trockener als auch nasser Beanspruchung deutliche Verschleißerscheinungen auf, wobei festzustellen war, dass bei Wassersättigung der Verschleiß sich ausgeprägter darstellte. Im trockenen Zustand war bereits nach 3.000 Zyklen die Deckversiegelung komplett abgetragen, bei Wasserbeanspruchung nach 2.000 Zyklen. Analog verhielt es sich mit dem Abtrag der Verschleißschicht, sodass nach 10.000 (trocken) bzw. 7.500 (wasserbeansprucht) Zyklen die Schwimmschicht sichtbar wurde. Auffällig ist bei diesem Probekörper zusätzlich der hohe Reifenabrieb, der bei der trockenen Prüfung am Beschichtungssystem festklebte.

Tabelle 21: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des Systems P2 (OS 11a)

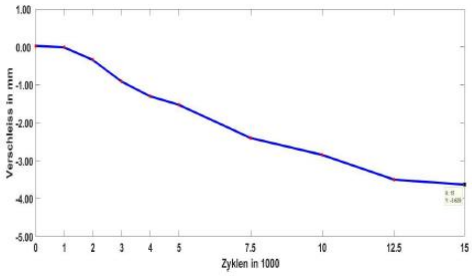
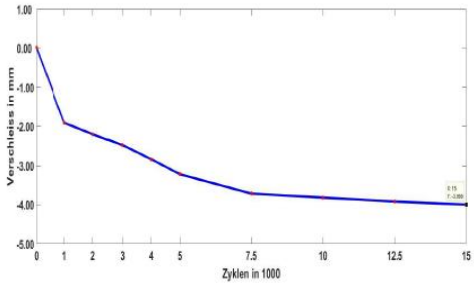
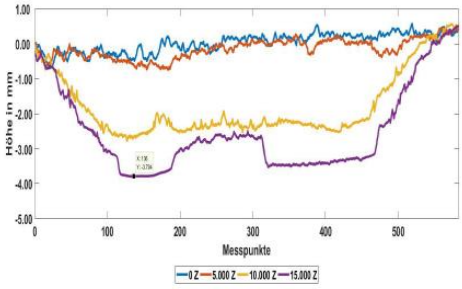
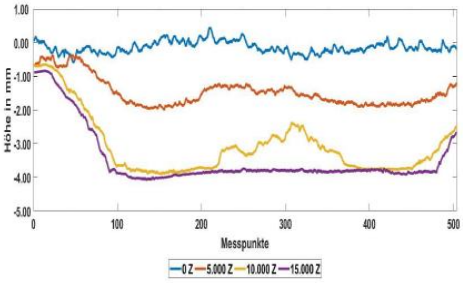
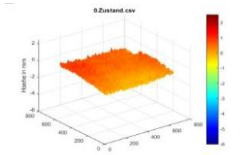
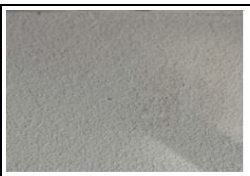
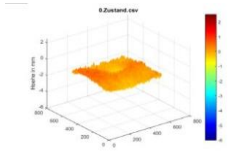
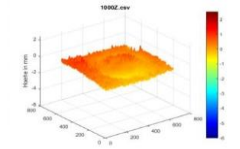
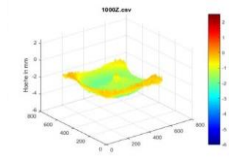
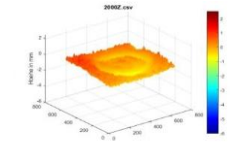
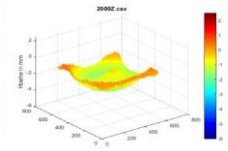
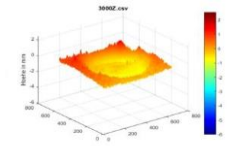
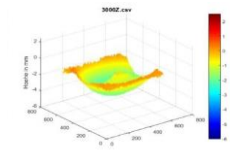
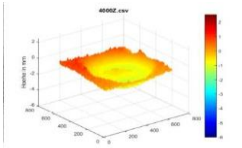
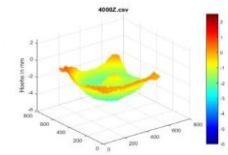
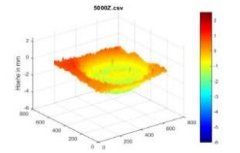
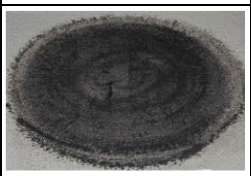
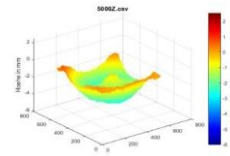
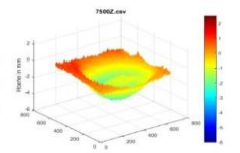
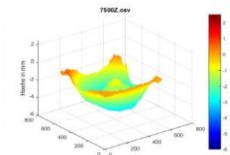
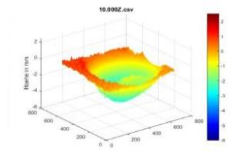
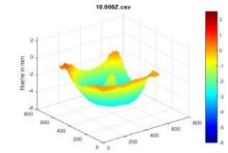
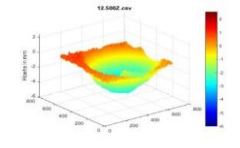
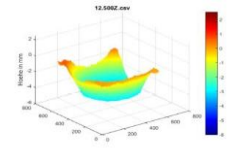
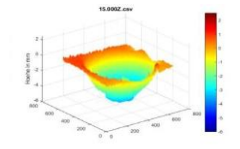
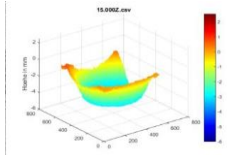
P2 (OS 11a)	**Laborklima**	**Wassersättigung**
maximale Verschleiß-tiefe		
Querschnitt in Plattenmitte		

Tabelle 22: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems (P2)

P2 (OS 11a)	Laborklima		Wassersättigung	
Ausgangs-zustand 0 Zyklen				
1.000 Zyklen				
2.000 Zyklen				
3.000 Zyklen				
4.000 Zyklen				
5.000 Zyklen				
7.500 Zyklen				
10.000 Zyklen				
12.500 Zyklen				
15.000 Zyklen				

Probekörper 3 zeigte ein ähnliches Versagensbild wie Probekörper 2 (Tabelle 23, Tabelle 24). Erneut trat unter Wassersättigung ein früher Verschleiß auf. Nach 15.000 Zyklen war dieser weiterhin deutlich stärker ausgeprägt als bei trockener Lagerung.

Tabelle 23: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des Systems P3 (OS 11b)

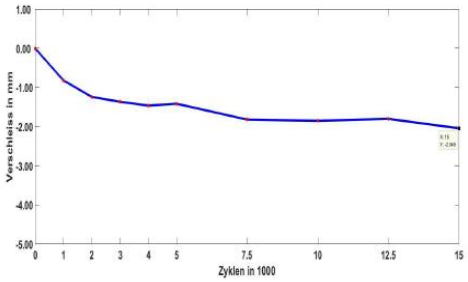
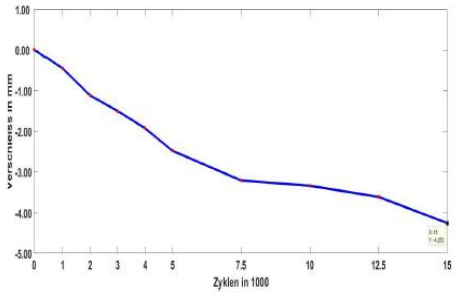
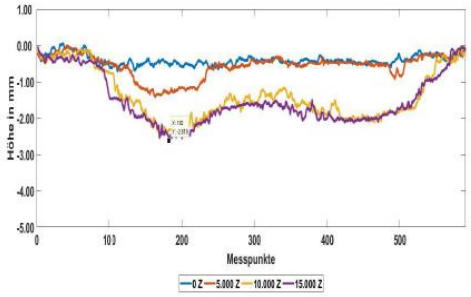
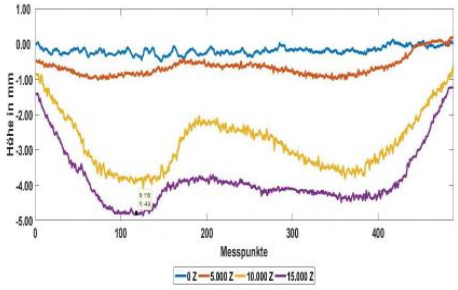
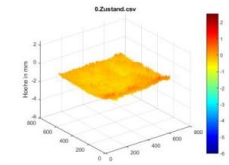
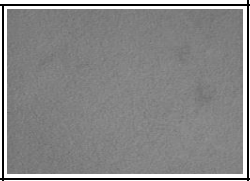
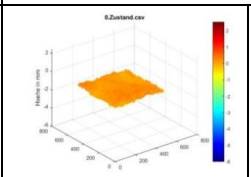
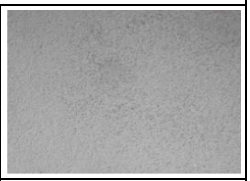
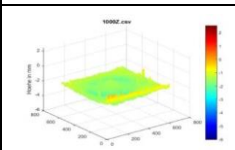
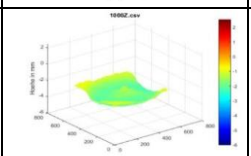
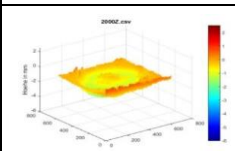
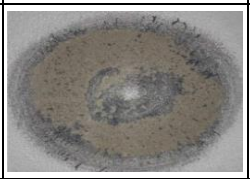
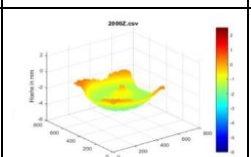
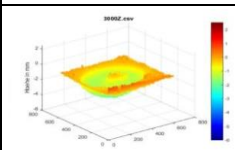
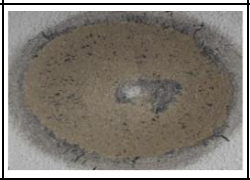
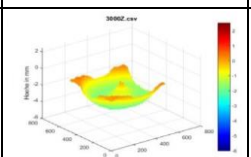
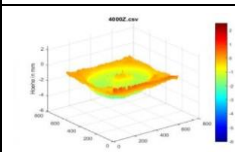
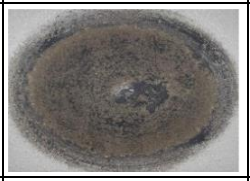
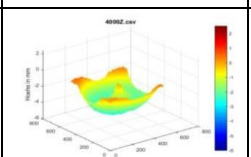
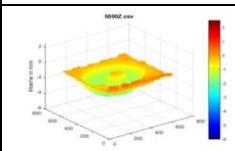
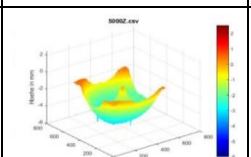
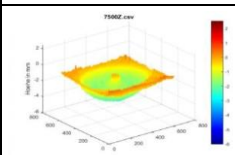
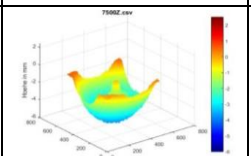
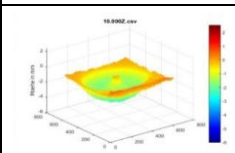
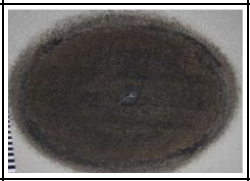
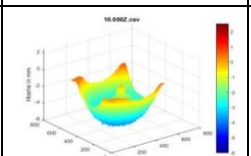
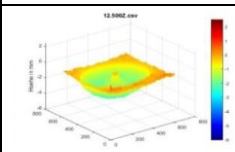
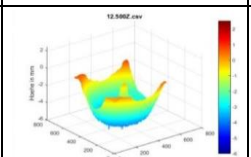
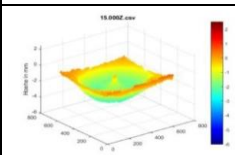
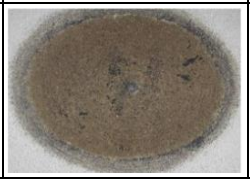
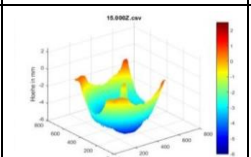
P3 (OS 11b)	Laborklima	Wassersättigung
maximale Verschleißtiefe		
Querschnitt in Plattenmitte		

Tabelle 24: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems (P3)

P3 (OS 11b)	Laborklima		Wassersättigung	
Ausgangs-zustand 0 Zyklen				
1.000 Zyklen				
2.000 Zyklen				
3.000 Zyklen				
4.000 Zyklen				
5.000 Zyklen				
7.500 Zyklen				
10.000 Zyklen				
12.500 Zyklen				
15.000 Zyklen				

Bei dem Probekörper P3 wurden zusätzliche Bohrkerne nach trockener Lagerung aus einer nicht belasteten Stelle und den optisch am stärksten beanspruchten Stellen nach 15.000 Zyklen entnommen (Abbildung 8). Die Quarzkörner waren im Ausgangszustand sehr gut eingebunden und die Rauheit des Systems war erkennbar. Nach 15.000 Zyklen war die Beschichtung nur noch bedingt vorhanden und die Verschleißschicht nahezu vollständig abgetragen. Deutlich zu erkennen sind auch die Vertiefungen aus welchen die Quarzsandkörner aus der Bindemittelmatrix herausgelöst wurden.

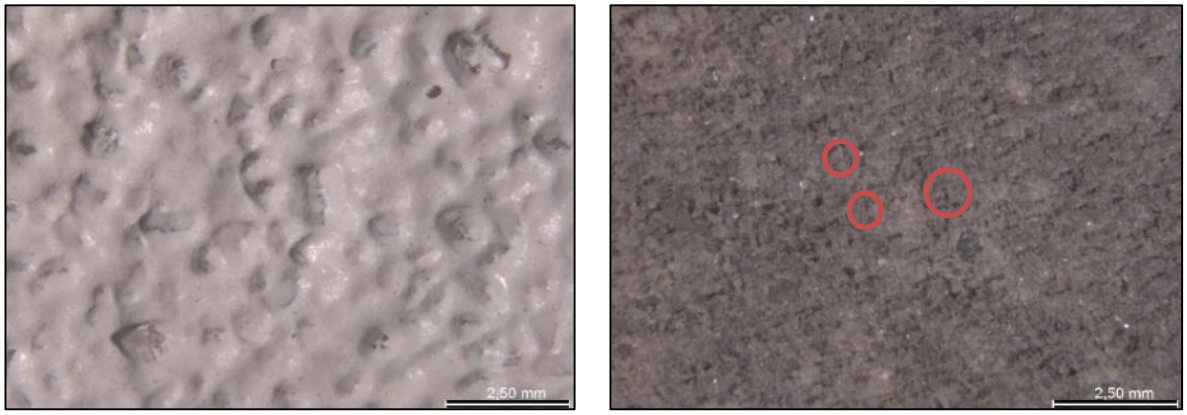


Abbildung 8: Mikroskopische Aufnahmen des Systems P3 unter Laborklima; Links: 0-Zustand; Rechts: nach 15.000 Zyklen

Probekörper 4 stellte in den Untersuchungen die Ausnahme dar: Es entstand nur bei der Beanspruchung im Laborklima Verschleiß. Auch bei diesem System hafteten die Reifenpartikel mit zunehmendem Verschleiß sehr gut am Oberflächenschutzsystem. Der Verschleiß nahm kontinuierlich zu, sodass nach 15.000 Zyklen in der Mitte des belasteten Bereichs die hwO zerstört war. Nachfolgend ist in Tabelle 25 und in Tabelle 26 der Verschleiß dokumentiert.

Tabelle 25: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des Systems P4 (OS 13)

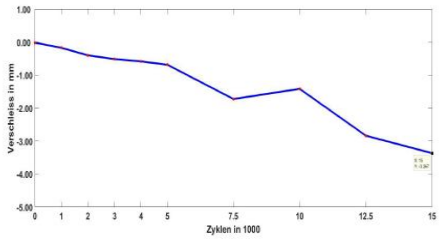
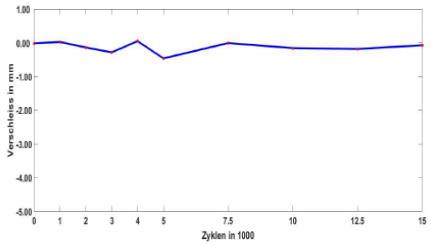
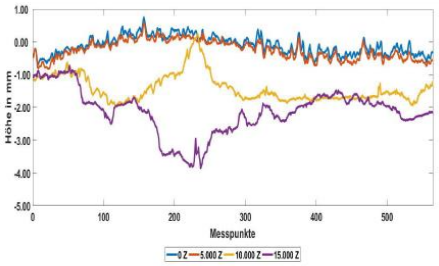
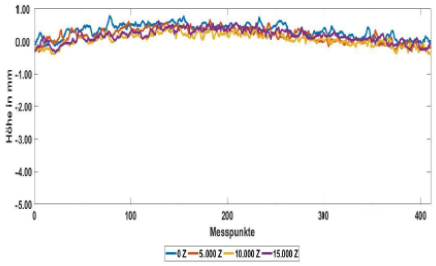
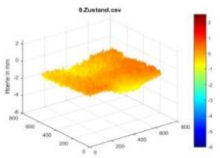
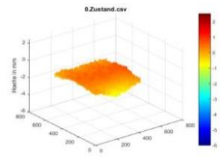
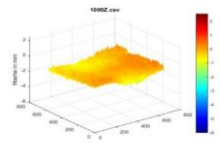
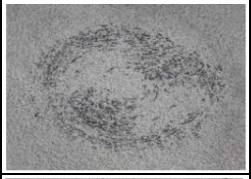
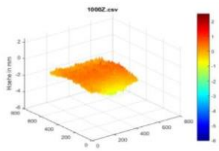
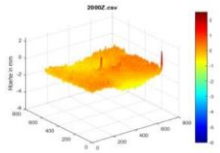
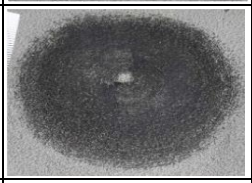
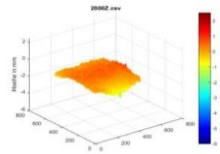
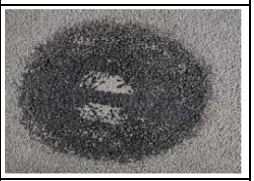
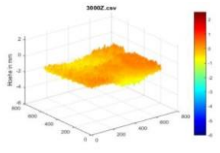
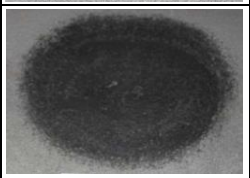
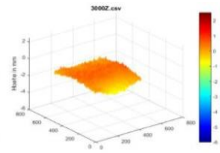
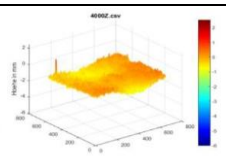
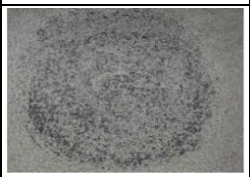
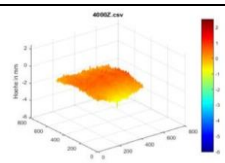
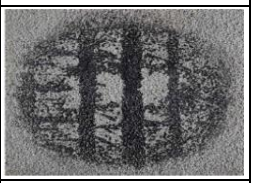
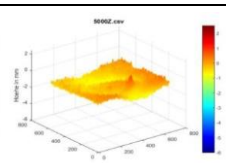
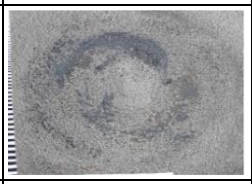
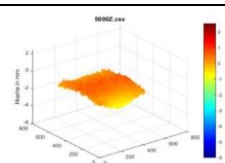
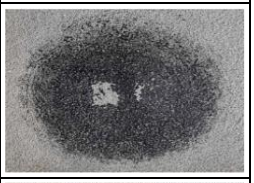
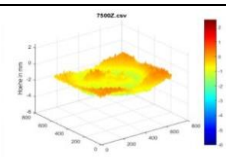
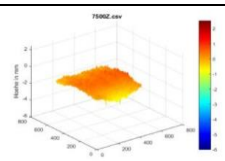
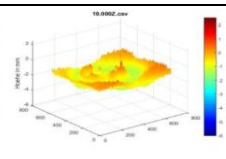
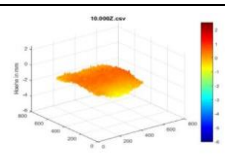
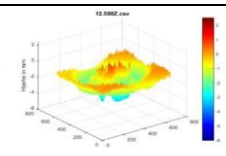
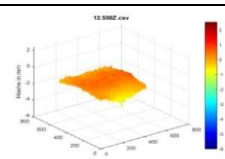
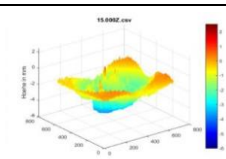
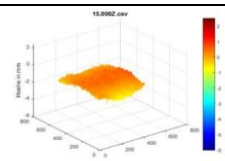
P4 (OS 13)	Laborklima	Wassersättigung
maximale Verschleiß-tiefe		
Querschnitt in Plattenmitte		

Tabelle 26: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 13-Systems (P4)

P4 (OS 13)	Laborklima		Wassersättigung	
Ausgangs-zustand 0 Zyklen				
1.000 Zyklen				
2.000 Zyklen				
3.000 Zyklen				
4.000 Zyklen				
5.000 Zyklen				
7.500 Zyklen				
10.000 Zyklen				
12.500 Zyklen				
15.000 Zyklen				

Probekörper 5 wies sowohl bei trockener Lagerung als auch unter Wassersättigung keinen sichtbaren Verschleiß auf (Tabelle 27, Tabelle 28). Das OS 13-System hat eine hohe Rauigkeit, die in den 3D-Modellierungen gut sichtbar wird. Diese verursacht eine starke Tiefen-Streuung bei den Laserdaten, welche z. T. zu einzelnen Fehlmessungen geführt und die Auswertung erschwert hat.

Auch bei diesem System wurden Bohrkerne bei der trockenen Lagerung entnommen. Durch mikroskopische Untersuchungen ist zu erkennen, dass nach 15.000 Zyklen ein leichter Abtrag des Bindemittels an den Kornspitzen stattgefunden hat. Deutlich wird dies auch in Abbildung 9. Der Glanz der beschichteten Oberfläche ist verschwunden, einzelne Körner werden jedoch nicht im Ganzen sichtbar.

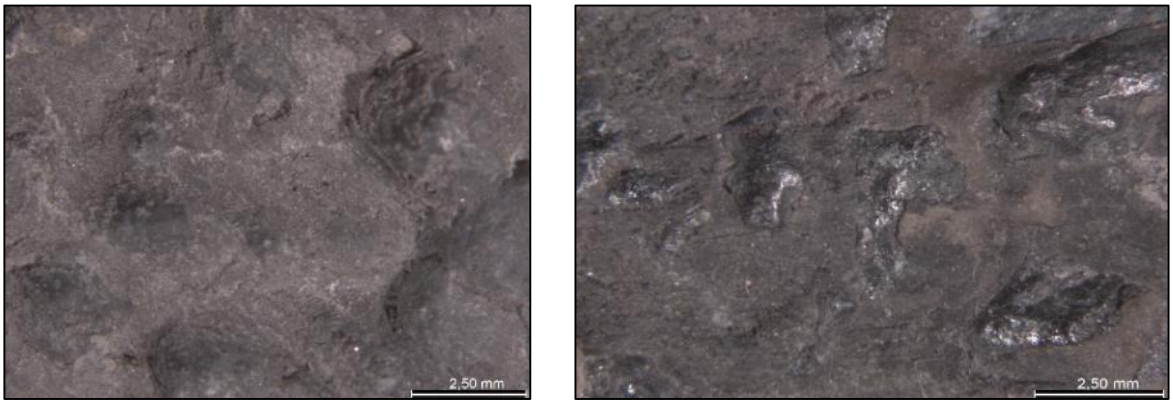


Abbildung 9: Mikroskopische Aufnahmen des Systems P5 unter Laborklima; Links: 0-Zustand; Rechts: nach 15.000 Zyklen

Tabelle 27: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des P5 (OS 13)

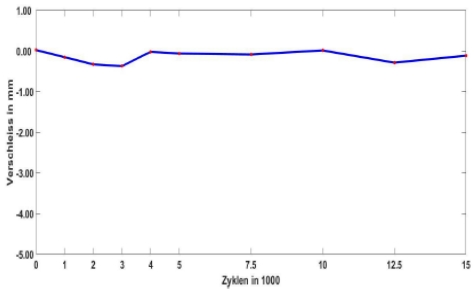
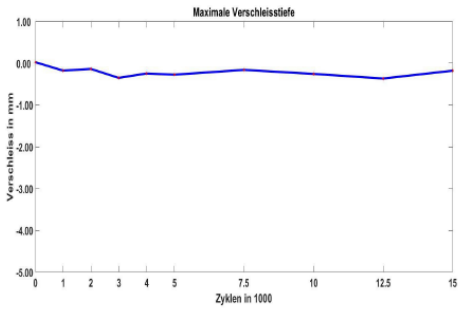
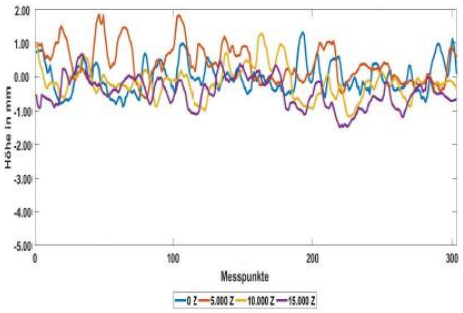
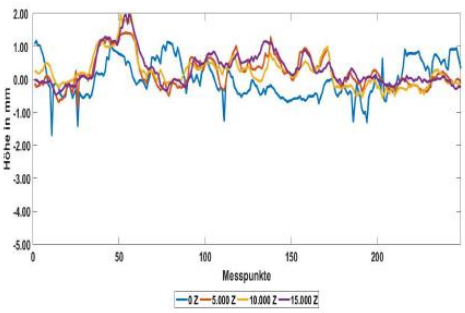
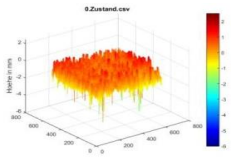
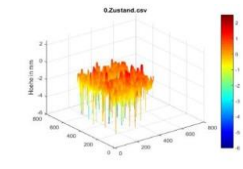
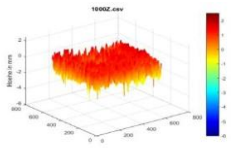
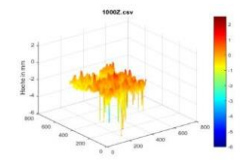
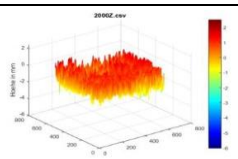
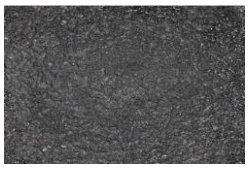
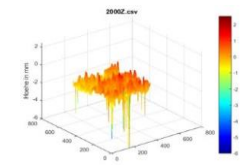
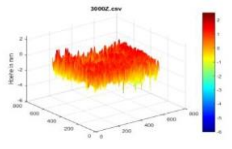
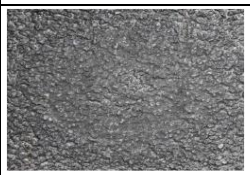
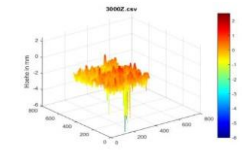
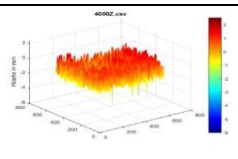
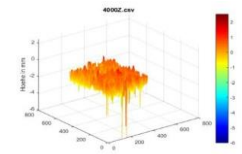
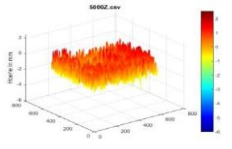
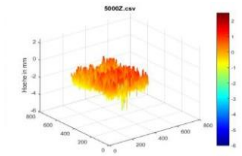
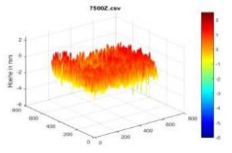
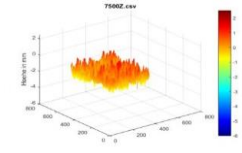
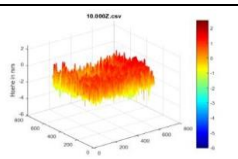
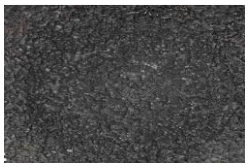
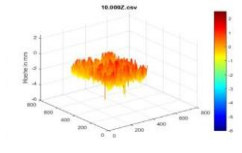
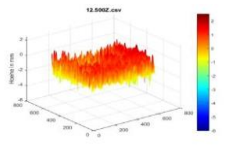
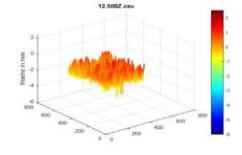
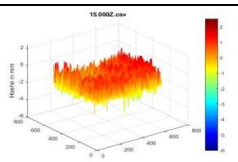
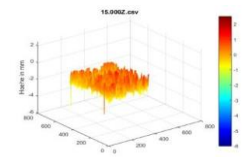
P5 (OS 13)	Laborklima	Wassersättigung
maximale Verschleiß-tiefe		
Querschnitt in Plattenmitte		

Tabelle 28: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 13-Systems (P5)

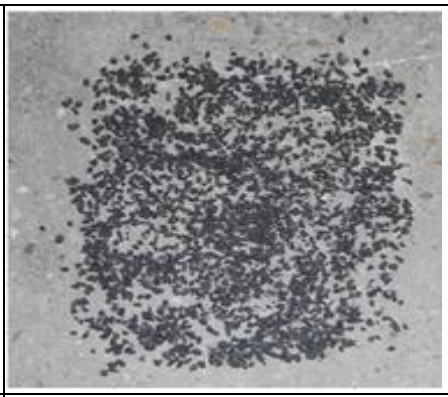
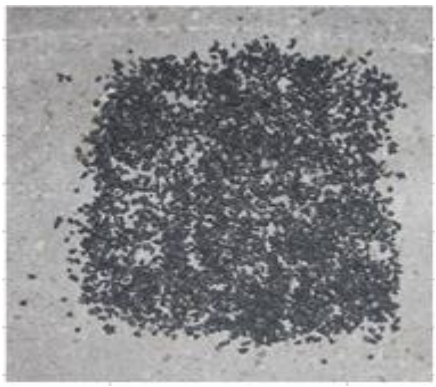
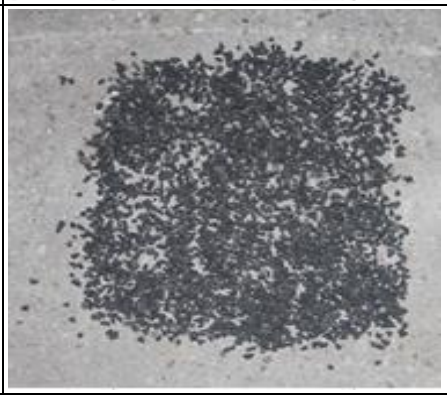
P5 (OS 13)	Laborklima		Wassersättigung	
Ausgangs-zustand 0 Zyklen				
1.000 Zyklen				
2.000 Zyklen				
3.000 Zyklen				
4.000 Zyklen				
5.000 Zyklen				
7.500 Zyklen				
10.000 Zyklen				
12.500 Zyklen				
15.000 Zyklen				

3.2.2 Splittbeanspruchung

In weiteren Versuchen wurde die mechanische Abrasion durch eingetragenes Streugut (in den Wintermonaten) untersucht. Diese Einwirkung und ihr Einfluss auf Oberflächenschutzsysteme wurde durch den Parking Abrasion Test durch zusätzliches Aufbringen von Splitt experimentell geprüft.

Die Menge an Splitt mit einer Korngröße von 1 mm bis 3 mm, welche pro Prüfstelle auf eine Fläche von 20 cm x 20 cm aufzubringen war, wurde nach der Untersuchung von vier Mengen (Tabelle 29) auf 52,6 g festgelegt. Diese Menge an Splitt wurde vor jedem neuen Prüfintervall erneut auf die Probekörper aufgetragen.

Tabelle 29: Überblick über die Ermittlung der Splittmenge

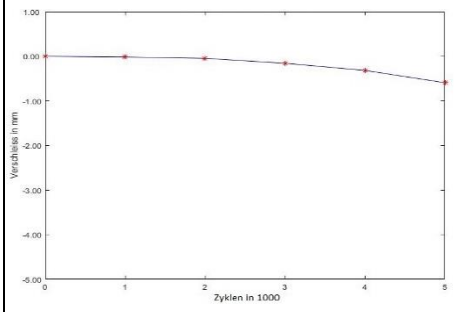
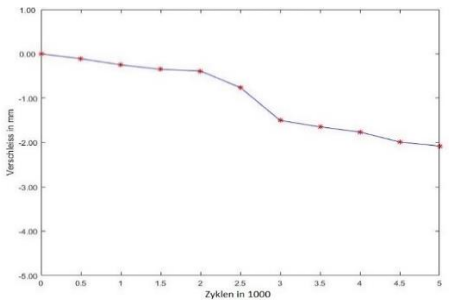
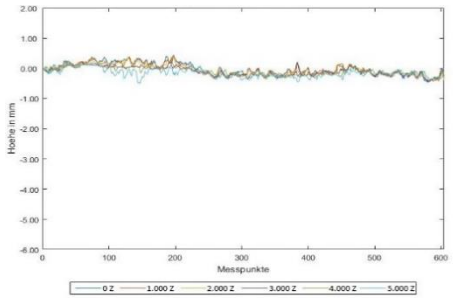
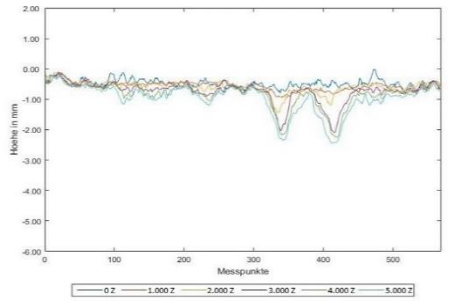
Variante 1: 52,6 g		Variante 2: 84,1 g	
Variante 3: 107,6 g		Variante 4: 182,8 g	

Die Untersuchung, die je 5.000 Prüfzyklen umfasste, wurde an vier Probekörpern durchgeführt, auf die drei verschiedene Oberflächenschutzsysteme (zwei starre OS 8-Systeme sowie die rissüberbückenden Systeme OS 11a und OS 11b) aufgebracht waren. Die visuelle sowie laserbasierte Kontrolle erfolgte jeweils nach 500 Zyklen. Anfangs wurde die Verschleißbeständigkeit der Systeme an einer Prüfstelle der Probekörper geprüft, woraufhin die zweite, gegenüberliegende Prüfstelle mit Streugut herangezogen wurde.

Nachfolgend sind die maximalen Verschleißtiefen sowie die Querschnitte in Plattenmitte aufgeführt. Des Weiteren sind die Entwicklungen und Ergebnisse der vier Probekörper in tabellarischer Form dargestellt. Neben den fotografischen Aufnahmen sind die auf den Lasermessdaten basierenden 2D-Modellierungen aufgeführt, um einen optimalen Vergleich zu ermöglichen.

Die 3D-Visualisierung liegt dabei jeweils vom Anfangs- und Endzustand vor.

Tabelle 30: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der zusätzlichen mechanischen Abrasion des Systems S1 (OS 11a)

S1 (OS 11a)	ohne Splitt	mit Splitt
maximale Verschleiß-tiefe		
Querschnitt in Plattenmitte		

Die Visualisierungen als auch die Fotos zeigen (Tabelle 30, Tabelle 31), dass ohne zusätzliche mechanische Abrasion durch Splitt über 2.000 Prüfzyklen kein nennenswerter Verschleiß am Oberflächenschutzsystem 11a festzustellen war. Erst nach circa 3.000 Zyklen war ein vergleichsweise höherer Abtrag an den Kornspitzen zu erkennen, wobei erste Kornausbrüche und ein zunehmender Verschleiß erst nach weiteren 1.000 Zyklen deutlich wurden. Die Messung der Schichtdicke sowie die Lasermessungen ergaben einen Abtrag von insgesamt 0,50 mm (10 %) beziehungsweise 0,59 mm (12 %).

Wurde vor jedem Prüfintervall eine Splittmenge von 52,6 g auf die Prüffläche gegeben, waren bereits nach 1.000 Zyklen erste Kornausbrüche sichtbar. Im weiteren Verlauf bildeten sich bei diesem Probekörper um das Zentrum ringförmige Bereiche starken Abtrags und die allgemeine Abrasion der Oberfläche nahm stets zu. Zwischen 2.000 und 3.000 Prüfzyklen war die stärkste Zunahme des Abtrags festzustellen. Nach der Durchführung des Parking Abrasion Tests war der Abtrag in einem größeren Radius um das Zentrum fortgeschritten. Die Abrasion im Zentrum war im Verhältnis zu den umliegenden Bereichen geringer, was darauf zurückzuführen ist, dass die Reibung in diesem Fall geschwindigkeitsabhängig ist und mit zunehmendem Abstand zum Mittelpunkt eine wachsende Relativgeschwindigkeit vorliegt.

Tabelle 31: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems (S1)

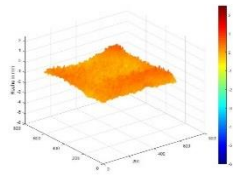
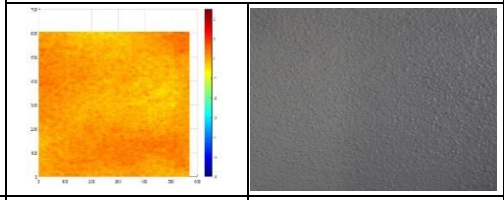
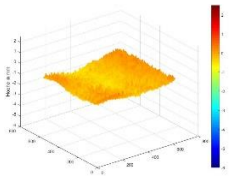
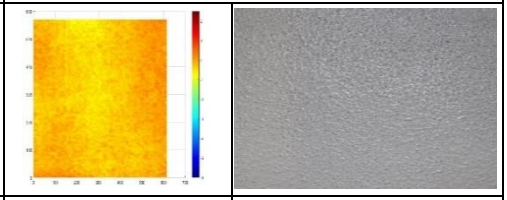
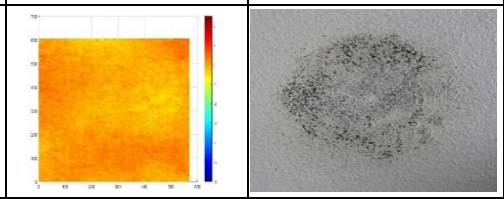
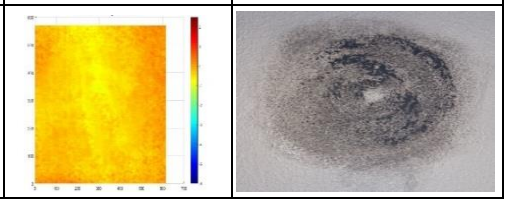
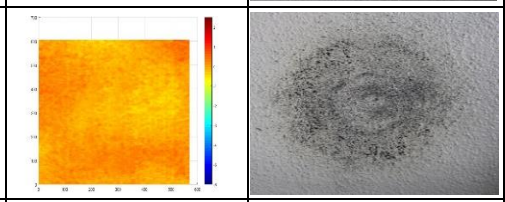
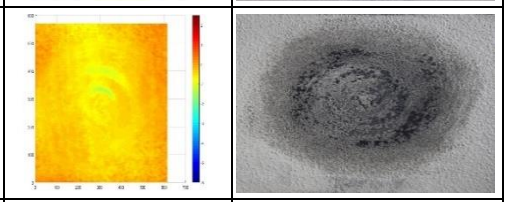
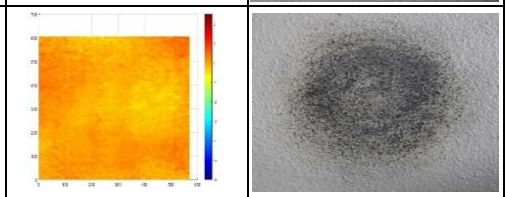
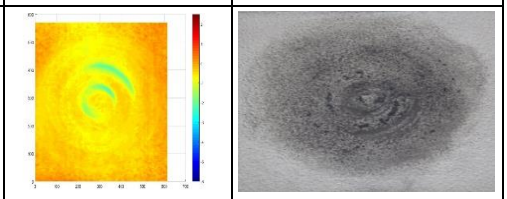
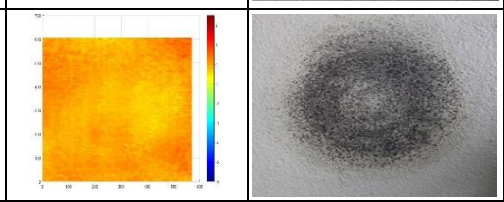
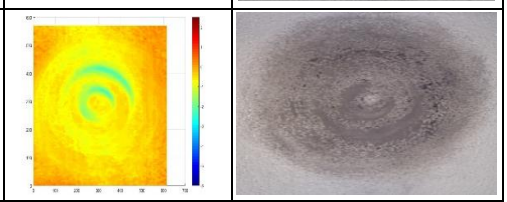
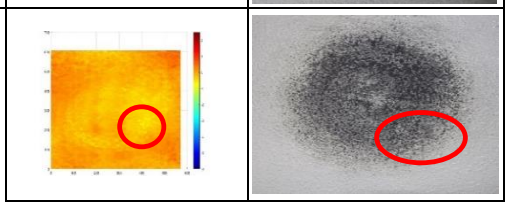
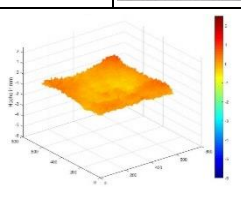
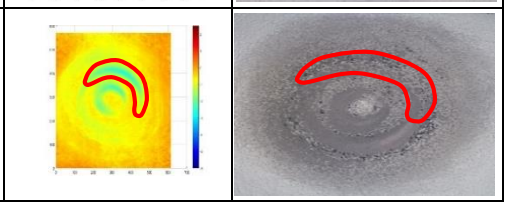
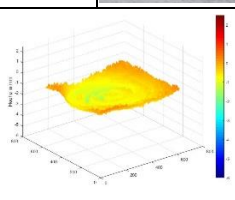
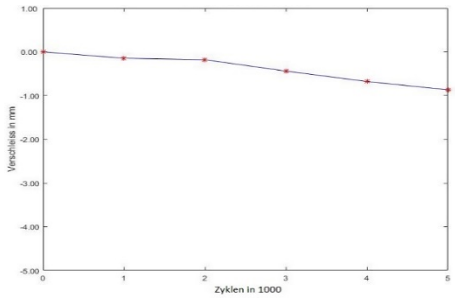
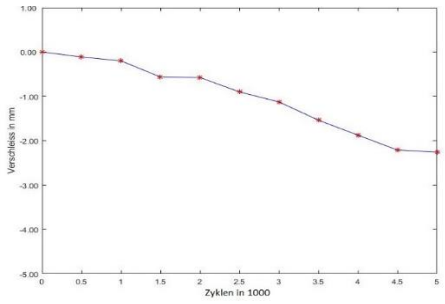
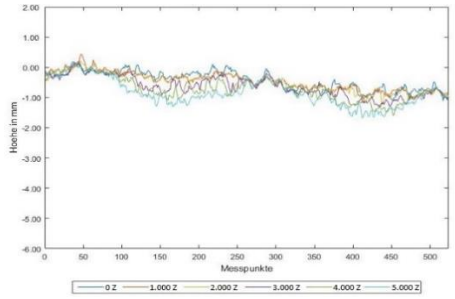
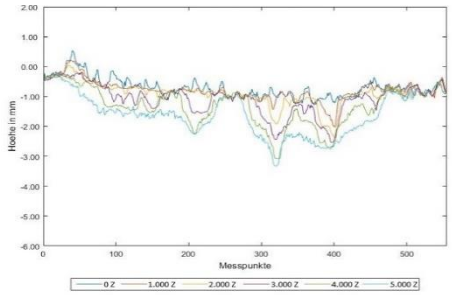
S1 (OS 11a)	ohne Splitt	mit Splitt
Ausgangs-zustand 0 Zyklen	 	 
1.000 Zyklen		
2.000 Zyklen		
3.000 Zyklen		
4.000 Zyklen		
5.000 Zyklen	 	 

Tabelle 32: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der zusätzlichen mechanischen Abrasion des Systems S2 (OS 11b)

S2 (OS 11b)	ohne Splitt	mit Splitt
maximale Verschleiß-tiefe		
Querschnitt in Plattenmitte		

Die Gegenüberstellung der maximalen Verschleißtiefe des Systems S2 mit und ohne Splitt zeigt deutlich (Tabelle 32), dass der Abtrag ohne die Zugabe von Splitt bis zu 2.000 Prüfzyklen sehr gering ausfiel und anschließend auch nur leicht zunahm. Wurde jedoch vor jeden Prüfintervall Splitt auf die Prüffläche aufgebracht, schritt der Abnutzungsprozess deutlich schneller voran. Der Zuwachs des Abtrags war besonders zwischen Zyklus 1.000 und 1.500 sowie ab Zyklus 2.000 deutlich gesteigert, wodurch nach Beendigung der Prüfung durch das Streugut ein deutlich höherer Abtrag gemessen werden konnte.

Die 2D-Visualisierungen und Fotodokumentationen (Tabelle 33) zeigen, dass das OS 11b-System ohne Zugabe von Splitt im Randbereich der Reifenaufstandsfläche erst nach 3.000 Zyklen leichte Materialabträge aufwies. Dieser Prozess setzte sich bis zum Ende der Prüfung fort, wonach ein Abtrag im Randbereich zu erkennen war und die Versiegelung größtenteils abgetragen wurde.

Die Prüffläche, die mit Splitt geprüft wurde, zeigte bereits nach 500 Zyklen abgefahrene Kornspitzen im Zentrum und im weiteren Verlauf wurden die ringförmigen Abtragungen in den Visualisierungen deutlich. Nach 5.000 Zyklen war ein gleichmäßiger Abtrag im Randbereich zu erkennen, der im Vergleich zu der Prüffläche ohne Splitt eine deutlichere Verschleißtiefe aufwies.

Tabelle 33: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems (S2)

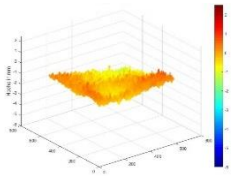
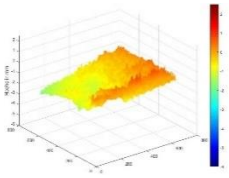
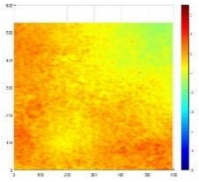
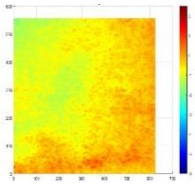
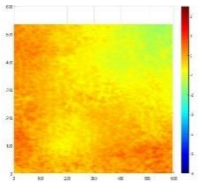
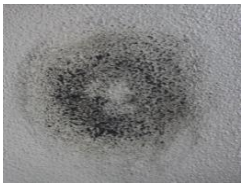
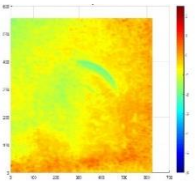
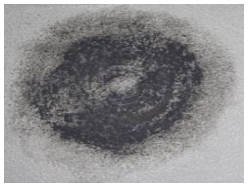
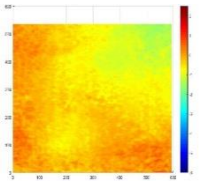
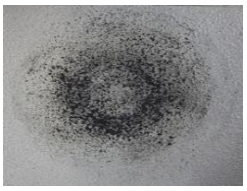
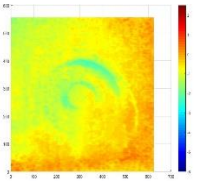
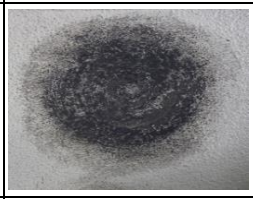
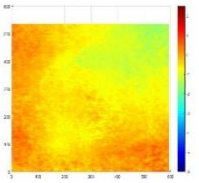
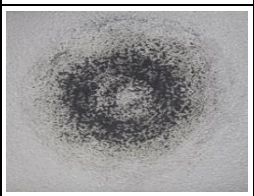
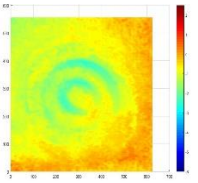
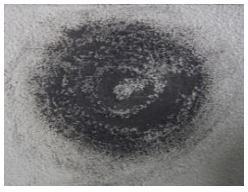
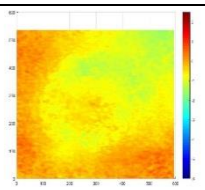
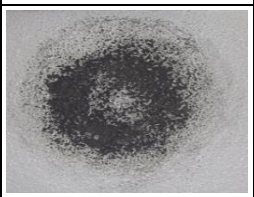
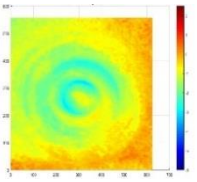
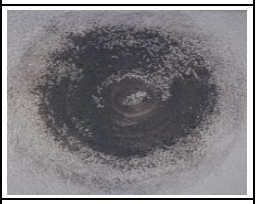
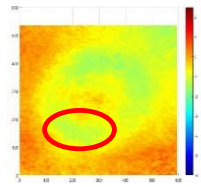
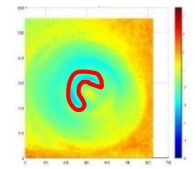
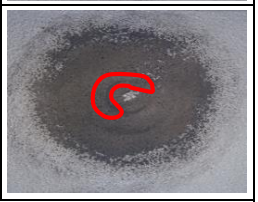
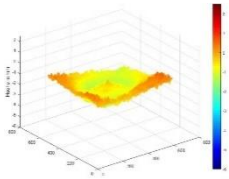
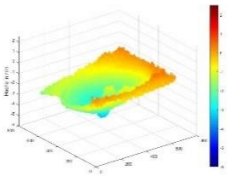
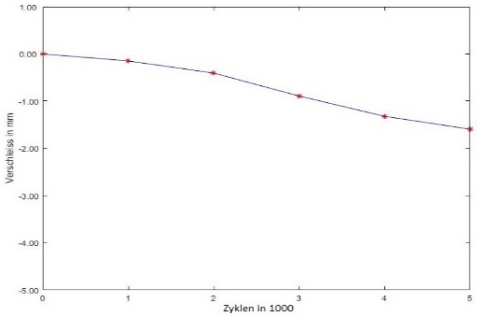
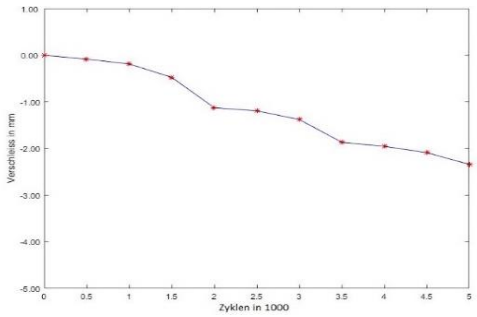
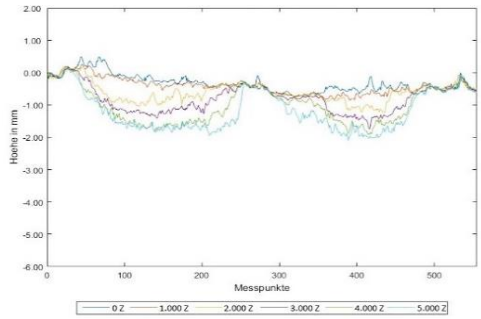
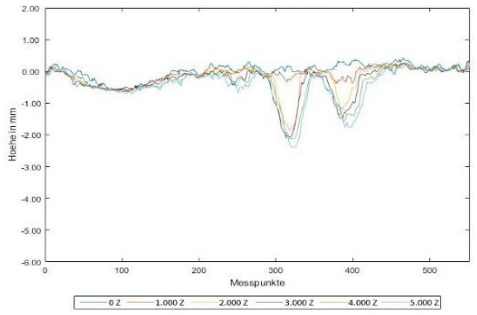
S2 (OS 11b)	ohne Splitt		mit Splitt	
Ausgangs-zustand 0 Zyklen				
				
1.000 Zyklen				
2.000 Zyklen				
3.000 Zyklen				
4.000 Zyklen				
5.000 Zyklen				
				

Tabelle 34: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der zusätzlichen mechanischen Abrasion des Systems S3 (OS 8)

S3 (OS 8)	ohne Splitt	mit Splitt
maximale Verschleiß-tiefe		
Querschnitt in Plattenmitte		

Die Prüffläche des OS 8-Systems, die ohne zusätzliches Streugut geprüft wurde, wies bereits nach 1.000 Zyklen erste Kornausbrüche auf, wobei der Reifenabrieb auf dem System sehr gering war. Die maximale Verschleißtiefe nahm dabei über die Versuchsdauer stetig zu, wobei die Steigung dabei gegen Versuchsende leicht abflachte. Bis zum Ende der Prüfung setzte sich der Materialabtrag in den Randbereichen gleichmäßig fort.

Durch die zusätzliche Abrasion durch Streugut bildeten sich im Prüfverlauf schnell zwei halbkreisförmige Verschleißbereiche aus (Tabelle 35). Erst nach rund 3.000 Prüfzyklen waren auch Kornausbrüche in den Randbereichen zu verzeichnen, der Materialabtrag nahm bis zum Ende der Prüfung zu. Das Zentrum der Prüffläche war in beiden Prüfungen in einem geringen Bereich noch intakt.

Tabelle 35: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 8-Systems (S3)

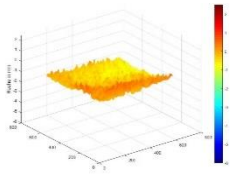
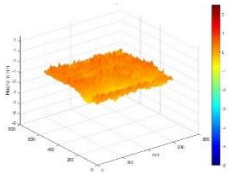
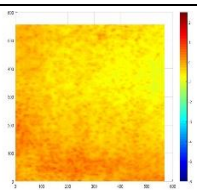
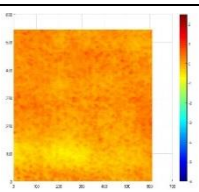
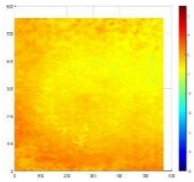
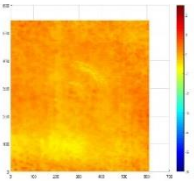
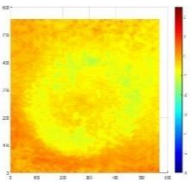
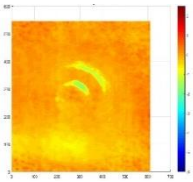
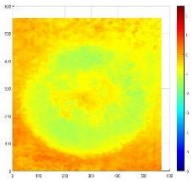
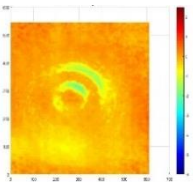
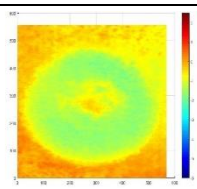
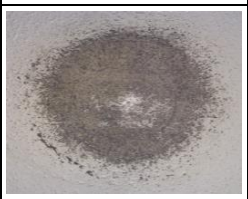
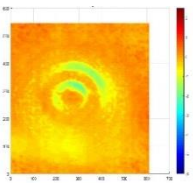
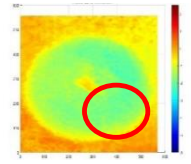
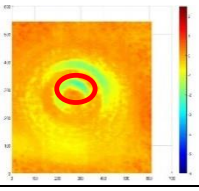
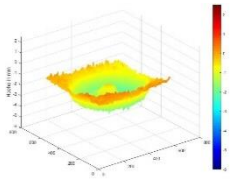
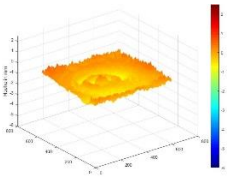
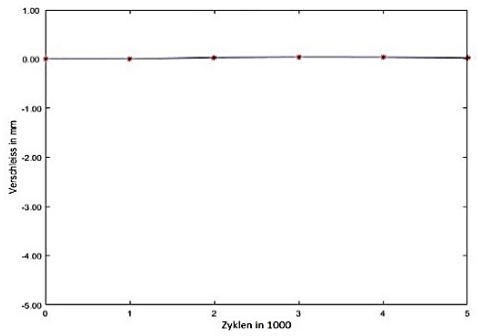
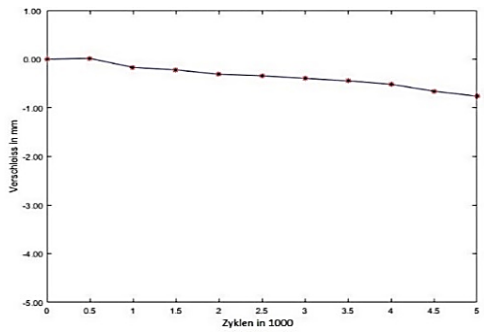
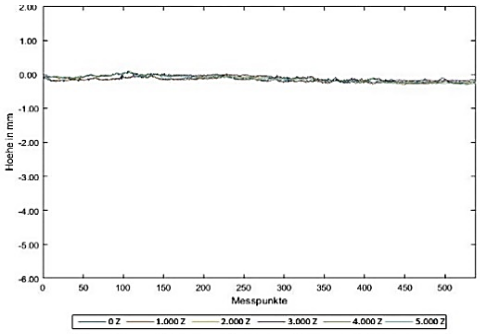
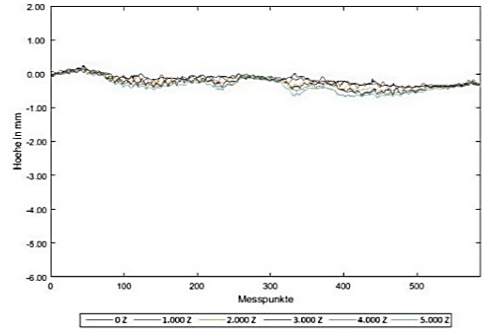
S3 (OS 8)	ohne Splitt		mit Splitt	
Ausgangs-zustand 0 Zyklen				
				
1.000 Zyklen				
2.000 Zyklen				
3.000 Zyklen				
4.000 Zyklen				
5.000 Zyklen				
				

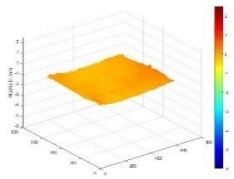
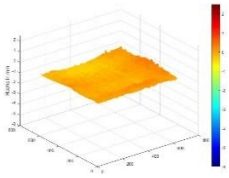
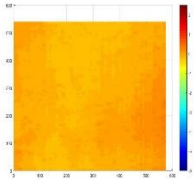
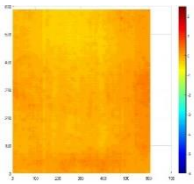
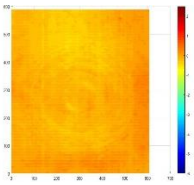
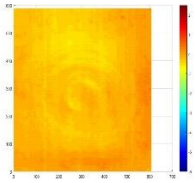
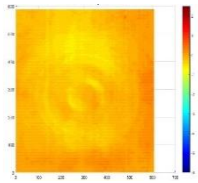
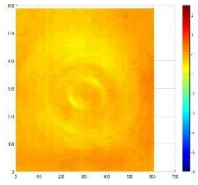
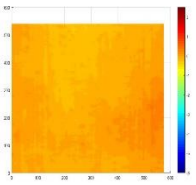
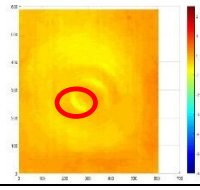
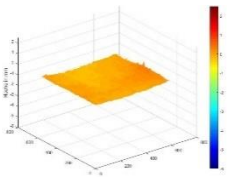
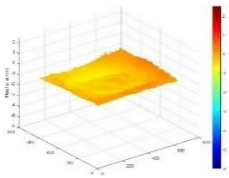
Tabelle 36: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der zusätzlichen mechanischen Abrasion des Systems S4 (OS 8)

S4 (OS 8)	ohne Splitt	mit Splitt
maximale Verschleiß-tiefe		
Querschnitt in Plattenmitte		

Das OS-8 System auf Probekörper S4 (Tabelle 36, Tabelle 37), das ohne zusätzliche Einwirkung von abrasiv wirkendem Streugut geprüft wurde, zeigte nach Versuchsdurchführung nahezu keine Verschleißerscheinungen. Durch Lasermessungen konnte eine maximale Abtragstiefe von 0,02 mm gemessen werden, bei der Messung anhand Bohrkernen konnte jedoch kein Abtrag beobachtet werden. Visuell waren lediglich minimale Kratzspuren zu dokumentieren.

Durch die zusätzliche Beanspruchung durch Splitt nahm die maximale Verschleißtiefe nach 500 Prüfzyklen zu. Im Randbereich um das Zentrum stieg der Abtrag mit fortschreitender Zyklenanzahl bis zu 5.000 Zyklen an, jedoch kam es nicht zu Kornausbrüchen. Dieser Probekörper verdeutlicht durch die unterschiedlichen Versuchsergebnisse den Einfluss zusätzlicher mechanischer Abrasion enorm.

Tabelle 37: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 8-Systems (S4)

S4 (OS 8)	ohne Splitt		mit Splitt	
Ausgangs-zustand 0 Zyklen				
				
1.000 Zyklen				
2.000 Zyklen				
3.000 Zyklen				
4.000 Zyklen				
5.000 Zyklen				
				

3.2.3 Zusammenfassung

Die durch die Versuchsdurchführung gewonnenen Erkenntnisse, die in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben wurden, sind im Folgenden zusammenfassend und erläuternd aufbereitet. Sie wurden in die Teilbereiche Wassersättigung und Splittbeanspruchung des Schwerpunktes 2 untergliedert.

Wassersättigung

Die Ergebnisse sind zusammenfassend in Tabelle 38 aufgelistet.

Tabelle 38: Gegenüberstellung und Einordnung der Ergebnisse

Probekörper	Max. Verschleißtiefe in mm nach 15.000 Zyklen		Verschleißklasse	
	Laborklima	Wassersättigung	Laborklima	Wassersättigung
P1	keine messbare Abrasion	keine messbare Abrasion	VK 1	VK 1
P2	3,5*	3,9	VK 6	VK 6
P3	2,3	2,8	VK 5	VK 6
P4	2,0	keine messbare Abrasion	VK 6	VK 1
P5	keine messbare Abrasion	keine messbare Abrasion	VK 1	VK 1

**Wert aus Querschnitt in Plattenmitte entnommen*

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Probekörper 1 auch unter Wasserbeanspruchung ein verschleißarmes OS 8-System ist. Vereinzelt wurden die Kornspitzen in der Deckversiegelung abgefahren. Dieses System ist in Verschleißklasse 1 einzuordnen.

Bei Probekörper 2, einem OS 11a-System, hingegen wurde ein komplettes Versagen festgestellt, das unter Wasserbeanspruchung noch deutlich früher und schneller einsetzte. Hier lässt sich deutlich der Einfluss der unterschiedlichen Prüfbedingungen feststellen. Aufgrund des Komplettausfalls wurde dieser Probekörper in Verschleißklasse 6 eingruppiert.

Ein ähnliches Bild zeigte sich bei Probekörper 3, einem OS 11b-System. Über 50 % der hwO wurden bei trockener Lagerung nach 15.000 Zyklen abgetragen. Unter Wassersättigung war der Verschleiß nochmals stärker. Bei trockener Lagerung wurde der Probekörper in Verschleißklasse 5 und unter Wassersättigung in Verschleißklasse 6 eingeordnet.

Probekörper 4 und 5 sind OS 13-Systeme. Während Probekörper 4 sich gegensätzlich zu den vorausgenannten Systemen unter Wassersättigung verhielt, konnte bei Probekörper 5 bei beiden

Lagerungsarten kein Verschleiß festgestellt werden und ist deshalb Verschleißklasse 1 zuzuordnen. Probekörper 4 war bei trockener Lagerung verschleißanfälliger als bei Wassersättigung (Verschleißklasse 1). Bei trockener Lagerung musste ein Totalversagen (Verschleißklasse 6) festgestellt werden. Zusätzlich auffällig war, dass der maximale Abtrag auf einen Bereich in Plattenmitte beschränkt war.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass stehendes Wasser auf Oberflächenschutzsystemen sowie eine Wassersättigung des Untergrundes einen deutlichen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit haben kann. Dies ist ein Faktor, der bislang nicht beachtet wurde, aber nicht unberücksichtigt bleiben darf. Ein vermindertes Adhäsionsvermögen zwischen dem Untergrund und der Grundierung kann beispielsweise durch Kapillardrücke und Druckänderungen durch Veränderungen der Wassersättigung hervorgerufen werden [6].

Erwartungsgemäß war das OS 8-System ein sehr verschleißrobustes Beschichtungssystem, ähnlich auch das OS 13-System. Auf die PMMAs hat das Wasser hinsichtlich der Verschleißanfälligkeit einen negativen Einfluss, das geprüfte epoxidharzbasierte Bindemittel zeigte sich weniger anfällig. Die Ausnahme stellte Probekörper 4 dar, an dem die Reifenpartikel sehr gut hafteten und es unter Laborbedingungen zu einem größeren Verschleiß kam. Hier gilt es zu überprüfen, ob die Prüftemperaturen von 50 °C überschritten wurden und das System gegenüber höheren Temperaturen verschleißanfällig ist.

OS 11-Systeme gelten generell als verschleißanfälliger als die starren Systeme, was die in diesem Schwerpunkt untersuchten Oberflächenschutzsysteme bestätigten. Dieser Effekt wird durch eine Wasserbeaufschlagung noch verstärkt, er tritt früher und ausgeprägter ein. Bei beiden geprüften Systemen musste ein vollständiges Versagen festgestellt werden. Polyurethane setzen die schon niedrigere Robustheit gegen Verschleiß herunter. Im Vorfeld durchgeführte Zugversuche an den Materialien bestätigen diese Tatsache, da der Zugmodul unter Wasserbeanspruchung deutlich niedriger ist.

Splittbeanspruchung

Zur Beurteilung des Einflusses von Splitt sind die Restschichtdicken sowie die maximalen Abtragstiefen zusammenfassend und vergleichend in Tabelle 39 aufgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Restschichtdicken der Probekörper mit Splittbeanspruchung um bis zu 2,4 mm von der Schichtdicke im Anfangszustand abweichen, wohingegen die Systeme ohne Splitt eine geringere Differenz von maximal 1,0 mm aufweisen. Durch die an den Bohrkernen beziehungsweise durch Lasermessung bestimmten maximalen Abtragstiefen wird verdeutlicht, dass auch hier die abrasive Wirkung von Splitt einen Abtrag von bis zu 60 % verursacht, wobei durch den Parking Abrasion Test ohne Auftragen von Splitt nur ein Abtrag von maximal 40 % erreicht wurde.

Die maximale Abweichung zwischen den Ergebnissen mit und ohne Splitt wurde an dem starren OS 8-System des Probekörpers S4 nachgewiesen, das erwartungsgemäß ohne Splitt die besten Werte bezüglich der Widerstandsfähigkeit lieferte. Dies verdeutlicht, dass die unter Laborbedingungen ohne zusätzliche mechanische Abrasion durchgeführten Prüfungen beim Eintrag von Streugut große Abweichungen von den in der Realität in den Wintermonaten zu erwartenden Abtragstiefen aufweisen können.

Des Weiteren zeigt die Auswertung der Verschleißkategorie des jeweiligen Probekörpers, dass sich diese durch Splittbeanspruchung um eine bis zwei Kategorien verschlechtert. Bei den OS 11-Systemen und einem der OS 8-Systeme (S4) ist jeweils eine Veränderung von zwei Kategorien zu verzeichnen, bei dem zweiten OS 8-System hat sich die Oberflächenbeschaffenheit nur zur nächst höheren Verschleißklasse verändert. Die Verschleißklassen der verschiedenen Systeme zeigen aber auch ohne Splittbeanspruchung eine Abweichung untereinander, denn das OS 8-System, welches auf Platte S3 aufgebracht wurde, ist der Verschleißklasse 4 zuzuordnen, wobei die übrigen Systeme diese Kategorie nicht oder nur durch die zusätzliche Abrasion durch Streugut erreichen.

Tabelle 39: Gesamtübersicht über die Schichtdicken und Abtragstiefen mit und ohne Splitt nach 5.000 Zyklen

Probekörper	Schichtdicke im Anfangszustand (0 Zyklen) in mm	Restschichtdicke im Endzustand (5.000 Zyklen) in mm	Maximale Abtragstiefe A_{BK} in mm	Maximale Abtragstiefe A_L in mm	Verschleißklasse
S1	5,0	4,5	0,5 (10 %)	0,6 (12 %)	VK 2
S1 mit Splitt	5,0	3,0	2,0 (40 %)	2,1 (42 %)	VK 4
S2	4,5	4,0	0,5 (11 %)	0,9 (19 %)	VK 2
S2 mit Splitt	4,5	2,5	2,0 (44 %)	2,2 (50 %)	VK 4
S3	4,0	3,0	1,0 (25 %)	1,6 (40 %)	VK 4
S3 mit Splitt	4,0	1,6	2,4 (60 %)	2,3 (59 %)	VK 5
S4	1,6	1,6	0,0 (0 %)	0,0 (0 %)	VK 1
S4 mit Splitt	1,6	0,9	0,7 (44 %)	0,8 (48 %)	VK 3

Der Volumenabtrag, welcher in Abbildung 10 grafisch dargestellt ist, ist ebenfalls eine heranzuziehende Kenngröße bei der Beurteilung der Auswirkungen mechanischer Abrasion auf Oberflächenschutzsysteme. Erwartungsgemäß übersteigt der Abtrag der Probekörper, auf die Splitt aufgebracht wurde, den Verschleiß derer ohne Streugut (ausgenommen S3) und nimmt fortlaufend zu, wobei die negativ aufgetragenen Werte auf anhaftende Reifenrückstände zurückzuführen sind. Das unerwartete Verschleißverhalten der Platte S3 ist zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht abschließend geklärt. Eine besonders deutliche Differenz zwischen den beiden Prüfbedingungen

ist bei Probekörper S2, auf welchen ein OS 11b-System aufgebracht wurde, ab 2.000 Prüfzyklen zu beobachten.

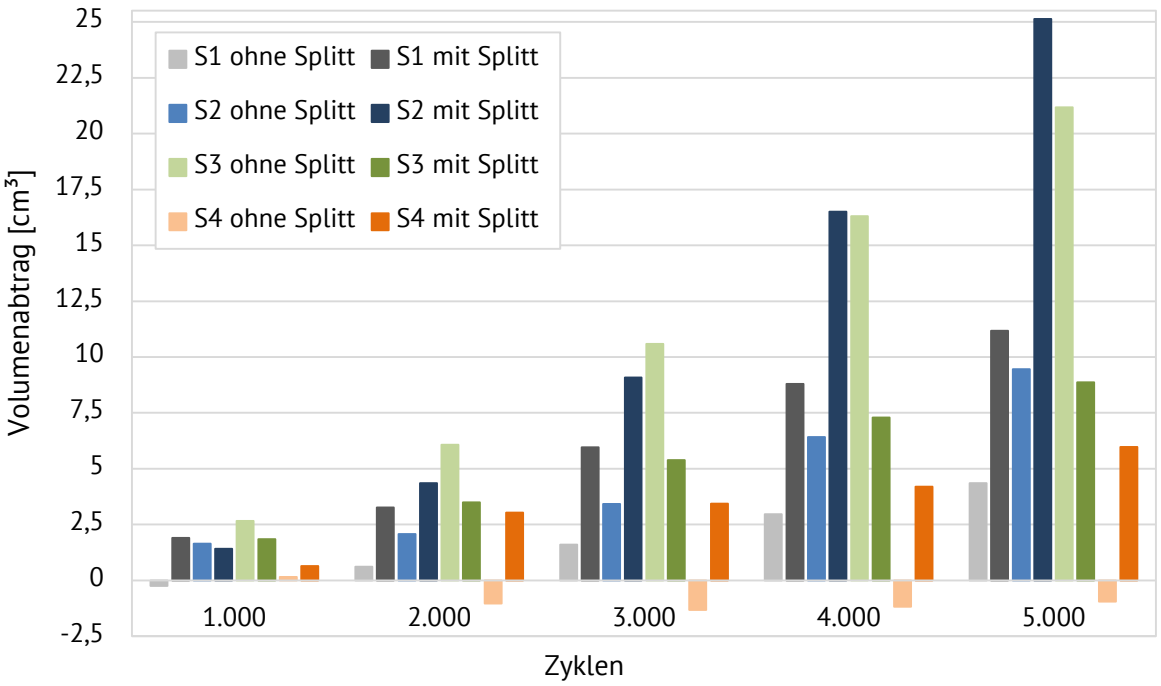


Abbildung 10: Volumenabtrag (cm³) der Systeme jeweils mit und ohne Splitt

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Aufbringen von Splitt den Verschleißvorgang teilweise soweit verstärkt, dass es zu einer Verdoppelung des Volumenabtrages kommt. Die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und die Verschleißbeständigkeit sind in der Realität also deutlich höher, als es aufgrund der Prüfergebnisse unter Laborbedingungen anzunehmen ist. Das Eintragen von Streugut durch Fahrzeuge auf befahrene Beschichtungssysteme in den Wintermonaten wirkt sich negativ auf die Oberflächenbeschaffenheit aus, weshalb durch regelmäßige Reinigung der negativen Entwicklung entgegengewirkt werden soll.

3.3 Schwerpunkt 3

3.3.1 Allgemeines

In Schwerpunkt 3 sollen, unter Einbezug der in Schwerpunkt 1 und Schwerpunkt 2 gewonnenen Erkenntnisse, Maßnahmen aufgezeigt und diskutiert werden, die die Auswirkungen umweltbedingter Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit und Verschleißbeständigkeit von Oberflächenschutzsystemen reduzieren können. Im folgenden Kapitel wird erneut zwischen der Applikations- und Nutzungsphase unterschieden, um die Maßnahmen optimal an die Einwirkungsmechanismen anzupassen.

3.3.2 Maßnahmen während der Applikation

Die vorangegangenen Untersuchungsreihen haben gezeigt, dass vor allem niedrige Temperaturen, Temperaturdifferenzen und Oberflächenfeuchte während der Applikationsphase Auswirkungen auf die Adhäsion der Schichten untereinander und daraus resultierend auch auf die Verschleißfestigkeit haben.

Durch Tauwasserausfall auf den zu beschichtenden Bauteiloberflächen kommt es, je nach chemischer Basis der Beschichtungskomponente, zu porigen Strukturen, Blasenbildung innerhalb des Materials und einem verminderten Schichtverbund. Daraus folgt, wie die Ergebnisse der Versuchsreihe zeigten, eine deutliche Herabsenkung der Dauerhaftigkeit und Verschleißbeständigkeit. Oberflächenschutzsysteme die bei der PAT-Prüfung nach Referenzlagerung die Verschleißklasse 1 erreichten, mussten durch die herbeigeführte Feuchteeinwirkung in Verschleißklasse 6 eingestuft werden. Um dieser Reaktion von auf zweikomponentigen Polyurethanbindemitteln basierenden Systemen entgegenzuwirken, gibt es mehrere Möglichkeiten.

Zum einen sollte die im Produktdatenblatt angegebene maximale Untergrundfeuchte eingehalten werden, weshalb diese vor dem Beginn des jeweiligen Beschichtungsschrittes zu bestimmen ist. Die Bestimmung der Untergrundfeuchte kann entweder über die in DIN 18560-4 [7] geregelte Calciumcarbid-Methode, woraufhin die Ergebnisse mit den Anforderungen der Produktdatenblätter abgeglichen werden können, oder zur Prüfung der Oberflächenfeuchte mittels digitaler Feuchtemessgeräte erfolgen.

Des Weiteren sollte bei der Planung der Baumaßnahme die Restfeuchte des Betons, der als Untergrund dient, je nach Beschichtungszeitpunkt einkalkuliert werden. Ist der Untergrund noch zu feucht, kann es durch diffusionsdichte Beschichtungen zu Blasenbildung und einer verminderten Haftung kommen. Ein weiterer wichtiger Punkt im Planungsprozess ist der zeitliche Verlauf der Beschichtung. Da die Oberflächenschutzsysteme aus mehreren Schichten bestehen, die unter-

schiedliche minimale als auch maximale Aushärtezeiten haben, kann die Applikation eines kompletten Oberflächenschutzsystems über mehrere Tage bis circa eine Woche andauern. Innerhalb dieser Zeit ist besonders bei frei bewitterten Flächen das Risiko von Niederschlägen oder Tauwasserbildung aufgrund von Temperaturdifferenzen sehr groß. Dieses Risiko sollte vorab je nach Wetterlage bewertet und gegebenenfalls Schutzmaßnahmen gegen den Niederschlag getroffen oder eine Beschichtung zu einem späteren Zeitpunkt in Betracht gezogen werden.

Besondere Vorsicht gilt auch in den Jahreszeiten, in denen die Temperaturen sinken. Denn nicht nur die aus Temperaturdifferenzen resultierende Tauwasserbildung kann dem aufgebrachten Oberflächenschutzsystem schaden, sondern auch die niedrigen Kerntemperaturen bei bereits etwas erwärmter Oberflächentemperatur. Die Restriktionen der Produktdatenblätter beziehen sich nämlich nur auf die Luft- und Oberflächentemperatur. Kühlt ein Bauteil jedoch stark ab und erwärmt sich beispielsweise am Morgen bei zunehmenden Lufttemperaturen, ist die Oberfläche möglicherweise schon so warm, dass die Vorgaben eingehalten sind, die Kerntemperatur des Bauteils ist aber noch deutlich niedriger. Infolge der Erwärmung des gesamten Bauteils kann sich nun enthaltene Luft ausdehnen, was zu Schäden am bereits applizierten Beschichtungssystem führen kann. Durch das Ausdehnen der Luft wird die Adhäsion zwischen der Grundierung und dem Betonuntergrund geschwächt, es kann also bei späterer mechanischer Beanspruchung zu Abplatzungen kommen.

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand der Prüfreihe war die Einwirkung von UV-Strahlung auf die einzelnen Schichten des frisch applizierten Systems. Bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit durch die Messergebnisse des Parking Abrasion Tests konnten keine nennenswerten Veränderungen im Vergleich zu dem Referenzsystem ohne zusätzliche UV-Einwirkung festgestellt werden. Die visuelle Untersuchung zwischen den Beschichtungsschritten zeigte jedoch optische Abweichungen zu den Referenzschichten an nicht abgestreuten Oberflächen. Aus diesem Grund wird empfohlen, dass vor allem nicht abgestreute Schichten während der Aushärtezeit durch Abschirmung vor UV-Strahlung geschützt werden, um optische Abweichungen zu verhindern. Ist eine Abschirmung nicht möglich, besteht die Möglichkeit durch gezielte Produktauswahl auf UV-beständige Bindemittelkomponenten zurückzugreifen. Dies hat im Falle der Deckversiegelung, die UV-beständig und pigmentiert war, im durchgeführten Versuch sehr gut funktioniert, denn auch nach der gezielten UV-Strahlen-Einwirkung konnten keine optischen Abweichungen dokumentiert werden

Im Allgemeinen sollte durch konkrete Planung vor dem Beschichtungsprozess abgewogen werden, welche Bindemittelkomponenten bei welchen zum entsprechenden Zeitpunkt zu erwartenden Umwelteinflüssen zu verwenden sind, um die Dauerhaftigkeit des Systems langfristig zu gewährleisten.

3.3.3 Maßnahmen während der Nutzung

In der durchgeführten labortechnischen Untersuchungsreihe wurden mehrere umweltbedingte Einflussfaktoren untersucht, die während der Nutzungsphase Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von Oberflächenschutzsystemen haben. In besonderem Umfang wurde auf die Auswirkungen von auf den Oberflächen anstehendem Wasser bei mechanischer Beanspruchung sowie auf den Eintrag von Streugut eingegangen.

Durch die zusätzliche Belastung von Feuchtigkeit auf dem Oberflächenschutzsystem vor als auch während des Parking Abrasion Tests über 15.000 Prüfzyklen, erhöhte sich insbesondere bei den OS 11-Systemen der Volumenabtrag deutlich. Anstehender Feuchte sollte deshalb konstruktiv durch geneigte Flächen, Abläufe, ebene Flächen (Vermeidung von Pfützenbildung) entgegengewirkt werden. Selbst Parkflächen welche nicht frei bewittert sind, sind durch das in den Radkästen der Fahrzeuge befindliche Wasser(Schnee) nicht vor einem Feuchteeintrag geschützt, sodass in jedem Fall Maßnahmen ergriffen werden müssen, dass das eingetragene Wasser abgeleitet werden kann.

Neben dem Wasser wird, vor allem in den Wintermonaten, ebenfalls eine nicht zu vernachlässigende Menge an Streugut in Form von Splitt oder ähnlichem in Parkbauten eingetragen. Durch das Streugut verändert sich das vorliegende tribologische System, denn zu dem Grundkörper (Untergrund) und dem Gegenkörper (PKW-Reifen) kommt der dazwischenliegende Zwischenstoff (Streugut) hinzu, der verschleißfördernd wirkt. Dies hat sich ebenfalls in den im Forschungsprojekt durchgeführten Versuchsreihen gezeigt, in denen der zusätzlich aufgebrachte Splitt teilweise zu einer Verdoppelung des Volumenabtrags geführt hatte.

Da der Eintrag von Zwischenstoffen durch Fahrzeuge nicht vermieden werden kann, sollte die Parkfläche in regelmäßigen Abständen (verstärkt in den Wintermonaten) gereinigt werden. Dabei sollten neben eingetragenem Splitt auch Chloridablagerungen, welche aus eingetragenen Tausalzen resultieren, entfernt werden, da diese das Oberflächenschutzsystem zusätzlich zu der mechanischen und physikalischen Belastung chemisch beanspruchen.

Da es trotz Einhaltung aller Schutzmaßnahmen bei der Nutzung der Parkfläche und der daraus resultierenden mechanischen Beanspruchung der Oberflächenschutzsysteme zu stellenweise erhöhtem Materialabtrag kommen kann, müssen die Systeme instandgesetzt werden, sobald sie ihre Schutzfunktion nicht mehr ausreichend erfüllen können. Um Fehlstellen und Materialermüdungen frühzeitig zu lokalisieren und beheben zu können, sind regelmäßige Wartungstermine sehr wichtig für die Dauerhaftigkeit des gesamten Systems. Auch wenn die Instandsetzung von Oberflächenschutzsystemen nicht immer möglich ist und mit einem hohen Aufwand verbunden ist, ist eine frühzeitige Gegenmaßnahme sehr wichtig.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass zur Reduzierung der umweltbedingten Einflüsse während der Nutzung von Oberflächenschutzsystemen einige Maßnahmen getroffen werden können. Da die Einwirkungen wie z. B. der Eintrag von Wasser und abrasiv wirkendem Streugut nicht ausgeschlossen werden kann, sollten grundsätzlich die Dauer, in der die Parkfläche den eingetragenen Stoffen ausgesetzt ist, reduziert werden (Abläufe für Wasser, Entfernung des Streuguts durch Reinigung) und regelmäßig geprüft werden, ob Fehlstellen im System vorliegen. Ist durch besondere Begebenheiten (Lage, Nutzungsintensität) schon bei der Planung mit einer erhöhten umweltbedingten Einwirkung zu rechnen, kann schon vorweg die Systemauswahl so gesteuert werden, dass Bindemittelzusammensetzungen und Schichtaufbauten gewählt werden, die in den durchgeführten Versuchsreihen weniger anfällig auf die zusätzlichen Einwirkungen reagiert haben.

4. Zusammenfassung

Die Dauerhaftigkeit von Bauteilen und Bauprodukten gewinnt – beispielsweise im Hinblick auf Ressourcenschonung (niedrigerer Produktverbrauch durch seltenere Instandsetzung) oder Profitoptimierung (keine Nutzungsausfälle während der Instandsetzung) – zunehmend an Bedeutung. Oberflächenschutzsysteme werden häufig in Parkbauten verwendet, um die Konstruktion dauerhaft vor eindringenden Medien zu schützen, die den Beton und den Stahl der Konstruktion angreifen und diese dadurch nachhaltig schädigen. Genügen diese unter Laborprüfbedingungen den standardisierten Anforderungen und weisen in der Praxis dennoch Mängel auf, müssen Lösungsansätze gefunden werden, wie die Praxisbedingungen bereits in labortechnischen Untersuchungsreihen implementiert werden können.

Das vorliegende Forschungsprojekt verfolgte das Ziel, die umweltbedingten Einwirkungen auf Oberflächenschutzsysteme während der Applikations- als auch Nutzungsphase zu untersuchen und Maßnahmen zu benennen, wie die Auswirkungen reduziert werden können. Die im Untersuchungsschwerpunkt 1 durchgeführten Prüfungen sollen belegen, inwieweit die während des Beschichtungsprozesses unvermeidbaren bzw. häufig auftretenden Umwelteinwirkungen einen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit von befahrenen Oberflächenschutzsystemen haben. Neben dem Einfluss von UV-Strahlung und der darin begründeten Nachvernetzung wurde zusätzlich durch PAT-Prüfungen der Einfluss von Feuchte (Ansammlung von Tauwasser) während der Applikation untersucht.

Die labortechnischen Untersuchungen belegen, dass durch Oberflächenfeuchte und Temperaturdifferenzen das Systemgefüge der einzelnen Schichten der Oberflächenschutzsysteme sichtbar und messbar geschädigt wurde. Die aus den Einwirkungen resultierende Blasenbildung war bereits nach dem Aushärten einzelner Schichten deutlich zu erkennen. Dies hat sich auch in den Ergebnissen des Parking Abrasion Test widergespiegelt. Die Prüfplatten, bei denen durch verschiedene Lagerungsvarianten ein Tauwasserausfall auf der Oberfläche erzielt wurde, zeigten je nach Oberflächenschutzsystem deutlich höhere Volumenabträge, als es bei den Referenzplatten der Fall war (ausgenommen OS 8-System). Die Oberflächenschutzsysteme waren teilweise schon nach 100 Prüfzyklen bis auf die Grundierung abgetragen und die Störungen des Adhäsionsvermögens wurden durch fehlenden Schichtverbund sichtbar.

Die UV-Einwirkungen auf den Schichtoberflächen wirkten sich durch einen geringfügig gesteigerten Materialabtrag gegenüber der Referenzmessung aus. Die Einflüsse wurden eher visuell dokumentiert, denn die nicht abgestreute Oberfläche der Dichtungsschicht zeigte deutliche Verfärbungen im Bereich der auftreffenden UV-Strahlung.

Die Versuchsreihen von Schwerpunkt 2 zielten darauf ab, die Einwirkungen umweltbedingter Einflüsse auf die verschiedenen Oberflächenschutzsysteme während der Nutzungsphase zu untersuchen. Die geprüften Aspekte waren zum einen die Simulation von anstehendem Wasser auf der Oberfläche und zum anderen der Eintrag von abrasiv wirkendem Streugut.

Die vorhergehende Wassersättigung und die Wasserlagerung während des Parking Abrasion Tests zeigten an einigen Oberflächenschutzsystemen deutliche Herabsetzungen der Verschleißfestigkeit. Auch wenn bei dem starren OS 8-System keine Auswirkung aufgrund der Wasserlagerung visuell als auch durch laserbasierte Messungen festgestellt werden konnte, zeigten sich die in Schwerpunkt 2 verwendeten OS 11-Systeme als sehr anfällig.

Die zusätzliche Beanspruchung durch eingetragenen Splitt auf der Oberfläche des Beschichtungssystems zeigte sich bei allen Systemen sehr deutlich. Bei einigen Oberflächenschutzsystemen kam es zu einer Verdoppelung des Materialabtrags im Vergleich zu der Messung der Referenz ohne Splitt. Die Notwendigkeit der Versuchsreihe zeigte sich besonders deutlich an den Ergebnissen des OS 8-System, welches ohne zusätzliche mechanische Beanspruchung die besten Ergebnisse der geprüften Systeme erzielte und durch den Eintrag von Splitt zwei Verschleißklassen höher einzuordnen war. Dies verdeutlicht, dass die labortechnischen Versuchsreihen oftmals zu guten Ergebnissen führen, jedoch nicht ausreichend praxisnah sind. Diese Ergebnisse wurden in Schwerpunkt 3 genutzt, um Maßnahmen aufzuzeigen, die während der Applikations- als auch Nutzungsphase die Auswirkungen der umweltbedingten Einflüsse auf die Oberflächenschutzsysteme reduzieren.

Abschließend ist festzustellen, dass die Versuchsreihen dieses Forschungsprojekts die Bedeutung der differenzierten Betrachtung von Laborprüfungsergebnissen und dem Materialverhalten in der praktischen Anwendung verdeutlichen. Die untersuchten umweltbedingten Einflüsse haben je nach chemischer Basis der Bindemittelzusammensetzung und Auswahl des Oberflächenschutzsystems eine nicht zu vernachlässigende Auswirkung auf die Verschleißbeständigkeit und Dauerhaftigkeit der Produkte, die in den labortechnischen Prüfungen der Systeme zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht beachtet werden. Durch gezielte Produktauswahl, konkrete Planung und Einhaltung der aufgezeigten Maßnahmen während der Applikations- als auch Nutzungsdauer kann das Oberflächenschutzsystem zielgerichteter seinen Zweck erfüllen und die Konstruktion länger vor schädigenden, eindringenden Medien schützen.

Literatur

[1] Breit, W. ; Ladner, E.-M. ; Krams, J.: Nachweis der Verschleißbeständigkeit von Parkhausbeschichtungssystemen unter realitätsnahen Prüfbedingungen: BBR-Endbericht. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl., 2015.

[2] Breit, W. ; Ladner, E.-M.: Dauerhaftigkeit von rissüberbrückungsfähigen Beschichtungssystemen unter realitätsnaher Beanspruchung: Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2017.

[3] DAfStb - Richtlinie "Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen (Instandsetzungs-Richtlinie)", Ausgabe Oktober 2001, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

[4] Neroth, G. ; Vollenschaar, D.: Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz. 27. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011.

[5] Raupach, M. ; Orlowsky, J.: Erhaltung von Betonbauwerken: Baustoffe und ihre Eigenschaften. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2008.

[6] Wolff, L. ; Raupach, M. ; Hailu, K.: Ursachen der Blasenbildung bei Reaktionsharzbeschichtungen auf Beton – Welche Rolle spielt die Osmose? In: Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 7, S. 439–449.

[7] DIN 18560-4: 2012-06 *Estriche im Bauwesen - Teil 4: Estriche auf Trennschicht*.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der drei Probekörper zur Prüfung des Einflusses von Feuchte während der Applikation (hier: vor der Grundierung, mit herbeigeführtem Tauwasserausfall); Probekörper 1: Referenzlagerung bei Raumklima; Probekörper 2: Lagerung bei – 5 °C/Raumklima; Probekörper 3: Lagerung bei -5 °C/ 10 °C / 80 % r. F. 11

Abbildung 2: Aufbau der Prüfung der UV-Bestrahlung von OS 11a- und OS 11b-Systemen ... 23

Abbildung 3: OS 11a-System nach der UV-Bestrahlung der Dichtungsschicht (links) und der Deckversiegelung (rechts) 24

Abbildung 4: Volumenabtrag [cm^3] der OS 11a- und OS 11b-Systeme verschiedener Lagerungsbedingungen in einem Bereich von 100 bis 350 Prüfzyklen 27

Abbildung 5: Volumenabtrag [cm^3] der OS 8-, OS 11a- und OS 11b-Systeme verschiedener Lagerungsbedingungen in einem Bereich von 5.000 bis 15.000 Prüfzyklen 28

Abbildung 6: Starker Materialabtrag sowie stellenweise Adhäsionsverlust zwischen den Schichten des OS 11a- (links) und OS 11b-Systems (rechts) bei einer Lagerung bei -10 °C / 10 °C / 80 % r. F. 29

Abbildung 7: PAT-Prüfung; Links: unter Laborklima (trocken); Rechts: unter Wassersättigung 32

Abbildung 8: Mikroskopische Aufnahmen des Systems P3 unter Laborklima; Links: 0-Zustand; Rechts: nach 15.000 Zyklen 38

Abbildung 9: Mikroskopische Aufnahmen des Systems P5 unter Laborklima; Links: 0-Zustand; Rechts: nach 15.000 Zyklen 40

Abbildung 10: Volumenabtrag (cm^3) der Systeme jeweils mit und ohne Splitt 54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifizierung der Oberflächen nach der Verschleißbeanspruchung [2] 9

Tabelle 2: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des Systems zwischen den Applikationsschritten des OS 8-Systems 12

Tabelle 3: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 8-Systems 13

Tabelle 4: Übersicht über die Beschichtungsschritte des OS 11a-Systems bei verschiedenen Lagerungsbedingungen 14

Tabelle 5: Verschleißtiefenentwicklung und Querschnitt in Plattenmitte in Abhängigkeit von der Lagerung des OS 11a-Systems 16

Tabelle 6: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems, Lagerungsvariante Raumklima 17

Tabelle 7: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems, Lagerungsvariante – 10 °C / Raumklima 17

Tabelle 8: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems, Lagerungsvariante -10 °C / 10 °C / 80 % r. F. 18

Tabelle 9: Übersicht über die Versiegelung des OS 11b-Systems bei verschiedenen Lagerungsbedingungen 19

Tabelle 10: Verschleißtiefenentwicklung und Querschnitt in Plattenmitte in Abhängigkeit von der Lagerung des OS 11b-Systems 20

Tabelle 11: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems, Lagerungsvariante Raumklima 20

Tabelle 12: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems an drei Messstellen, Lagerungsvariante -10 °C / Raumklima 21

Tabelle 13: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems an zwei Messstellen, Lagerungsvariante -10 °C / 10 °C / 80 % r. F. 22

Tabelle 14: Verschleißtiefenentwicklung und Querschnitt in Plattenmitte des OS 11a-Systems im Raumklima und bei UV-Bestrahlung 24

Tabelle 15: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems mit zusätzlicher UV-Bestrahlung 25

Tabelle 16: Verschleißtiefenentwicklung und Querschnitt in Plattenmitte des OS 11b-Systems im Raumklima und bei UV-Bestrahlung 26

Tabelle 17: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems mit zusätzlicher UV-Bestrahlung 26

Tabelle 18: In Schwerpunkt 2 untersuchte OS-Systeme 31

Tabelle 19: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des Systems P1 (OS 8) 32

Tabelle 20: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 8-Systems (P1) 33

Tabelle 21: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des Systems P2 (OS 11a) 34

Tabelle 22: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems (P2) 35

Tabelle 23: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des Systems P3 (OS 11b) 36

Tabelle 24: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems (P3) 37

Tabelle 25: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des Systems P4 (OS 13) 38

Tabelle 26: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 13-Systems (P4) 39

Tabelle 27: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der Lagerung des P5 (OS 13) 40

Tabelle 28: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 13-Systems (P5) 41

Tabelle 29: Überblick über die Ermittlung der Splittmenge 42

Tabelle 30: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der zusätzlichen mechanischen Abrasion des Systems S1 (OS 11a) 43

Tabelle 31: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11a-Systems (S1) 44

Tabelle 32: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der zusätzlichen mechanischen Abrasion des Systems S2 (OS 11b) 45

Tabelle 33: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 11b-Systems (S2) 46

Tabelle 34: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der zusätzlichen mechanischen Abrasion des Systems S3 (OS 8) 47

Tabelle 35: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 8-Systems (S3) 48

Tabelle 36: Verschleißtiefen in Abhängigkeit von der zusätzlichen mechanischen Abrasion des Systems S4 (OS 8) 49

Tabelle 37: Optische Darstellung der Ergebnisse der PAT-Prüfung des OS 8-Systems (S4) 50

Tabelle 38: Gegenüberstellung und Einordnung der Ergebnisse 51

Tabelle 39: Gesamtübersicht über die Schichtdicken und Abtragstiefen mit und ohne Splitt nach 5.000 Zyklen 53