

Abschlussbericht

Verbesserung des Hagelwiderstandes von Holzbeschichtungen durch eine Verstärkung mit nanofibrillierter Cellulose

Projektleitung:
Dipl. Ing. Tina Künninger
Empa, Abteilung Angewandte Holzforschung

Empa Dübendorf, Dezember 2018

| | |
|--|-----------|
| ZUSAMMENFASSUNG | 4 |
| 1 RAHMENBEDINGUNGEN | 6 |
| 2 AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG | 8 |
| 2.1 EINFÜHRUNG | 8 |
| 2.2 BEDEUTUNG FÜR INDUSTRIE UND FORSCHUNG | 9 |
| 2.3 ZIEL | 10 |
| 3 LITERATUR | 11 |
| 3.1 DEFINITIONEN | 11 |
| 3.2 HAGELEREIGNISSE IN DER SCHWEIZ | 12 |
| 3.3 HAGELWIDERSTAND VON HOLZ UND HOLZBESCHICHTUNGEN | 14 |
| 4 MATERIAL | 16 |
| 4.1 ZELLSTOFF FÜR NFC-GEWINNUNG | 16 |
| 4.2 BESCHICHTUNGEN | 16 |
| 4.3 HOLZ | 16 |
| 5 METHODEN UND ERGEBNISSE | 17 |
| 5.1 HERSTELLUNG DER NFC SUSPENSION | 17 |
| 5.2 CHARAKTERISIERUNG DER NFC SUSPENSION | 18 |
| 5.2.1 VISKOSITÄT | 18 |
| 5.2.2 RASTERELEKTRONEN MIKROSKOPIE (REM) | 20 |
| 5.3 BEREITSTELLUNG DER BESCHICHTUNGEN MIT NFC | 21 |
| 5.4 CHARAKTERISIERUNG DER BESCHICHTUNG MIT UND OHNE NFC | 22 |
| 5.4.1 VISKOSITÄT | 22 |
| 5.4.2 RASTERELEKTRONEN MIKROSKOPIE (REM) | 25 |
| 5.5 CHARAKTERISIERUNG FREIER ANSTRICHFILME | 27 |
| 5.5.1 ZUGFESTIGKEIT | 28 |
| 5.5.2 RASTERELEKTRONEN MIKROSKOPIE (REM) AN BRUCHFLÄCHEN DER FREIEN FILME | 33 |
| 5.5.3 SCHLAGZUGZÄHIGKEIT | 36 |
| 5.5.4 DYNAMISCHE MECHANISCHE ANALYSE (DMA) | 40 |
| 5.6 BEREITSTELLUNG UND CHARAKTERISIERUNG DER BESCHICHTETEN HOLZPROBEN FÜR HAGELVERSUCHE | 55 |
| 5.6.1 KÜNSTLICHE VORBEWITTERUNG | 55 |
| 5.6.2 BESTIMMUNG TROCKENSCHICHTDICKE | 56 |
| 5.6.3 WASSERDURCHLÄSSIGKEIT DER BESCHICHTUNG | 57 |
| 5.7 HAGELVERSUCHE | 59 |
| 5.7.1 HERSTELLUNG DER EISKUGELN | 60 |
| 5.7.2 BEHAGELN DER BESCHICHTETEN HOLZPROBEN | 60 |
| 5.7.3 VISUELLE BEURTEILUNG DER SCHADENSBILDER | 62 |
| 5.7.4 BEURTEILUNG DER WASSERDICHTHEIT | 70 |
| 5.8 VARIATIONEN HAGELVERSUCHE | 74 |
| 5.8.1 EINFLUSS VON FEUCHTE UND TEMPERATUR | 74 |
| 5.8.2 EINFLUSS DER SCHICHTDICKE | 75 |
| 5.8.3 VERHALTEN VON SÄGERAUEN OBERFLÄCHEN | 76 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 5.9 | FREIBEWITTERUNG DER HAGELPROBEN | 79 |
| 6 | <u>WICHTIGSTE ERKENNTNISSE</u> | 86 |
| 7 | <u>LITERATUR</u> | 89 |

Zusammenfassung

Für die Untersuchungen wurden vier auf unterschiedlichen Bindemitteln basierende, wasserverdünnbare, weiss pigmentierte Beschichtungen für Holz im Aussenbereich ausgewählt. Wichtige Eigenschaften der Beschichtungssysteme, verstärkt mit 0%, 2.5%, 3.5% und 5% nanofibrillierter Cellulose (NFC), wurden im flüssigen Zustand und als freie Filme charakterisiert. Anschliessend wurden die auf gehobelte Fichtenlamellen aufgebrachten Beschichtungen im Neuzustand und im vorbewitterten Zustand mit Eiskugeln (\varnothing 20 mm) beschossen, um Hagel zu simulieren. Es wurden zwei Hagelintensitäten gewählt, wobei die höhere den Anforderungen der Hagelwiderstandsklasse 2 entsprach. Die Einschlagstellen wurden direkt nach dem Hagelbeschuss, nach 28 Tagen und nach 9 Monaten Freibewitterung bezüglich Schädigungen wie Dellen, Risse usw. untersucht, dokumentiert und bewertet.

Während sich die vier Beschichtungen bezüglich der im quasistatischen Zugversuch ermittelten Zähigkeiten und Steifigkeiten deutlich unterschieden, waren die Schlagzugzähigkeiten, ermittelt im Schlagpendelversuch sehr ähnlich. Durch die Zugabe von NFC, als auch durch die künstliche Alterung im QUV wurden alle Beschichtungen steifer und vor allem spröder. Das viskoelastische Verhalten der Originalbeschichtungen mit Alkyd-basierten Bindemitteln (Beschichtung C und D) war im relevanten Temperaturbereich (um 20°C) ähnlich, während sich die Beschichtung (A) basierend auf PU/Acrylat etwas elastischer und weniger steif verhielt. Das reine Acrylat (Beschichtung B) dagegen zeigte ein höheres Dämpfungsvermögen. Die Verstärkung der Beschichtungen mit NFC führte dazu, dass das Material mehr Energie speichern konnte ($E' \uparrow$), was wiederum als Triebfeder für die Rückdeformation wirkt. Das Dämpfungsvermögen des NFC-verstärkten Materials dagegen war reduziert ($\tan \delta \downarrow$), es wurde somit elastischer. Dies zeigten auch die Relaxationsversuche. NFC führte zu einer Erhöhung des Relaxationsmoduls, das heisst das NFC-Netzwerk schränke Relaxationsvorgänge wie plastische Verformungen ein. Bei 1% Dehnung traten an Beschichtung A und D bereits irreversible Deformationen auf, während sich Beschichtungen B und C lediglich reversibel verformten. Das Rückverformungsverhalten nach Entlastung wurde, abhängig von der Beschichtung, durch die Zugabe von NFC teilweise positiv aber teilweise auch negativ beeinflusst. Kühlere Temperaturen um 10°C führten zu einer schnelleren und vollständigeren Rückverformung. Durch Alterung dagegen verlangsamte sich die Rückverformungsgeschwindigkeit.

Die Behagelung, auch mit sehr geringer kinetischer Energie, führte an allen Proben zu Schäden in der Beschichtung in Form von Dellen, Haarrissen, grösseren Rissen und Abplatzungen. Es konnten deutliche Unterschiede an neuwertigen und vorbewitterten Oberflächen festgestellt werden. Während an neuwertigen Oberflächen nur relativ geringe Eindrucktiefen an den Ein-

schlagstellen der Eiskugeln gemessen wurden, waren diese Dellen an den vorbewitterten Proben wesentlich tiefer. Bei sehr geringen Schussgeschwindigkeiten korrelierten die gemessenen Eindrucktiefen mit der Intensität der entstandenen Risse. Bei grösseren Schussgeschwindigkeiten kam es generell zu stärkeren Rissen, unabhängig von der gemessenen Eindrucktiefe. NFC konnte an den vorbewitterten Proben zur Reduktion der maximalen Eindrucktiefe und zu einer geringeren Intensität der Risse beitragen.

Nach 9 monatiger Freibewitterung waren 99% aller Hagelschläge deutlich durch Risse und den darin entstandenen Bewuchs mit Mikroorganismen sichtbar. Keine der getesteten Varianten erfüllte die Anforderungen an die Hagelwiderstandsklasse 2.

Beschichtung B zeigte nach einem Jahr Freibewitterung, mit lediglich ganz begrenzten Rissen an den Hageleinschlagspunkten, die beste Performance. Dabei waren die Hagelschäden an der Beschichtungsvariante mit 5% NFC deutlich weniger sichtbar als an der Originalbeschichtung. Die Beschichtungen A und D waren nach einem Jahr Freibewitterung aufgrund von genereller Rissbildung als auch aufgrund von Folgerissen durch den Hagel (Risse ausgehend von den Hageleinschlägen) in einem renovationsbedürftigen Zustand. Beschichtung C zeigte ebenfalls, ausgehend von den Hagelschlägen, erste Folgeschäden in Form von Längsrissen. Während an Beschichtung A und D durch den Einsatz von NFC die Rissbildung deutlich reduziert wurde, konnte an Beschichtung C zum jetzigen Zeitpunkt kein Unterschied zwischen den Varianten ohne und mit NFC festgestellt werden.

Die zur Einschätzung des Hagelwiderstandes übliche visuelle Beurteilung der Proben aus 50 cm und 5 m Abstand reichte für eine korrekte Einschätzung der Hagelwiderstandsklasse nicht aus. In diesem Projekt wurden bis zu 73% der Risse, welche unter dem Mikroskop sichtbar waren, im Abstand von 50 cm nicht erkannt. Es kam somit während der visuellen Beurteilung (ohne Hilfsmittel wie z.B. Lupe) zu teilweise groben Fehleinschätzungen. Selbst die Bewertung der Schäden unter dem Mikroskop (10-fach) war unzureichend, wie sich nach der Freibewitterung zeigte. Auch an Stellen, die unter dem Mikroskop lediglich als Dellen ohne Risse wahrgenommen wurden, zeigten sich nach der Freibewitterung die typischen Rissbilder.

Ebenfalls ist eine ausschliessliche Bewertung von neuwertigen Oberflächen nicht zielführend, da sich gealterte Oberflächen unterschiedlich verhalten. Für eine realistische Beurteilung der Hagelwiderstandsklasse müssten gegebenenfalls gealterte Oberflächen getestet werden, bzw. an den Hageltest sollte sich zusätzlich eine Freibewitterung anschliessen.

1 Rahmenbedingungen

Das Projekt „Verbesserung des Hagelwiderstandes von Holzbeschichtungen durch eine Verstärkung mit nanofibrillierter Cellulose“ wurde vom Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung finanziell unterstützt (Projektnummer 2016.01).

Das Projekt wurde im Zeitraum September 2016 bis Dezember 2018 an der Empa bearbeitet. Für eine praxisnahe Umsetzung des Themas konnte der Industriepartner Bosshard + Co. AG gewonnen und ins Projekt eingebunden werden.

Zusammenstellung der durchgeführten Arbeiten

Die im Folgenden aufgeführten Arbeiten sind durchgeführt worden:

- Literaturrecherche über Hagelversuche an Beschichtungen
- Herstellung und qualitative Charakterisierung nanofibrillierter Cellulose (NFC)
 - Rheologische Eigenschaften
 - Mikroskopie
- Charakterisierung der konventionellen Beschichtungen
 - Feststoffgehalt
 - Rheologische Eigenschaften
- Modifizierung der konventionellen Beschichtungen mit NFC
 - Einröhren der NFC in die Beschichtungen
 - Rheologische Eigenschaften
- Untersuchung an konventionellen und NFC verstärkten Beschichtungen (unbewitterte und 1 Monat künstlich bewitterte freie Filme)
 - Mechanische Eigenschaften (Zugversuch)
 - Viskoelastisches Verhalten (DMA)
 - Relaxationsverhalten (DMA)
- Untersuchung an konventionellen und NFC verstärkten Beschichtungen auf Fichtenholz
 - Hagelwiderstand
 - Künstliche und natürliche Bewitterung

Beteiligte Personen an der Empa und beim Industriepartner Bosshard + Co. AG

2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

2.1 Einführung

Holz ist seit vielen Jahrhunderten ein beliebtes Baumaterial für diverse Teile der Gebäudehülle. Zur Gewährleistung von Funktionalität und langer Dauerhaftigkeit als auch aufgrund ästhetischer Ansprüche werden in der Regel Fenster und Türen, aber auch Bauteile wie beispielsweise Fassaden mit Beschichtungen versehen.

Diese Bauteile sind aufgrund ihrer Lage in der Gebäudehülle mechanischen Einflüssen wie Hagelschlag unterschiedlich stark ausgesetzt. Gerade die heute beliebte Bauweise ohne schützende Vordächer führt dazu, dass Fassaden, aber auch beispielsweise Fensterrahmen und Flügel direkt bewittert werden und im Fall eines Hagelsturms stark beansprucht und gegebenenfalls beschädigt werden. Es besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen Materialtyp und Hagelwiderstand. Im Synthesebericht der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen aus dem Jahre 2007 (Stucki and Egli 2007) wird explizit erwähnt, dass der vermehrte Einsatz von Holz nicht zu einer erhöhten Verletzbarkeit der Gebäudehülle führte. Allerdings zeigt die derzeitige Zuordnung von Holz im aktuellen Hagelregister die bestehende Problematik. Naturbelassene Hobelware als auch Holz mit einer Hydrophobierung bzw. Dünnschichtlasur (Schichtdicke < 30 µm) sind in die Hagelwiderstandsklasse HW 3 (HW 1 = sehr schwacher Hagelwiderstand; HW 5 = sehr hoher Hagelwiderstand) eingeordnet. Mit einer Dickschichtlasur oder einem Lack (Schichtdicke > 30 µm) beschichtete Hölzer sind aufgrund ihrer schlechten Performance jedoch bisher NICHT klassifiziert! Hier muss im Gegensatz zu den unbehandelten oder mit Dünnschichtlasur beschichteten Hölzern nach dem Behageln nicht nur das Aussehen bewertet, sondern auch die Wasserdichtheit geprüft werden.

Selbst Mikroschädigungen wie Dellen und kleine Risse, die bei der Beurteilung des Aussehens keine Rolle spielen, können bei der Beurteilung der Wasserdichtheit problematisch sein. Mögliche Folgeschäden durch eintretende Feuchtigkeit machen somit eine Renovation notwendig. So wird beschichtetes Holz (Schichtdicke > 30 µm) neben Materialien wie Metallblech oder Metallhohlprofil zu den Materialien gezählt, welche relativ schnell eine Schädigung durch Hagel erfahren und somit durch die Versicherungen als problematisch eingestuft werden.

2.2 Bedeutung für Industrie und Forschung

Seit den 90er-Jahren stellen die 19 Kantonale Gebäudeversicherungen (KGV) in der Schweiz einen deutlichen Anstieg der Schäden durch Hagel fest. Während in der Periode 1961 bis 1991 die durch Hagel hervorgerufenen Schäden eine Grösse von 15 Millionen bis maximal 60 Millionen CHF pro Jahr erreichten, ist die Grenze von 60 Millionen CHF zwischen 1992 und 2006 insgesamt acht Mal überschritten worden. 2005 überstiegen die Hagelschäden in der Schweiz die 140-Millionen-CHF-Grenze (www.hagelregister.ch).

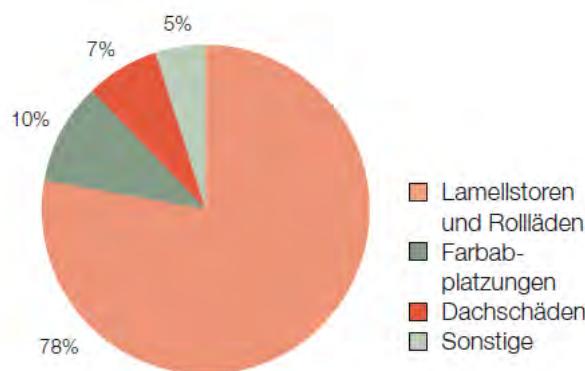


Abbildung 1 Prozentualer Anteil der Schäden an 80 Wohngebäuden im Kanton Zürich; verursacht durch den Hagelzug am 8. Juli 2004 (Stucki and Egli 2007)

Obwohl an Storen und Rollläden mengen- und auch kostenmässig der weitaus grösste Anteil der Schäden an der Gebäudehülle anfällt, werden auch beschichtete Holzbauteile immer wieder als kritisch genannt (fällt unter Farbabplatzungen in Abbildung 1). Empfehlungen der Gebäudeversicherer besagen, mindestens Materialien der HW 3 in der Gebäudehülle zu verwenden. Diese HW 3 werden derzeit von Hobelwaren mit filmbildender Beschichtung > 30µm, wie Fenster und Fassaden, nicht erreicht.

Eine Verbesserung des Hagelwiderstands von Holzbeschichtungen (auf Hobelware) wäre für die Praxis wichtig, damit gegenüber Planern, Bauherren als auch Gebäudeversicherern der Einsatz dieser Bauteile in der Gebäudehülle, auch in Hagelrisikogebieten als weniger bis nicht problematisch eingestuft werden könnte. Der Einsatz von Holzbeschichtungen mit erhöhtem Hagelwiderstand würde dazu beitragen, das positive Image von Holz als Baustoff zu stärken und somit den Holzabsatz in der Schweiz langfristig zu sichern.

Aus Sicht der Forschung hat dieses Projekt für den Bereich Holzbeschichtungen mit NFC Pilotcharakter. Der Einsatz von NFC als funktionalisierende Komponente in Holzbeschichtungen zur Verbesserung des Hagelwiderstandes wurde bisher nicht untersucht. Die Erkenntnisse die-

ses Projektes sind neu und bilden eine wichtige Basis für die Optimierung von Holzbeschichtungen.

2.3 Ziel

Ziel des Projektes war es, durch den Einsatz von nanofibrillierter Cellulose (NFC) als 'Armierung' den Hagelwiderstand von pigmentierten Holzbeschichtungen (Schichtdicke > 30 µm) zu verbessern.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen einer Verbesserung der Witterungsbeständigkeit von Beschichtungen und der damit verbundenen Sicherstellung der Dauerhaftigkeit entsprechender Holzbauteile sowie der Nachhaltigkeit des Holzbau dienen.

Die Ziele im Detail waren:

1. Auswahl von 4 Beschichtungen basierend auf verschiedenen Bindemittelsystemen
2. Charakterisierung der viskoelastischen Eigenschaften der Beschichtungen mit und ohne NFC
Messung der viskoelastischen Eigenschaften und des Relaxationsverhaltens an freien Anstrichfilmen unter verschiedenen klimatischen Bedingungen (Temperatur und Relativer Luftfeuchtigkeit)
3. Vergleich des Hagelwiderstandes der Beschichtungen mit und ohne NFC
Messung des Hagelwiderstandes bei Variation diverser Testparameter (NFC-Konzentration in der Beschichtung, Schichtdicke, Oberflächentemperatur und Feuchte; Durchmesser der Eiskugeln, Schussgeschwindigkeit).
Beurteilung der Kategorie ‚Aussehen‘ inklusive Vermessung der Druckstellen sofort und nach 28 Tagen
Beurteilung der Kategorie ‚Wasserdichtheit‘
4. Beurteilung der Folgeschäden
Natürliche Bewitterung der behagelten Oberflächen für maximal 1 Jahr inklusive Dokumentation der Folgeschäden.
5. Vorschläge für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis

Dieses Forschungsprojekt soll das nötige Wissen über den Einfluss von NFC in Beschichtungssystemen auf deren Hagelwiderstand bereitstellen und somit die Basis für eine Umsetzung erfolgversprechender Ergebnisse in die Praxis liefern.

3 Literatur

3.1 Definitionen

Als **Hagel** bezeichnet man einen Niederschlag, der aus Eisklumpen grösser 0,5 cm besteht und überwiegend in der warmen Jahreszeit auftritt.

Hagelbildung steht immer im Zusammenhang mit Gewitterwolken und sehr heftigen Turbulenzen (Abbildung 2). In entstehenden Gewitterwolken kondensiert der Wasserdampf der aufsteigenden Luft je nach Temperaturbedingungen zu Wassertröpfchen oder Eiskörnern. Sie werden mit dem Aufwind aufwärts befördert. Grössere Wassertröpfchen oder Hagelkörner können nur bei sehr starkem Aufwind von den Luftmassen in der Schwebe gehalten oder aufwärts getrieben werden. Deshalb entstehen durchschnittlich nur in jedem zehnten Gewitter Hagelkörner.

Beim Aufwärtstransport lagert sich unterkühltes Wasser an die kleinen Hagelkörner an (Koagulation) und gefriert zu einer Eisschicht. Ein Hagelkorn kann so bis auf Durchmesser von über 10 cm wachsen (Quelle: www.planat.ch/de/wissen/hagel/entstehung).

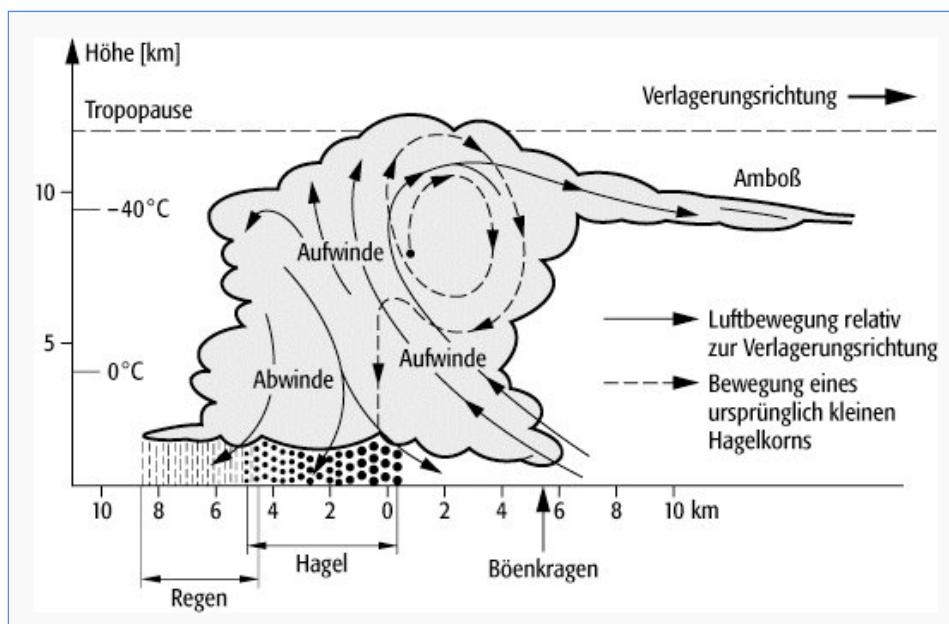


Abbildung 2 Vertikalschnitt durch eine Gewitterwolke mit Hagelbildung
(Quelle: Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg)

Das Aussehen eines Hagelkorns ist vom Wachstumsprozess abhängig (siehe Abbildung 3). Eingeschlossene Luftblasen im Hagelkorn geben ihm ein trübes Aussehen. Bei Eishagel sind die Schichten des Hagelkorns dagegen klar, da keine Luft eingeschlossen ist.



Abbildung 3 Hagelkörner mit verschiedenen Formen (www.rheintalwetter.ch)

Erst wenn das Hagelkorn so gross ist, dass es nicht mehr vom Aufwind gehalten werden kann, fällt es zur Erde. Das beim Fallen schmelzende Hagelkorn trifft bei genügend grossem Durchmesser (über 1 cm) und nicht zu hohen Umgebungstemperaturen als Eis auf der Erde auf. Ein Hagelkorn von beispielsweise 3 cm Durchmesser erreicht dabei eine Geschwindigkeit von 90 km/h (Quelle: www.planat.ch/de/wissen/hagel/entstehung).

Zusätzlich zu Gewicht und Grösse der Hagelkörner ist die Form mit entscheidend für die verursachten Schäden. So können selbst kleinere Hagelkörner mit scharfen Kanten und Spitzen enorme Schäden verursachen.

3.2 Hagelereignisse in der Schweiz

Einen sehr guten Überblick über Sturmereignisse inklusive Hagelereignisse in der Schweiz bietet die Internetseite des **Sturmarchiv Schweiz - Swiss Severe Weather Database (SSWD)** (www.sturmarchiv.ch).

Hier werden Hagelereignisse in der Schweiz statistisch erfasst. Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Hagelereignisse des Jahres 2016 für die gesamte Schweiz.

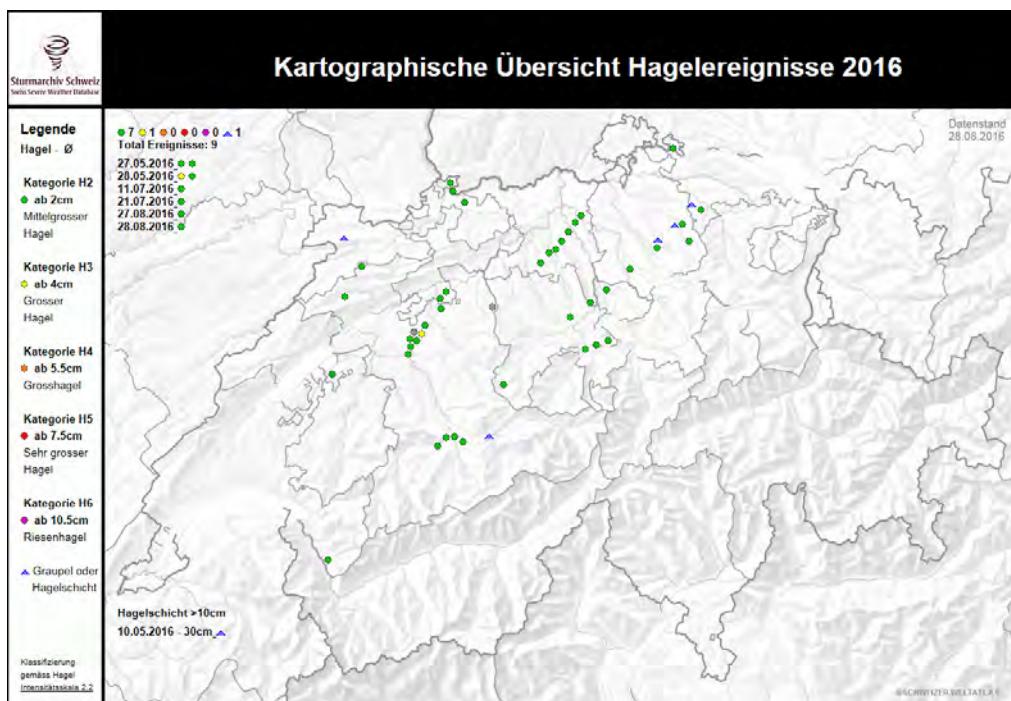


Abbildung 4 Hagelereignisse in der Schweiz für das Jahr 2016

Die Schadenstatistik des VKF (Vereinigung kantonaler Feuerversicherungen) dagegen gibt Auskunft darüber, welchen finanziellen Schaden die jährlichen Naturereignisse verursachten. Die aktuellen Statistiken zeigen, dass fast die Hälfte der Elementarschäden an Gebäuden auf Hagelereignisse zurückzuführen ist (Abbildung 5).

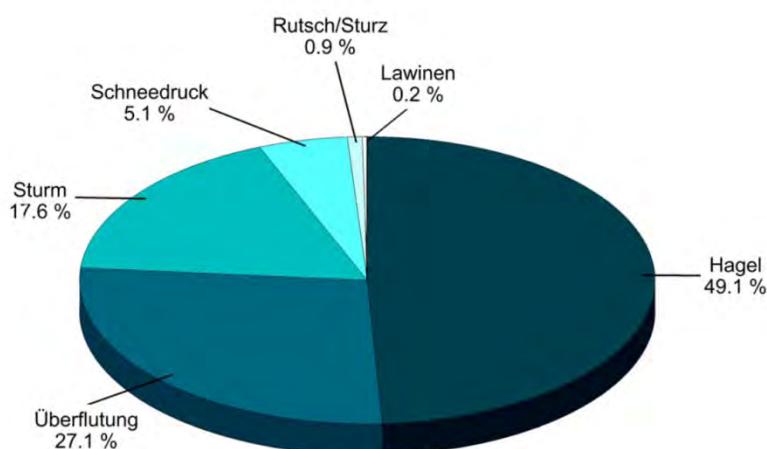
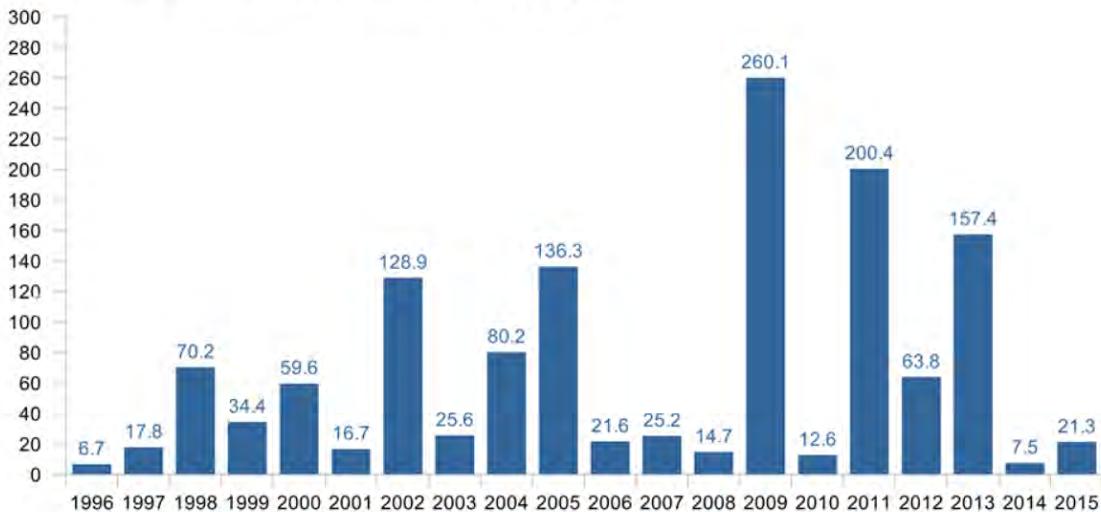


Abbildung 5 Verteilung von Elementarschäden an Gebäuden in der Schweiz
 (Quelle: Schadenstatistik VKF)

Die jährlichen Schadenssummen unterscheiden sich dabei von Jahr zu Jahr enorm (siehe Abbildung 6).

Hagel

Elementarschäden an Gebäuden in Mio. CHF (nicht der Teuerung angepasst)



Quelle: Schadenstatistik VKF / Source: Statistique des dommages AEA

Abbildung 6 Elementarschäden an Gebäuden in Mio CHF

Ursachen für diese Unterschiede in den Schadensummen sind neben anderen Kriterien die Häufigkeit der Hagelereignisse, aber vor allem auch die Grösse, Form und Härte der niedergegangenen Hagelkörner.

Seit 2008 führt die VKF das sogenannte Hagelregister (www.praever.ch). In diesem Register sind Baumaterialien entsprechend ihres Hagelwiderstands charakterisiert. Weitere Informationen hierzu sind in (Flüeler, Lateltin et al. 2008) aufgeführt.

3.3 Hagelwiderstand von Holz und Holzbeschichtungen

Seit längerem gibt es Bestrebungen, Schäden durch Hagel an Holzbauteilen zu reduzieren.

Bemühungen wurden zum einen in die Früherkennung von Hagelschäden unternommen. Ziel eines Forschungsprojektes in Österreich war es beispielsweise, mit Hilfe sogenannter 'Wartungsindikatoren', welche an die Holzaußbauteile angebracht werden, eine deutlich erkennbare Signalwirkung zu erhalten, um somit rechtzeitig Renovationsschritte einleiten zu können (Grüll and Spitaler 2001). Der Hagelschlagindikator auf Basis eines farbstoffgefüllten Reservoirs zeigte jedoch sowohl in Kugelfallversuchen als auch bei einem natürlichen Hagelschlag an einem Standort in der Steiermark eine zu geringe Empfindlichkeit und konnte mit den zur Verfügung stehenden Materialien nicht mehr mit höherer Empfindlichkeit hergestellt werden. Bei einem anderen Lösungsansatz kommt ein Hagelindikator auf Basis einer spröden Beschichtung zum Einsatz. Ob diese Methode bereits den Weg in die Praxis gefunden hat, ist uns nicht bekannt.

Im Forschungsprojekt 'Hagelwiderstand von Holzfassaden' wurden umfangreiche Untersuchungen an unbeschichteten Holzfassaden, sowie an Lamellen mit Dünnschichtlasur durchgeführt (Richter, Risi et al. 2009). Aus diesem Projekt resultierten Erkenntnisse zum Verhalten verschiedener Holzoberflächen unter Hagelbeschuss. Es standen vor allem die Methodik Entwicklung zur Beurteilung von Hagelschäden auf Holzfassaden und die Einordnung der untersuchten Oberflächen in die bestehenden Hagelwiderstandsklassen im Vordergrund. Lösungsansätze zur Verbesserung des Hagelwiderstandes der Beschichtungen wurden in diesem Projekt nicht erarbeitet, jedoch als notwendig erwähnt.

Zeitgleich zum hier erarbeiteten Forschungsprojekt läuft ein Projekt an der Holzforschung Austria, das sich mit der Hagelbeständigkeit von Holzbeschichtungen beschäftigt. Der Hagelwiderstand von 18 Beschichtungen wurde auf Pappelholz, und teilweise auf Fichte, Lärche und Eiche getestet. Erste Ergebnisse zeigen, dass keine der getesteten Beschichtungen die Hagelwiderstandsklasse 2 erreichte (Grüll, Ecker et al. 2016).

4 Material

4.1 Zellstoff für NFC-Gewinnung

Als Ausgangsmaterial wurde der Kraftzellstoff TCF der Firma Zellstoff Stendal (www.zellstoff-stendal.de) verwendet. Es handelt sich dabei um chlorfrei gebleichten Zellstoff aus Nadelholz (Kiefer und Fichte) mit einem Anteil von 81% Zellulose, 14% Hemizellulose und einem Restligningehalt von 1.5%.

4.2 Beschichtungen

Für die Untersuchungen wurden vier verschiedene wasserverdünnbare, weiss pigmentierte Beschichtungen für Holz im Aussenbereich ausgewählt. Sie stellen Testformulierungen dar, die das Projekt möglichst breit abstützen sollen und so auch am Markt verfügbar sind:

- **Beschichtung A** ist eine wasserverdünnbare Zwischen- und Schlussbeschichtung auf PU/Acrylharzbasis für qualitativ hochwertige Beschichtungen im Innen- und Aussenbereich, speziell auf masshaltigen Bauteilen wie Holzfenster und Türen.
- **Beschichtung B** ist eine wasserverdünnbare Spezialfarbe auf Acrylatbasis für Aussen- und Innenanstriche auf Holz, wie Schindelfassaden, Holzhäuser, Plus-Minus-Schalungen, Riegel, Garagentore, Dachuntersichten sowie für andere Holzteile. (Aufgrund geringer Blockfestigkeit nicht geeignet für Fenster und Rollläden).
- **Beschichtung C** ist eine wasserverdünnbare, haftstarke, hochwertige PU-Hybrid-Haftemaille (wasseremulgierter PU-Alkydharz) für Aussenanstriche auf masshaltigem und bedingt masshaltigem Holz, und ist speziell geeignet für Fenster.
- **Beschichtung D** ist ein wasserverdünbarer Seidenglanzlack (Alkyd-emulsion) für Innen- und Aussenanstriche auf grundiertem Holz.

4.3 Holz

Als Ausgangsmaterial für den Zuschnitt der Probenbretter wurde Schweizer Fichtenholz (Blockware) bester Qualität verwendet. Das Material wurde in unserer Schreinerei zu 3 bis 4 m langen Lamellen zugeschnitten (halbrift), auf eine Dicke von 20 mm gehobelt und anschließend konditioniert (20°C/ 65 % RH).

Für ausgewählte Versuche wurden zusätzlich industriell geschnittene Fassadentäfer (sägerau Feinschnitt) zugekauft. Beim weiteren Zuschnitt wurde darauf geachtet, dass die Proben möglichst astfrei sind und die Jahrringstellung halbrift entspricht.

5 Methoden und Ergebnisse

5.1 Herstellung der NFC Suspension

Die Kraftzellulose wurde in einem Mahlwerk zerkleinert (Supermasscolloider MKZA 10-20J CE, Masuko Sangyo Co. Ltd., Japan), um die Zellulosefasern möglichst gut voneinander zu separieren und zu kürzen (Abbildung 7). Dafür wurde eine 2 % (w/w) Suspension des Zellstoffes in deionisiertem Wasser angemischt und mit einem Mixer gut verrührt. Anschliessend wurde die Suspension für 4 Tage bei 10°C und unter ständigem Rühren gelagert, um ein Quellen des Zellstoffes zu ermöglichen.

Die so vorbereitete Suspension wurde anschliessend im Mahlwerk zerkleinert (10 Durchgänge). Je nach Viskosität wurde die Suspension nach ca. 7 Durchgängen weiter auf 1.8 % (w/w) verdünnt. Die entstandene Zellulose Suspension wurde bis zur weiteren Verarbeitung bei ca. 10°C gelagert.



Abbildung 7 Mahlwerk zur Vorzerkleinerung des Kraftzellstoffs

Der weitere Aufschluss der Zellulose erfolgte im Hochdruck-Homogenisator (Microfluidizer®, Microfluidics Corporation, USA). Hierbei wurde die Zellulose Suspension mit Drücken bis zu 1200 bar durch zwei hintereinander geschalteten Kammern mit unterschiedlichen Durchmessern gepresst (Abbildung 8). Für die ersten 5 Durchläufe wurden Kammern mit 400 und 200 µm Durchmesser verwendet. Für die weiteren 8 Durchläufe wurden die Kammern mit Durchmesser 200 und 75 µm ausgewählt. Durch die entstehenden Scherkräfte werden die Zellulosefasern mechanisch bis zu den Zellulosefibrillen aufgeschlossen. Die NFC Suspension wurde bis zur weiteren Verarbeitung bei ca. 10°C gelagert.

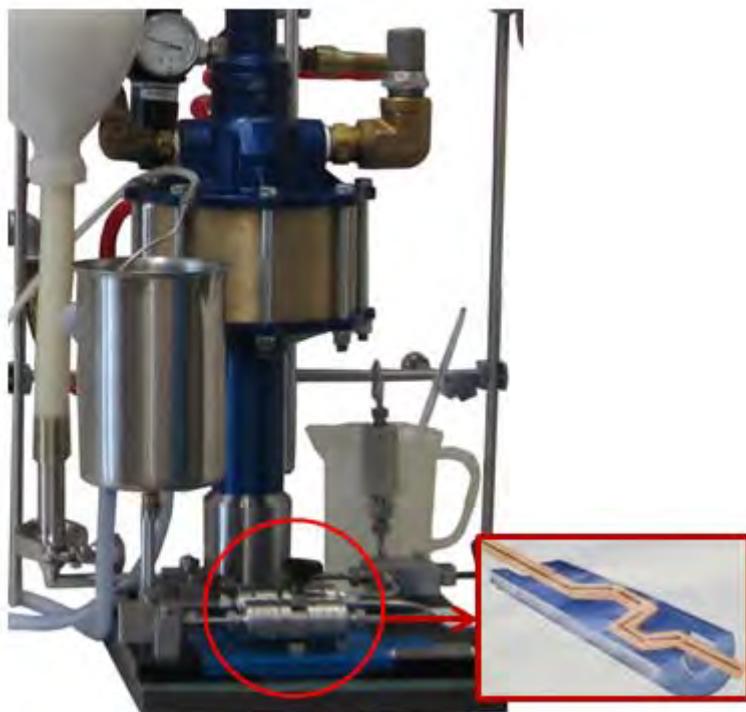


Abbildung 8 Hochdruck-Homogenisator

5.2 Charakterisierung der NFC Suspension

5.2.1 Viskosität

Die fertige NFC Suspension (hergestellt wie unter 5.1 beschrieben) wurde auf 0.5, 0.75 und 1 wt% verdünnt. Die verdünnten Suspensionen wurden ca. 3 min bei etwa 11 000 rpm (Ultra-Turrax T25 digital, IKA Werke, Deutschland) gemixt und anschliessend unter Vakuum entgast. Die Viskosität wurde mit einem Rotations-Rheometer (Rheolab QC, CC39 Geometrie, Anton Paar, Österreich) mit konzentrischer Zylindergeometrie gemessen (Abbildung 9).



Abbildung 9 Rotations-Rheometer mit konzentrischem Zylindereinsatz

Die Messungen wurden bei 25°C im 'Shear rate mode' bei Scherraten von 0.1 bis 1000 1/s und zurück durchgeführt (4 Intervalle). Die Ergebnisse sind Mittelwerte aus jeweils 3 Messungen pro NFC-Konzentration (Abbildung 10).

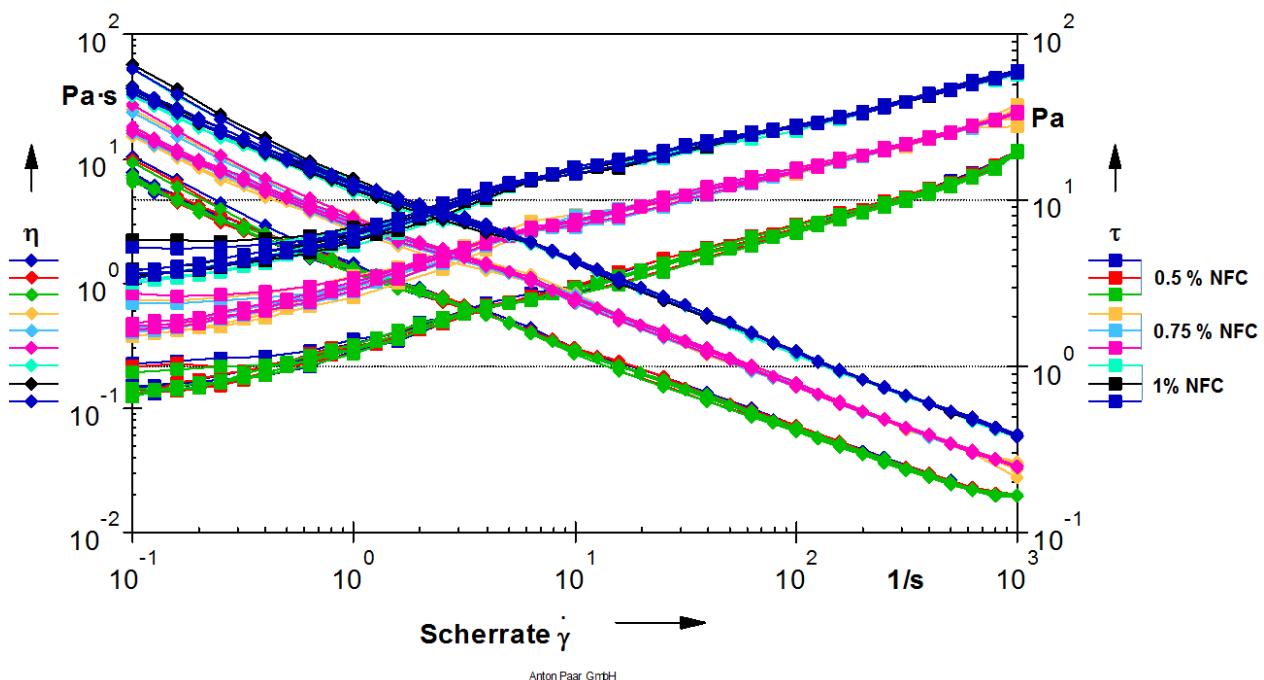


Abbildung 10 Viskositäten und Scherspannung der NFC Lösungen (0.5% NFC, 0.75% NFC und 1% NFC in Wasser) in Abhängigkeit der Scherrate

Die angestrebten Viskositäten wurden erreicht (Tabelle 1). Aus vorhergegangenen Studien (Grueneberger, Kuenniger et al. 2014) wissen wir, dass die Viskosität mit zunehmendem Auf-

schlussgrad ansteigt. Die gemessenen Viskositäten entsprechen eher den maximalen Zielwerten oder liegen, wie bei den Suspensionen mit 1% sogar leicht darüber. Somit wurde ein genügend feiner Aufschluss der NFC erreicht.

Tabelle 1 Viskositäten der NFC Lösungen (0.5% NFC, 0.75% NFC und 1% NFC in Wasser) gemessen bei einer Scherrate von 100 1/s

| Intervall | 0.5% NFC | | | 0.75% NFC | | | 1% NFC | | |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 | Messung 1 | Messung 2 | Messung 3 |
| 1 | 72.1 | 71.4 | 70.3 | 155.0 | 156.0 | 147.0 | 264.0 | 277.0 | 278.0 |
| 2 | 67.7 | 67.5 | 66.6 | 149.0 | 149.0 | 150.0 | 277.0 | 277.0 | 275.0 |
| 3 | 64.8 | 64.8 | 64.0 | 145.0 | 146.0 | 148.0 | 278.0 | 284.0 | 285.0 |
| 4 | 66.7 | 66.3 | 65.4 | 148.0 | 148.0 | 150.0 | 280.0 | 282.0 | 280.0 |
| Viskosität [mPas] | 67.8 | 67.5 | 66.6 | 149.3 | 149.8 | 148.8 | 274.8 | 280.0 | 279.5 |
| IST | 67 | | | 149 | | | 278 | | |
| Ziel | 60-70 | | | 120-150 | | | 200-250 | | |

5.2.2 Rasterelektronen Mikroskopie (REM)

Die Feinheit und Gleichmässigkeit des Aufschlusses der NFC wurde am REM visualisiert.



Abbildung 11 Rasterelektronenmikroskop an der Empa

Die NFC Suspension wurden vor der Untersuchung mit entionisiertem Wasser auf 0.1 % (w/w) verdünnt und anschliessend auf Glimmerplättchen (Mica flakes) auf getropft. Die Tropfen wurden mit einer 7 nm dicken Platinschicht unter Vakuum bedampft (BAL-TEC MED 020 Modular High Vacuum Coating Systems, BAL-TEC AG, Lichtenstein).

Die REM Bilder wurden mit einem FEI Nova NanoSEM 230 instrument (FEI, USA) aufgenommen (Abbildung 11). Die Beschleunigungsspannung wurde mit 5 kV vorgewählt.

Die sehr feine Aufschlussqualität wurde durch die optische Charakterisierung am REM bestätigt (Abbildung 12).

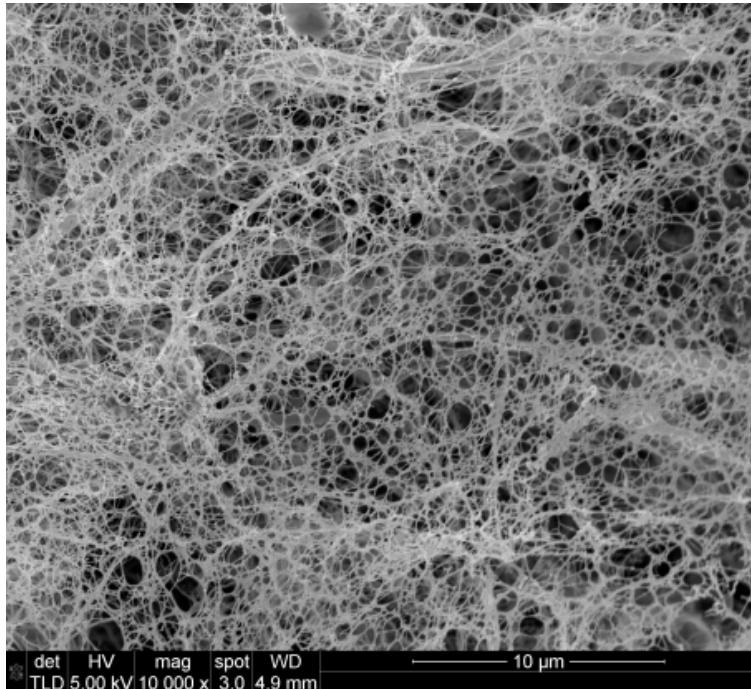


Abbildung 12 Aufschlussqualität der NFC

5.3 Bereitstellung der Beschichtungen mit NFC

Die durch die Industrie gelieferten Beschichtungen wurden mit verschiedenen Mengen NFC versetzt. In einem ersten Schritt wurde die NFC Suspension auf 4 % (w/w) verdünnt.

Anschliessend wurden auch die Original Beschichtungen auf einen Feststoffgehalt (FSG) von 40 % (w/w) verdünnt. Anschliessend wurde die NFC Suspension ca. 30 min in die Beschichtung eingerührt (RW16 Laborrührer von IKA, Deutschland). Dabei wurden die Mischungsverhältnisse so gewählt, dass die NFC-Gehalte im getrockneten Anstrichfilm (fest) 2.5%, 3.5% und 5% (w/w) betragen.

Tabelle 2 Einwaage pro 100 g Beschichtung mit NFC

| | 0 % NFC | 2.5 % NFC | 3.5 % NFC | 5 % NFC |
|-------------------------|---------|-----------|-----------|---------|
| Beschichtung (40% FSG) | 100 g | 79.6 g | 73.4 g | 65.5 g |
| NFC Suspension (4% FSG) | 0 g | 20.4 g | 26.6 g | 34.5 g |
| gesamt | 100 g | 100 g | 100 g | 100 g |

Die so hergestellten Beschichtungen wurden zeitnah weiterverarbeitet und nicht über einen längeren Zeitraum gelagert.

5.4 Charakterisierung der Beschichtung mit und ohne NFC

5.4.1 Viskosität

Nach der Bereitstellung der Beschichtungen (wie in Kapitel 5.3 beschrieben) wurden diese in einem Rotations-Rheometer (Physika MCR300, CC27 Geometrie, Anton Paar, Österreich) mit konzentrischer Zylindergeometrie gemessen. Dieses Gerät erlaubt die Messung von Flüssigkeiten in einem relativ grossen Viskositätsbereich. Die Messungen wurden bei 25°C im 'Shear rate mode' bei Scherraten von 0.1 bis 1000 1/s und zurück durchgeführt. Die Ergebnisse setzen sich aus jeweils 2 Einzelmessungen zusammen und sind in Abbildung 13 bis Abbildung 16 dargestellt.

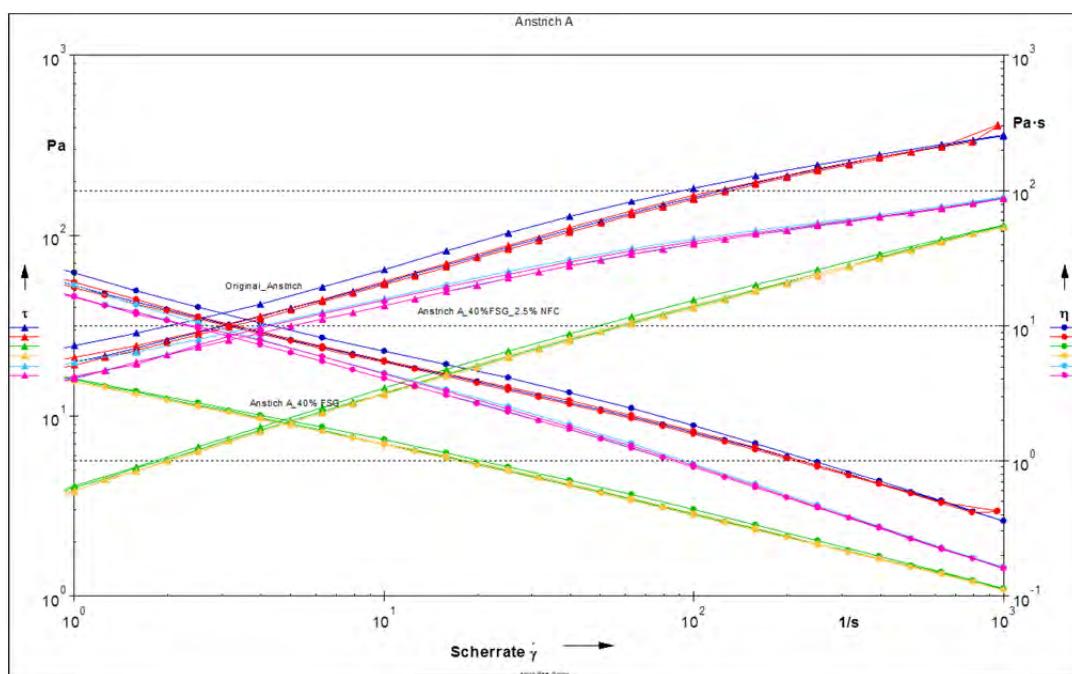


Abbildung 13 Viskositäten η und Scherspannung τ der Beschichtung A in Abhängigkeit der Scherrate (-/- Original, -/- verdünnt auf 40% FSG, -/- verdünnt auf 40% FSG + Zugabe 2,5% NFC)

Beschichtung A zeigt bereits im Originalzustand ein scherverdünnendes Fließverhalten, welches durch die Zugabe von NFC nicht verändert wird. Lediglich wird die Viskosität durch Verdünnen mit Wasser herabgesetzt bzw. durch Zugabe von NFC wieder erhöht.

Auch Beschichtung B zeigt bereits im Originalzustand scherverdünnendes Fließverhalten, jedoch wird dies durch die Zugabe von NFC noch verstärkt. Besonders bei höheren Scherraten nimmt die Viskosität der Beschichtung mit NFC deutlich stärker ab, als die Originalbeschichtung sowohl im unverdünnten als auch im verdünnten Zustand.

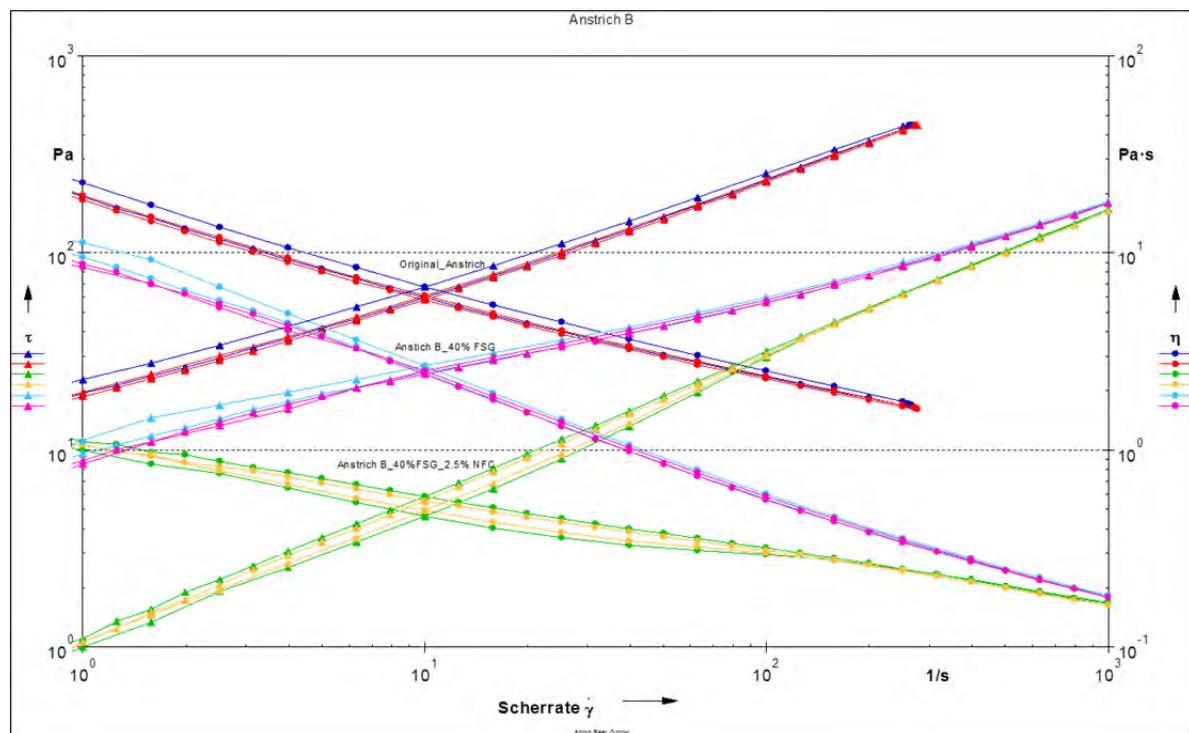


Abbildung 14 Viskositäten η und Scherspannung T der Beschichtung B in Abhängigkeit der Scherrate (-/- Original, -/- verdünnt auf 40% FSG, -/- verdünnt auf 40% FSG + Zugabe 2,5% NFC)

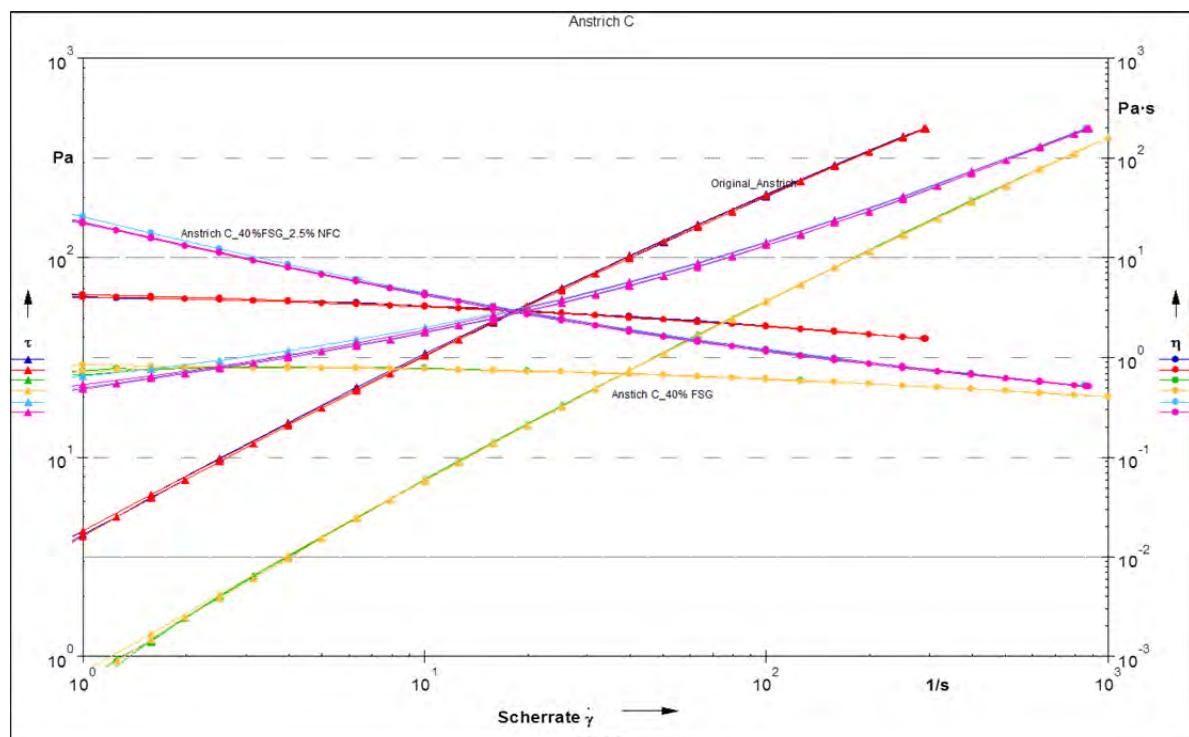


Abbildung 15 Viskositäten η und Scherspannung T der Beschichtung C in Abhängigkeit der Scherrate (-/- Original, -/- verdünnt auf 40% FSG, -/- verdünnt auf 40% FSG + Zugabe 2,5% NFC)

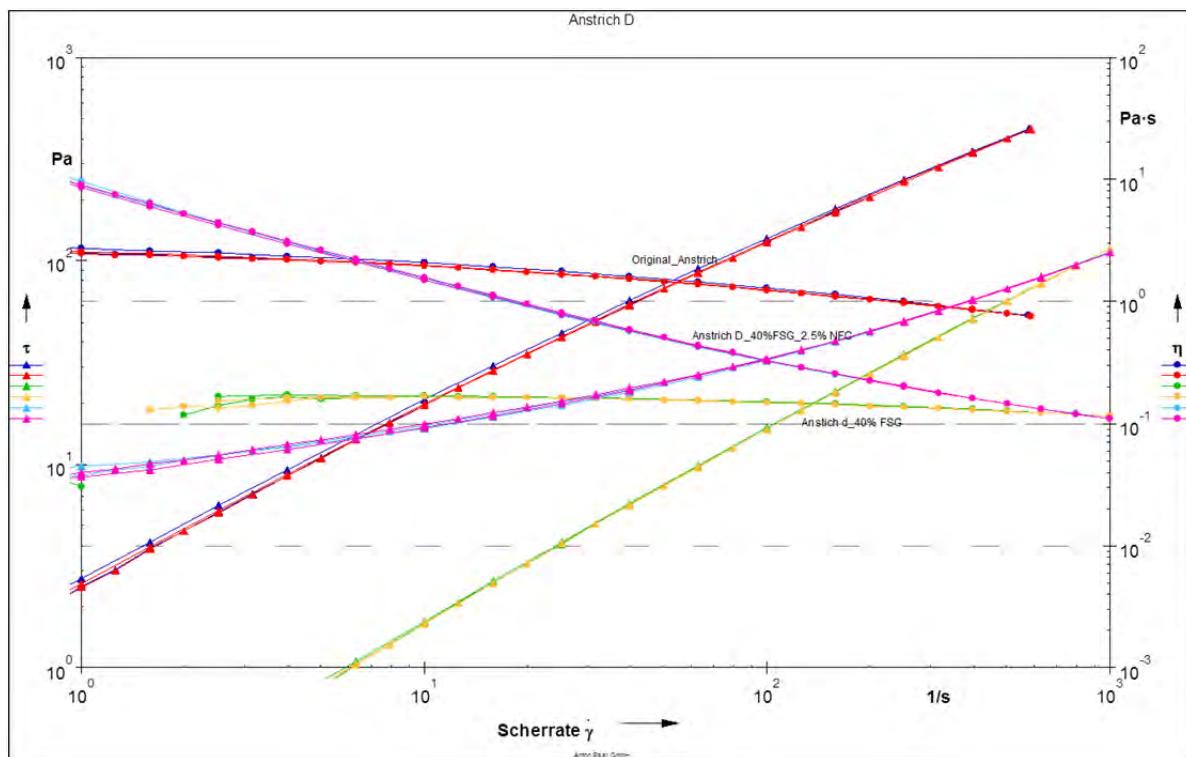


Abbildung 16 Viskositäten η und Scherspannung τ der Beschichtung D in Abhängigkeit der Scherrate (-/- Original, -/- verdünnt auf 40% FSG, -/- verdünnt auf 40% FSG + Zugabe 2,5% NFC)

Die Beschichtungen C und D zeigen im Originalzustand ein nahezu newtonsches Fliessverhalten. Die Viskosität nimmt mit erhöhter Scherrate nur geringfügig ab. Nach Zugabe der NFC ändert sich das Fliessverhalten stark und ist nun auch, genau wie bei den Beschichtungen A und B scherverdünnend.

Tabelle 3 Viskositäten der Beschichtungen (Original, verdünnt auf 40% FSG und verdünnt auf 40% FSG plus 2,5% NFC) gemessen bei einer Scherrate von 100 1/s

| Intervall | Anstrich A | | | Anstrich B | | |
|--------------------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|-------------------|
| | Original | FSG 40% | FSG40% + 2.5% NFC | Original | FSG 40% | FSG40% + 2.5% NFC |
| 1 | 1.83 | 0.437 | 0.957 | 2.53 | 0.295 | 0.596 |
| 2 | 1.63 | 0.404 | 0.902 | 2.35 | 0.314 | 0.563 |
| 3 | 1.66 | 0.412 | 0.928 | 2.38 | 0.302 | 0.579 |
| 4 | 1.59 | 0.396 | 0.896 | 2.3 | 0.31 | 0.559 |
| Viskosität [mPas] | 1677.5 | 412.25 | 920.75 | 2390 | 305.25 | 574.25 |
| Intervall | Anstrich C | | | Anstrich D | | |
| | Original | FSG 40% | FSG40% + 2.5% NFC | Original | FSG 40% | FSG40% + 2.5% NFC |
| 1 | 2.08 | 0.61 | 1.2 | 1.29 | 0.151 | 0.323 |
| 2 | 2.03 | 0.604 | 1.16 | 1.24 | 0.149 | 0.328 |
| 3 | 2.06 | 0.608 | 1.19 | 1.26 | 0.149 | 0.328 |
| 4 | 2.03 | 0.602 | 1.15 | 1.24 | 0.149 | 0.331 |
| Viskosität [mPas] | 2050 | 606 | 1175 | 1257.5 | 150 | 327.5 |

5.4.2 Rasterelektronen Mikroskopie (REM)

Die Beschichtungen wurden minimal mit Wasser verdünnt. Das weitere Vorgehen entspricht dem in Kapitel 5.2.2.

Obwohl in früheren Arbeiten die Verteilung von NFC in reinem Bindemittel mittels dieser Methode sehr gut beobachtet werden konnte, erwies sie sich im Fall von pigmentierten Beschichtungen nicht als zielführend. Die Beschichtungen rissen nicht und somit konnte nicht ins Innere der Beschichtungen geschaut werden.

Lediglich Beschichtung A zeigte Risse und liess sich somit auf diese Weise untersuchen. Die Untersuchungen am REM lassen darauf schliessen, dass NFC homogen in Beschichtung A eingebracht werden konnte (Abbildung 17). Allerdings ist auch erkennbar, dass die Beschichtung durch das Einbringen von NFC deutlich poröser wird. Dieser Punkt wird noch ausführlicher im Kapitel 5.6.3 diskutiert.

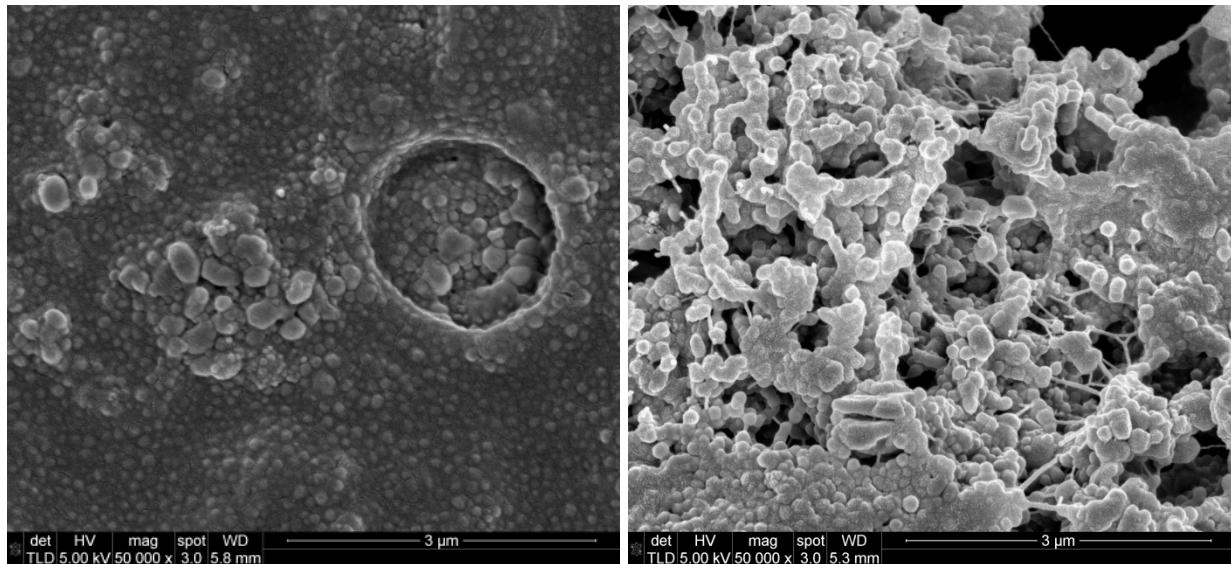


Abbildung 17 Beschichtung (A) PigaPur Finish DS links ohne, rechts mit 2.5 Gew.% NFC

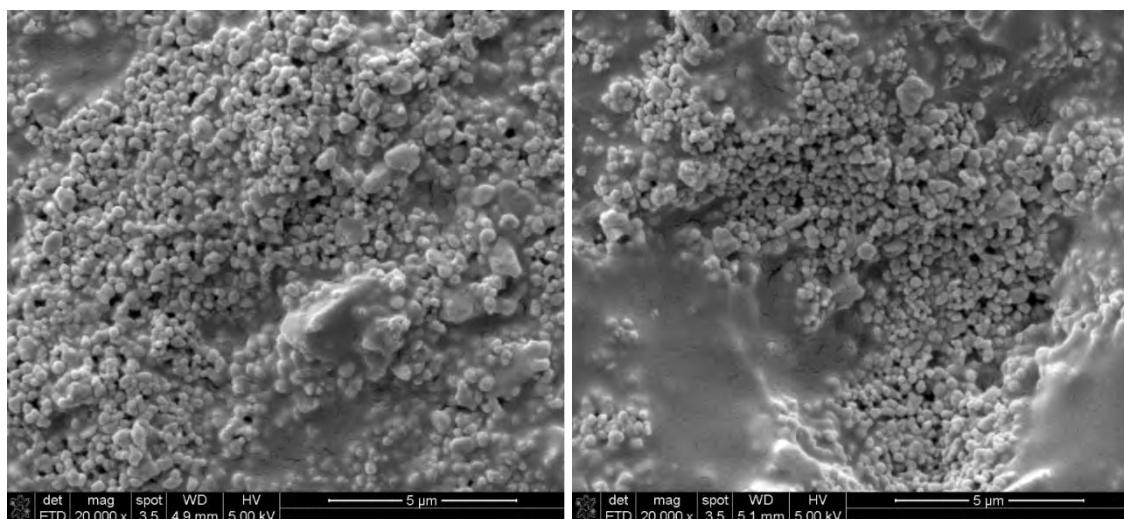


Abbildung 18 Beschichtung (B) PigaPur Flex links ohne, rechts mit 2.5 Gew.% NFC

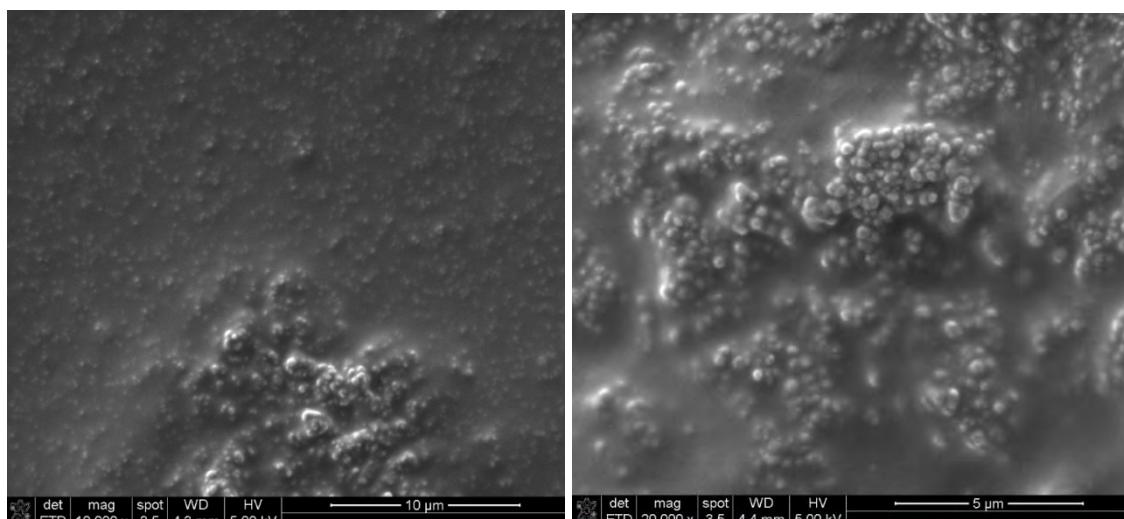


Abbildung 19 Beschichtung (C) PigaPur Exterior links ohne, rechts mit 2.5 Gew.% NFC

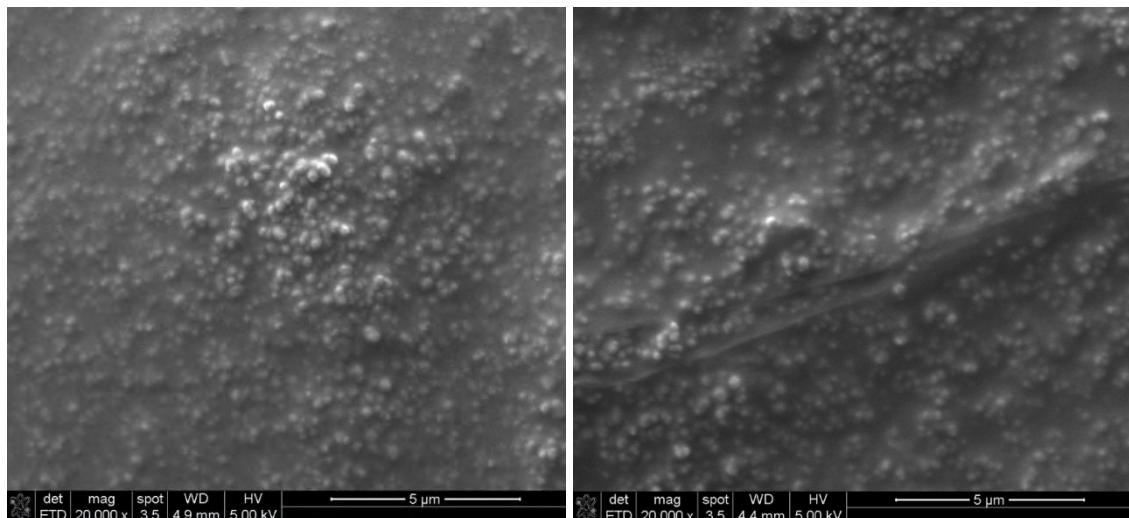


Abbildung 20 Beschichtung (D) Satinator KH-Seidenglanzemaille links ohne, rechts mit 2.5 Gew.% NFC

Bei den Beschichtungen B, C und D entstanden keine Risse in den Oberflächen der Tropfen, sodass ein Blick in das Innere des Tropfens nicht möglich war. Die Tropfenoberflächen der Beschichtungen ohne und mit NFC unterschieden sich nicht (siehe Abbildung 18, Abbildung 19, Abbildung 20). NFC war oberflächlich nicht sichtbar.

5.5 Charakterisierung freier Anstrichfilme

Aus den Beschichtungen mit und ohne NFC wurden freie Filme hergestellt (Abbildung 21).

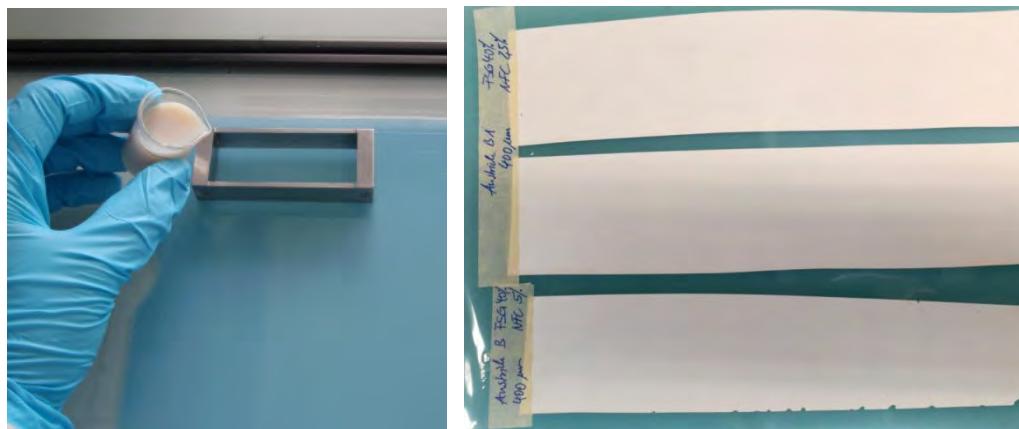


Abbildung 21 Herstellung freier Filme mit Kastenrakel (400 µm Nassschichtdicke)

Mit einem 400 µm Nassschichtdicke Kastenrakel wurden die Filme auf Kunststofffolien gezogen, um Filme mit einer Dicke von ca. 100 µm zu erhalten. Anschliessend wurden die Filme im Klima 20°C/65% RH getrocknet und auskonditioniert.

Mit steigendem NFC Gehalt erhöht sich auch der Wassergehalt in der Beschichtung. Beim Auftrag gleicher Nassschichtdicken kommt es somit zu durchschnittlich etwas geringeren Trocken-
schichtdicken bei höheren NFC Gehalten.

Bei der Herstellung freier Anstrichfilme zeigten sich homogene, glatte Oberflächen ohne sichtbare Defekte. Bis auf den Glanzgrad konnten visuell keine Unterschiede zwischen den Beschichtungen ohne und denen mit NFC festgestellt werden.

Ein Teil der Beschichtungsfilme wurde im QUV bewittert, um den Einfluss der Alterung auf das mechanische und viskoelastische Verhalten der Beschichtungen zu untersuchen. Die Proben wurden dabei im QUV 480 Stunden bei einer Stärke von $0,89 \text{ W}/(\text{m}^2\text{nm})$ im Wellenlängenbereich 340 nm (UVA) bestrahlt. Damit ist Länge und Intensität der UV Bestrahlung vergleichbar mit der Behandlung der beschichteten Proben für die Hagelversuche (vergleiche Stufe 3 in Tabelle 4)

5.5.1 Zugfestigkeit

Aus vorherigen Projekten ist bekannt, dass die Zugfestigkeit sowie die Bruchdehnung geeignete Parameter sind, um die Armierungswirkung der NFC im Beschichtungsfilm zu überprüfen.

Aus den freien Filmen wurden Zugproben mit folgenden Abmessungen gestanzt:

Länge 75 mm

Breite 3 mm

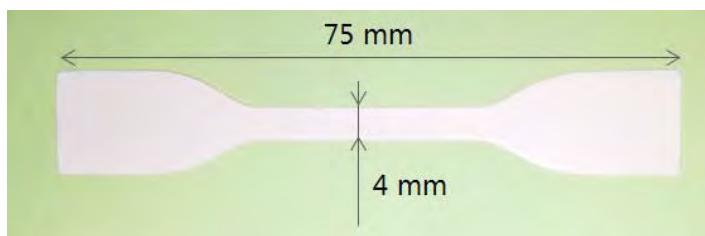


Abbildung 22 Abmessung Zugproben

Die Messungen wurden mit einer Zugmaschine (Zwick Z 010, Germany), welche mit einer 200 N Kraftmessdose und einem optischen Dehnungsmesser ausgerüstet ist, durchgeführt.

Folgende Maschinenparameter wurden gewählt:

| | |
|-----------------|------------|
| Einspannlänge | 50 mm |
| Vorspannung | 0.05 N |
| Geschwindigkeit | 5 mm/min |
| | 500 mm/min |

Der Elastizitäts-Modul (MOE), die Zugfestigkeit (σ_{max}) und die Bruchdehnung (ε_B) wurden entsprechend EN ISO 527-1 bestimmt. Der Elastizitäts-Modul wurde basierend auf dem Anstieg der Kurve im Spannungs-Dehnungs-Diagramm im linear elastischen Bereich (Dehnungsbereich von $0,0005 \leq \varepsilon \leq 0,0025$) bestimmt.

Die Ergebnisse der Zugversuche (Geschwindigkeit von 5 mm/min) an unbewitterten Proben sind in Abbildung 23 grafisch dargestellt.

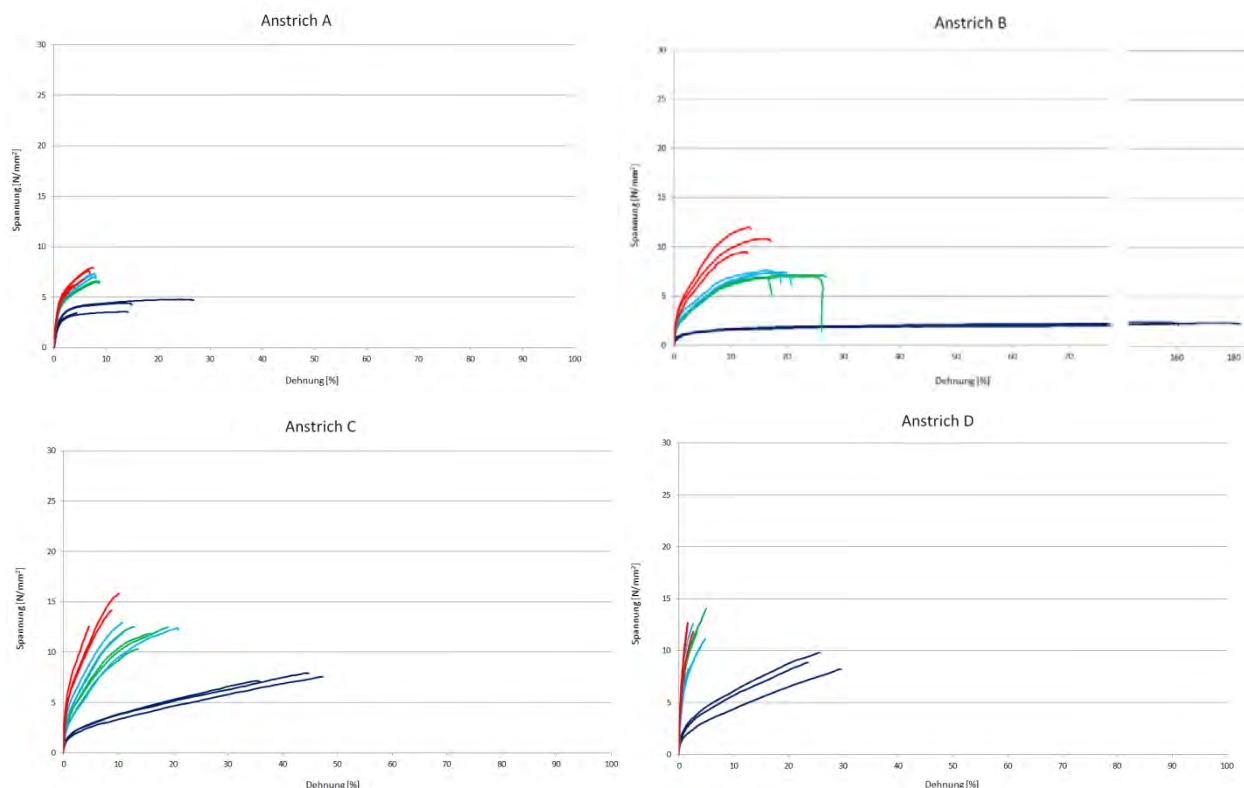


Abbildung 23 Spannungs-Dehnungsdiagramme der Beschichtungen A, B, C und D
■ 0% NFC, ■ 2.5% NFC, ■ 3.5% NFC, ■ 5% NFC

Erwartungsgemäss wird durch die Zugabe von NFC bei allen Beschichtungen der E-Modul (Abbildung 25) und die Zugfestigkeit (Abbildung 26) erhöht. Die plastische Verformung des Beschichtungsfilms wird durch das NFC Netzwerk stark eingeschränkt. Es kommt zu einer deutlichen Abnahme der Bruchdehnung (Abbildung 27).

Der Vergleich zu den künstlich bewitterten Filmen (Abbildung 24) zeigte, dass die armierende Wirkung der NFC in der Beschichtung auch noch an den gealterten Filmen sichtbar ist. Allerdings sieht man bei den durchschnittlich flexiblen Beschichtungen (A, C und D) kaum noch einen Unterschied zwischen den Varianten mit und ohne NFC. Lediglich bei der stärker dehnbaren Beschichtung B war der Unterschied zwischen der originalen Beschichtung und den mit NFC verstärkten Varianten noch recht deutlich. Bei allen Beschichtungen kam es zu einer Ver-

sprödung durch die künstliche Bewitterung. Dieser Effekt war grösser bei den originalen Beschichtungen ohne NFC.

Bei den Alkyd basierten Beschichtungen (C und D) war die Veränderung der mechanischen Eigenschaften durch die Bewitterung wesentlich stärker, als der Einfluss von NFC. Alkyd basierte Beschichtungsfilme wurden erwartungsgemäss durch die Nachvernetzung massiv spröder. Die Messung des Anstrichs D im künstlich bewitterten Zustand war nicht mehr möglich.

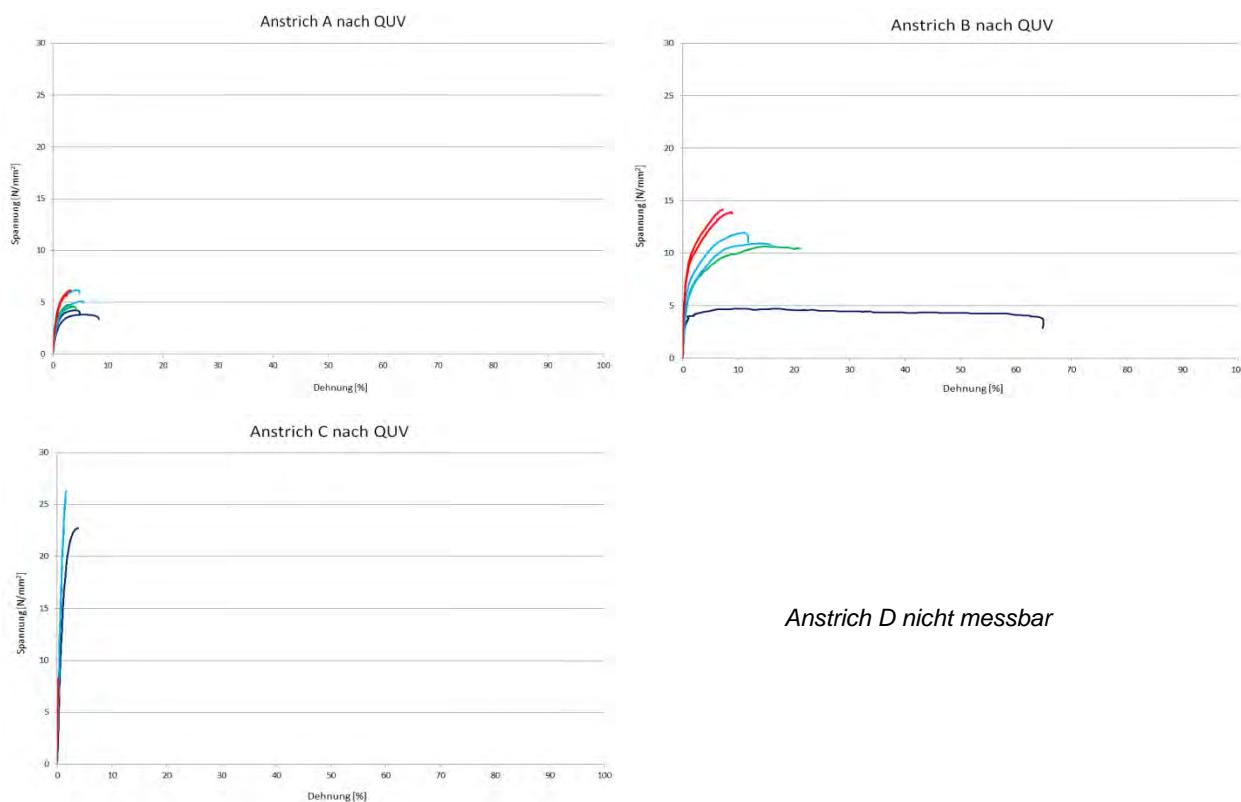


Abbildung 24 Spannungs-Dehnungsdiagramme der Beschichtungen A, B, C und D
 ■ 0% NFC, ■ 2.5% NFC, ■ 3.5% NFC, ■ 5% NFC

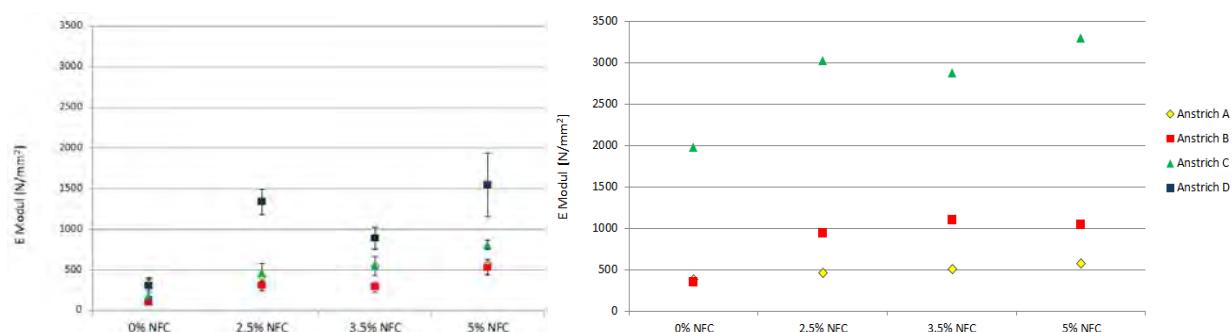


Abbildung 25 E-Modul der Beschichtungen in Abhängigkeit vom NFC Gehalt
 links unbewitterte Proben; rechts künstlich bewitterte Proben

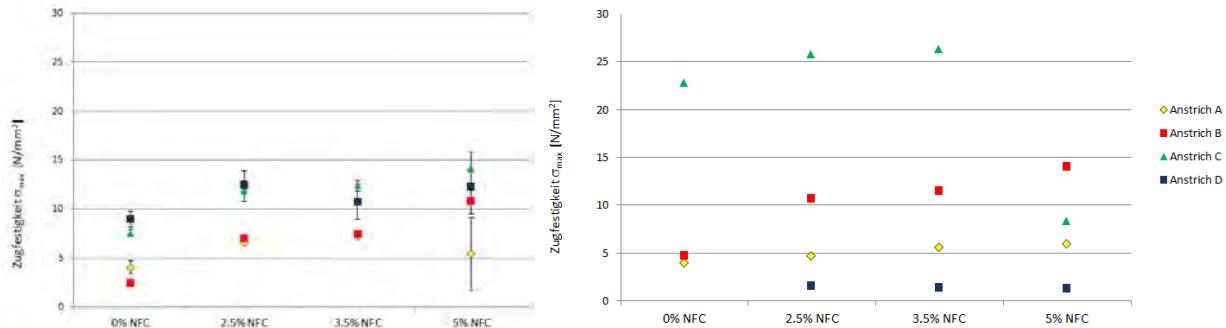


Abbildung 26 Zugfestigkeit der Beschichtungen in Abhängigkeit vom NFC Gehalt
 links unbewitterte Proben; rechts künstlich bewitterte Proben

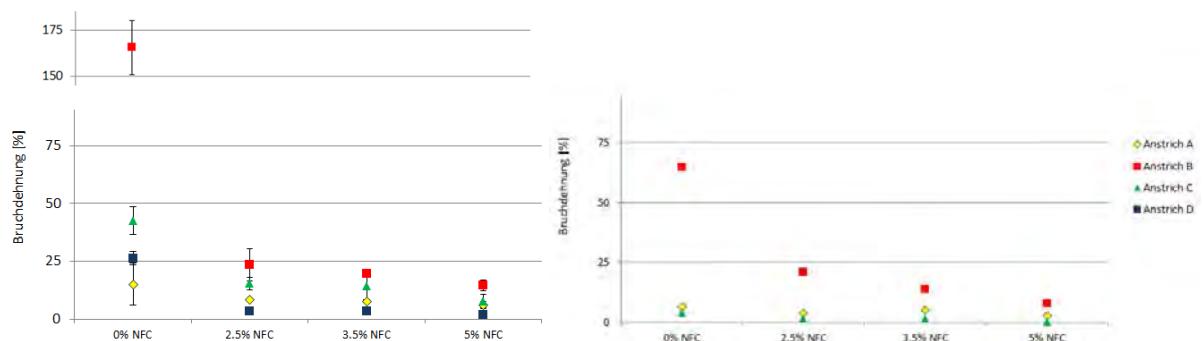


Abbildung 27 Bruchdehnung der Beschichtungen in Abhängigkeit vom NFC Gehalt
 links unbewitterte Proben; rechts künstlich bewitterte Proben

Das Verhältnis von E-Modul mit NFC zu E-Modul ohne NFC wird im Folgenden als Verstärkungsfaktor bezeichnet. Wie schon bei den transparenten Beschichtungen zeigte sich auch bei den pigmentierten Beschichtungen der Trend, dass die Verstärkungswirkung der NFC stark vom Charakter des Ausgangsmaterials abhängt. Beschichtungen mit einem geringen E-Modul werden meist in einem grösseren Masse verstärkt, als Beschichtungen, die bereits relativ steif sind (Abbildung 28). Lediglich Beschichtung D zeigt trotz eines bereits sehr hohen E-Moduls der Originalbeschichtung nach Zugabe von NFC die deutlich grössste gemessene Verstärkungswirkung.

Ein klarer Zusammenhang der Verstärkungswirkung bezogen auf den E-Modul der Beschichtung ohne NFC ist bei den vorbewitterten Proben nicht mehr gegeben (Abbildung 29). Zudem gibt es keinen klaren Unterschied mehr in der Höhe der Verstärkung bei 2.5% NFC und 5% NFC, wie das bei den unbewitterten Proben zumindest bei Beschichtung B und C der Fall war.

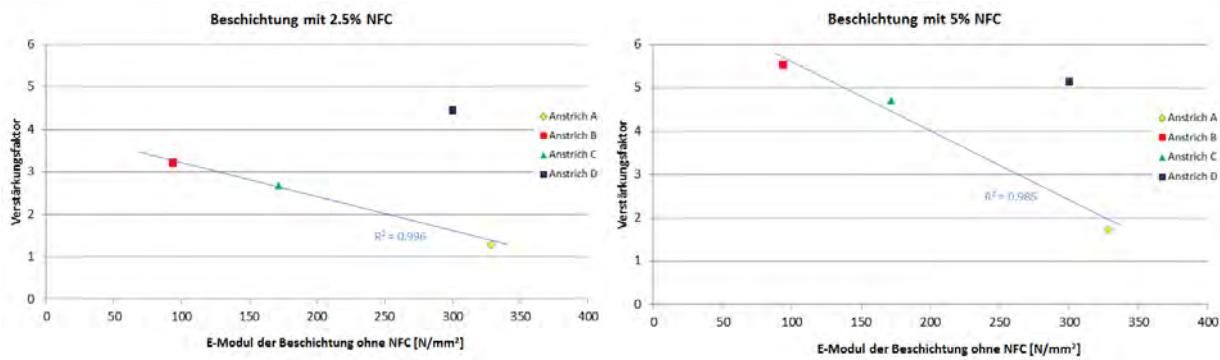


Abbildung 28 Verstärkung neuwertiger Beschichtungen durch 2.5% und 5% NFC

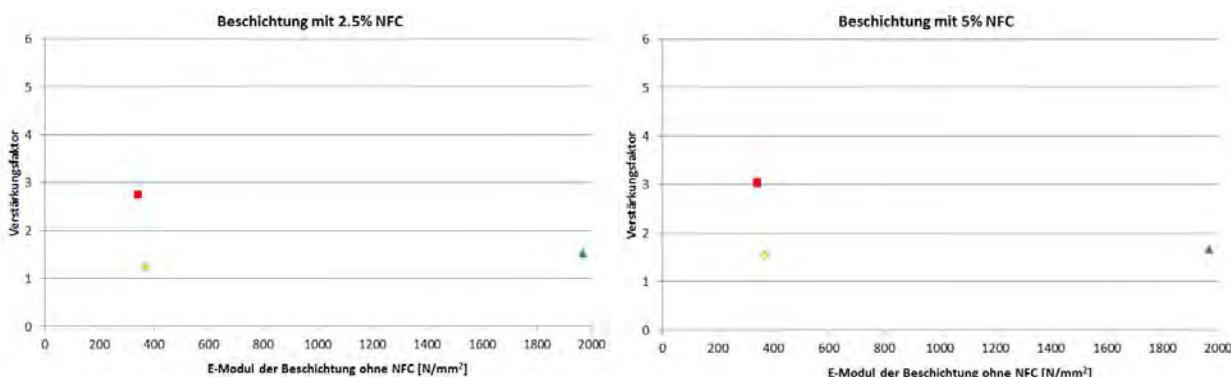


Abbildung 29 Verstärkung künstlich bewitterter Beschichtungen durch 2.5% und 5% NFC

Die Auswertung der Zugversuche bei einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min lässt vermuten, dass Beschichtung B aufgrund seines hohen Dehnvermögens vorteilhaft bei den Hagelversuchen abschneiden könnte. Der Vergleich mit den Ergebnissen aus den Zugversuchen mit erhöhter Prüfgeschwindigkeit (500 mm/min) zeigt allerdings, dass bei einer schnellen Zugbeanspruchung die Unterschiede zwischen den verschiedenen Beschichtungen wesentlich geringer ausfallen (Abbildung 30).

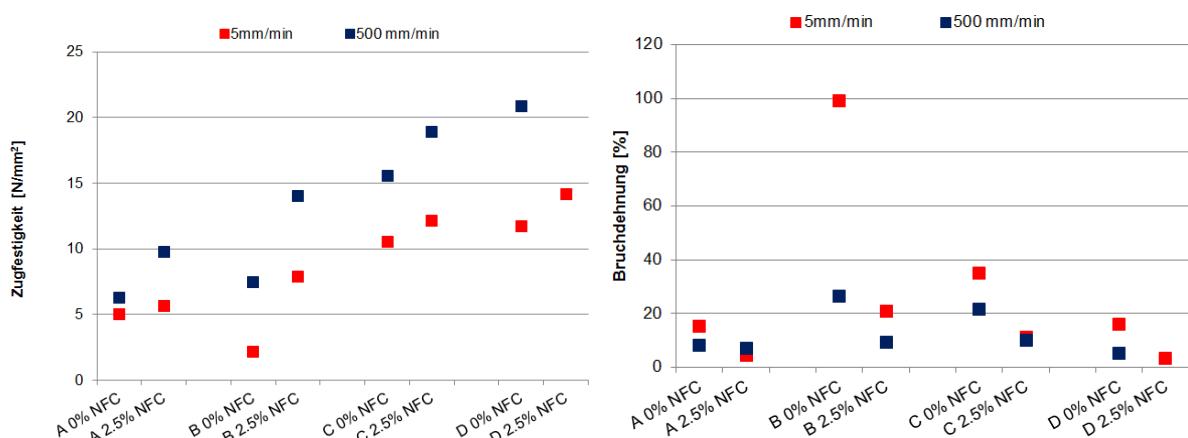
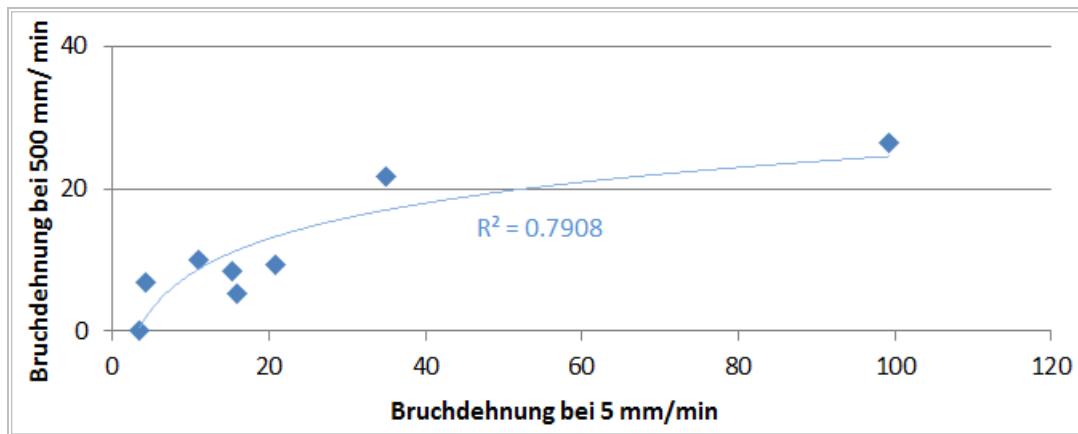


Abbildung 30 Vergleich der Zugfestigkeit und Bruchdehnung bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten

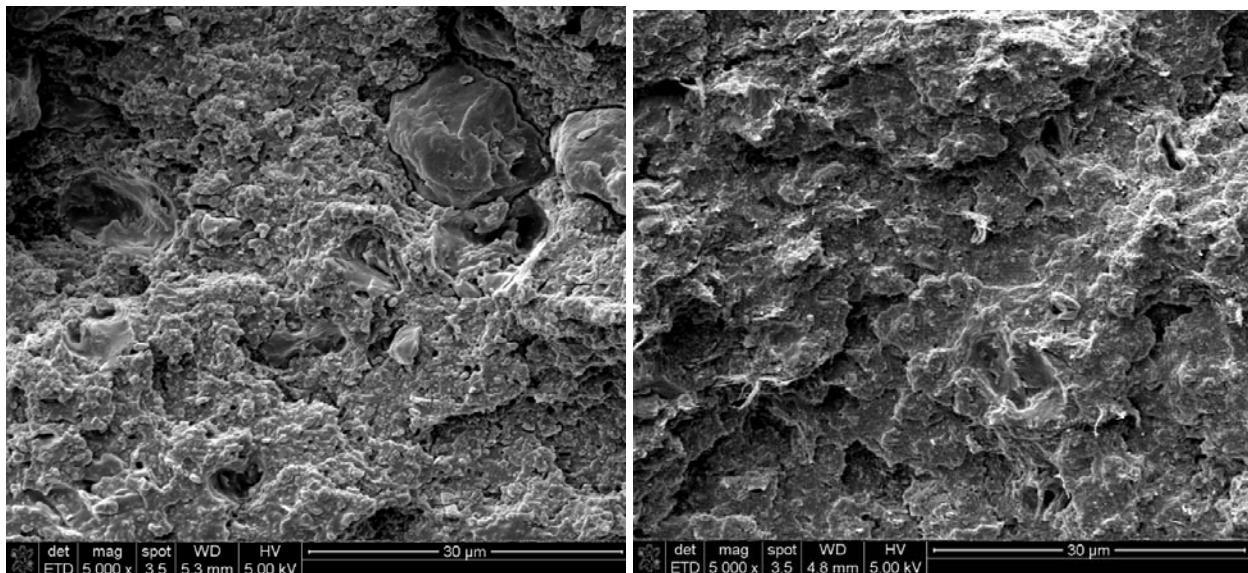
Die Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min auf 500 mm/min führte zu erhöhten Zugfestigkeiten und einer Reduktion der Bruchdehnung.



5.5.2 Rasterelektronen Mikroskopie (REM) an Bruchflächen der freien Filme

Bruchflächen der freien Filme wurden am REM untersucht. Es handelt sich um Bruchflächen aus den Zugversuchen. Dabei ist auf der linken Seite jeweils die Originalbeschichtung ohne NFC, auf der rechten Seite die jeweilige Beschichtung mit 5% NFC abgebildet.

Während sich die Bruchflächen der Acryl-basierten Beschichtungen (A und B) optisch nicht unterscheiden, zeigen die Alkyde mit und ohne NFC optische Unterschiede.



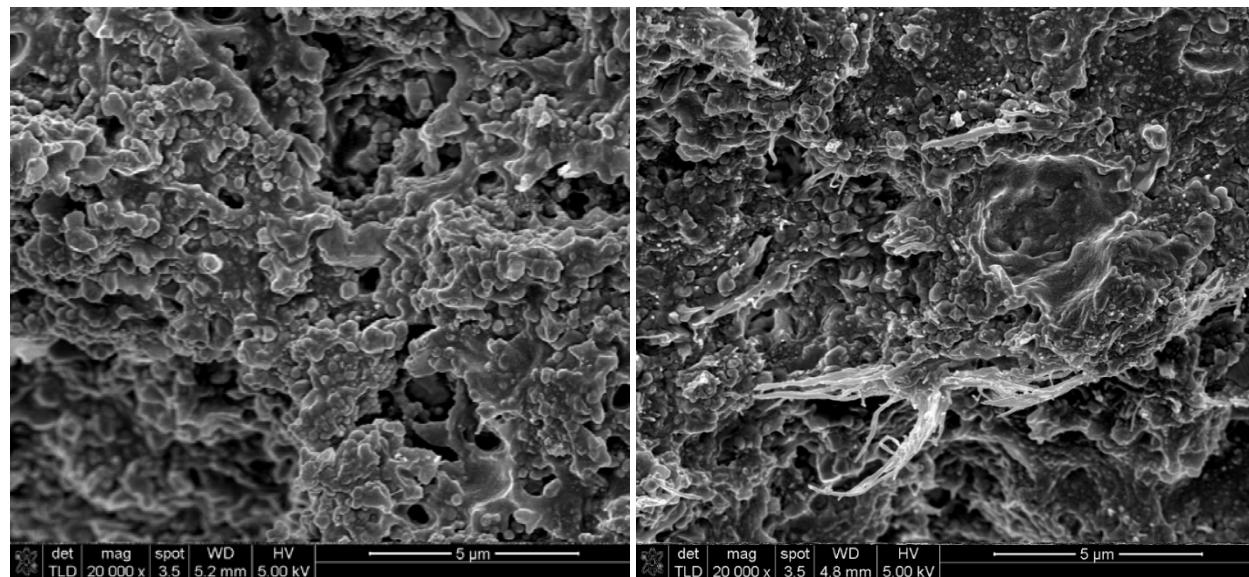


Abbildung 31 Bruchflächen Beschichtung A (links 0% und rechts 5% NFC)

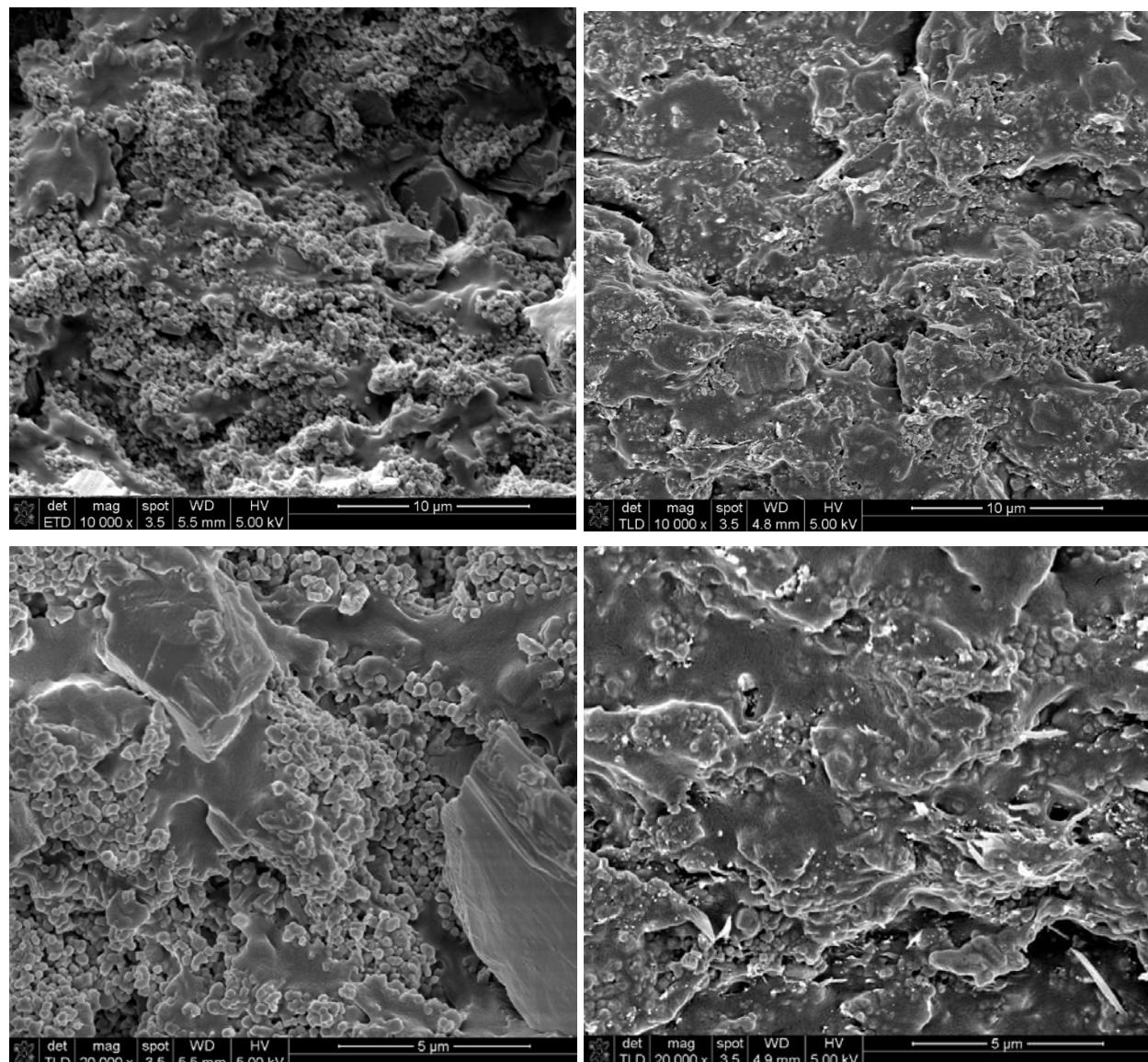


Abbildung 32 Bruchflächen Beschichtung B (links 0% und rechts 5% NFC)

Die Bruchflächen der Alkyde ohne NFC erscheinen sehr glatt, während die Bruchflächen der Alkyde mit NFC wesentlich mehr Struktur zeigen. Die Bruchflächen der Alkyde mit NFC erscheinen zudem poröser.

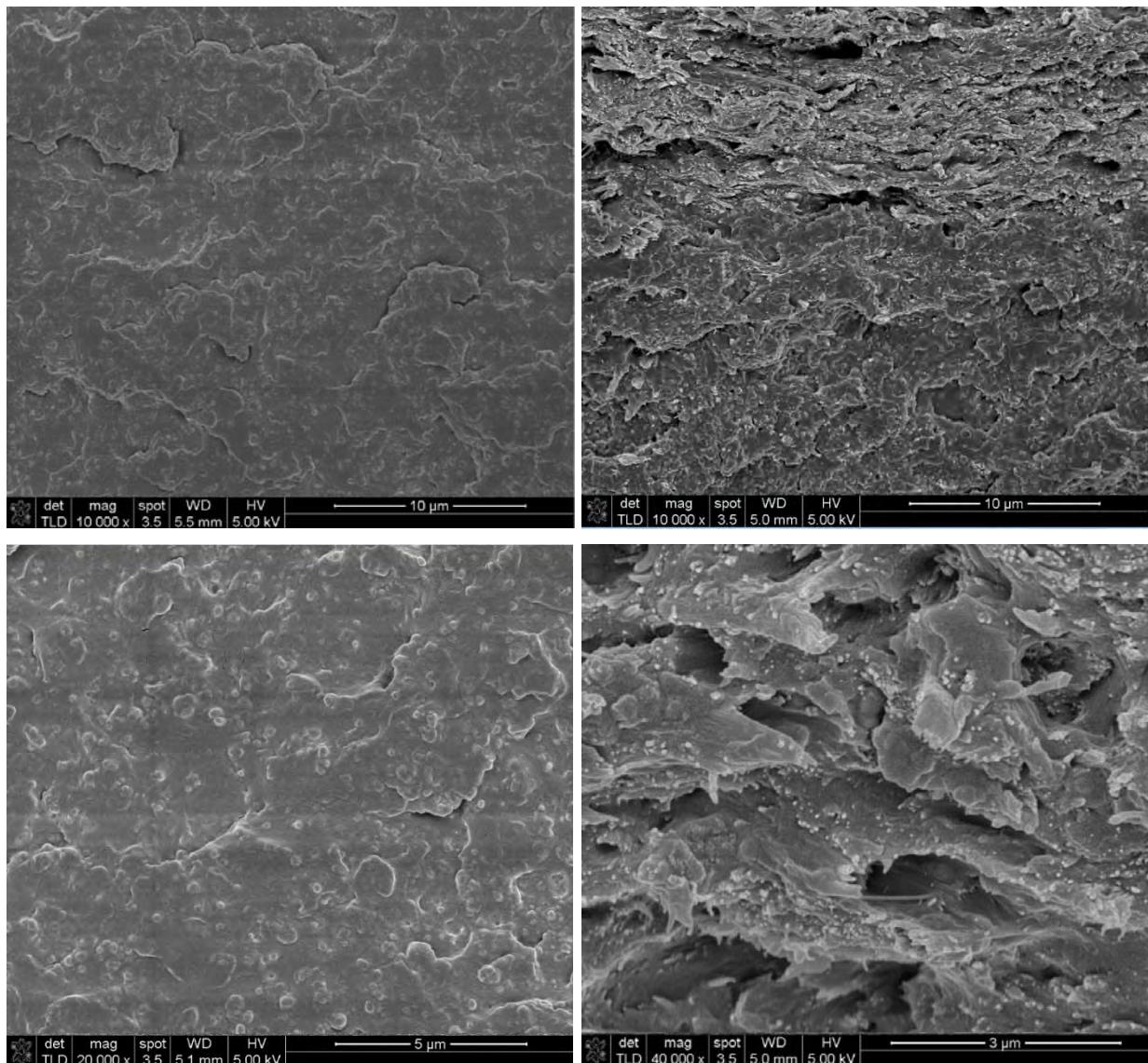


Abbildung 33 Bruchflächen Beschichtung C (links 0% und rechts 5% NFC)

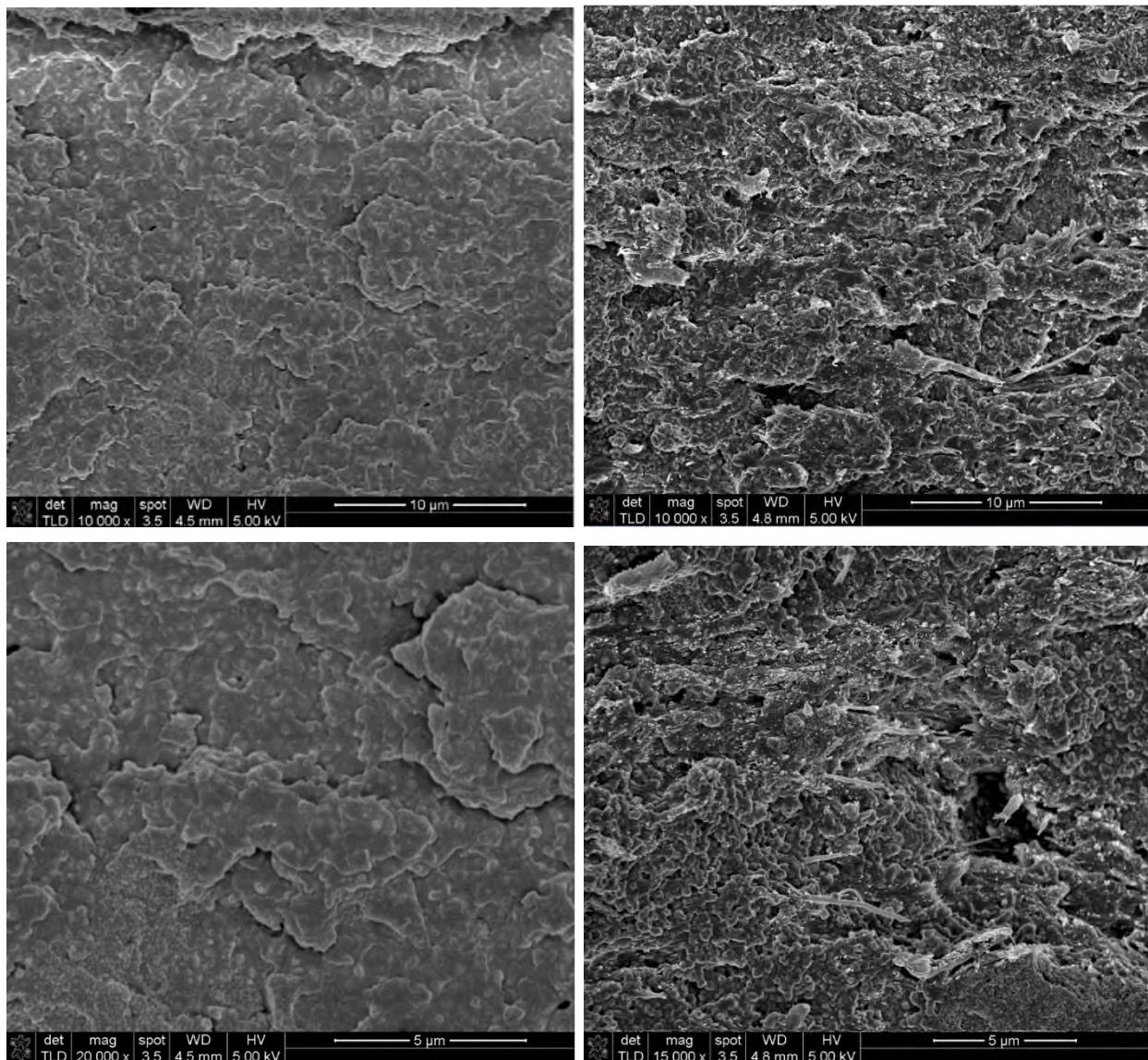


Abbildung 34 Bruchflächen Beschichtung D (links 0% und rechts 5% NFC)

5.5.3 Schlagzugzähigkeit

Der Schlagpendelversuch zur Bestimmung der Schlagzugzähigkeit (δ_{tU}) kann als Zugversuch mit hoher Verformungsgeschwindigkeit bezeichnet werden. Auch beim Hagelschlag kommt es in der Beschichtung zu einer starken Zugbelastung mit sehr hoher Verformungsgeschwindigkeit. Daher scheint eine hohe Schlagzugzähigkeit eine der wichtigen Eigenschaften, um einen Hagelschlag unbeschadet zu überstehen.

Aus den freien Filmen der Beschichtungen B und D (0%, 2.5%, 3.5% und 5% NFC) wurden Schlagzugproben mit folgenden Abmessungen gestanzt:

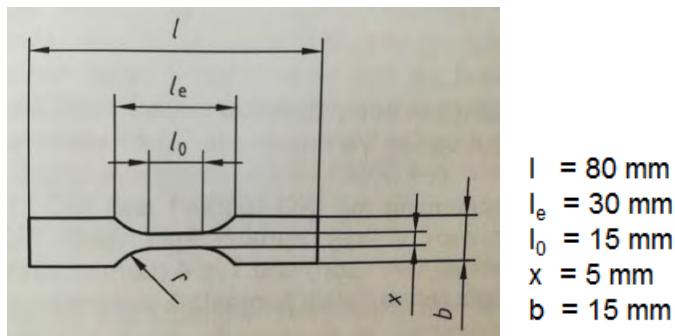


Abbildung 35 Abmessung Schlagzugproben

Die Bestimmung der Schlagzugzähigkeit erfolgte nach EN ISO 8256:2004. Die Prüfungen wurden auf einem Zwick Pendelschlagwerk 5102 B mit einem 0.5 J Pendel und einem 15.87 g Joch durchgeführt (Abbildung 36).

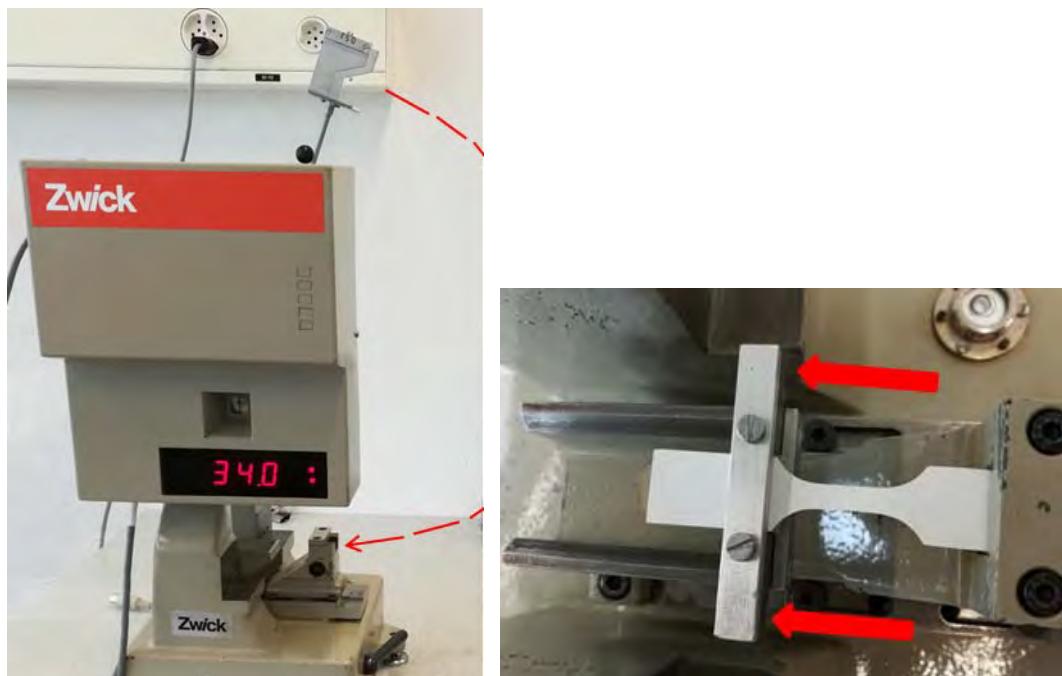


Abbildung 36 Pendelschlagwerk 5102 B von Zwick

Anschliessend wurde die Arbeit bestimmt, die beim Bruch, bezogen auf die Anfangs-Querschnittsfläche des ungekerbten Prüfkörpers, verbraucht wurde.

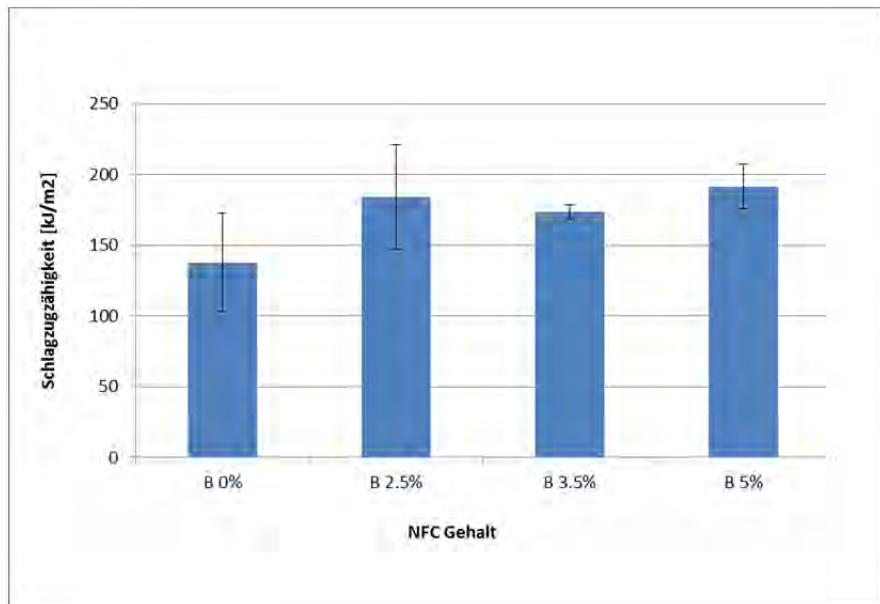


Abbildung 37 Schlagzugzähigkeit der Beschichtung B in Abhängigkeit des NFC Gehaltes

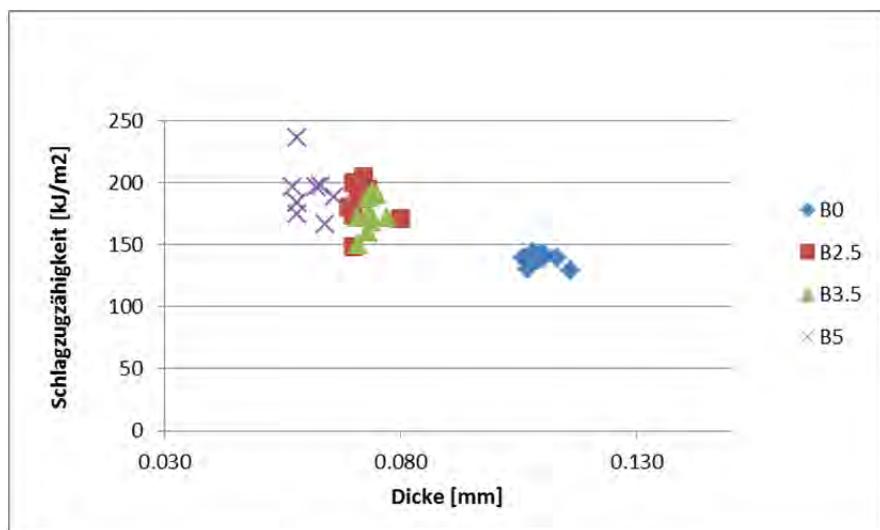


Abbildung 38 Schlagzugzähigkeit der Beschichtung B in Abhängigkeit der Filmdicke

Die Schlagzugzähigkeit der Beschichtungen B (Acrylat) und D (Alkyd) in Abhängigkeit des NFC Gehaltes ist in Abbildung 37 bzw. Abbildung 39 dargestellt. Trotz grosser Unterschiede der beiden Originalbeschichtungen bezüglich Zugfestigkeit und Bruchdehnung (vergleiche Abbildung 26 und Abbildung 27) zeigen beide ein ähnliches Verhalten bei der Schlagzugzähigkeit. Vor allem Beschichtung B, welche sich bei den geringen Verformungsgeschwindigkeiten im klassischen Zugversuch durch eine sehr hohe Bruchdehnung auszeichnete, zeigt diese Flexibilität bei einer schnellen Verformungsgeschwindigkeit, wie sie beim Pendelschlagversuch auftritt, nicht mehr.

Die Armierungswirkung des NFC Netzwerks wirkt sich in beiden Beschichtungen positiv aus. Die Schlagzugzähigkeit wird durch die Einbindung von 5% NFC in den Beschichtungsfilm bei der Beschichtung B durchschnittlich um 39% und bei Beschichtung D um 25% erhöht.

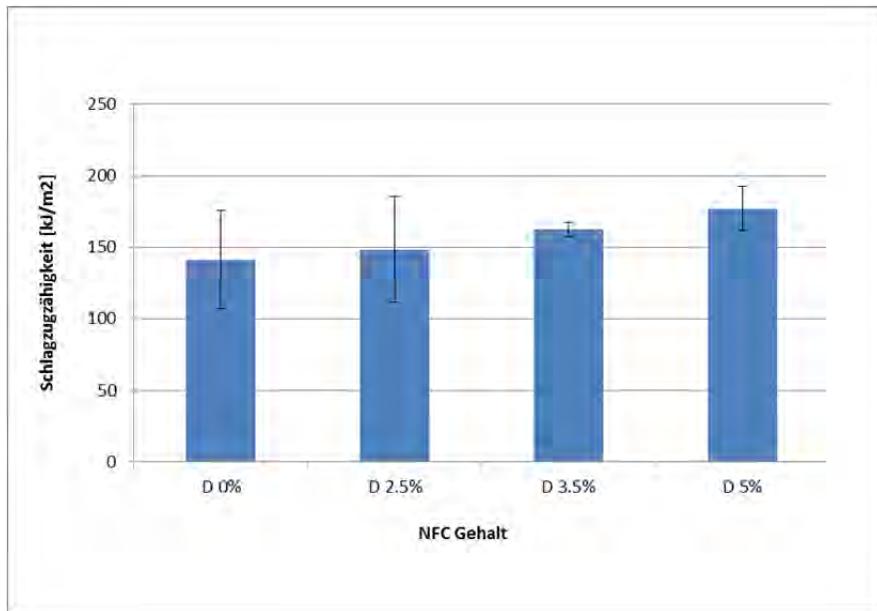


Abbildung 39 Schlagzugzähigkeit der Beschichtung D in Abhängigkeit des NFC Gehaltes

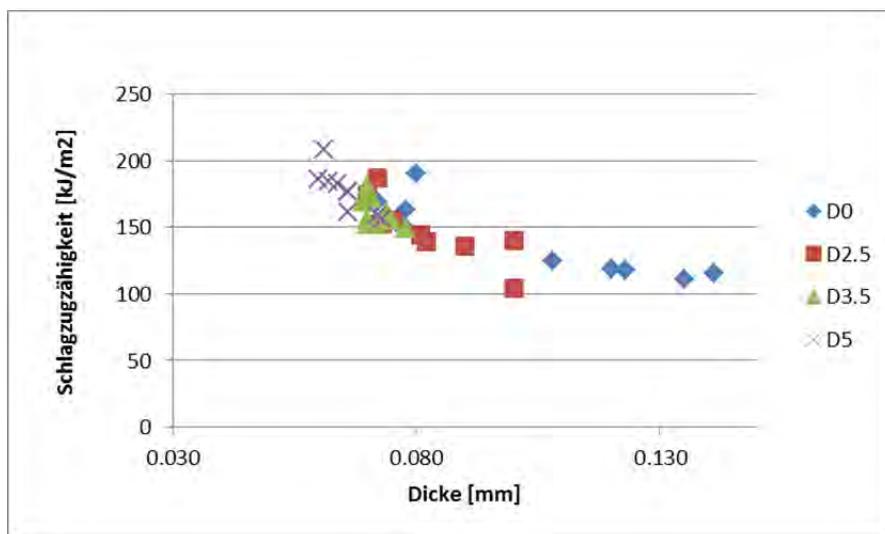


Abbildung 40 Schlagzugzähigkeit der Beschichtung D in Abhängigkeit der Filmdicke

Die Abhängigkeit der Schlagzugzähigkeit in Abhängigkeit der Dicke der getesteten Filme ist in den Abbildung 38 und Abbildung 40 dargestellt. Der Effekt, dass mit steigendem NFC Gehalt die Filmdicken sinken, hat mit der Herstellung der Filme zu tun und ist im Kapitel 5.5 erläutert.

Während bei der Beschichtung B keine klare Abhängigkeit der Schlagzugzähigkeit von der Dicke der Filme festgestellt werden konnte, zeigt sich bei Beschichtung D ein klarer Trend. Mit steigender Schichtdicke sinkt die Schlagzugzähigkeit der auf einer Alkydemulsion basierenden Beschichtung (D), sowohl bei der Originalbeschichtung als auch bei den Beschichtungen mit NFC. Grund hierfür kann eine inhomogene Aushärtung der Beschichtung bezogen auf den Querschnitt sein. Eine ungenügende Aushärtung im Inneren der Filme würde zu einer reduzier-

ten Schlagzugzähigkeit führen. (*Dieser Aspekt wurde im Rahmen des Projektes nicht weiter untersucht.*)

5.5.4 Dynamisch Mechanische Analyse (DMA)

Am DMA (RSA III, TA Instruments) wurden für alle 4 Anstrichsysteme mit 0% NFC, 2.5% NFC, 3.5% NFC und 5% NFC oszillierende Zugversuche im Temperaturbereich von -40°C bis 120°C durchgeführt. Diese geben Aufschluss über das viskoelastische Verhalten der NFC-verstärkten Beschichtungen unter dynamischer Belastung (Frequenz 1 Hz). Der Speichermodul E' als Mass für die Elastizität eines Materials und die Fähigkeit, Energie zu speichern und der Verlustfaktor Tan Delta als Mass für die Dämpfung eines Materials wurden ermittelt. Ebenfalls wurden der Verlustmodul E" als Mass für die vom Material in Wärme dissipierte Energie sowie entsprechend der Norm ASTM D 4065-94 das Maximum des Verlustmoduls E" als Glasübergangstemperatur T_g ausgewiesen.

Aus den freien Filmen wurden rechteckige Zugproben (Breite 6 mm, Länge 50 mm) gestanzt. Folgende Maschinenparameter wurden gewählt:

| | |
|-----------------|---------|
| Einspannlänge | 20 mm |
| Vorspannung | 0.3 N |
| Temperaturrampe | 2°C/min |
| Dehnung | 0.1 % |

Es wurden unbewitterte und im QUV vorbewitterte Proben (Bewitterung siehe Kapitel 5.5) getestet. Im QUV wurden die Filme 480 Stunden bei einer Stärke von 0,89 W/(m²nm) im Wellenlängenbereich 340 nm bestrahlt. Damit ist Länge und Intensität der UV Bestrahlung vergleichbar mit der Behandlung der beschichteten Proben für die Hagelversuche (vergleiche Stufe 3 in Tabelle 4)

Die Glasübergänge der Beschichtungen mit und ohne NFC im Neuzustand als auch im vorbewitterten Zustand sind in Abbildung 41 dargestellt.

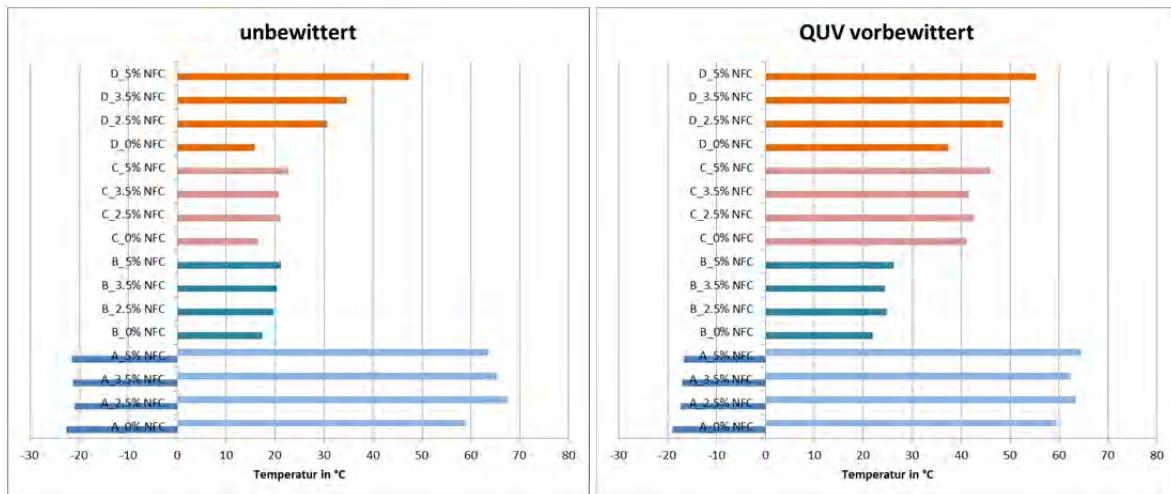


Abbildung 41 Glassübergangstemperaturen T_g der freien Filme, basierend auf Maximum E"

Die Beschichtungen B, C und D ohne NFC weisen im Neuzustand einen vergleichbaren Glasübergang auf:

$$\text{Beschichtung B} \quad T_g \quad 17.4^\circ\text{C}$$

$$\text{Beschichtung C} \quad T_g \quad 16.5^\circ\text{C}$$

$$\text{Beschichtung D} \quad T_g \quad 15.8^\circ\text{C}$$

Die Zugabe von NFC in die Beschichtung führt bei den Beschichtungen B und C lediglich zu einer geringfügigen Erhöhung des Glasübergangs um maximal 4°C bzw. 6°C. Bei Beschichtung D dagegen erhöht sich der T_g signifikant um +15°C (2,5 % NFC), +19°C (3,5 % NFC) bzw. +32°C (5 % NFC).

Beschichtung A weist im Gegensatz zu den anderen Beschichtungen zwei Glasübergänge auf:

$$\text{Beschichtung A} \quad T_g \quad -22.7^\circ\text{C} \text{ und } 59.1^\circ\text{C}$$

NFC ändert die Glasübergangstemperatur im Minus-Temperaturbereich nicht, im Plus-Bereich wie schon bei Beschichtung B und C nur geringfügig um maximal 5°C. Die Ausbildung von zwei Glasübergangstemperaturen zeigt, dass in der Beschichtung A die Hauptbestandteile des Bindemittels (Acrylat und PU) separat agieren. Das Schmelzen der kristallinen Anteile des Polyurethans wird ab ca. 60°C sichtbar (Maximum E" bei 59,1°C) und führt anschliessend zu einem starken Abfall des Speichermoduls E'.

Durch die Alterung der Proben im QUV ändern sich wie erwartet die Glasübergänge der auf Alkydharz basierenden Beschichtungen (C und D) wesentlich stärker, als die der auf Acrylat basierten Beschichtungen (A und B). Während sich die Glasübergänge der Beschichtungen A und B um maximal +5°C verschieben, erhöht sich die Glasübergangstemperatur bei den Beschichtungen C und D durch die stattfindende Nachvernetzung um bis zu +25°C.

Bei den Beschichtungen A, B und C bleibt der geringfügige Unterschied beim T_g zwischen Proben ohne und mit NFC auch nach der Vorbewitterung erhalten. Die Unterschied von maximal +4°C bis +6°C ist vergleichbar mit dem der unbewitterten Proben.

Lediglich Beschichtung D zeigt hier ein unterschiedliches Verhalten. Während sich der T_g der Originalbeschichtung durch die künstliche Alterung und die damit verbundenen Nachvernetzung um knapp 22°C erhöht, verändern sich die Varianten mit NFC in geringerem Masse. Mit zunehmendem NFC Gehalt unterscheiden sich die T_g vor und nach einer künstlichen Alterung weniger voneinander:

| | |
|-----------|-------|
| 0% NFC | +22°C |
| 2,5 % NFC | +18°C |
| 3,5 % NFC | +15°C |
| 5 % NFC | +8°C |

Somit sind im gealterten Zustand die Glasübergänge der Originalbeschichtung D 0% NFC und die der Variante mit 5% NFC mit +18°C wesentlich geringer als im Neuzustand (+32°C).

Ein Vergleich von Speichermodul E', Verlustmodul E" und Verlustfaktor Tan Delta der verschiedenen Beschichtungen ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Im Diagramm befinden sich immer:

— Beschichtung A, — Beschichtung B, — Beschichtung C und — Beschichtung D

Grau gestrichelt ist der Temperaturbereich (Raumtemperatur $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) markiert, in dem auch die Behagelung der Proben stattfand.

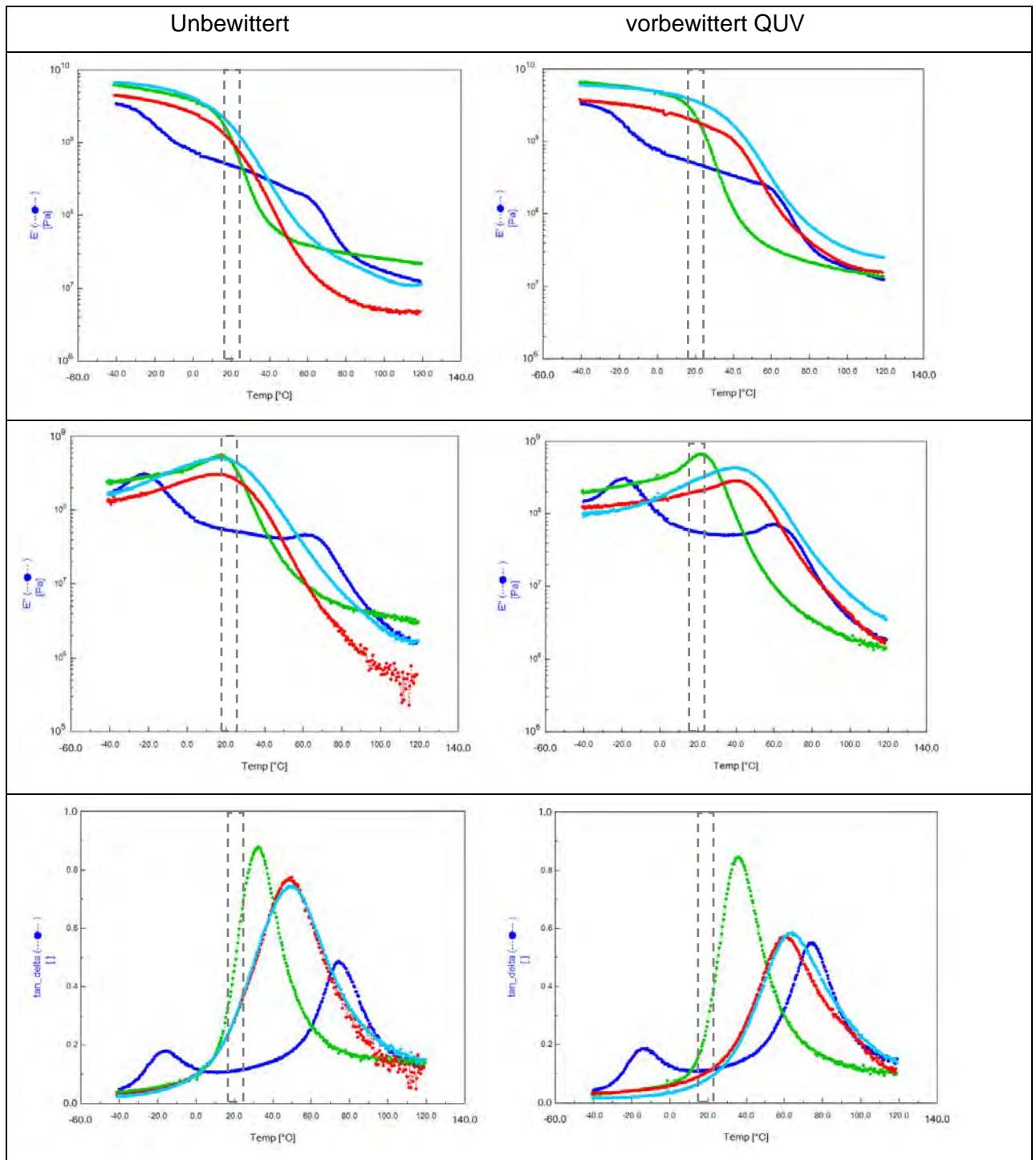


Abbildung 42 Originalbeschichtungen ohne NFC; — A, — B, — C und — D
 links unbewitterte Proben; rechts vorbewitterte Proben

Vergleicht man die Originalbeschichtungen im Neuzustand (unbewittert) zeigen die Beschichtungen C und D ein ähnliches viscoelastisches Verhalten (Abbildung 42). Beschichtung A zeigt im Temperaturbereich um 20°C verglichen zu den anderen drei Beschichtungen ein etwas elas-tisches Verhalten mit gleichzeitig geringerem Widerstand gegen Verformung, welches sich in geringerem Speicher- und Verlustmodul sowie in einem geringeren Verlustfaktor Tan Delta widerspiegelt. Beschichtung B dagegen zeigt eine höhere Dämpfung.

Durch die Alterung im QUV vernetzen die Alkyd-basierten Beschichtungen C und D nach und zeigen nun ein ähnlich elastisches Verhalten wie die Beschichtung A. Lediglich Beschichtung B zeigt auch nach der Alterung eine etwas höhere Dämpfung (höherer Tan Delta). Während Beschichtung B, C und D durch die Vorbewitterung an Steifigkeit zunehmen, das heisst bei einer aufgebrachten Spannung weniger Dehnung zulassen, bleibt dieser Wert bei Beschichtung A fast unverändert. Beschichtung A ist deutlich weniger steif im Bereich um 20°C und kann dieses positive Verhalten auch bei niedrigen Temperaturen bis ca. 0°C beibehalten.

Beschichtung B zeigt im Vergleich zu den anderen drei Beschichtungen einen sehr starken Abfall des Speichermoduls E' im Temperaturbereich ab 18°C (T_g 17.4°C) bis ca. 40°C, das heisst in dieser Temperaturspanne ändert sich die Steifigkeit des Materials massiv. Während das Material bei 20°C noch einen Speichermodul von 2.326 GPa aufweist, sinkt er bereits bei einer Temperaturerhöhung von +5°C um 45% auf 1.269 GPa. Bei sommerlichen Temperaturen von 30°C ist die Steifigkeit der Beschichtung B vergleichbar mit der von Beschichtung A. Bei noch höheren Temperaturen lässt sich Beschichtung B deutlich einfacher verformen als die Beschichtungen A, C und D. Den höchsten Widerstand gegen eine Verformung leistet erwartungsgemäss die Beschichtung D. Ein ähnliches Verhalten über den getesteten Temperaturbereich zeigt auch die ebenfalls Alkyd-basierte Beschichtung C. Allerdings ist das Material durch die Kombination mit PU etwas weniger steif, was in einem etwas geringeren E' sichtbar wird.

Im Folgenden wird gezeigt, in welchem Masse NFC den Speichermodul E', Verlustmodul E" und Verlustfaktor Tan Delta beeinflusst. Der Verlauf in Abhängigkeit der Temperatur ist für alle Beschichtungen in den folgenden Abbildungen (Abbildung 43 bis Abbildung 46) dargestellt. In einem Diagramm befinden sich immer die Originalbeschichtung mit — 0% NFC sowie die Varianten mit — 2,5% NFC, — 3,5% NFC und — 5% NFC.

Beschichtung A:

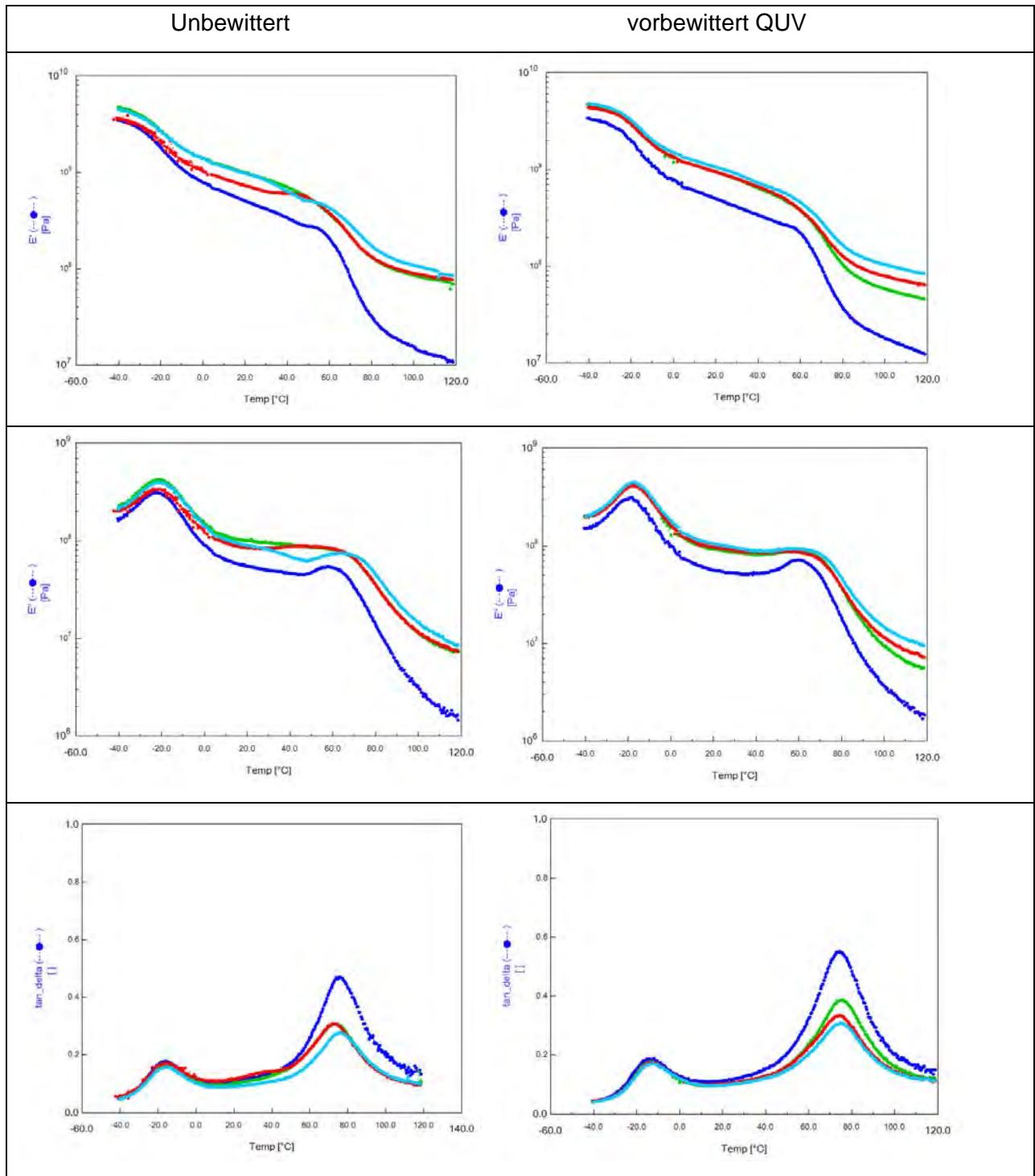


Abbildung 43 Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor der Beschichtung A
 — 0%, — 2,5%, — 3,5% und — 5% NFC;
 links unbewitterte Proben; rechts vorbewitterte Proben

Beschichtung B:

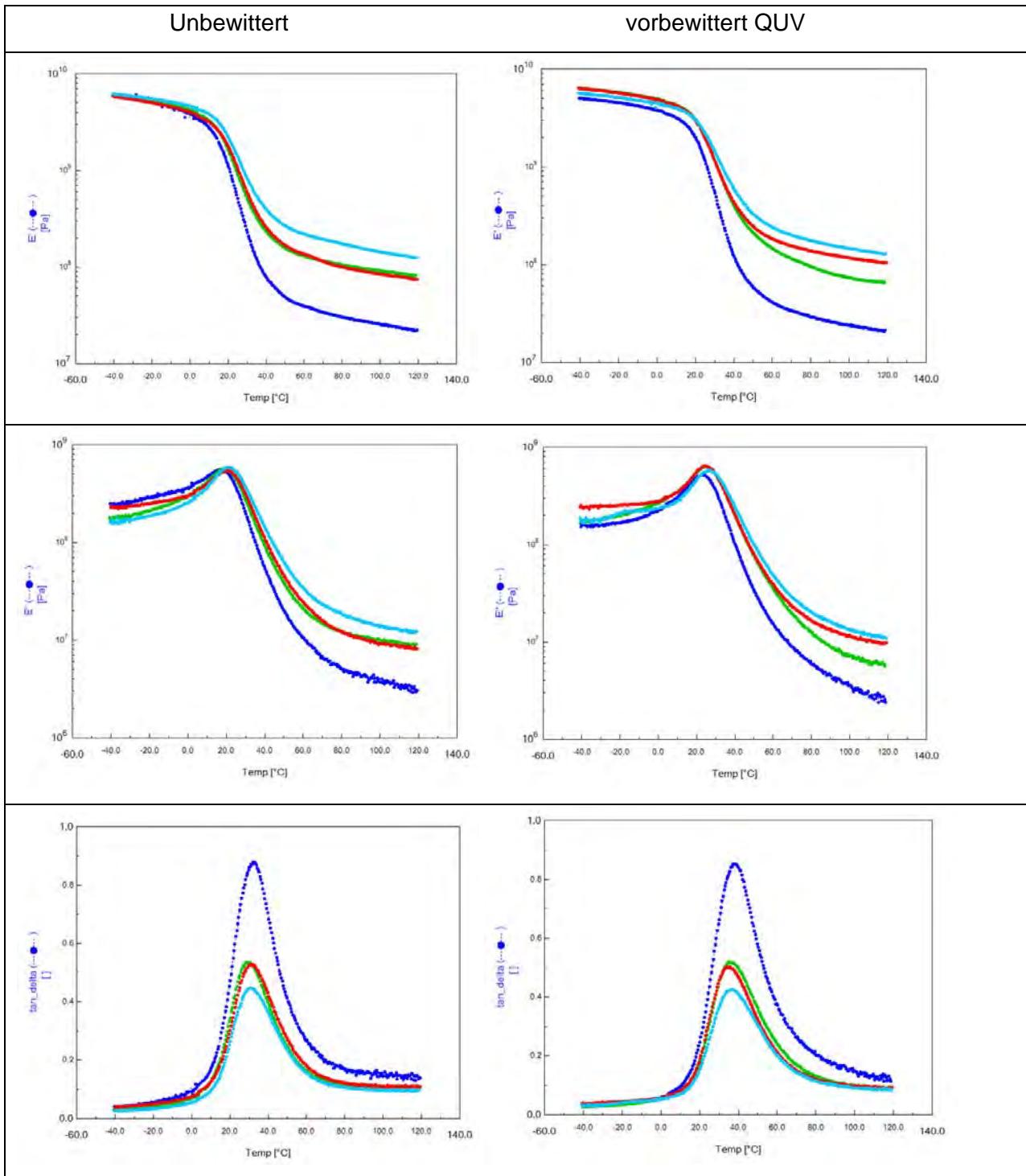


Abbildung 44 Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor der Beschichtung B
 — 0%, — 2,5%, — 3,5% und — 5% NFC;
 links unbewitterte Proben; rechts vorbewitterte Proben

Beschichtung C:

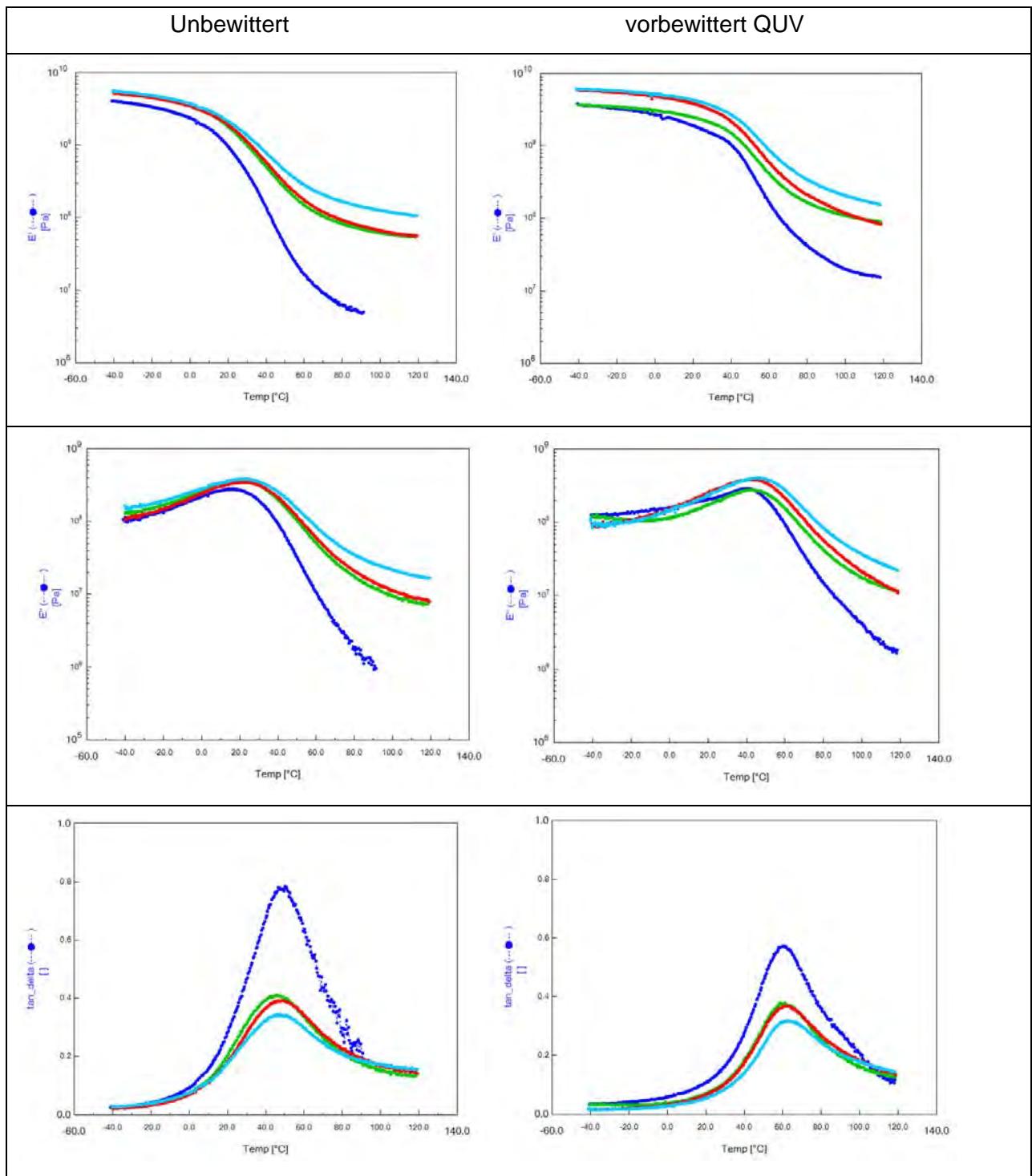


Abbildung 45 Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor der Beschichtung C
 — 0%, — 2,5%, — 3,5% und — 5% NFC;
 links unbewitterte Proben; rechts vorbewitterte Proben

Beschichtung D:

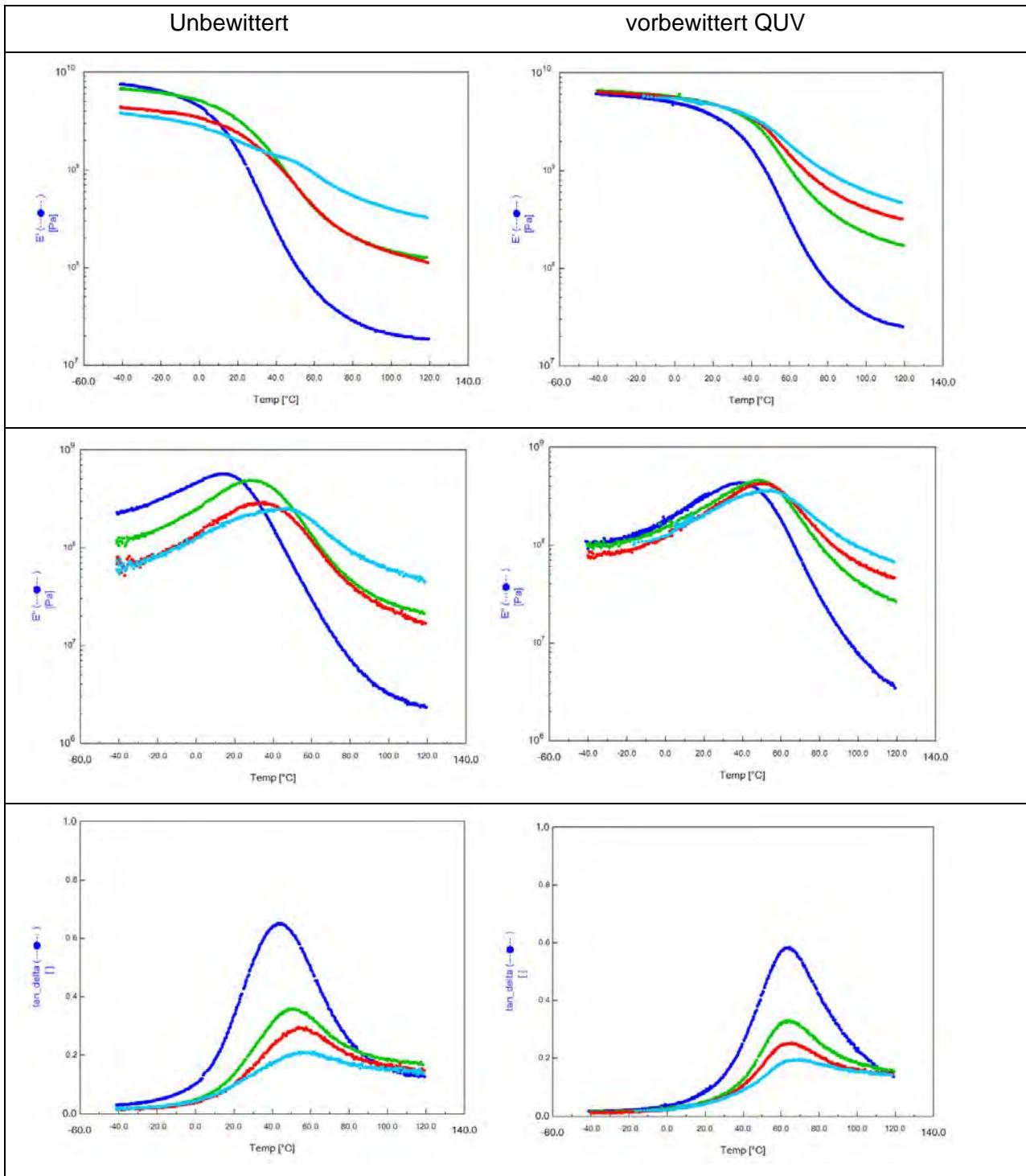


Abbildung 46 Speichermodul, Verlustmodul und Verlustfaktor der Beschichtung D
 — 0%, — 2,5%, — 3,5% und — 5% NFC;
 links unbewitterte Proben; rechts vorbewitterte Proben

Die Verstärkung der Beschichtungen mit NFC führt dazu, dass das Material mehr Energie speichert kann ($E' \uparrow$), die wiederum als Triebfeder für die Rückdeformation wirkt. Das Dämpfungs-

vermögen des NFC-verstärkten Materials dagegen ist reduziert (Tan Delta ↓), es wird somit elastischer.

Allerdings sind die Unterschiede durch NFC an den vorbewitterten Proben im Temperaturbereich um 20°C nicht sehr gross. Erst bei höheren Temperaturen zeigt sich die Wirkung von NFC deutlich. Das Beschichtungsmaterial bleibt formbeständiger.

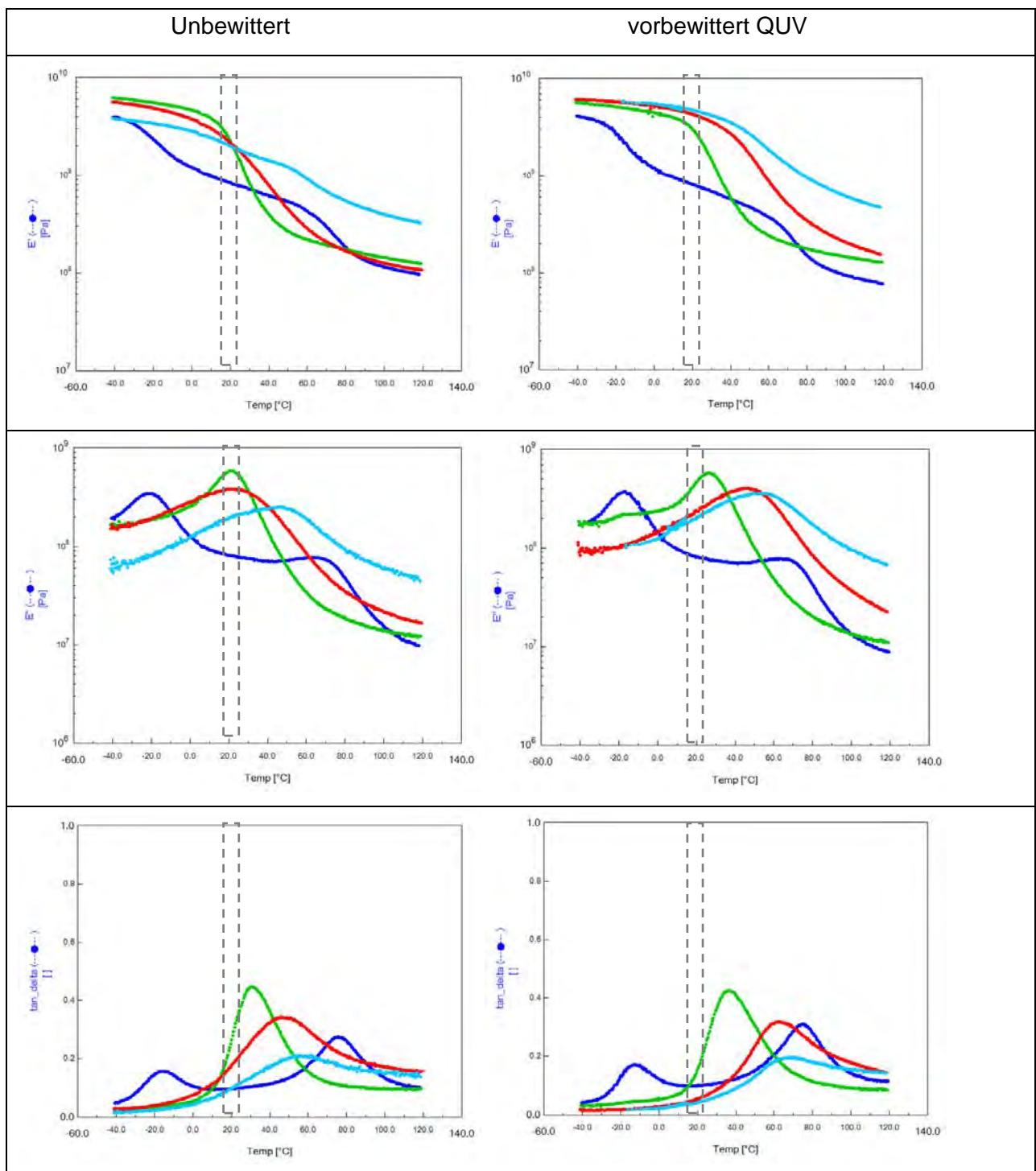


Abbildung 47 Beschichtungen mit 5% NFC; — A, — B, — C und — D
 links unbewitterte Proben; rechts vorbewitterte Proben

Der Vergleich der vier Beschichtungen mit 5% NFC untereinander zeigt im Temperaturbereich um 20°C vergleichbare Charakteristika wie schon bei den Beschichtungen ohne NFC (siehe Abbildung 42).

Am DMA (Q800, TA Instruments) wurden für alle 4 Anstrichsysteme mit 0% NFC, 2.5% NFC, 3.5% NFC und 5% NFC an freien unbewitterten Filmen Spannungsrelaxationsversuche (Zugversuch) bei 85% rel. Luftfeuchte und zwei unterschiedlichen Temperaturen (10°C und 30°C) durchgeführt. Die Messungen geben Aufschluss darüber, wie schnell ein Material bei gleichbleibender Dehnung die inneren Spannungen durch viskoelastische Verformung abbauen kann. Als Mass für den Widerstand eines Materials gegen viskoelastische Verformung wird der Relaxationsmodul E_r ausgewiesen.

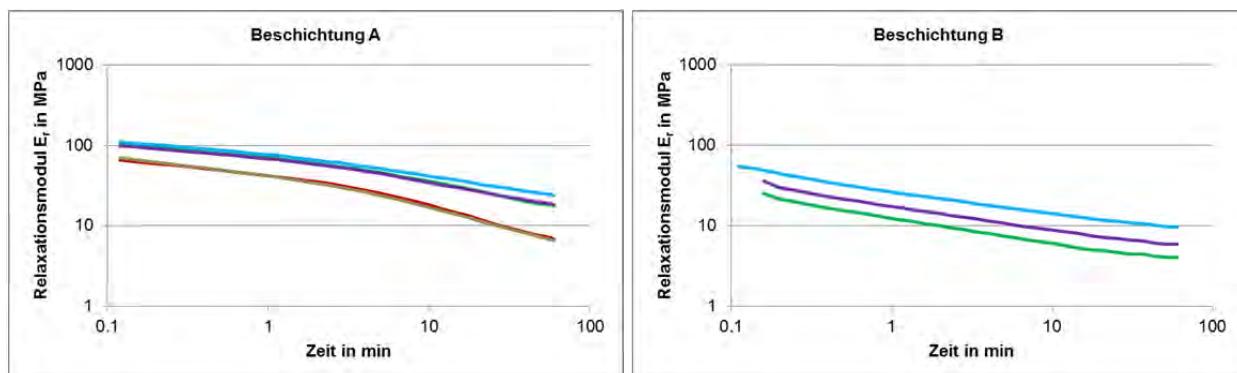
Aus den freien Filmen wurden rechteckige Zugproben (Breite 6 mm, Länge 50 mm) gestanzt.

Folgende Maschinenparameter wurden gewählt:

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| Einspannlänge | 20 mm |
| Konditionierung | 50 min bei 23°C bzw. 10°C und 85% RH |
| Dehnung | 1 % während 60 min |
| Entspannung | 60 min |

Im QUV gealterte Filme der Originalbeschichtungen wurden ebenfalls für die Relaxationsversuche verwendet. Die Filme wurden im QUV 480 Stunden bei einer Stärke von 0,89 W/(m²nm) im Wellenlängenbereich 340 nm bestrahlt. Damit ist Länge und Intensität der UV Bestrahlung vergleichbar mit der Behandlung der beschichteten Proben für die Hagelversuche (vergleiche Stufe 3 in Tabelle 4).

Die Ergebnisse zur Bestimmung des Relaxationsmoduls bei 23°C / 85% RH sind in Abbildung 48 dargestellt. Die Proben B 0% NFC und die vorbewitterten Proben B1 0% sowie die vorbewitterten Proben D1 0% NFC konnten nicht gemessen werden. Sie rissen beim Aufbringen der Dehnung. Auch Dehnungen von nur 0.5% waren nicht möglich.



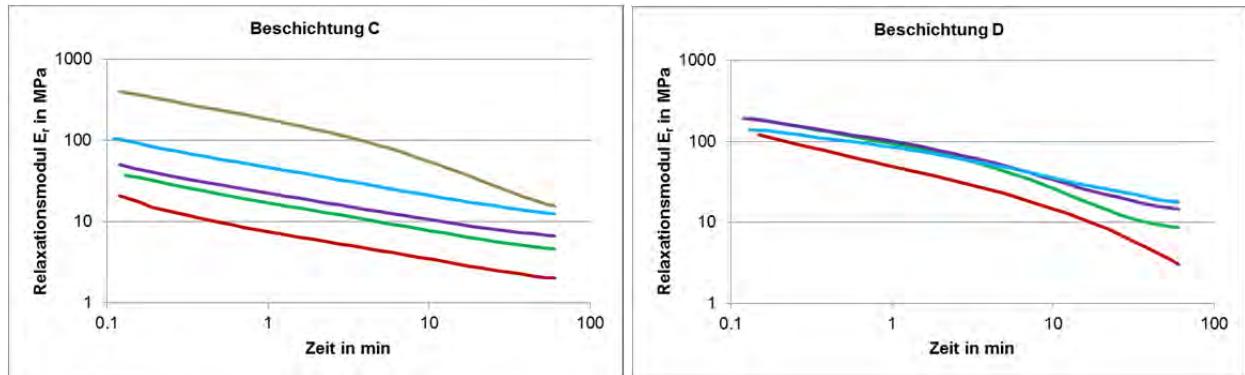


Abbildung 48 Relaxationsmodul E_r für die Beschichtungen A, B, C und D mit
 — 0% NFC, — 2,5% NFC, — 3,5% NFC, — 5% NFC und — 0% NFC nach QUV
 (Messung bei 23°C / 85% RH)

Die Ergebnisse der Relaxationsversuche zeigen, dass die Zugabe von NFC zu einer Erhöhung des Relaxationsmoduls führt, das heisst während einer aufgebrachten Spannung werden durch das NFC-Netzwerk Relaxationsvorgänge eingeschränkt. Ein Fitting der Messkurven zeigt den theoretisch Relaxationsmodul nach einer unendlichen Zeit (Abbildung 49).

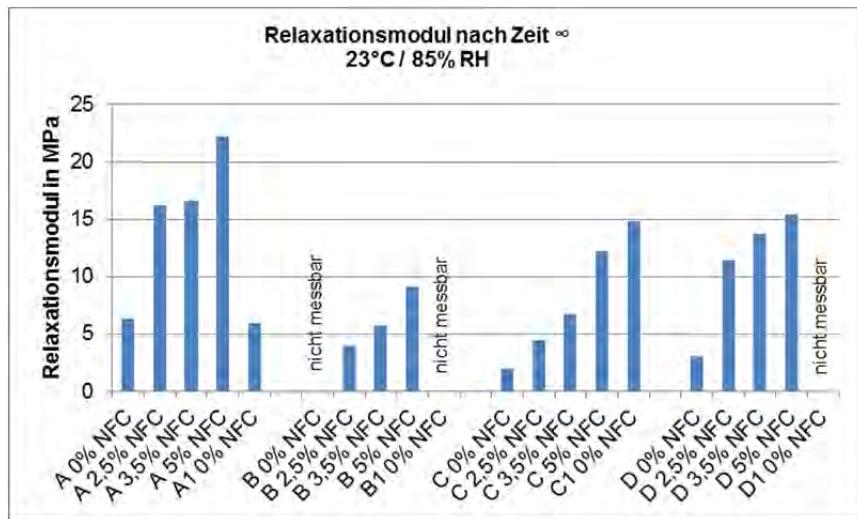


Abbildung 49 Theoretischer Relaxationsmodul nach $t \rightarrow \infty$ (23°C / 85% RH)

Das Fitting der Messdaten zeigt, dass der Relaxationsmodul gemessen nach 60 min und der im Fitting errechnete Relaxationsmodul nach $t \rightarrow \infty$ annähernd gleich sind, was bedeutet, dass nach den 60 min keine weitere Relaxation mehr zu erwarten ist.

Ebenfalls zeigt sich in den Relaxationsversuchen, dass Beschichtung A durch die Alterung im QUV seine Eigenschaften wenig bis gar nicht verändert, wogegen bei Beschichtung C nach der Alterung ein wesentlich erhöhter Relaxationsmodul messbar war.

Kältere Temperaturen führen generell zu höheren Relaxationsmodulen. Gleichzeitig sinkt die Duktilität der Materialien, das heisst die Eigenschaft sich unter Belastung plastisch zu verformen, nimmt ab (Abbildung 50).

Bei den Proben C mit 5% NFC und allen Proben der Beschichtung D mit NFC war es nicht möglich, Relaxationsmessungen bei 10°C und einer Dehnung von 1% durchzuführen.

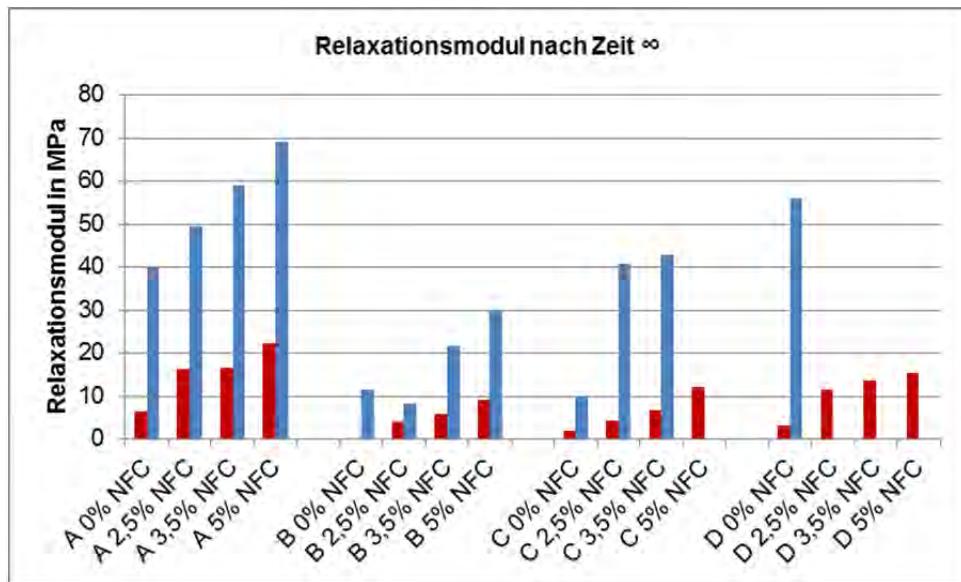


Abbildung 50 Theoretischer Relaxationsmodul nach $t \rightarrow \infty$ bei unterschiedlichen Temperaturen
— 23°C / 85% RH, — 10°C / 85% RH

Keine der getesteten Proben konnte sich innerhalb der 60 min Messdauer vollständig (100%) zurückverformen (Abbildung 51). Nach 60 min konnten sich die Beschichtungen um

| | |
|----------|------|
| A 0% NFC | 31% |
| B 0% NFC | n.m. |
| C 0% NFC | 65% |
| D 0% NFC | 21% |

zurückverformen. Die Varianten mit 2.5%, 3.5% und 5% NFC unterscheiden sich nur gering voneinander und liegen für die Beschichtung D im Bereich zwischen 30% und 40%, für die Beschichtungen A und B im Bereich zwischen 40% und 50% sowie für die Beschichtung C im Bereich zwischen 50% und 60% Rückverformung.

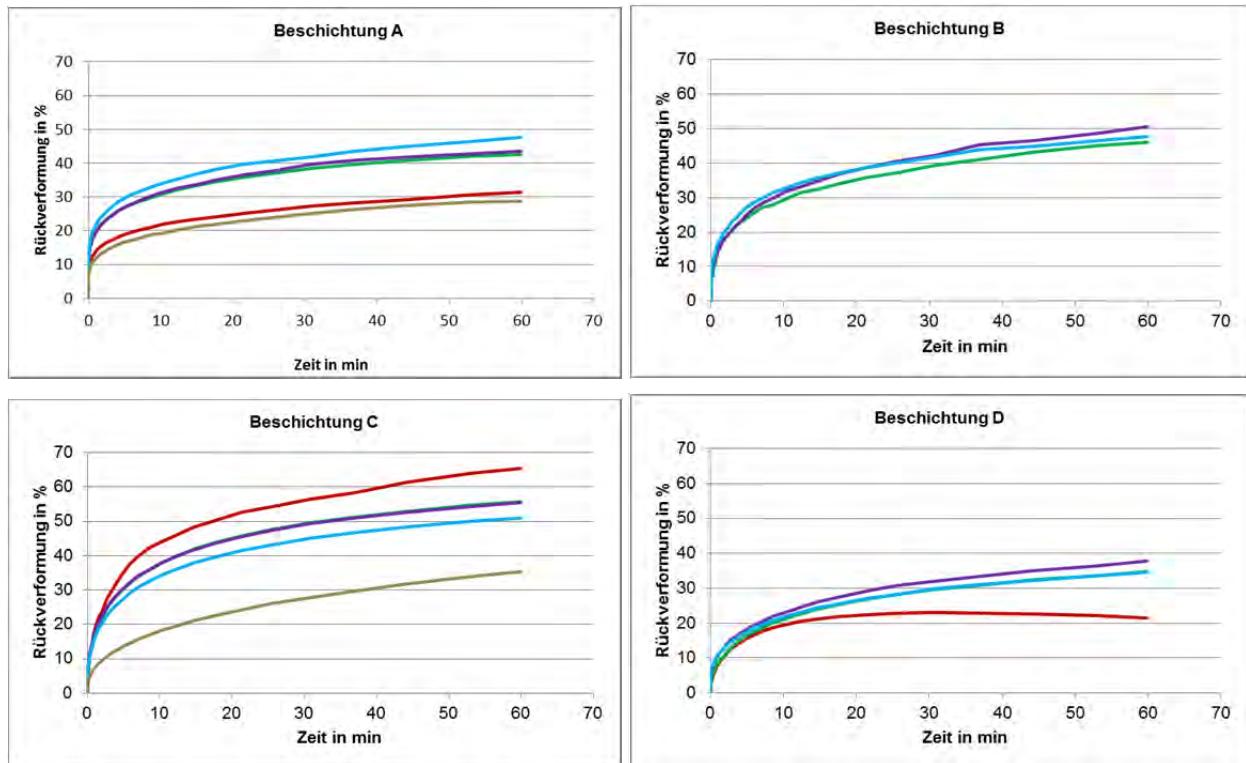


Abbildung 51 Rückverformung der Beschichtungen A, B, C und D nach Entlastung
 — 0% NFC, — 2,5% NFC, — 3,5% NFC, — 5% NFC und — 0% NFC nach QUV
 (Messung bei 23°C / 85% RH)

Ein Fitting der Messkurven zeigt die Zeit, welche theoretische bis zur vollständigen Rückverformung notwendig gewesen wäre (Abbildung 52).

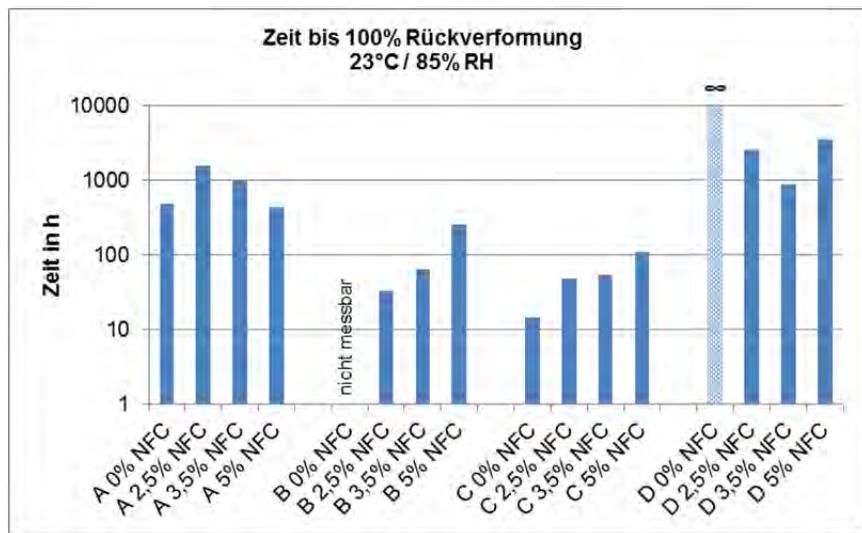


Abbildung 52 Theoretischer Zeitbedarf bis zur vollständigen Rückverformung der Proben nach Relaxation (23° / 85% RH)

Die gefitteten Messkurven zeigen, dass theoretisch alle Proben (ausser D 0% NFC) nach unterschiedlich langer Zeit zum Ausgangszustand zurückkehren würden. Die Beschichtungen B und C zeigen theoretische Rückformungszeiten im Bereich zwischen 15 Stunden und 4,5 Tagen.

Bei den Beschichtungen B und C kann in der Praxis durchaus von einer realistischen Chance der vollständigen Rückverformung ausgegangen werden, das heisst die während der Dehnung aufgetretenen Deformationen sind reversibel.

Bei Beschichtung A mit bis zu über 100 Tagen und Beschichtung D mit bis zu 4,5 Monaten theoretischer Rückverformungszeit scheint eine vollständige Rückverformung in der Praxis eher unwahrscheinlich. Daher muss bei Beschichtung A und D eher davon ausgegangen werden, dass durch die Dehnung von 1% bereits irreversible Verformungen aufgetreten sind. Diese irreversiblen Verformungen durch Überdehnung können sowohl nichtlinear-viskoelastische Deformationen (Mikroschädigungen durch die Aufhebung von Verknüpfungen des Molekülverbands) als auch plastische Deformationen (Schädigungen durch molekulare Gleit- und Deformationsprozesse bis hin zum Versagen) sein.

NFC verhindert bei einigen Beschichtungen in einem gewissen Umfang diese Überdehnung und führt somit zu einem besseren Rückverformungsverhalten, wie zu sehen bei Beschichtung A und D. Bei Beschichtungen mit einem bereits sehr vorteilhaften Rückverformungsverhalten (reversibel) wie z.B. bei Beschichtung B und C wird dieses durch NFC eher verlangsamt.

Vorbewitterten Proben zeigen eine verlangsamte Rückverformung nach der Entlastung.

Niedrigere Temperaturen (10°C) führten bei allen gemessenen Varianten zu einer rascheren Rückverformung (ausgenommen Beschichtung C ohne NFC). Entsprechend den gefitteten Messkurven würden theoretisch alle Proben nach maximal einer Woche vollständig in den Ausgangszustand zurückkehren (Abbildung 53).

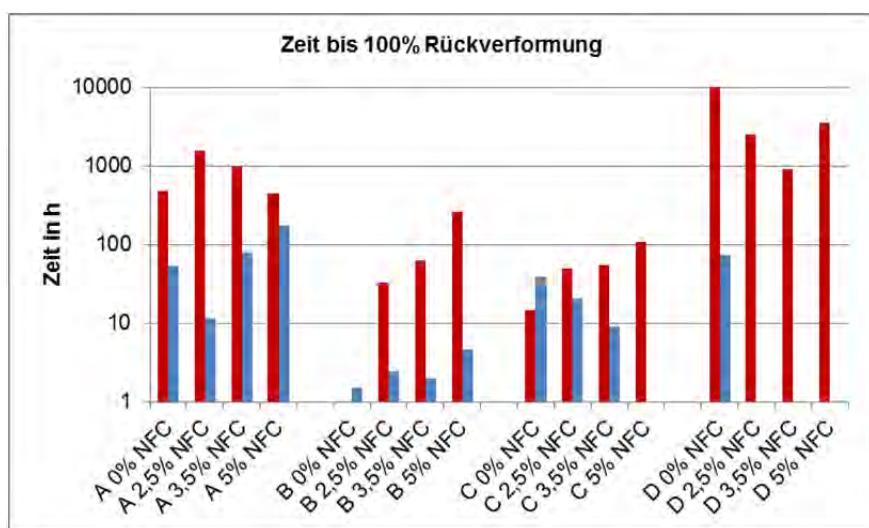


Abbildung 53 Theoretischer Zeitbedarf bis zur vollständigen Rückverformung der Proben
— 23°C / 85% RH, — 10°C / 85% RH

Eine Gegenüberstellung der vier Beschichtungen zeigt, dass die Beschichtungen B und C ein vorteilhafteres Relaxationsverhalten zeigen, als die Beschichtungen A und D. Vor allem bei küh-

leren Temperaturen (10°C) zeigt die Beschichtung B einen geringen Relaxationsmodul und eine schnelle Rückverformung.

5.6 Bereitstellung und Charakterisierung der beschichteten Holzproben für Hagelversuche

Für die geplanten Hagelversuche wurden die unter Kapitel 4.3 beschriebenen Lamellen in zwei verschiedene Größen zugeschnitten. Die Abmessungen entsprachen unserem Standard für die Freibewitterung (365 x 75 mm) bzw. für die künstliche Bewitterung im QUV (300 x 75 mm).

Nach dem Zuschnitt wurden die Proben von Hand (Pinsel) beschichtet (*Beschichtungen siehe Kapitel 5.3*). Es wurde eine Trockenschichtdicke von ca. 70 µm angestrebt. Nach dem zweiten Anstrich wurden die Trockenschichtdicken kontrolliert und wenn notwendig ein dritter oder vierter Anstrich aufgebracht.

Bis zur weiteren Verwendung wurden die Proben im Normklima 20°C /65% RH gelagert.

5.6.1 Künstliche Vorbewitterung

Ein Teil der beschichteten Holzproben wurde vor der Behagelung künstlich gealtert. Insbesondere bei den Alkyden wird durch die künstliche Bewitterung eine Nachvernetzung angeregt, die wiederum zu wesentlich spröderen Beschichtungsschichten führt. Die so vorbewitterten Proben simulieren später bei der Behagelung eine bereits seit längerer Zeit in Gebrauch befindliche Oberfläche.

Alle Proben wurden mit 4 Zyklen bewittert, was einer Gesamtdauer von 4 Wochen entspricht. Ein Bewitterungszyklus dauert eine Woche (168 h) und besteht aus einer Kondensationsphase, gefolgt von einem Unterzyklus mit Besprühen und Bestrahlen mit einer UV-A 340-Lampe, wie in Tabelle 4 angegeben.

Die Position der Proben wurde nach jedem Bewitterungszyklus horizontal und vertikal durch Drehen über Kopf verändert. Nach der künstlichen Bewitterung im QUV wurden die Proben wieder im Normklima 20°C/ 65 % RH gelagert.

Alle Beschichtungen waren nach der einmonatigen QUV Bewitterung noch intakt. Es konnten keine Risse oder ähnliches festgestellt werden.

Tabelle 4 Bewitterungszyklus QUV gemäss EN 927-6

| Stufe | Funktion | Temperatur | Dauer | Bedingung |
|-------|-----------------|------------|---|--|
| 1 | Kondensation | (45 ±3) °C | 24 h | |
| 2 | Unterzyklus 3+4 | | 144 h bestehend aus 48 Zyklen von je 3 h der Stufen 3 und 4 | |
| 3 | UV | (60 ±3) °C | 2,5 h | eingestellte Bestrahlungsstärke 0,89 W/(m²nm) bei 340 nm |
| 4 | Besprühen | | 0,5 h | 6 l/min bis 7 l/min, keine UV-Strahlung |

5.6.2 Bestimmung Trockenschichtdicke

An jeweils 2 gestrichenen Proben pro Beschichtung wurde die Trockenschichtdicke der Beschichtung unter dem Lichtmikroskop bestimmt. Der Mittelwert aus zehn Einzelmessungen pro Probe (gesamt 20 Einzelmessungen pro Beschichtung) wird als durchschnittliche Schichtdicke ausgewiesen.

Die angestrebte Trockenschichtdicke von ca. 70 µm konnte erreicht werden (Abbildung 54). Der Mittelwert aller gemessenen Schichtdicken beträgt 71.3 µm (± 20.5 µm).

Die Ursachen für die grösseren Standardabweichungen sind vielfältig. Generell sind beim manuellen Auftrag der Beschichtung mit dem Pinsel grössere Schwankungen der Schichtdicke zu erwarten, als beim maschinellen Auftrag. Eine weitere Ursache besteht darin, dass durch Beifügen der NFC unterschiedliche Viskositäten und Konsistenz der Beschichtungen entstehen, die ebenfalls zu Schwankungen der Schichtdicke führen kann. Hinzu kommt eine Messungenauigkeit von ca. ± 5 µm bei der Schichtdickenmessung selbst.

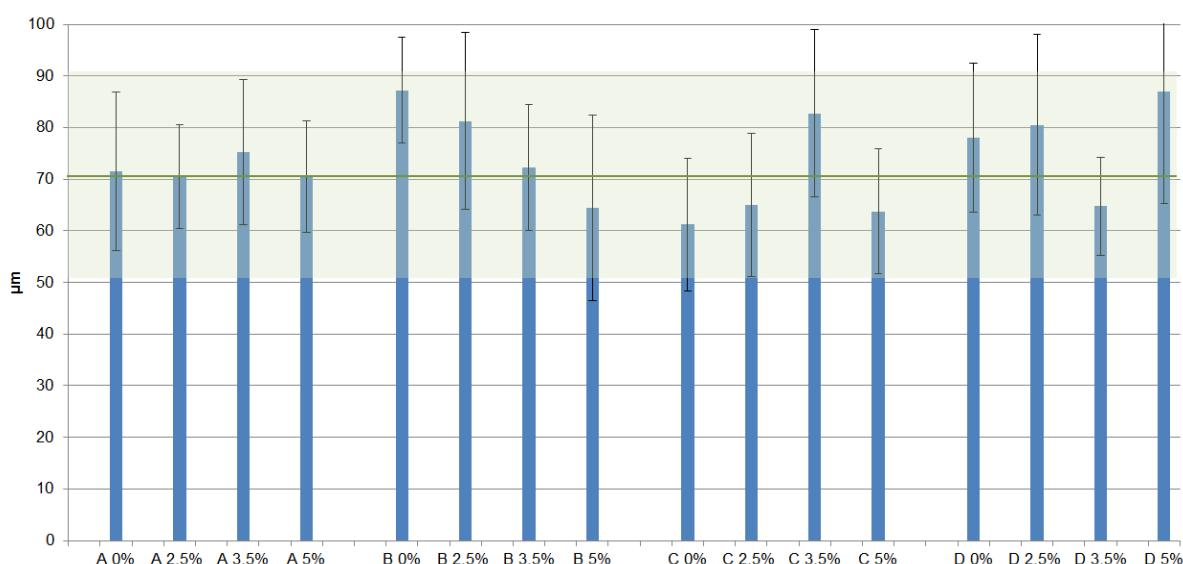


Abbildung 54 Mittlere Schichtdicken der Beschichtungen A, B, C, und D mit 0% bis 5% NFC
 (--- Mittelwert aller Messungen; □ Standardabweichung aller Messungen)

5.6.3 Wasserdurchlässigkeit der Beschichtung

Die Wasserdurchlässigkeit der beschichteten Holzproben wurde im Neuzustand und nach der Vorbewitterung im QUV (siehe Kap. 5.6.1) in Anlehnung an die Norm EN 927-5 bestimmt (Abbildung 55). Hierfür wird die während einer bestimmten Zeit durch die Beschichtung hindurch kapillar als auch die durch Diffusion aufgenommene Wassermenge durch Wägung gemessen. Es wurden jeweils 3 Proben pro Variante getestet.



Abbildung 55 Wasserlagerung der Proben zur Bestimmung der Wasseraufnahme

Die Proben wiesen dazu nur auf der 'Vorderseite' die jeweilige Testbeschichtung auf, während alle übrigen Flächen feuchte undurchlässig versiegelt waren (2- bis 4-facher Anstrich mit 2K-PU Lackfarbe). Die Vorbehandlung der Proben (zwei mal 24 h Wasserlagerung mit anschließender Trocknung und Rückkonditionierung) wurde wie in der Norm vorgeschrieben durchgeführt.

Als Kennwert der Feuchteschutzwirkung wurde die flächenbezogene Wasseraufnahme in g/m² nach 72 Stunden Versuchsdauer (für EN 927-2: 72 h) berechnet.

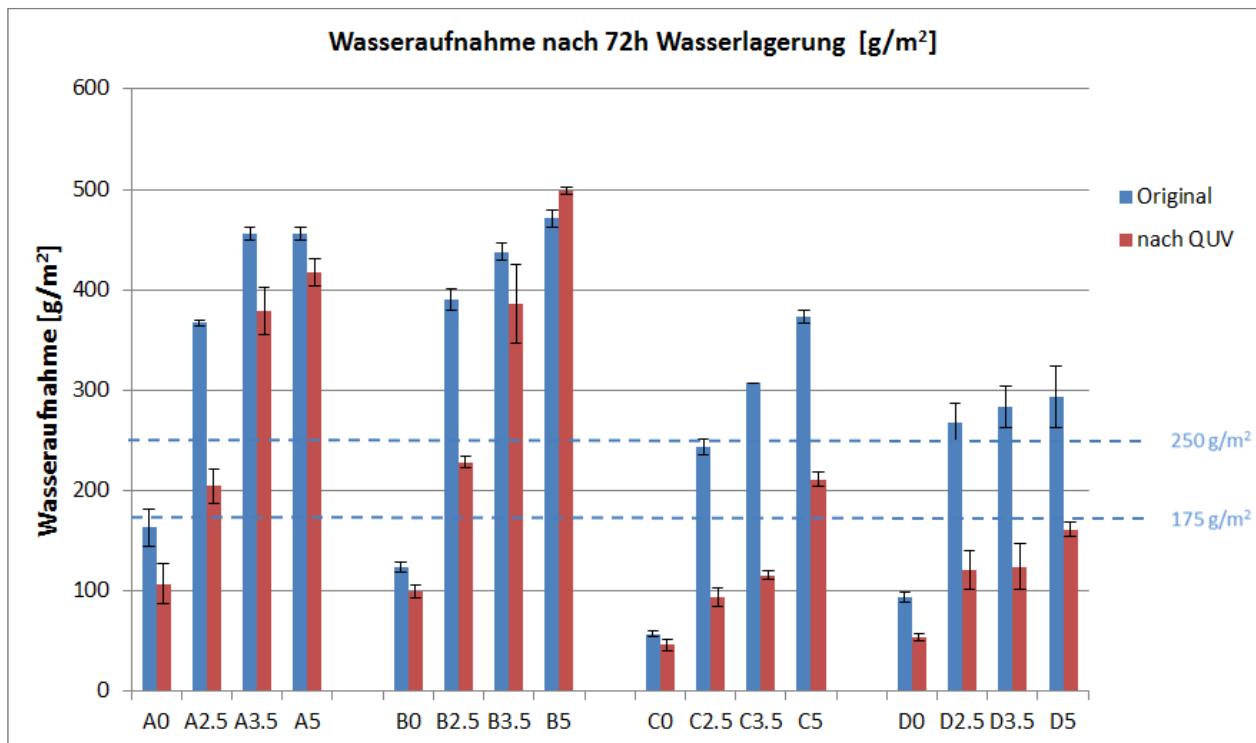


Abbildung 56 Wasseraufnahme nach 72 Stunden Kaltwasserlagerung gemäss EN 927-2

Alle vier getesteten Originalbeschichtungen blieben unter dem für masshaltige Bauteile empfohlenen Grenzwert von 175 g/m². Die einmonatige Vorbewitterung im QUV verbesserte die Dichtigkeit aller Beschichtungen.

Durch die Einbindung von NFC wurden alle Beschichtungen poröser und somit diffusionsoffener. Diesen Trend konnten wir bereits an transparenten Holzbeschichtungen beobachten (KÜNNIGER 2016).

Die prozentuale Mehraufnahme von Wasser bei den Beschichtungen mit NFC ist sehr unterschiedlich (siehe **Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**). Die grösste Veränderung der Dichtigkeit zeigte Beschichtung C. Im Vergleich zur Originalbeschichtung wurde bei einem Anteil von 5% NFC in der Beschichtung 6½- mal mehr Wasser aufgenommen.

Allerdings hat sich bei den Versuchen auch gezeigt (Messungen der Vorkonditionierung), dass die Feuchtigkeit bei allen Proben wieder abgegeben werden konnte. Die erhöhte Durchlässigkeit der Beschichtung durch die Einbindung von NFC ist somit bei Wasseraufnahme als auch bei Wasserabgabe gegeben.

Tabelle 5 Wasseraufnahme nach 72 Stunden Kaltwasserlagerung gemäss EN 927-2

| | Mittelwert in g/m ² | | | | % | | |
|------|--------------------------------|-------|----------|-------|----------|------------|----------|
| | Original | Stabw | nach QUV | Stabw | Original | nach QUV | nach QUV |
| A0 | 163.4 | 18.5 | | 106.8 | 19.9 | 100 | 65 |
| A2.5 | 367.3 | 2.8 | | 204.5 | 17.2 | 225 | 125 |
| A3.5 | 455.9 | 5.9 | | 378.8 | 23.3 | 279 | 232 |
| A5 | 455.9 | 6.5 | | 417.1 | 13.3 | 279 | 255 |
| B0 | 123.4 | 5.0 | | 99.5 | 6.2 | 100 | 81 |
| B2.5 | 390.1 | 10.8 | | 228.4 | 5.9 | 316 | 185 |
| B3.5 | 437.8 | 8.7 | | 386.0 | 39.2 | 355 | 313 |
| B5 | 471.2 | 8.6 | | 498.6 | 3.6 | 382 | 404 |
| C0 | 57.4 | 3.2 | | 46.4 | 5.5 | 100 | 81 |
| C2.5 | 243.5 | 7.7 | | 94.1 | 9.0 | 425 | 164 |
| C3.5 | 306.9 | 0.5 | | 115.8 | 4.3 | 535 | 202 |
| C5 | 373.3 | 6.5 | | 211.3 | 6.8 | 651 | 368 |
| D0 | 93.1 | 5.0 | | 53.6 | 3.4 | 100 | 58 |
| D2.5 | 267.6 | 19.6 | | 120.7 | 19.6 | 287 | 130 |
| D3.5 | 283.5 | 20.4 | | 123.9 | 22.8 | 305 | 133 |
| D5 | 293.7 | 30.4 | | 161.3 | 6.7 | 315 | 173 |

Mittelwert aus jeweils 3 Proben inklusive Standardabweichung, sowie der prozentuale Wert bezogen auf die Originalbeschichtung

5.7 Hagelversuche

Zur Beurteilung des Hagelwiderstandes wurden Hagelversuche mit Eiskugeln durchgeführt.

Eine Übersicht über die verschiedenen Hagelversuche gibt Abbildung 57.

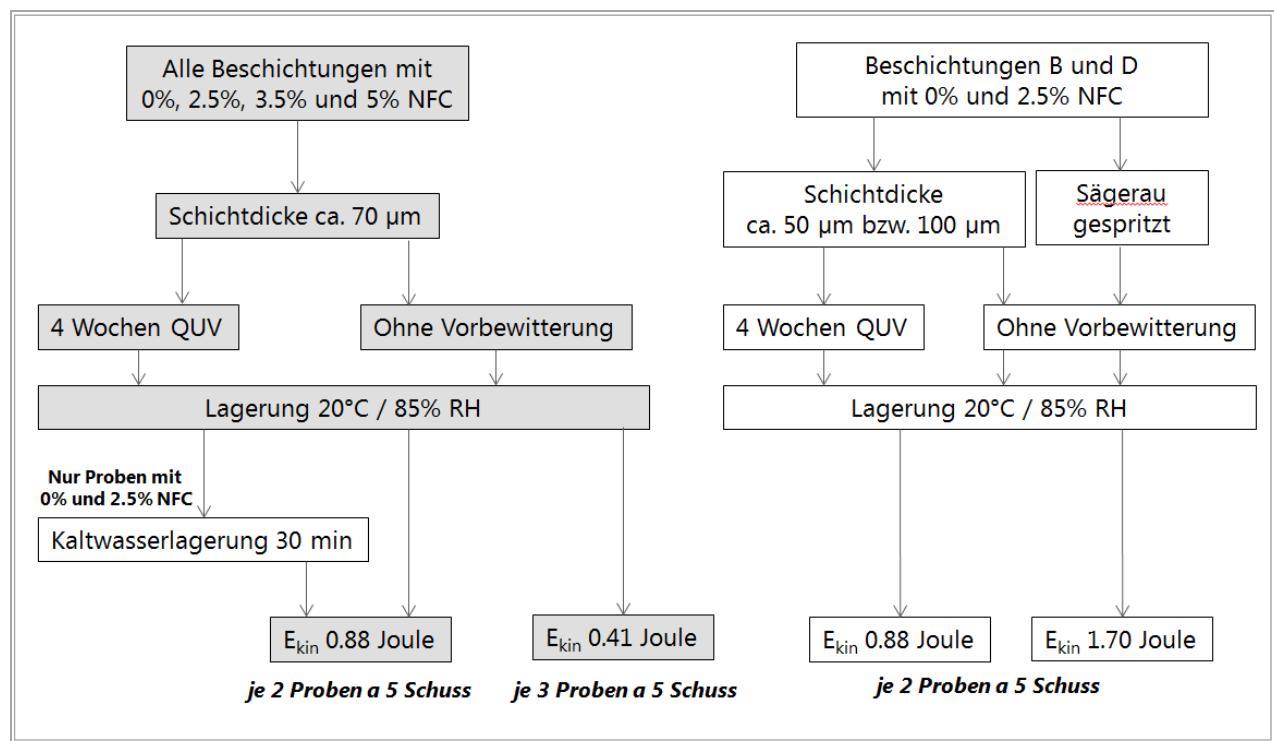


Abbildung 57 Varianten für die Hagelversuche (Hauptversuch grau unterlegt)

Zusätzlich zum Hauptversuch (grau unterlegt) wurden weitere ausgewählte Varianten getestet, um den Einfluss der Schichtdicke bzw. der Oberflächenfeuchte auf den Hagelwiderstand zu untersuchen. Auch wurden sägeraue Proben behagelt, welche zuvor mit Beschichtung B und D (0% und 2.5% NFC) durch Spritzen beschichtet wurden.

5.7.1 Herstellung der Eiskugeln

Aus der Literaturstudie ging hervor, dass bei Hagelereignissen in der Schweiz nur ein sehr geringer Anteil der Hagelkörner einen Durchmesser von mehr als 10 mm aufweisen bzw. dass Hagelereignisse mit wesentlich grösseren Hagelkörnern eher selten sind. Daher haben wir uns entschieden, die geplanten Versuche mit den kleinstmöglichen Eiskugeln (\varnothing 20 mm) durchzuführen, die an der Empa hergestellt werden können. Die Herstellung der Eiskugeln erfolgte fortlaufend, je nach Bedarf, da sie aus Qualitätsgründen nicht länger als einen Monat gelagert werden dürfen.



Abbildung 58 Herstellung der Eiskugeln

Zur Herstellung der Eiskugeln wird Wasser in eine Silikonform eingespritzt. Die Silikonform wird danach auf einer elektrischen Kühlplatte in einem Klimaschrank positioniert. Die Eiskugeln gefrieren so langsam über Nacht von unten nach oben bei einer Umgebungstemperatur von 0.8°C. Anschließend verbleiben die Eiskugeln noch für ca. 2 Stunden bei -20°C im Klimaschrank. Danach können die Eiskugeln aus der Form entnommen und in Plastiksäcken verpackt werden (Abbildung 58).

Bis zum Verbrauch wurden die Eiskugeln in einer Kühltruhe bei -34°C gelagert.

5.7.2 Behageln der beschichteten Holzproben

Für die Hagelversuche wurde die an der Empa installierte Hagelkanone (inkl. Software) verwendet (Abbildung 59). Die Proben wurden bei einem Umgebungsklima von 23°C/ 50% RH unter einem Winkel von 45° beschossen, was ein realistisches Szenario für vertikale Fassaden-teile darstellt.



Abbildung 59 Versuchsanordnung Hagelkanone

Die Hagelproben wurden auf einer eigens für die Versuche hergestellten Unterkonstruktion befestigt, um eine Bewegung während oder nach dem Beschuss zu verhindern.

Die entsprechenden Parameter für den Beschuss können in der Software individuell ausgewählt und eingestellt werden (Abbildung 60).

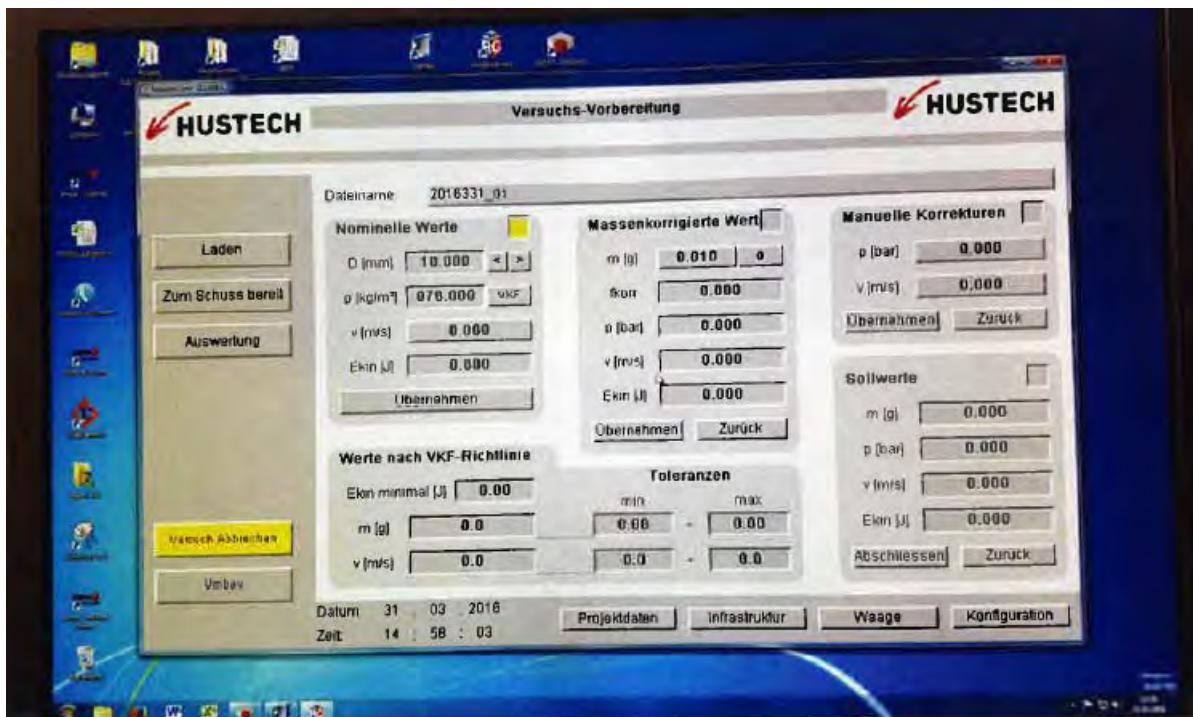


Abbildung 60 Eingabemaske in der Software der Hagelkanone

Die ursprünglich geplante Vorgehensweise, die Schussgeschwindigkeit schrittweise bis zur Schädigung der Proben zu erhöhen, konnte nicht umgesetzt werden, da selbst bei der geringstmöglichen Schussgeschwindigkeit von 15 m/s bereits Schäden an den Proben auftraten.

Daher haben wir uns für zwei Varianten mit folgenden Aufschlagenergien entschieden:

- E_{kin} 0.41 J (*Schussgeschwindigkeit ca. 15 m/s*)
- E_{kin} 0.88 J (*leicht über der geforderten E_{kin} für Hagelwiderstandsklasse 2*)

Vor jedem Schuss wurde die entsprechende Eiskugel gewogen. Basierend auf dem Gewicht der Eiskugel wird die benötigte Schussgeschwindigkeit automatisch eingeregelt, um die vorge-wählte kinetische Energie zu erreichen. Mit der während dem Schuss gemessenen Geschwin-digkeit der Eiskugel kann abschliessend die genaue Aufschlagenergie E_{kin} für jeden Schuss berechnet werden.

Es wurden insgesamt 240 Proben mit insgesamt 1330 Eiskugeln behagelt und die Einschlag-stellen als Messpunkte markiert. Jede Probe wurde solange behagelt, bis sie mindestens 5 gültige Schüsse aufwies. Als gültig zählen alle Schüsse, bei denen die Eiskugeln mit der definier-ten kinetischen Energie ($\pm 10\%$) eingeschlagen waren.

Alle Hageleinschläge wurden nummeriert und beurteilt (siehe Kapitel 5.7.3).

Danach wurden ausgewählte Proben der Freibewitterung ausgesetzt (siehe Kapitel 5.9).

5.7.3 Visuelle Beurteilung der Schadensbilder

Alle Messpunkte wurden direkt nach dem Beschuss beschriftet und visuell bewertet. Dabei wurde die Sichtbarkeit des Einschusses aus einer Entfernung von 50 cm und 5 m beurteilt. An-schliessend wurde die Eindrucktiefe jedes Einschusses (an der tiefsten Stelle) mit einem digita-len Messschieber gemessen (siehe Abbildung 61).



Abbildung 61 Markierung der Hageleinschüsse (links) und Messung der Eindrucktiefe (rechts)

Nach einer 28 tägigen Lagerung im Normklima 20°C / 65% RH, sowie nach der anschliessenden 9-monatigen Freibewitterung wurde die gesamt Beurteilung wiederholt.

Die Hageleinschüsse waren, bis auf einzelne Ausnahmen, aus einer Entfernung von 5 Metern nicht sichtbar, weder direkt nach dem Einschuss noch nach der 9 monatigen Freibewitterung. Daher werden im Bericht diesbezüglich keine weiteren Angaben gemacht.

Die Beurteilung der Sichtbarkeit aus 0.5 Metern Abstand erfolgte im Labor bei künstlichem und teilweise einfallendem Tageslicht. Die Proben konnten dabei leicht gedreht werden, um die Einschüsse beispielsweise durch entstehende Lichtreflexionen sichtbar zu machen.

Eine Beurteilung mit 'Nein' bedeutet, dass der Einschuss absolut nicht sichtbar war. Eine Beurteilung mit 'Ja' heisst, der Einschuss ist aus dieser Entfernung mit dem blosen Auge sichtbar und beinhaltet alle Beschädigungen von Delle ohne Riss, über Haarriss bis hin zur starken Abplatzung.

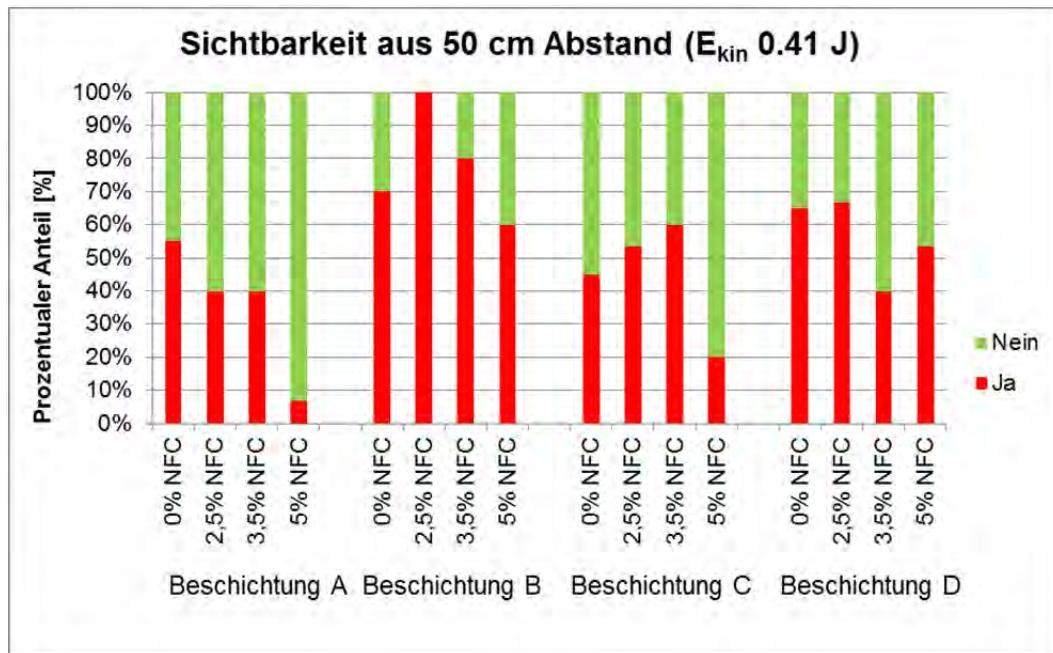


Abbildung 62 Sichtbarkeit der Hageleinschüsse auf neuwertigen Oberflächen;
Entfernung Auge-Oberfläche 0.5 m

An den neuwertigen Originalbeschichtungen ohne NFC (Abbildung 62) waren nach Hagelbe-
schuss mit geringer kinetischer Energie (E_{kin} 0.41 J) zwischen 45% und 70% der Einschüsse
aus einer Entfernung von 0.5 m sichtbar:

| | |
|----------------|---------------------|
| Beschichtung A | 55% sichtbar |
| Beschichtung B | 70% sichtbar |
| Beschichtung C | 45% sichtbar |
| Beschichtung D | 65% sichtbar |

Die Beschichtungen, die ebenfalls Polyurethan im Bindemittel enthalten (Beschichtung A und C), zeigen deutlich weniger sichtbare Beschädigungen im Vergleich zu den reinen Acrylat- (Beschichtung B) bzw. Alkyd-basierten Beschichtungen (Beschichtung D). Bei den neuwertigen Beschichtungen zeigen die Alkyd-basierten Systeme mit etwas weniger sichtbaren Schäden leichte Vorteile gegenüber den Acryl-basierten.

Der Einfluss der NFC auf die sichtbaren Beschädigungen war bei allen vier untersuchten Be-
schichtungen unterschiedlich. Während bei Beschichtung A die Erhöhung des NFC Gehaltes zu
einer klaren Reduktion der sichtbaren Beschädigungen führte, war dieser Trend bei den ande-
ren drei Beschichtungen (B, C und D) nicht so eindeutig. Jedoch zeigten bei allen vier Be-
schichtungen die Varianten mit hohen NFC Gehalten (3,5%, 5%) die geringsten von Auge
sichtbaren Beschädigungen.

Vergleicht man nun diese Ergebnisse mit denen der vorbewitterten Oberflächen (Abbildung 63) zeigen sich klare Unterschiede. An den vorbewitterten Originalbeschichtungen ohne NFC waren an:

- Beschichtung A (PU/Acrylat) weniger Beschädigungen sichtbar; 55% → **20%**
- Beschichtung B (Acrylat) weniger Beschädigungen sichtbar; 70% → **53%**
- Beschichtung C (PU/Alkyd) mehr Beschädigungen sichtbar; 45% → **67%**
- Beschichtung D (Alkyd) mehr Beschädigungen sichtbar; 65% → **93%**

Im Gegensatz zu den unbewitterten Oberflächen zeigen die bewitterten Acryl-basierten Beschichtungen deutlich weniger sichtbare Beschädigungen im Vergleich zu den bewitterten Alkyd-basierten.

Die Varianten mit NFC zeigen bei Beschuss mit geringer kinetischer Energie (E_{kin} 0.41 J) deutlich mehr sichtbare Beschädigungen als die Originalbeschichtungen. Es gibt einen klaren Trend; bei Erhöhung der NFC Konzentration sind deutlich mehr Beschädigungen sichtbar. Lediglich Beschichtung D zeigt einen leicht gegenläufigen Trend.

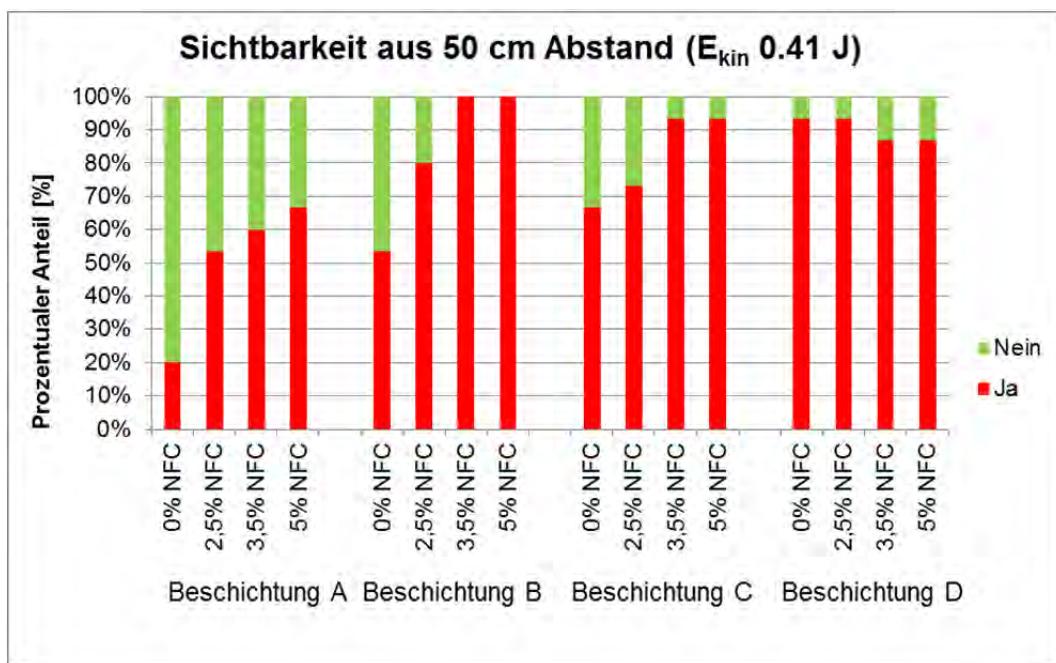


Abbildung 63 Sichtbarkeit der Hageleinschüsse auf vorbewitterten Oberflächen;
Entfernung Auge-Oberfläche 0.5 m

An den neuwertigen Originalbeschichtungen ohne NFC (Abbildung 64) waren nach Hagelbeschuss mit höherer kinetischer Energie (E_{kin} 0.88 J) zwischen 80% und 90% der Einschüsse aus einer Entfernung von 0.5 m sichtbar:

- Beschichtung A **80%** sichtbar
Beschichtung B **90%** sichtbar

| | |
|----------------|---------------------|
| Beschichtung C | 80% sichtbar |
| Beschichtung D | 90% sichtbar |

Wie schon beim Beschuss mit geringer kinetischer Energie zeigen die Beschichtungen, bei denen Polyurethan im Bindemittel enthalten ist (Beschichtung A und C), auch beim Beschuss mit höherer Geschwindigkeit weniger sichtbare Beschädigungen im Vergleich zu den reinen Acrylat- (Beschichtung B) bzw. Alkyd-basierten Beschichtungen (Beschichtung D).

Während an Beschichtung A ein klarer positiver Effekt der NFC bezüglich sichtbarer Schäden zu verzeichnen ist, zeigen die Beschichtungen B und D mit 2.5% NFC lediglich eine leichte Verbesserung von 20% bzw. 10%, Beschichtung C gar eine Verschlechterung.

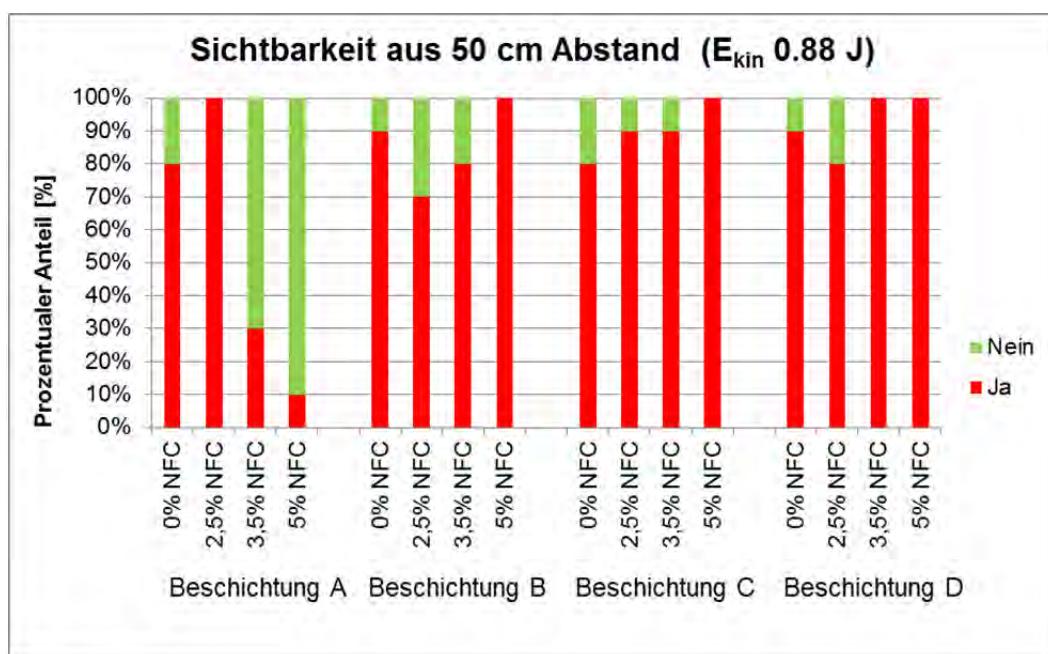


Abbildung 64 Sichtbarkeit der Hageleinschüsse auf neuwertigen Oberflächen;
Entfernung Auge-Oberfläche 0.5 m

Im Vergleich dazu zeigen alle vorbewitterten Originalbeschichtungen (Abbildung 65) nach Hagelbeschuss mit höherer kinetischer Energie (E_{kin} 0.88 J) 100% sichtbare Beschädigungen. Lediglich an Beschichtung A mit NFC waren bis zu 70% der Hageleinschläge nicht sichtbar. Ein hoher NFC Gehalt von 5% scheint hier die beste Option.

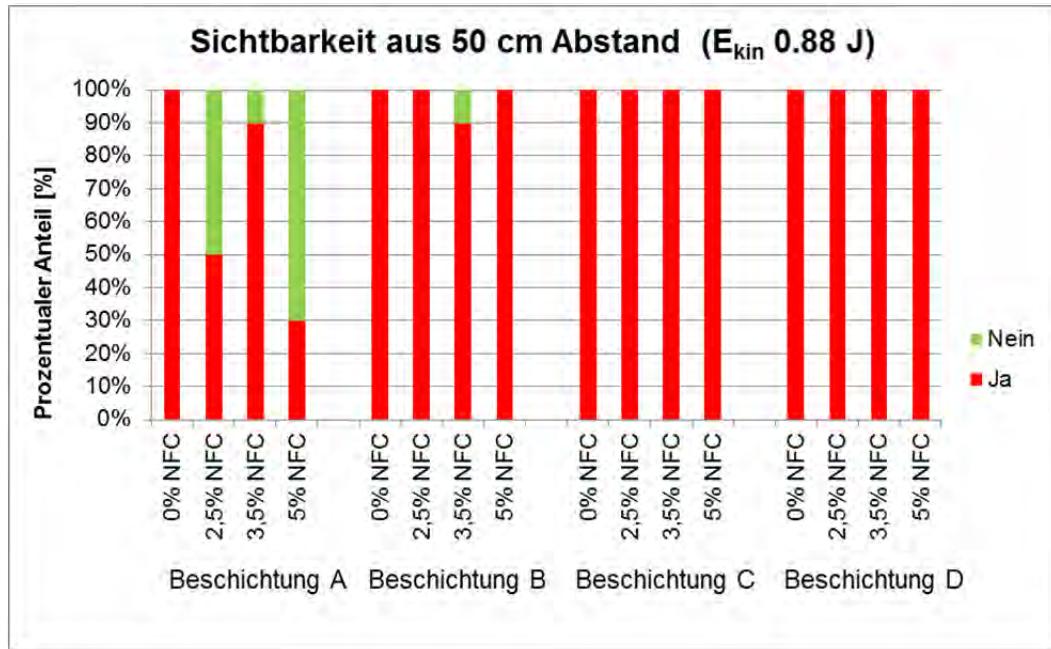


Abbildung 65 Sichtbarkeit der Hageleinschüsse auf vorbewitterten Oberflächen; Entfernung Auge-Oberfläche 0.5 m

Nach der ersten visuellen Beurteilung wurde an jedem Einschuss die maximale Eindrucktiefe gemessen. Die Messung wurde nach 28 Tagen wiederholt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 66 bis Abbildung 69 dargestellt.

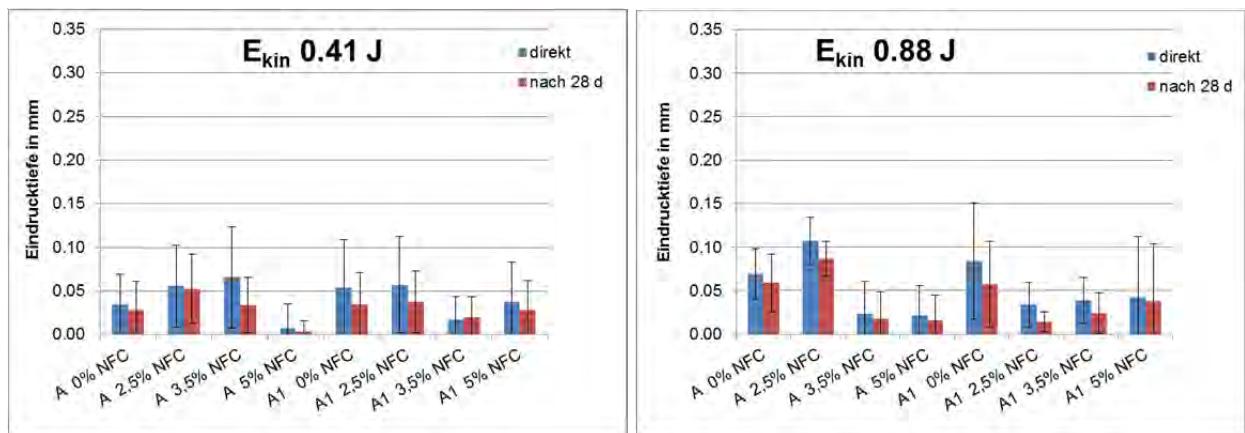


Abbildung 66 Maximale Eindrucktiefe Beschichtung A
 (A – neu; A1 – vorbewittert)

An Beschichtung A erzeugten die Eiskugeln nur sehr geringe Eindrucktiefen mit durchschnittlich weniger als 0.1 mm Tiefe. Nach 28 Tagen im Klima 20°C/85%RH bildeten sich die Dellen um bis zu 55% zurück. Ein höherer NFC Gehalt für zu deutlich geringeren Eindrucktiefen, sowohl an den neuwertigen als auch an den vorbewitterten Proben. Beim Behageln mit höherer kinetischer Energie (rechts im Bild) zeigen die vorbewitterten Proben (A1) mit 2.5% NFC durchschnittlich 60% geringere Eindrucktiefen (direkt gemessen) im Vergleich zur vorbewitterten Ori-

ginalbeschichtung ohne NFC. Betrachtet man die Werte gemessen nach 28 Tagen Lagerung
beläuft sich die Reduktion gar auf 75%.

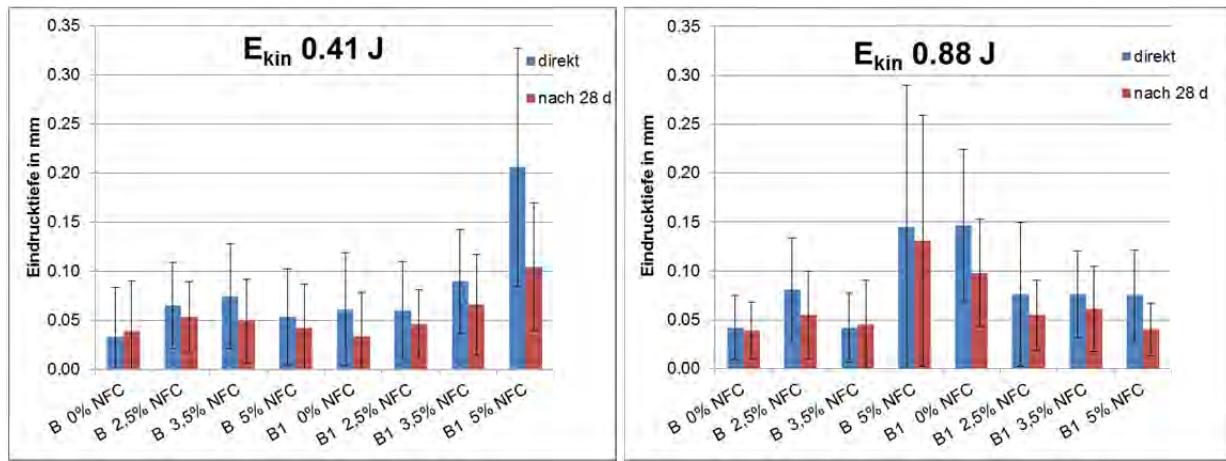


Abbildung 67 Maximale Eindrucktiefe Beschichtung B
 (B – neu; B1 – vorbewittert)

Beim Beschuss mit geringer kinetischer Energie zeigt auch Beschichtung B sehr geringe Eindrucktiefen, ebenfalls im Durchschnitt deutlich unter 0.1 mm. Bei stärkerem Beschuss (rechts im Bild) wird das unterschiedliche Verhalten von neuwertigen und vorbewitterten Beschichtungen deutlich. Während bei neuwertigen Proben (B) an der Originalbeschichtung mit 0% NFC die Eindrucktiefen wesentlich geringer waren, als bei der Beschichtung mit 5% NFC, zeigt sich an den vorbewitterten Proben (B1) ein genau gegensätzlicher Trend. Der Anteil von 5% NFC in der Beschichtung führte zu einer Reduktion der Eindringtiefe von 49%, gemessen direkt nach dem Behageln bzw. 59% nach 28 Tagen.

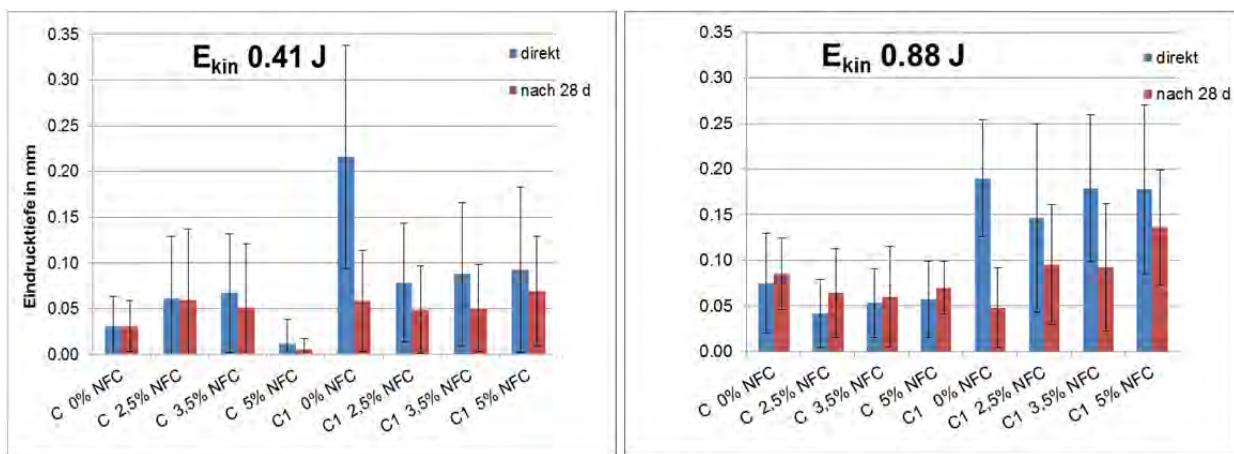


Abbildung 68 Maximale Eindrucktiefe Beschichtung C
 (C – neu; C1 – vorbewittert)

Die neuwertigen Proben der Beschichtung C (C) zeigen ebenfalls geringe Eindrucktiefen unter 0.1 mm. Die vorbewitterten Originalproben (C1 0% NFC) zeigen sowohl beim Beschuss mit geringer als auch mit höherer kinetischer Energie deutliche Dellen mit einer durchschnittlichen Tiefe von ca. 0.2 mm, die sich allerdings nach 28 Tagen Lagerung auf durchschnittlich 0.05 mm Tiefe zurück bilden. Ein Anteil von 2.5% NFC in der vorbewitterten Beschichtung senkte die direkte Eindrucktiefe bei geringem Beschuss um 64% und bei stärkerem Beschuss um 23%. Die Eindrücke an den vorbewitterten Proben mit NFC scheinen sich jedoch schlechter zurückzubilden. Während sich die Eindrücke an den Beschichtungen (C1) ohne NFC um ca. 75% zurückbilden, liegt dieser Wert bei den Proben mit NFC bei maximal 49%. Dementsprechend sind nach 28 Tagen die Eindrücke an den vorbewitterten Proben ohne NFC vergleichbar oder flacher als die der Proben mit NFC.

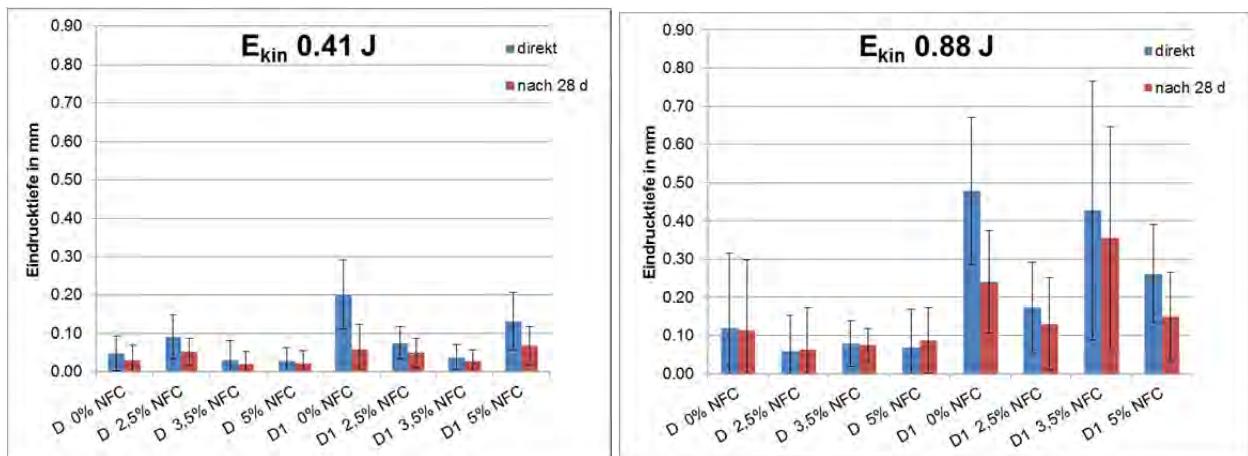


Abbildung 69 Maximale Eindrucktiefe Beschichtung D
(D – neu; D1 – vorbewittert)

Beschichtung D zeigt vor allem bei den höheren Schussgeschwindigkeiten die tiefsten Druckstellen, verglichen mit den Beschichtungen A, B und C. Beschichtung D zeigt bei Beschuss mit geringer kinetischer Energie ähnliche Ergebnisse wie Beschichtung C. Bei stärkerem Hagel zeigen die vorbewitterten Oberflächen (D1) besonders tiefe Eindrücke. Auch hier senkte, im Vergleich zur Originalbeschichtung ohne NFC, ein Anteil von 2.5% NFC in der vorbewitterten Beschichtung die direkte Eindrucktiefe um durchschnittlich 63%. NFC scheint aber auch hier die Rückverformung zu behindern. Während sich die Eindrücke an den Beschichtungen (D1) ohne NFC um maximal 71% zurückbilden, liegt dieser Wert bei den Proben mit NFC bei maximal 48%.

5.7.4 Beurteilung der Wasserdichtheit

Die Wasserdichtheit der Beschichtungen nach dem Hageleinschlag wurde, nicht wie anfänglich geplant experimentell, sondern visuell unter dem Mikroskop beurteilt (Abbildung 70). Abschließend wurde jeder Einschuss fotografiert.

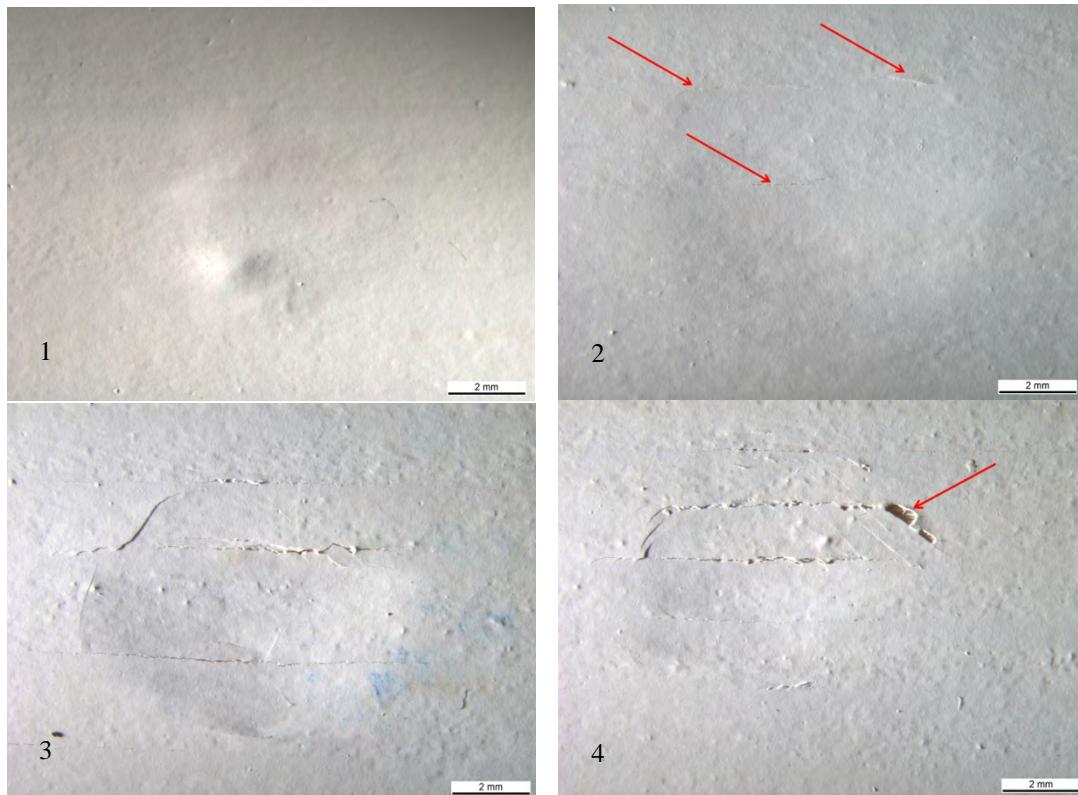


Abbildung 70 Schadkategorien zur Beurteilung der Wasserdichtheit der Beschichtung
(0 nicht sichtbar; 1 Eindruck; 2 Haarriss; 3 deutlicher Riss; 4 Riss / Abplatzungen)

Bei keiner sichtbaren Beschädigung bzw. einer Delle ohne sichtbaren Riss (Schadkategorie 0 und 1) gehen wir von einer intakten Wasserdichtheit aus; in Abbildung 71 grün markiert. Bei Haarrissen und feine Bruchkanten (Schadkategorie 2) kann die Wasserdichtheit bereits eingeschränkt sein; daher mit gelb gekennzeichnet. Risse und Abplatzungen (Schadkategorie 3 und 4) sind klare Beschädigungen des Beschichtungsfilms. Eine Wasserdichtheit ist somit nicht mehr gegeben; daher in der Abbildung mit rot gekennzeichnet.

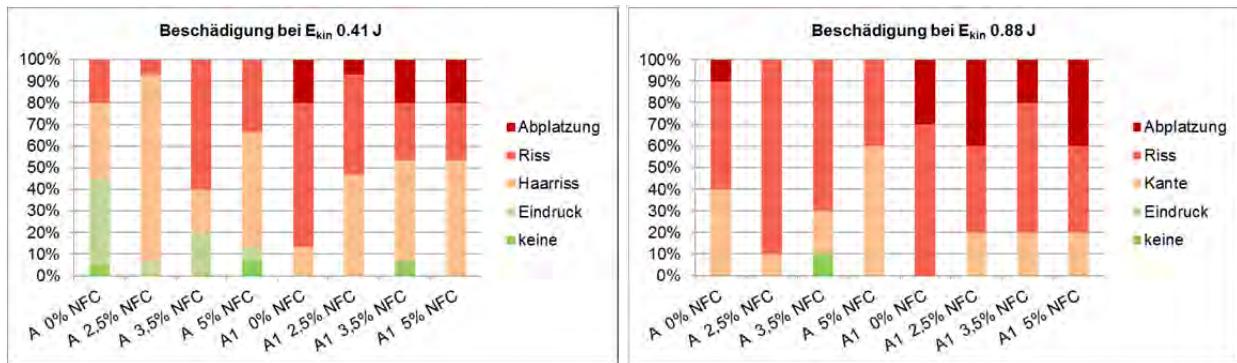


Abbildung 71 Sichtbare Risse, Beschichtung A

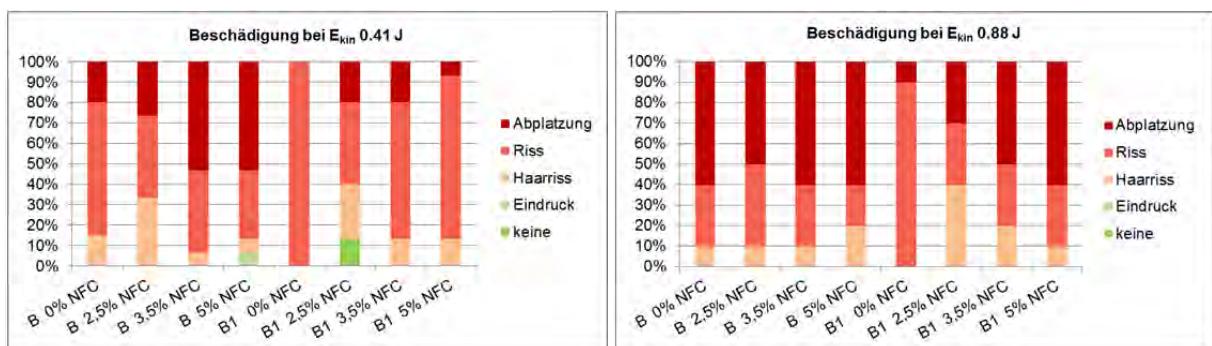


Abbildung 72 Sichtbare Risse, Beschichtung B

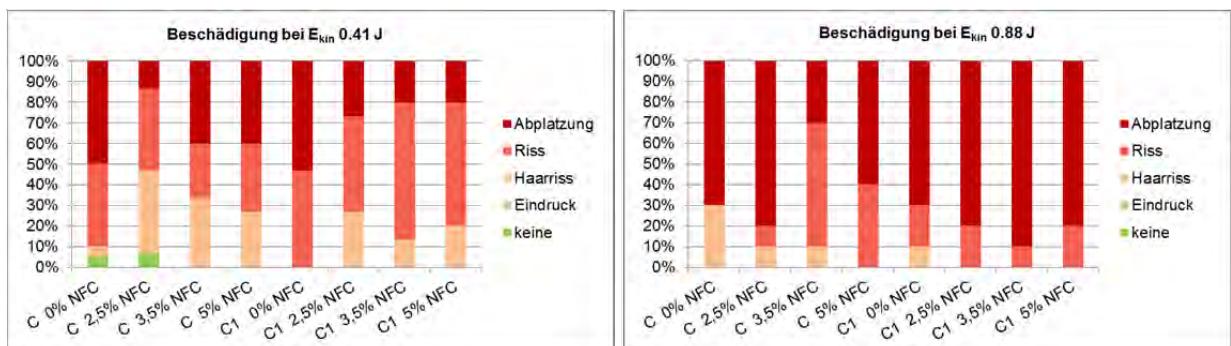


Abbildung 73 Sichtbare Risse, Beschichtung C

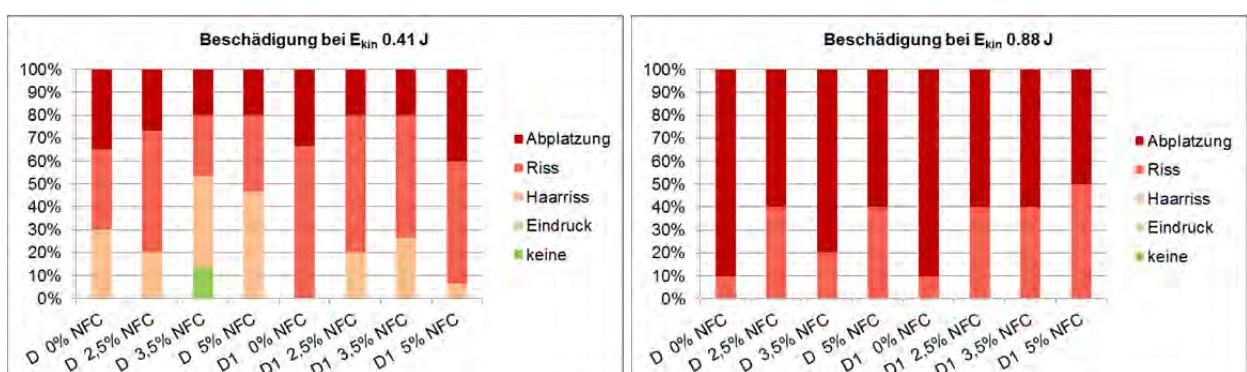


Abbildung 74 Sichtbare Risse, Beschichtung D

Die Beurteilung der Hagelproben unter dem Mikroskop zeigt, dass bis auf wenige Ausnahmen fast alle Proben Haarrisse bzw. starke Risse oder Abplatzungen aufweisen.

Die Verstärkung der Beschichtungen mit NFC führt zu weniger stark ausgebildeten Rissen. Es entstehen mehr Haarrisse anstelle von starken Rissen oder Abplatzungen. Dies wird vor allem an den vorbewitterten Proben deutlich. Mit zunehmender Intensität des Hagels schwächt sich dieser Effekt jedoch ab.

Vergleicht man die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchung mit den Resultaten der visuellen Beurteilung (siehe Abbildung 62 bis Abbildung 65) wird schnell deutlich, dass die rein visuelle Beurteilung ohne Hilfsmittel zu falschen Ergebnissen führte. Ein erheblicher Teil der unter dem Mikroskop sichtbaren Schäden wurde ohne Hilfsmittel nicht erkannt.

Ein grosser Teil der Eindrücke und Haarrisse wurde visuell (aus 50 cm Abstand ohne Hilfsmittel) nicht als Beschädigung erkannt. Dies waren bei:

| | |
|----------------|------------|
| Beschichtung A | bis zu 68% |
| Beschichtung B | bis zu 25% |
| Beschichtung C | bis zu 68% |
| Beschichtung D | bis zu 73% |

Aber auch stärkere Risse (Kategorie 3) und selbst Abplatzungen (Kategorie 4) wurden teilweise nicht erkannt. Dies waren bei:

| | |
|----------------|------------|
| Beschichtung A | bis zu 49% |
| Beschichtung B | bis zu 23% |
| Beschichtung C | bis zu 27% |
| Beschichtung D | bis zu 19% |

Eine vergleichende Gegenüberstellung der Schadintensität an den verschiedenen Beschichtungen zeigt, welche Varianten durch den Hagelbeschuss am wenigsten geschädigt wurden. Dabei wurden die Schäden durch ein Punktesystem gewichtet:

| | |
|--------------------------------|----------|
| Katergorie 0 (kein Schaden) | 0 Punkte |
| Katergorie 1 (Delle ohne Riss) | 1 Punkte |
| Katergorie 2 (Haarriss) | 2 Punkte |
| Katergorie 3 (Riss) | 3 Punkte |
| Katergorie 4 (Abplatzung) | 4 Punkte |

Die entsprechende Punktzahl wurde mit der Anzahl der entstandenen Schäden multipliziert. Für die gesamte Anzahl der Beschüsse konnte so ein Mittelwert der Schadintensität ermittelt

werden. Die Ergebnisse für leichten Hagel sind in Abbildung 75, die für stärkeren Hagel in Abbildung 76 dargestellt.

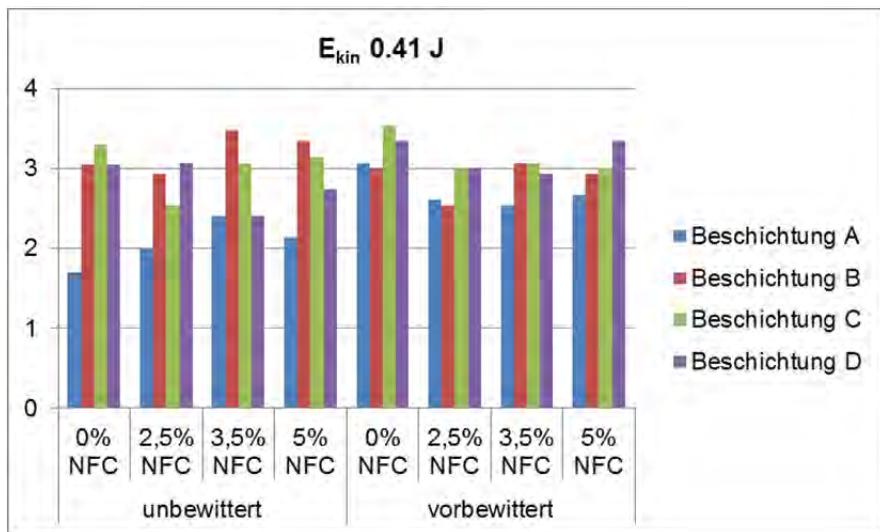


Abbildung 75 Schadintensität nach leichtem Hagel ($E_{kin} 0.41 \text{ J}$)

Bei den neuwertigen, unbewitterten Beschichtungen zeigen nach leichtem Hagel die Beschichtung A ohne NFC, nach intensiverem Hagel die Beschichtung A mit 5% NFC die beste Performance bezüglich Hagelwiderstand.

Beim praxisrelevanten Szenario mit den vorbewitterten Proben zeigen die Proben der Beschichtung A mit 3,5% NFC und die der Beschichtung B mit 2,5% NFC sowohl nach leichtem als auch nach intensiverem Hagel die geringsten Schäden im Vergleich zu allen anderen Varianten.

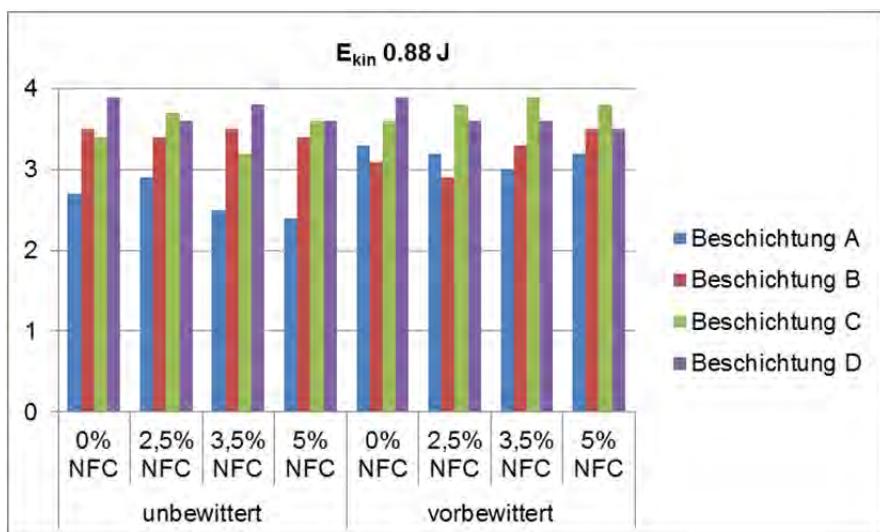


Abbildung 76 Schadintensität nach stärkerem Hagel ($E_{kin} 0.88 \text{ J}$)

5.8 Variationen Hagelversuche

5.8.1 Einfluss von Feuchte und Temperatur

Um den Einfluss von Feuchte und Temperatur auf den Hagelwiderstand zu eruieren, wurden die Proben vor der Behagelung 30 min in Eiwasser gelegt. Pro Variante wurden 20 Hageleinschläge ausgewertet (vergleiche Varianten in Abbildung 57). Es wurde mit einer kinetischen Energie von E_{kin} 0.88 J behagelt.

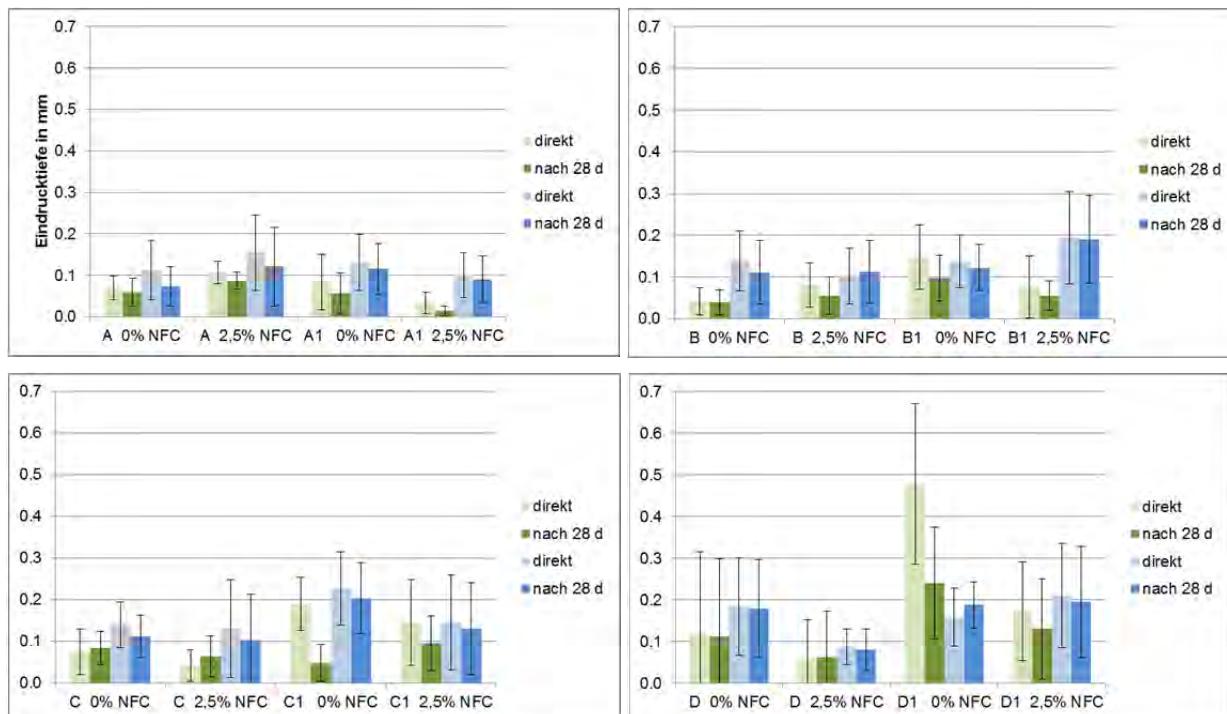


Abbildung 77 Maximale Eindrucktiefe an trockenen und feuchten/kalten Proben
(trockene Proben grün; feuchte/kalte Proben blau)

Die Versuche haben gezeigt, dass im Gegensatz zu trockenen, zimmerwarmen Oberflächen, an feuchten und kalten Oberflächen bis dreimal tiefere Eindruckspuren durch die Eiskugeln entstehen (Abbildung 77). Diese erhöhte Dehnungsbelastung der Beschichtung führte zu einer stärkeren Rissbildung (Abbildung 78). An den feuchten Proben entstanden fast ausschliesslich starke Riss und Abplatzungen.

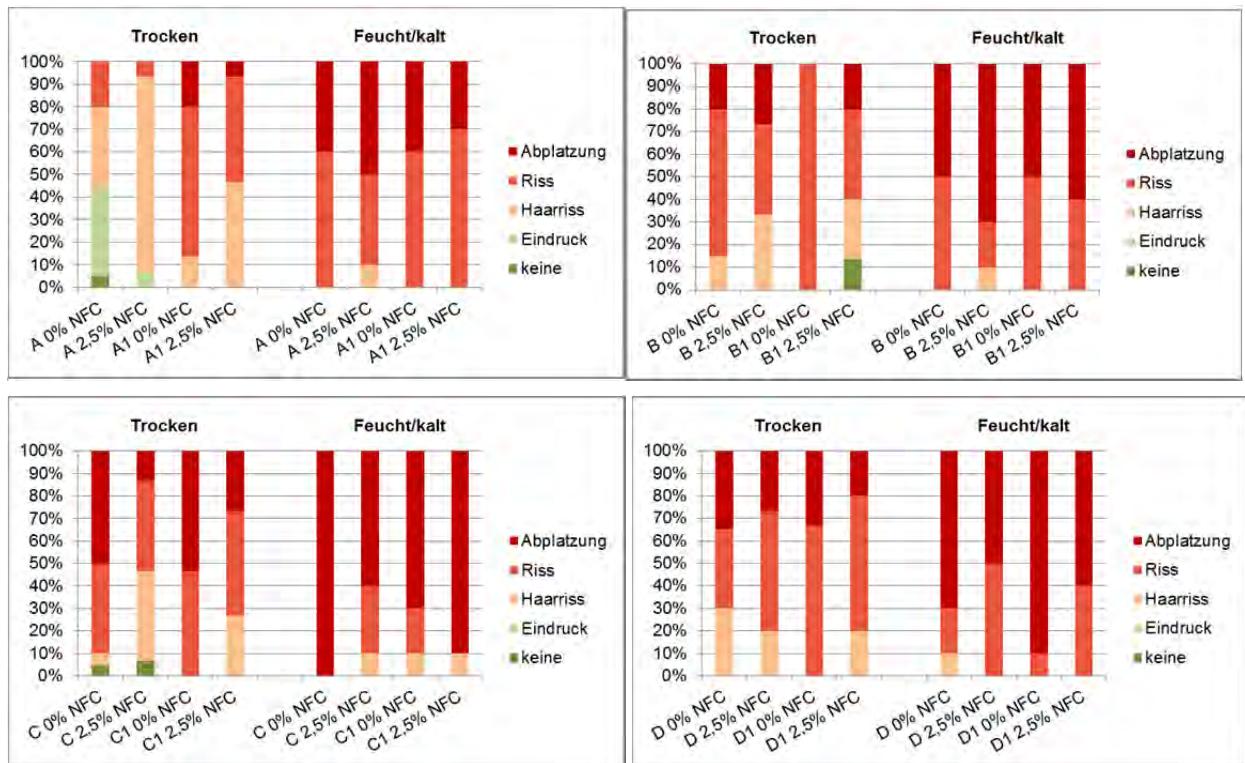


Abbildung 78 Sichtbare Risse an trockenen und feuchten Proben

5.8.2 Einfluss der Schichtdicke

Um den Einfluss der Schichtdicke auf den Hagelwiderstand zu eruieren, wurden zusätzliche Proben mit Schichtdicken von 50 µm und 100 µm hergestellt. Es wurden lediglich die Beschichtungen B und D, jeweils mit 0% und 2,5% NFC getestet. Es wurde mit einer kinetischen Energie von E_{kin} 0.88 J behagelt.

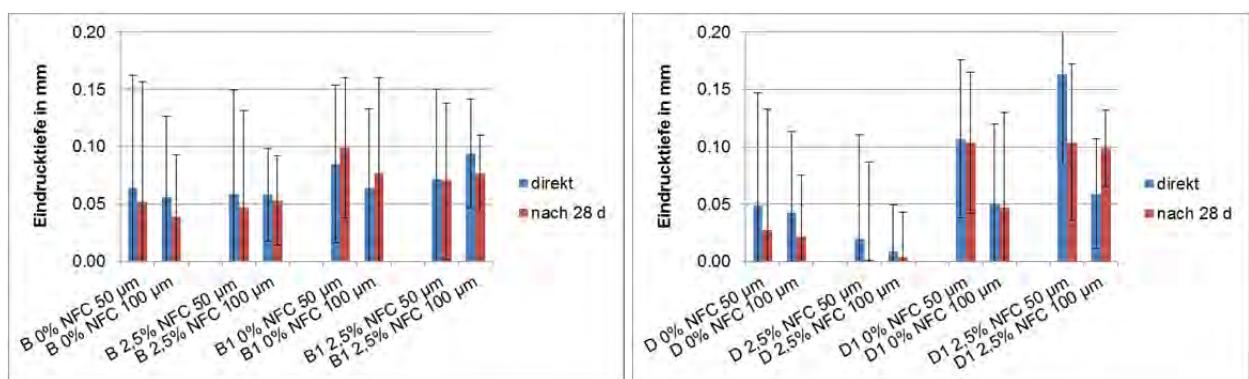


Abbildung 79 Maximale Eindrucktiefe an Proben mit geringer (50 µm) und grösserer (100 µm) Schichtdicke am Beispiel der Beschichtungen B und D

Eine Verdopplung der Schichtdicke von 50 µm auf 100 µm führte an Beschichtung B nicht zu einer signifikanten Veränderung der Eindrucktiefe (Abbildung 79 links). Im Gegensatz dazu führte eine doppelte Schichtdicke, vor allem an den vorbewitterten Proben der Beschichtung D (D1), zu einer klaren Reduktion der direkten Eindrucktiefe (Abbildung 79 rechts). An den Proben

D1 ohne NFC verringerte sich die Eindrucktiefe im Durchschnitt um mehr als die Hälfte (auf 48%), an den Proben D1 mit 2,5% NFC sogar um zwei Drittel (auf 36%).

Eine Variation der Schichtdicke wirkt sich also, je nach Beschichtung, unterschiedlich stark auf die Eindrucktiefe aus.

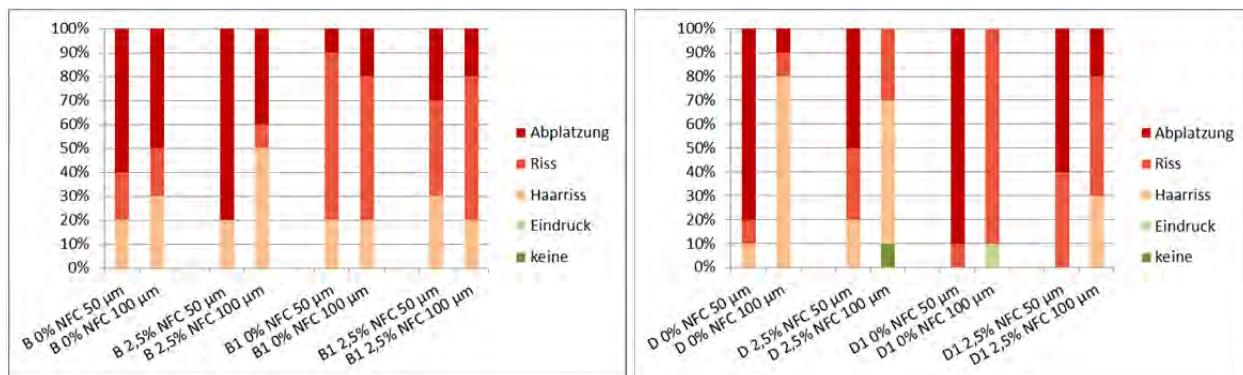


Abbildung 80 Sichtbare Risse an Proben mit geringer (50 µm) und grösserer (100 µm) Schichtdicke am Beispiel der Beschichtungen B und D

Beschichtung B zeigt, wie schon bei den Eindrucktiefen, auch bei den sichtbaren Beschädigungen in Form von Rissen oder Abplatzungen keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Proben mit 50 µm und 100 µm. Im Gegensatz dazu führte die Verdopplung der Schichtdicke an Beschichtung D nicht nur zu einer signifikanten Reduktion der Eindrucktiefe, sondern auch zu einer deutlich geringen Schädigung (geringere Rissintensität).

5.8.3 Verhalten von sägerauen Oberflächen

Um den Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf den Hagelwiderstand zu eruieren, wurden ebenfalls sägerau Proben beschichtet. Um eine möglichst homogene Schichtdicke zu erhalten, erfolgte das Beschichten beim Industriepartner durch Spritzen. Wie schon bei den gestrichenen Proben ergaben sich auch hier etwas geringere Schichtdicken bei den Beschichtungen mit NFC (Abbildung 81).

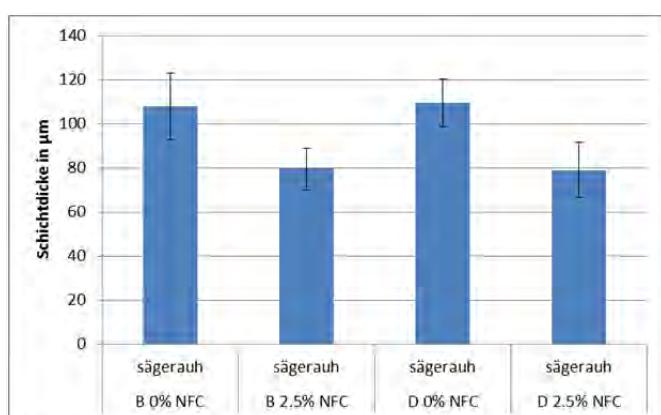


Abbildung 81 Durchschnittliche Schichtdicke an sägerauen Proben

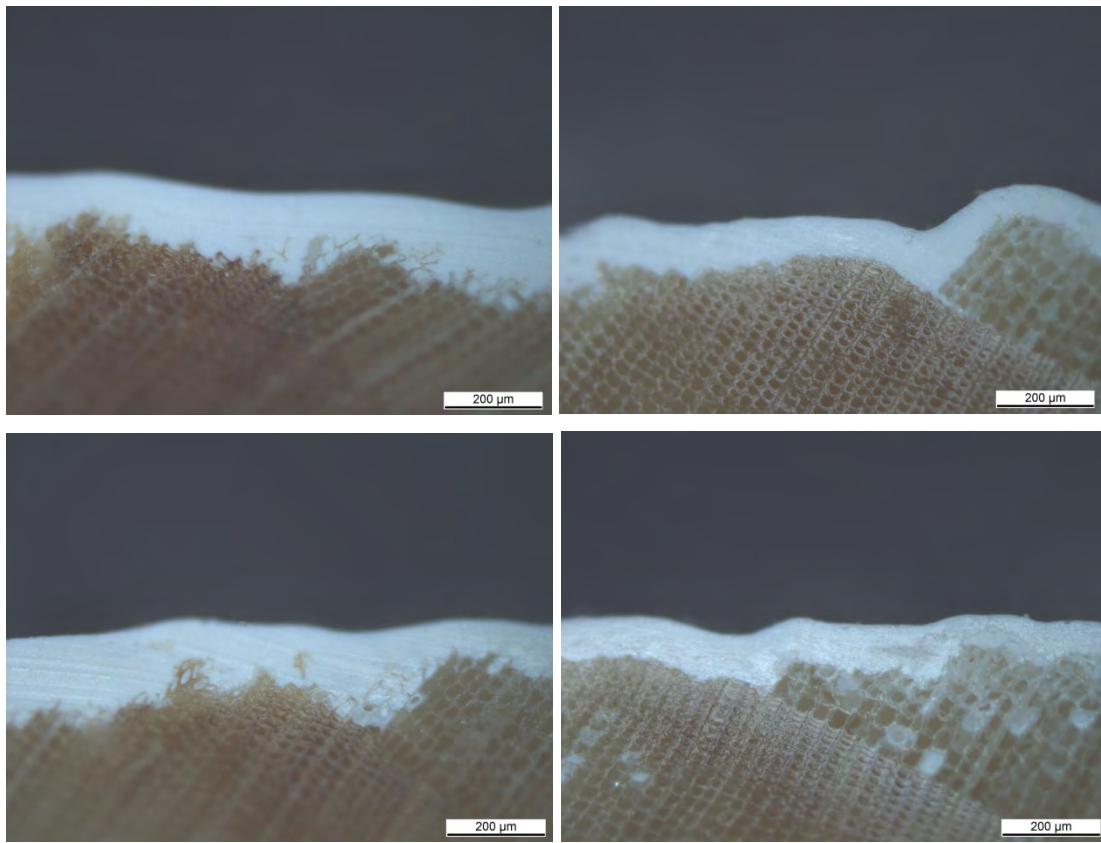


Abbildung 82 Lichtmikroskopische Aufnahmen an Beschichtung B (oben) und D (unten) ohne NFC (links) und mit 2,5% NFC (rechts)

Beim Hagelbeschuss mit E_{kin} 0.88 J konnten aufgrund der rauen Oberflächenstruktur die Einschlagstellen nicht lokalisiert werden. Daher wurde die Schussgeschwindigkeit auf 30 m/s erhöht, was eine durchschnittliche kinetische Aufprallenergie von E_{kin} 1.7 J ergab. Die Behagelung erfolgte nur an neuwertigen Proben.

Die visuelle Beurteilung der sägerauen Proben war ohne Hilfsmittel schwierig. Dellen bzw. Risse, wie beispielhaft in Abbildung 83 dargestellt, waren aufgrund der generell rauen Oberfläche mit dem blossen Auge (Abstand 50 cm) nicht sichtbar. Abplatzungen an den Beschichtungen waren ebenfalls schlecht sichtbar. So konnten an Beschichtung B nur 20%, an Beschichtung D nur 30% der gesamten Abplatzungen mit dem Auge erkannt werden.

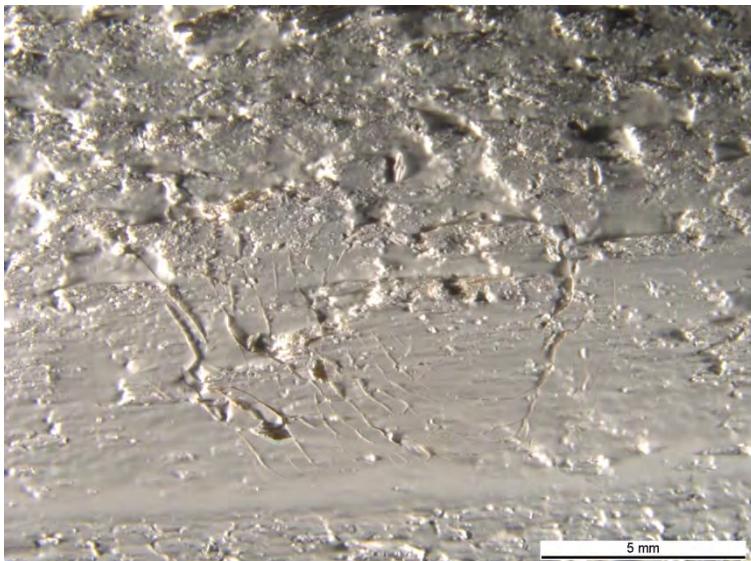


Abbildung 83 Mikroskopische Aufnahme eines Hagelschadens an einer sägerauen Oberfläche mit Beschichtung D ohne NFC

Durch die schlechte Sichtbarkeit war auch eine Vermessung der Eindrucktiefen nicht möglich. Die Ergebnisse der mikroskopischen Schadensbeurteilung für die sägerauen Proben ist in Abbildung 84 dargestellt. Zum Vergleich sind ebenfalls die Ergebnisse der gehobelten Proben dargestellt. Allerdings ist zu beachten, dass die sägerauen Proben mit annähernd doppelter Energie beschossen wurden!

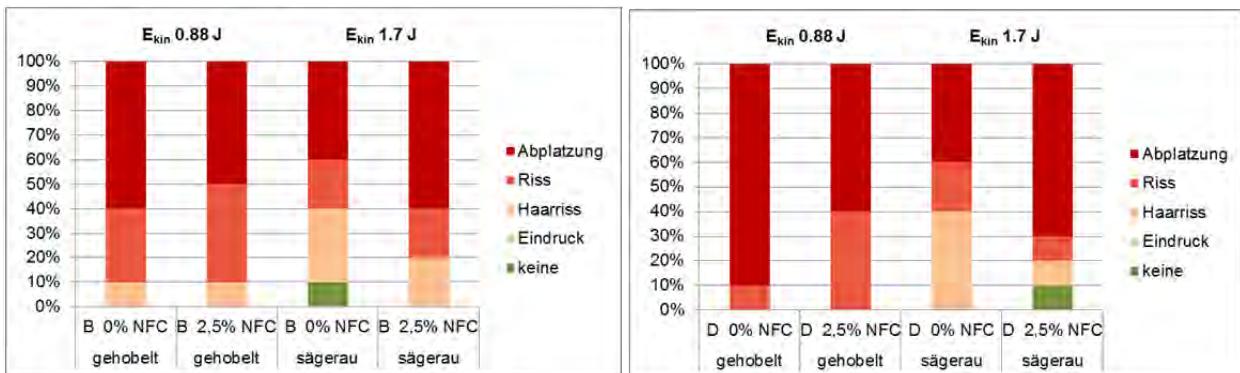


Abbildung 84 Sichtbare Risse an neuwertigen, gehobelten und sägerauen Proben am Beispiel der Beschichtungen B und D

Trotz wesentlich stärkerem Hagelschlag sind die neuwertigen, sägerauen Proben im Vergleich zu den neuwertigen, gehobelten Proben weniger stark geschädigt. Während an den neuwertigen, gehobelten Proben die Verstärkung mit NFC zu einer leichten Verbesserung des Hagelwiderstandes führte, scheint dies an den neuwertigen, sägerauen Proben nicht der Fall.

Wie sich vorbewitterte, sägeraue Proben verhalten, konnte im Rahmen dieses Projektes nicht untersucht werden.

5.9 Freibewitterung der Hagelproben

Ziel der Freibewitterung war es, die Folgeschäden nach einem Hagelschlag zu dokumentieren.

Seit Anfang November 2017 wird ein Teil der behagelten Proben auf dem Freibewitterungsstand der Empa bewittert. Für die Freibewitterung wurden die behagelten Proben zusätzlich an den Schmalflächen versiegelt (1-fach, Hirnholz 2-fach). Auf Gestellen, wie in Abbildung 85 dargestellt, werden die Proben in einem Winkel von 45° der Witterung ausgesetzt. Es wurden je Variante zwei Proben mit geringer Aufschlagenergie (E_{kin} 0.41 J) und eine Probe mit hoher Aufschlagenergie (E_{kin} 0.88 J) bewittert. Als Referenz dienten intakte Proben ohne Hageleinschlag.



Abbildung 85 Behagelte Proben auf dem Freibewitterungsstand der Empa in Dübendorf

Die visuelle Beurteilung der Proben erfolgte nach 9 Monaten Freibewitterung. Nach dieser Zeit waren an 99% aller Hägelschläge deutliche Risse sichtbar.

Während der Freibewitterung wurden die Schäden auffälliger. Dafür gibt es zwei wesentliche Gründe:

- Färbung der Risse durch Besiedlung mit Mikroorganismen (Abbildung 86)
- Weitere Risse durch Unterfeuchtung ausgehend vom Hagelschaden (Abbildung 87)

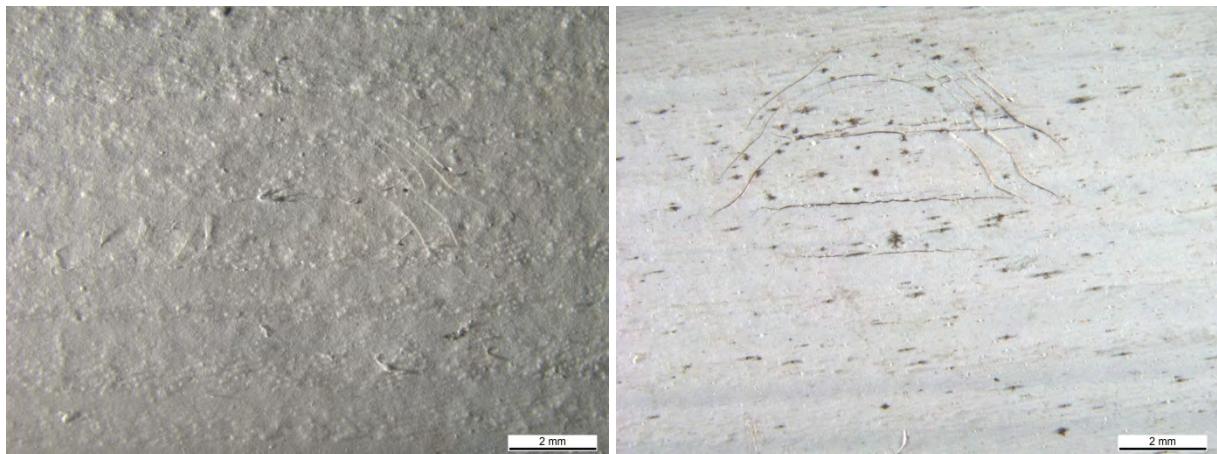


Abbildung 86 Hageleinschlag an einer Probe Beschichtung C vor und nach der Freibewitterung
Bessere Sichtbarkeit der Risse durch Besiedlung mit Mikroorganismen

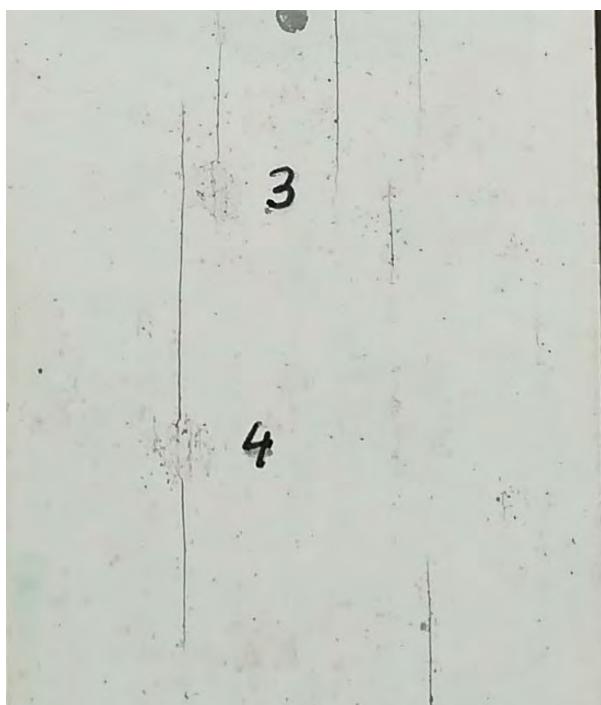


Abbildung 87 Rissausbreitung ausgehend von der Stelle des Hageleinschlags am Beispiel
einer Probe der Beschichtung D

Gleichzeitig führten die Risse und die dadurch mögliche Unterfeuchtung der Beschichtung zu einer Glättung der Hageleinschläge. Dellen waren nach 9 Monaten Freibewitterung nicht mehr wahrnehmbar.

Eine Gegenüberstellung der ermittelten Schadintensität vor und nach der Freibewitterung zeigt Abbildung 88.

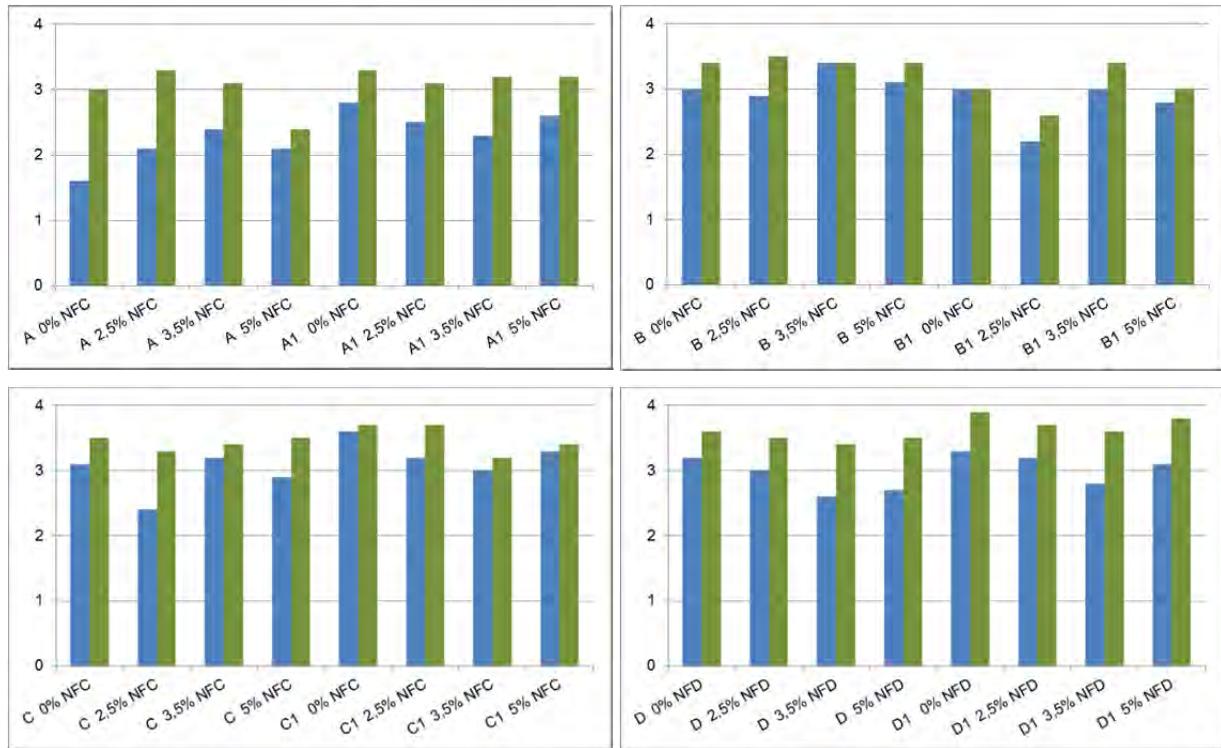


Abbildung 88 Schadintensität vor und nach der Freibewitterung
— direkt nach Hagelbeschuss; — nach 9 Monaten Freibewitterung

Nach der Freibewitterung waren an allen Proben mehr Hagelschäden sichtbar und die dadurch kalkulierte Schadintensität höher. Die durchschnittliche Schadintensität war bei allen Varianten der Alkyd-basierten Beschichtungen C und D grösser 3, was starken Rissen bis Abplatzungen entspricht. Die Acrylat-basierten Systeme schnitten mit jeweils einer Variante kleiner 3 leicht besser ab. Mit einer durchschnittlichen Schadintensität kleiner 3 wurden lediglich die Varianten Beschichtung A mit 5% NFC und Beschichtung B1 mit 2,5% NFC bewertet. Sie sind damit die besten Varianten im gesamten Vergleich.

Die erneute visuelle Kontrolle der Freibewitterungsproben nach 1 Jahr zeigt deutliche Unterschiede zwischen den vier getesteten Beschichtungssystemen. Am Beispiel der vorbewitterten Proben werden die Ergebnisse im Folgenden diskutiert, da die Schäden hier bereits deutlicher zu Tage treten, als an den im Neuzustand behagelten Proben.



Abbildung 89 Beschichtung A1 mit Hageleinschlägen nach 1 Jahr Freibewitterung

Bereits nach wenigen Monaten Freibewitterung war an Beschichtung A eine problematische Rissbildung, unabhängig vom Hagelbeschlag, festzustellen. Diese Rissbildung führte bereits vor Ablauf eines Jahres zum Totalausfall der Originalbeschichtung A (siehe Abbildung 89 links). Die Rissbildung wurde durch die Armierung der Beschichtung mit NFC sichtbar reduziert. Die besten Ergebnisse mit einer im Vergleich wesentlich geringer geschädigten Oberfläche zeigten die Proben mit 5% NFC (siehe Abbildung 89 rechts).

Unabhängig von der generellen Rissproblematik waren die Hagelschäden an den untersuchten Proben der Beschichtung A kaum sichtbar. Bis auf die Proben mit 5% NFC sind alle anderen Varianten nach 1 Jahr Freibewitterung absolut renovationsbedürftig.

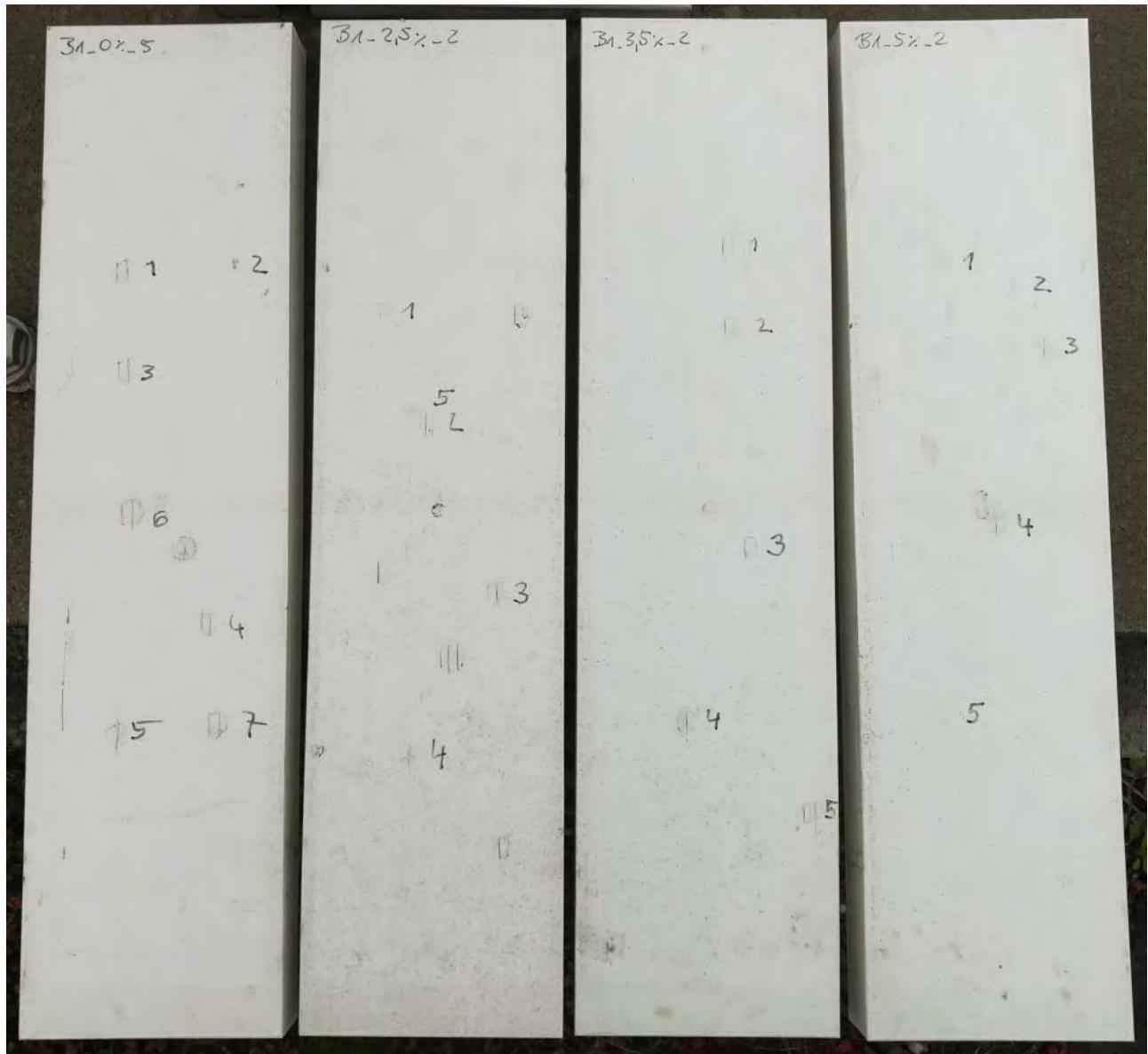


Abbildung 90 Beschichtung B1 mit Hageleinschlägen nach 1 Jahr Freibewitterung

Beschichtung B zeigt bezüglich Rissbildung eine generell gute Performance. Nach einem Jahr Freibewitterung waren an der Oberfläche keine zusätzlichen (vom Hagel unabhängigen) Risse sichtbar. Die Hagelschläge jedoch waren deutlich sichtbar an der Originalbeschichtung ohne NFC. Mit höheren NFC Gehalten sind die Hageleinschläge etwas weniger dominant (3,5% NFC) bis kaum sichtbar (5% NFC).

Ein Gehalt von 5% NFC bringt eine optische Verbesserung, und eventuell eine Verlängerung der Zeit bis zur notwendigen Renovation (dieser Aspekt muss nach 2-3 Jahren Freibewitterung nochmals beurteilt werden).

Die Hagelschäden an Beschichtung B sind mehrheitlich noch lokal ohne weitere Folgeschäden wie Längsrisse oder Abplatzungen.

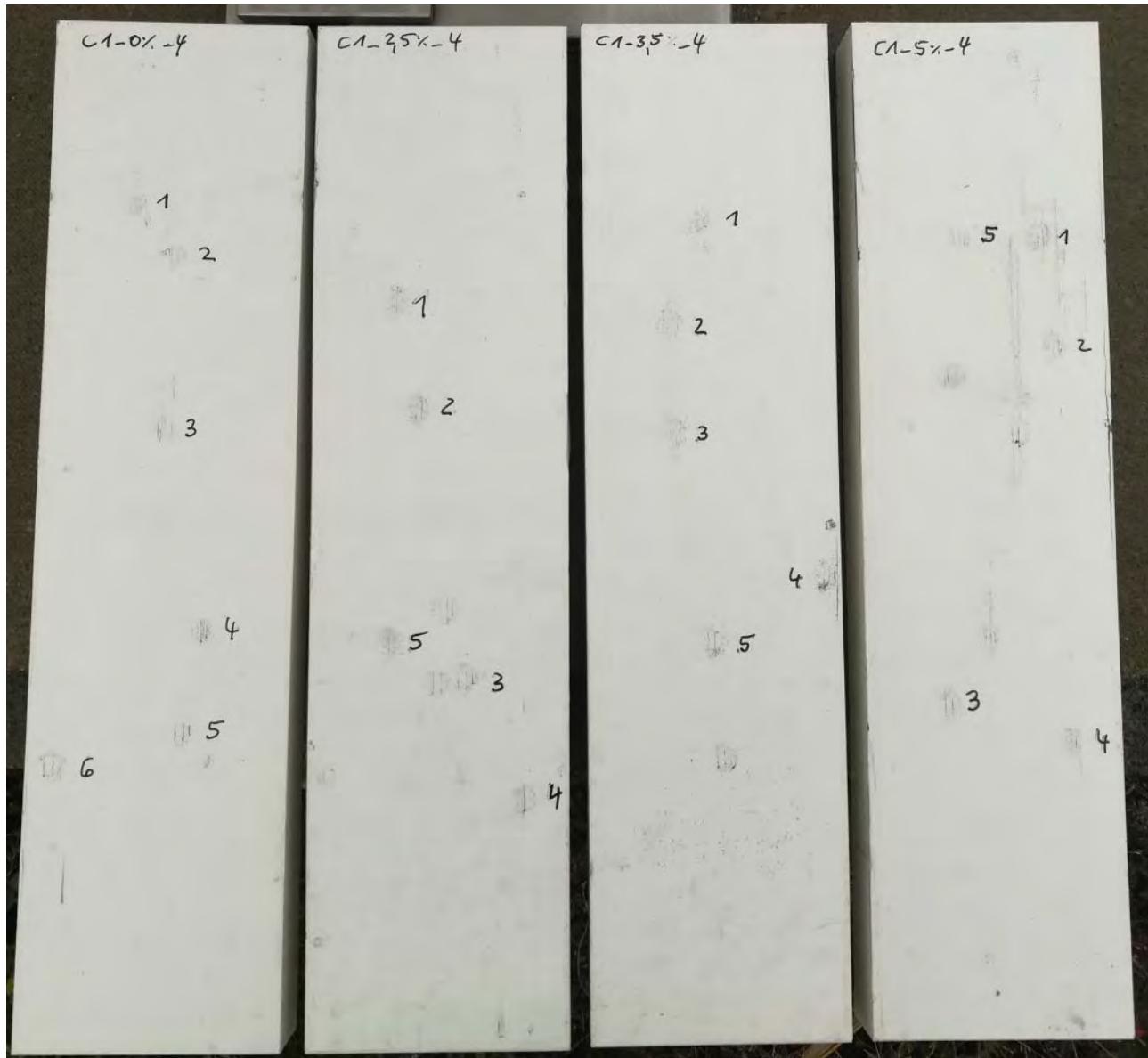


Abbildung 91 Beschichtung C1 mit Hageleinschlägen nach 1 Jahr Freibewitterung

Wie Beschichtung B zeigt auch Beschichtung C nach 1 Jahr keine vom Hagel unabhängigen Risse. Die Hagelschläge dagegen sind an allen Varianten (mit und ohne NFC) deutlich sichtbar. Die lokale Unterfeuchtung der Beschichtung an den Hagelschäden führte hier zu einer stärkeren Besiedlung mit Mikroorganismen und einer dadurch optisch auffälligeren Verfärbung, als bei den Beschichtungen A, B und D. Die Unterfeuchtung führt zu ersten zusätzlichen Rissen, ausgehend von den Hageleinschlägen (siehe als Beispiel Probe C1_5%_4 in Abbildung 91).

Nach einem Jahr Freibewitterung lassen sich an Beschichtung C keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Varianten mit und ohne NFC feststellen. Die Hagelschäden sind mehrheitlich noch lokal. Erste Folgeschäden in Form von Längsrissen sind sichtbar.



Abbildung 92 Beschichtung D1 mit Hageleinschlägen nach 1 Jahr Freibewitterung

Beschichtung D neigt ebenfalls zur Rissbildung, allerdings in geringerem Masse als Beschichtung A. Auch hier musste an den Proben ohne NFC die stärkste Rissbildung festgestellt werden (Abbildung 92 links). Die Proben mit 2,5% und 3,5% NFC zeigen deutlich weniger Risse auf der Oberfläche. Gehen die Risse an diesen Proben mit 2,5% und 3,5% NFC klar von den Hagelschäden aus, zeigen die Proben ohne NFC, aber auch die Proben mit einem sehr hohen NFC Gehalt (5%) zusätzliche Risse, die nicht in direktem Zusammenhang zu den Hagelschäden stehen.

Alle Proben der Beschichtung D sind aufgrund der Hagelschäden und deren Folgeschäden nach 1 Jahr Freibewitterung in einem renovationsbedürftigen Zustand.

6 Wichtigste Erkenntnisse

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die weiss pigmentierten Beschichtungen änderten durch die Zugabe von NFC ihr Fließverhalten. Die Beschichtungen mit NFC verhielten sich scherverdünnend.
- Durch das Einbringen von NFC wurden die Beschichtungen poröser und somit diffusionsoffener. Die Wasseraufnahme und –abgabe durch die Beschichtung war erhöht.
- Mit steigendem NFC Gehalt erhöhte sich der Wassergehalt in der Beschichtung. Beim Auftrag gleicher Nassschichtdicken kam es durchschnittlich zu geringeren Trockenschichtdicken bei höheren NFC Gehalten.
- Bis auf den Glanzgrad konnten im Neuzustand visuell keine Unterschiede zwischen den Beschichtungen mit und ohne NFC festgestellt werden.

- Die vier gewählten Beschichtungen unterscheiden sich hinsichtlich Zähigkeit und Steifigkeit.
- Durch die Zugabe von NFC änderten sich die mechanischen Eigenschaften der Beschichtungen. E-Modul und Zugfestigkeit waren erhöht, während sich die Bruchdehnung deutlich reduzierte. Die Höhe der Verstärkungswirkung war stark abhängig vom Charakter des Ausgangsmaterials.
- Bei allen Beschichtungen kam es zu einer Versprödung durch die künstliche Vorbewitterung. Dieser Effekt war grösser bei den alkyd-basierten Systemen, sowie generell bei den originalen Beschichtungen ohne NFC. Die Verstärkungswirkung durch NFC ist auch nach der künstlichen Alterung messbar, jedoch in geringerem Ausmass als an den neuwertigen Beschichtungen.
- Die Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min auf 500 mm/min im Zugversuch führte zu erhöhten Zugfestigkeiten und einer Reduktion der Bruchdehnung.
- Während die vier Beschichtungssysteme sehr unterschiedliche Eigenschaften im Zugversuch zeigten, waren die Unterschiede bei der gemessenen Schlagzugzähigkeit eher gering. Durch Einbringung von NFC wurde die Schlagzugzähigkeit aller Beschichtungen erhöht.

- Die Beschichtungen B, C und D zeigten vergleichbare Glasübergänge zwischen +15°C und +17°C. Beschichtung A wies zwei Glasübergangstemperaturen auf (-23°C und +59°C)
- Durch die Zugabe von NFC und durch die künstliche Alterung im QUV verschoben sich die Glasübergänge zu höheren Temperaturen.
- Die Verstärkung der Beschichtungen mit NFC führte dazu, dass das Material mehr Energie speichern konnte ($E' \uparrow$), die wiederum als Triebfeder für die Rückdeformation wirkte. Das

- Dämpfungsvermögen des NFC-verstärkten Materials dagegen war reduziert (Tan Delta ↓), es war somit elastischer.
- Die Zugabe von NFC führte zu einer Erhöhung des Relaxationsmoduls, das heisst während einer aufgebrachten Spannung wurden durch das NFC-Netzwerk Relaxationsvorgänge eingeschränkt.
 - Kältere Temperaturen führten generell zu höheren Relaxationsmodulen. Gleichzeitig sankt die Duktilität der Materialien, das heisst die Eigenschaft sich unter Belastung plastisch zu verformen, nahm ab.
 - Bei Beschichtung B und C führten Dehnungen von 1% lediglich zu reversible Deformationen, während die Beschichtungen A und D in diesem Bereich bereits irreversible Verformungen aufwiesen. NFC konnte in einem gewissen Masse diese Überdehnung und die dadurch hervorgerufenen irreversiblen Verformungen verhindern, und somit das Rückverformungsverhalten der Beschichtungen verbessern.
 - Vorbewitterte Proben zeigten eine verlangsamte Rückverformung nach der Entlastung.
 - Niedrige Temperaturen (10°C) führten dagegen zu einer rascheren Rückverformung.
-
- Die Hageleinschüsse mit maximal E_{kin} 0.88 J waren, bis auf wenige Ausnahmen, aus einer Entfernung von 5 Metern nicht sichtbar.
 - Die Behagelung der neuwertigen Oberflächen führte zu relativ geringen Eindrucktiefen von weniger als 0.1 mm.
 - An den vorbewitterten Oberflächen entstanden deutlich tiefere Hagelschläge. Dabei zeigten bei höheren Schussgeschwindigkeiten die Varianten mit 2,5% NFC die geringsten Eindrucktiefen.
 - Im Vergleich zu trockenen zimmerwarmen Oberflächen wurden an nassen kalten Oberflächen mit bis zu dreimal tiefere Eindrücke gemessen. Höhere Schichtdicken können zu einer Reduktion der Eindrucktiefen und damit zu geringeren Schäden beitragen.
 - Die Beschichtungen zeigten auf sägerauem Holz einen besseren Hagelwiderstand.
 - Die visuelle Beurteilung der Hagelschläge aus 50 cm Entfernung (ohne Hilfsmittel) zeigte eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Eindrucktiefen und/oder mit vorhandenen Rissen. Hagelschläge ohne deutliche Risse und mit geringer Eindrucktiefe waren mit dem Auge schlecht bis gar nicht sichtbar.
 - An den neuwertigen Oberflächen waren generell weniger Schäden sichtbar, als an den vorbewitterten Oberflächen.
-
- **Die Beurteilung der Hagelproben unter dem Mikroskop zeigte, dass bis auf wenige Ausnahmen alle Proben Haarrisse bzw. starke Risse und Abplatzungen aufweisen.**

Die rein visuelle Beurteilung aus 50 cm Abstand und ohne Hilfsmittel hatte somit zu einer falschen Bewertung des Hagelwiderstandes geführt. Von den unter dem Mikroskop sichtbaren Schäden wurden in der visuellen Beurteilung bis zu 73% nicht erkannt.

- **Die Verstärkung der Beschichtungen mit NFC führte zu weniger stark ausgebildeten Rissen.** Mit zunehmender Intensität des Hagels schwächte sich dieser Effekt jedoch ab.
- Beim praxisrelevanten Szenario mit den vorbewitterten Proben zeigten die Proben der Beschichtung A mit 3,5% NFC und die der Beschichtung B mit 2,5% NFC sowohl nach leichtem als auch nach intensivem Hagel die geringsten Schäden im Vergleich zu allen anderen Varianten.
- **Nach 9 Monaten Freibewitterung waren 99% aller Hagelschläge deutliche durch Risse und den darin entstandenen Bewuchs mit Mikroorganismen sichtbar.**
- Beschichtung A ohne NFC musste aufgrund massiver Rissbildung (unabhängig vom Hagel) bereits vor Ablauf 1 Jahres in der Freibewitterung als Totalausfall deklariert werden. Diese Rissbildung wurde durch die Armierung der Beschichtung mit NFC sichtbar reduziert.
- Beschichtung B zeigte nach 1 Jahr Freibewitterung mehrheitlich nur lokale Hagelschäden ohne weitere Folgeschäden wie Längsrisse oder Abplatzungen. Ein Gehalt von 5% NFC brachte eine optische Verbesserung, und möglicherweise eine Verlängerung der Zeit bis zur notwendigen Renovation.
- Beschichtung C zeigt nach 1 Jahr Freibewitterung deutlich sichtbare Hagelschäden mit leichter Verfärbung. Erste Folgeschäden in Form von zusätzlichen Rissen, ausgehend von den Hageleinschlägen, waren sichtbar. Ein Unterschied zwischen den Proben mit und ohne NFC war nicht festzustellen.
- Beschichtung D neigt ebenfalls zu Rissbildung, besonders ausgeprägt an den Proben ohne NFC. Die Rissbildung ist an den Varianten mit 2,5% und 3,5% NFC reduziert, jedoch zeigen sich auch hier Folgeschäden in Form von zusätzlichen Rissen auf der Oberfläche, ausgehend von den Hagelstellen. Die Proben sind bereits in einem renovationsbedürftigen Zustand.
- **Keine der Beschichtungsvarianten erfüllte die Anforderungen für Hagelwiderstandsklasse 2.**

Abschliessend kann festgestellt werden, dass sich der Hagelwiderstand durch den Einsatz von NFC verbessern lässt. Jedoch führte der derzeitige Ansatz (Einmischen von NFC in eine bestehende Beschichtung) nicht zu einer genügend grossen Verbesserung des Hagelwiderstandes, um zumindest die Hagelwiderstandsklasse 2 zu erreichen.

7 Literatur

- Flüeler, P. H., O. Lateltin, et al. (2008). "Switzerland: Public Register For Hail Impact Resistant Building Materials Created."
- Grueneberger, F., T. Kuenniger, et al. (2014). "Rheology of nanofibrillated cellulose/acrylate systems for coating applications." *Cellulose* 21(3): 1313-1326.
- Grüll, G., M. Ecker, et al. (2016). Hail Resistance of Coatings on Wood - State of The Art. 10th Woodcoatings Conference. Amsterdam NL.
- Grüll, G. and I. Spitaler (2001). "Wenn es Schäden hagelt - Indikatoren können helfen, Folgeschäden von Hagel auf Holzoberflächen zu vermeiden." Holzforschung Austria 04.2011.
- Künniger, T. (2016). Scientific Final Report: Modified Nanofibrillated Cellulose in Wood Coatings (MoNaCo). Dübendorf, Empa.
- Richter, K., W. Risi, et al. (2009). Hagelwiderstand von Holzfassaden, Empa Dübendorf. WHFF 2008.04.
- Stucki, M. and T. Egli (2007). Synthesebericht - Elementarschutzregister Hagel. Untersuchungen zur Hagelgefahr und zum Widerstand der Gebäudehülle
Bern, Präventionsstiftung der kantonalen Gebäudeversicherungen.