

Schlussbericht zur Projektphase 2

„Ressourcenschonende funktionale Beschichtungen“

gefördert unter dem Aktenzeichen 30290 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Laufzeit: 12.02.2014 – 31.05.2017 (Projektphase 2)

durchgeführt von: Rhenotherm Kunststoffbeschichtungs GmbH
Peter-Jakob-Busch-Straße 8
47906 Kempen



Projektleiter: Herr Dr.-Ing. Volkmar Eigenbrod

Kempen im Oktober 2017

Ergebnisse und Diskussion

Ergebnis des Projektes ist ein neues Beschichtungsverfahren, mit dem eine gleichmäßige Beschichtung mit hydrophoben und oleophoben Eigenschaften für CFK-Zylinder erreicht werden kann. Dies wurde durch eine geeignete Zusammensetzung und Struktur der Funktionsschicht sowie geeignete Prozessführungen umgesetzt. Die erzielten Schichten sind mechanisch stabil und weisen eine hohe Haftung auf dem Grundkörper auf. Der Nachweis der Eigenschaften erfolgte über Oberflächenanalysen mittels REM, EDX, Wasserkontaktwinkelmessungen und Peeltests.

Es ging außerdem eine Beschichtungsvariante basierend auf der Zugabe von Silikonen aus den Arbeiten hervor, die eine hohe Antihafwirkung gegenüber Klebstoffen sowie eine hohe Beständigkeit gegenüber Lösungsmitteln aufweist. Diese wurde für den Anwendungsfall Klebstoffschichten-berührender Walzen erarbeitet und in geeigneten Laborversuchen nachgewiesen.

Weiterhin wurde ein Verfahren zur Entschichtung mittels Strahlen und Neubeschichtung verschlissener Zylinder entwickelt, um so die Betriebszeit der CFK-Zylinder optimieren zu können.

Um die Eignung unter Praxisbedingungen nachzuweisen, sollen im Weiteren Anwendungstests folgen. Dies war bisher nicht möglich, da kein Anwendungspartner für die Versuche gefunden werden konnte.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die Ergebnisse wurden interessierten Herstellern von CFK-Leichtbauzylindern vorgestellt. Weiterhin waren die Projektergebnisse Inhalt der Gespräche mit potenziellen Anwendungspartnern.

Darüber hinaus wurden Prototypen auf der ICE Messe 2017 (Internationale Converting Fachmesse) in München vorgestellt und beworben.

Fazit

Wie die Arbeiten gezeigt haben, konnten ein geeignetes Beschichtungsverfahren sowie ein Schichtaufbau entwickelt werden, mit dem hydrophobe und oleophobe Eigenschaften erzielt werden. Dadurch, dass die Oberflächeneigenschaften durch die Zusammensetzung der funktionalen Schicht gezielt einstellbar sind, können diese so für die jeweiligen Anwendungsbedingungen optimiert werden.

Die Ergebnisse aus den Laborversuchen sind sehr vielversprechend, der Nachweis der Eignung hinsichtlich der mechanischen, chemischen und thermischen Stabilität der Schichten auch unter Anwendungsbedingungen sowie die resultierenden Umweltvorteile stehen jedoch noch aus. Rhenotherm plant somit, die Arbeiten weiterzuführen und steht derzeit in Kontakt zu interessierten Anwendungspartnern.

Langfristig soll es damit möglich sein, die nach dem aktuellen Stand eingesetzten teflonbeschichteten Metallzylinder durch CFK-Leichtbauzylinder zu ersetzen, womit Energie- und Ressourceneinsparungen erzielt werden sollen.

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	6
2. Einleitung	7
3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse	10
3.1 Optimierung des Beschichtungsverfahrens und der Beschichtungsparameter	10
3.2 Entwicklung Beschichtungsaufbau für geplante Anwendung	24
3.3 Entwicklung von Beschichtungsprototypen und Test der Beschichtungsprototypen	26
3.4 Kleinserien im industriellen Maßstab	27
3.5 Ent- und Neubeschichtung verschlissener Bauteile	28
3.6 Bilanzierung	30
3.7 Öffentlichkeitsarbeit	34
4. Fazit	35

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1: Chromoxidschicht auf Aluminium: 10 Übergänge	10
Abbildung 2: Chromoxid auf CFK: 15 Übergänge	11
Abbildung 3: Kühldüsen befestigt an Plasmabrenner	11
Abbildung 4: Schematische Darstellung einer zugeschwemmten und einer gleichmäßig beschichteten Oberflächenstruktur	12
Abbildung 5: REM-Aufnahmen der Funktionsschicht auf Chromoxid: (links Tal; rechts Spitze)	12
Abbildung 6: Mehrfachbestimmung des Wasserkontaktwinkels.....	14
Abbildung 7: KW Messung nach Klebebandabzug	15
Abbildung 8: Kraftmessung nach Klebebandabzug	16
Abbildung 9: REM-/FEM-Aufnahmen einer plasmagespritzten Chromoxidschicht	16
Abbildung 10: REM-/FEM-Aufnahmen der Funktionsschicht auf einer plasmagespritzten Chromoxidschicht	17
Abbildung 11: REM-/FEM-Aufnahmen und EDX-Aufnahme (rechts: Sauerstoff, gelb)	18
Abbildung 12: EDX-Aufnahme (links: Silicium (violett); rechts: Fluor (grün)).....	18
Abbildung 13: REM-/FEM-Aufnahmen mit verschiedenen EDX-Einstellungen (oben links: FEM-Aufnahme; oben rechts: EDX-Sauerstoff; unten links: EDX-Silicium; unten rechts: EDX-Fluor)	19
Abbildung 14: Ergebnisse der Bestimmung des Wasserkontaktwinkels vor und nach durchgeführtem Peeltest.....	20
Abbildung 15: REM-Aufnahmen (links: 10 % Fluorelastomer mit einem Kreuzgang beschichtet; rechts: analog mit zwei Kreuzgängen beschichtet)	21
Abbildung 16: Bestimmung des Abrollwinkels von Wasser vor und nach durchgeführtem Peeltest	22
Abbildung 17: Gemittelte Ergebnisse der 90 °-Tesatape-Peeltests von unterschiedlichen Musterproben	23
Abbildung 18: Verlauf der Ergebnisse des Peeltests mit mehreren aufeinanderfolgenden Abzügen	24
Abbildung 19: Ergebnisse Peeltest mit Klebeband	25
Abbildung 20: Ergebnisse der Lösemittelbeständigkeit	26
Abbildung 21: gestrahltes CFK-Rohr	29
Abbildung 22: Einsparung von Energie infolge reduzierter Sintertemperaturen	31
Abbildung 23: CFK-Barren mit Verschleißschutzschicht.....	33
Tabelle 1: Vergleich der Energieeinsparung beim Abkühlen der Schichten durch Verwendung der neu entwickelten Kühldüsen	31
Tabelle 2: Vergleich der verwendeten Materialien und der resultierenden Kosten.....	32

1. Zusammenfassung

Zielsetzung des Projektes waren neuartige funktionale Beschichtungen für Leichtbauwerkstoffe, die hochfest, mechanisch stabil und möglichst hydro- und oleophob sind. Es sollte bevorzugt mit dem Grundwerkstoff CFK gearbeitet werden und v. a. rotationssymmetrische Körper, wie z. B. Zylinder, Rollen und Walzen, beschichtet werden, wie sie z. B. in der Verpackungsindustrie zum Einsatz kommen. Durch die Beschichtung sollte die Oberfläche nicht mit Öl und ähnlichen Medien benetzbar bzw. bezüglich dieser Medien bindungsabweisend sein, sodass das Anhaften von Medien, beispielsweise Ölen, Klebstoffen oder Farben, vermindert oder bestenfalls verhindert wird.

Nachdem in einer ersten Phase des Projektes die Machbarkeit einer Funktionsbeschichtung von CFK-Materialien im Labor nachgewiesen und die dafür geeigneten Schichtaufbauten und Beschichtungsverfahren ermittelt worden waren, lag der Schwerpunkt der vorliegenden zweiten Projektphase in der erfolgreichen Umsetzung dieser Beschichtungen in die Praxis.

In dieser Phase des Projektes wurden praxistaugliche Beschichtungen entwickelt und die Vorteile ihrer Eigenschaften untersucht und demonstriert. Dazu wurden Leichtbauzylinder bzw. -rollen mit funktionalen Schichten ausgestattet, um damit die bislang mit wesentlich größerem Ressourceneinsatz hergestellten und verwendeten teflonbeschichteten Metallzylinder zu ersetzen. Sowohl der Beschichtungsprozess als auch die Zusammensetzung der funktionalen Schicht wurden entwickelt, um die Eigenschaften zu optimieren und gezielt einstellen zu können. Neben den hydrophoben und oleophoben Eigenschaften, standen auch die Antihafteigenschaften für eine Anwendung Klebstoff-berührender Walzen im Vordergrund. Es wurden umfangreiche Analysen der Oberflächenschichten und ihrer Eigenschaften durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigten, dass die Schichten oleophob sowie hydrophob sind und sich durch eine homogene Verteilung und gute Haftung auszeichnen. Außerdem konnten durch Verwendung geeigneter Silikone eine hohe Antihafwirkung und Beständigkeit gegenüber Lösungsmitteln erzielt werden. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Suche nach einem Pilotanwender konnten trotz Aufbau einer Kooperation mit einem Walzenhersteller zunächst keine Praxistests durchgeführt werden. Allerdings erfolgte inzwischen die Bemusterung von CFK-Barren, die in Strickmaschinen eines namhaften Herstellers von Textilmaschinen eingesetzt werden sollen. Es handelt sich hierbei um einen völlig neuen Maschinentyp, der zum jetzigen Zeitpunkt noch konstruiert wird. Daher war ein Praxistest in der eigentlichen Maschine bisher nicht möglich. Stattdessen erfolgte eine theoretische Energiebilanzierung.

Das Projekt wurde unter dem Aktenzeichen 30290 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.

2. Einleitung

Aufgabe des Projektes war es, neuartige funktionale Beschichtungen für Leichtbauwerkstoffe zu entwickeln, die hochfest, mechanisch stabil und möglichst hydro- und oleophob sind. Die keramischen Beschichtungen sollten nach Möglichkeit kovalent mit den aufgetragenen Funktionsschichten verbunden sein. Ziel war es, Grundwerkstoffe wie CFK (Carbon-faserverstärkter Kunststoff) mit diesen Beschichtungen so auszurüsten, dass Eigenschaften erreicht werden, die bislang nur durch metallische Werkstoffe mit aufwändig herzustellenden Beschichtungen, wie Teflon, unter hohem Ressourceneinsatz erreicht werden konnten. Insbesondere sollte das Anhaften von Medien, beispielsweise Ölen, Klebstoffen oder Farben, verhindert werden.

Als Ergebnis des Projektes sollten beispielsweise Zylinder und Rollen für verschiedene Produktionsprozesse (z. B. in der Verpackungsindustrie und der Druckindustrie) ressourcenschonender hergestellt (Material- und Energieverbrauch) und durch den Leichtbau auch im Einsatz Produktivitäts- und Umweltvorteile erschlossen werden können.

Die geplanten neuen Beschichtungen wurden bei der Projektplanung durch folgende Funktionen und Parameter beschrieben:

- Bevorzugte zu beschichtende Substrate: Leichtbauwerkstoffe wie kohlefaserverstärkte Werkstoffe, Glas- und Aramidfaser-verstärkte Werkstoffe
- Beschichtung vor allem rotationssymmetrischer Körper, wie z. B. Rollen, Zylinder und Walzen
- Möglichst hochfeste Trägerschichten, erzeugt durch Kombination aus Flamm- und Plasmaspritzen, je nach Anwendungsfall auch anschließendes Schleifen
- Schichtdicke der hydrophoben oder oleophoben Schicht: 10 nm - 10 µm
- Hohe mechanische Beständigkeit, Härte: 600 - 2.000 HV
- Poröse Schicht: 20 – 50 % Porenanteil
- Wasserkontaktwinkel: hydrophob, bis 150 ° und größer
- Oleophob, Ölablaufwinkel < 20 °, d. h. die Oberfläche soll nicht mit Öl und ähnlichen Medien benetzbar bzw. bezüglich dieser Medien bindungsabweisend sein
- Thermische Beständigkeit: 150 - 230 °C
- Werkstoffe Trägerschicht: Zink- und Aludraht sowie nickelbasierte Haftungspulver TiO₂, Al₂O₃ und weitere Metalloxide
- Werkstoffe Nanoschicht: amorphes Fluorpolymer, Silane wie fluoroPOSS und Silikone
- Hohe Haftfestigkeit des Systems auf den Substraten
- Hohe Elastizität, d. h. geringe Neigung zu Sprödbruch und Rissen in der Schicht

Die Projektdurchführung war in mehrere Abschnitte unterteilt: Im Rahmen der 1. Phase des Projektes waren die Machbarkeit der Beschichtung von Leichtbauwerkstoffen mit funktionalen Schichten nachgewiesen und geeignete Verfahren zur Herstellung ermittelt worden. Die Arbeiten hatten sich auf CFK-Rohre und -Platten als Grundwerkstoff, bei einer noch stark eingeschränkten Materialauswahl, konzentriert.

Das entwickelte Beschichtungssystem war mehrschichtig: Nach Applikation einer Zinkschicht zur Haftvermittlung, wurde mittels Flamm- bzw. Plasmaspritzen eine gut haftende Zwischenschicht, die beispielsweise zu 80 % aus Nickel und 20 % aus Chrom bestand, aufgebaut und im Anschluss mit einer Keramikschiicht (Al_2O_3 , Cr_2O_3 oder $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$) überlagert. Auf diese Keramikschiicht wurde dann die eigentliche Funktionsschiicht aufgetragen, wofür unterschiedliche Antihafmaterialien bzw. Mischungen dieser Antihafmaterialien verwendet werden konnten, um die Oberflächeneigenschaften zu modifizieren.

Die Trägerschiicht diente dazu, um unterschiedliche Spannungs- und Dehnungsverhalten zwischen Haftungs- und Deckschiicht auszugleichen, sodass eine gute Haftung der keramischen Deckschiicht erzielt werden konnte und im Gitterschnitttest keine Spannungsrisse auftraten. Geeignete Schichtdicken der einzelnen Plasma- und Flamm-spritzschichten waren ermittelt worden, ebenso wie Parameter zum Auftrag der Schichten. Die Auftragung erfolgte mit der Plasmapistole in mehreren Übergängen, was jedoch Abkühlphasen erforderte, um Überhitzungen der CFK-Oberfläche zu vermeiden.

Die Herstellung der Funktionsschiichten erfolgte unter Verwendung unterschiedlicher Antihafmaterialien sowie aus Mischungen dieser Antihafmaterialien, um die positiven Eigenschaften der einzelnen Substanzen zielführend zu kombinieren. Mittels der unterschiedlichen Antihafmaterialien konnten dabei die Oberflächeneigenschaften modifiziert werden. So konnten beispielsweise gezielt die Ölkontaktwinkel so eingestellt werden, dass eine Öl-abstoßung erfolgte und somit oleophobe Oberflächeneigenschaften vorlagen. Die gemessenen Ölkontaktwinkel konnten je nach Antihafmaterial bis auf 140° erhöht werden. Um die Eigenschaften der Funktionsschiichten hinsichtlich Haftung, Wasser- und Öl-abweisung sowie Antihafwirkung zu verbessern, wurden dabei geeignete Varianten der Funktionsschiichten bzw. deren Zusammensetzungen sowie Beschichtungsparameter ermittelt. So konnte beispielsweise durch Einbetten des Antihafmaterials POSS als Füllstoff in geeignete Matrices wie Fluorelastomer die Haftung deutlich verbessert werden, allerdings wiesen die Antihafmischungen noch sehr heterogene Verteilungen auf, die sich unter anderem auch in lokalen Unterschieden der Oberflächeneigenschaften bemerkbar machten. In der 2. Projektphase sollte somit auch an einer Homogenisierung dieser Antihafmischung gearbeitet werden.

Die erreichten Ergebnisse der 1. Phase des Projektes bestanden zusammenfassend in einem Schichtsystem, bei dem die Funktionsschiicht prinzipiell je nach Anforderungen ausgewählt

bzw. modifiziert werden konnte. Ferner war ein Verfahren zur Aufbringung des Schichtaufbaus auf CFK-Materialien entwickelt worden. Die so hergestellten Schichten wiesen eine gute Haftung zum CFK-Grundwerkstoff auf. Die Funktionsschicht konnte so eingestellt werden, dass der Kontaktwinkel über 90° und der Ölabrollwinkel unter 20° betrug. Somit waren die Grundlagen für die FuE-Arbeiten der vorliegenden 2. Projektphase in Richtung praxistauglicher Beschichtungen und Beschichtungsverfahren geschaffen worden.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen der AP 1 – 4 bestand das Ziel der 2. Projektphase darin, praxistaugliche Beschichtungen zu entwickeln und die Vorteile dieser Beschichtungen in der Anwendung zu demonstrieren. Es sollten Leichtbauzylinder bzw. -rollen mit funktionalen Schichten ausgestattet werden und damit die bislang mit wesentlich größerem Ressourceneinsatz hergestellten und verwendeten teflonbeschichteten Metallzylindern ersetzt werden.

Dazu sollten in dieser 2. Phase Arbeiten zur Optimierung des Beschichtungsverfahrens und der Beschichtungsparameter durchgeführt werden. Weiterhin sollte der Beschichtungs Aufbau für ausgewählte Anwendungen der Zylinder entwickelt werden und die Eignung in Praxistest nachgewiesen werden. Dabei sollte das Beschichtungsverfahren für Kleinserien im industriellen Maßstab geeignet sein.

Als weiterer Schritt war eine Neubeschichtung verschlissener Bauteile zu untersuchen, um einen längeren Einsatz der CFK-Grundkörper ermöglichen zu können.

Schließlich sollte die Energieeffizienz bilanziert werden und die Wirtschaftlichkeit beurteilt werden.

3. Entwicklungsarbeiten und erreichte Ergebnisse

3.1 Optimierung des Beschichtungsverfahrens und der Beschichtungsparameter

Ein Schwerpunkt dieser Arbeiten betraf die **Optimierung der Oxidkeramik-Schicht**, deren Aufbringung mittels Plasmaapplikation bisher längere Abkühlphasen erforderte und dadurch verhältnismäßig lange dauerte. Zur Lösung dieser Problematik wurde zunächst statt der normalen Druckluft Stickstoff als Kühlgas verwendet. Hierbei konnte allerdings kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden. In der weiteren Entwicklung wurden spezielle Kühldüsen getestet. Mit einer ausgewählten Flachstrahldüse konnte ein breiter, effektiver Luftstrahl erzeugt werden, der sich hervorragend zur Kühlung von CFK-Bauteilen während der Plasmaapplikation eignet. Ein weiterer Vorteil ist die Reduktion des Luftverbrauches im Vergleich zu den bisher verwendeten herkömmlichen Druckluftdüsen um bis zu 43 %, wodurch sowohl Kosten als auch Ressourcen eingespart werden können. Die Oxidkeramik konnte mit dieser Technik ohne zusätzliche Abkühlungsphasen aufgebracht werden.

Da die Oxidkeramik mit einer höheren Vorschubgeschwindigkeit sowie einer angepassten Spindeldrehzahl aufgebracht werden musste, wurde der Auftragswirkungsgrad (AWG) stark herabgesetzt. Während die Schichtdicke bei einer geringeren Vorschubgeschwindigkeit auf Metalloberflächen um ca. 8 μm pro Übergang zunahm, wurden bei CFK-Bauteilen nur eine Zunahme von ca. 4 μm pro Übergang (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2) erzielt. Andere Eigenschaften wie Porösität, Haftung und Härte wurden nicht beeinflusst.



Abbildung 1: Chromoxidschicht auf Aluminium: 10 Übergänge

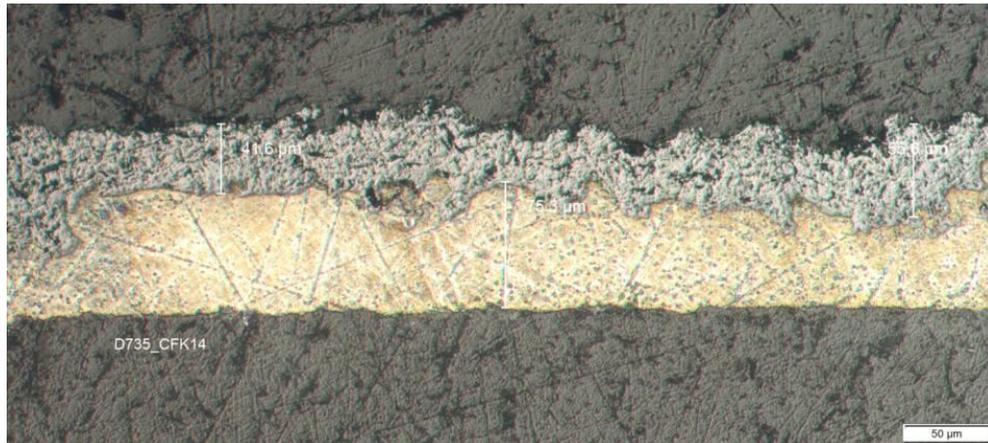


Abbildung 2: Chromoxid auf CFK: 15 Übergänge

Es wurden weitere Beschichtungsversuche mit dem über zusätzliche Kühldüsen optimierten thermischen Plasmaspritzverfahren durchgeführt. Dabei wurden die Ausrichtung und der Abstand der Kühldüsen optimiert, um einen gleichmäßigen und schonenderen Schichtaufbau der Keramik auf dem CFK-Grundkörper zu erzielen.



Abbildung 3: Kühldüsen befestigt an Plasmabrenner

Darauf basierend konnten auch die Vorlaufgeschwindigkeiten zum gleichmäßigen und schonenderen Schichtaufbau der Keramik auf den CFK-Grundkörper erfolgreich optimiert werden.

Zur **Optimierung der Funktionsschicht** wurden verschiedene Antihaftmaterialien kombiniert, um bestimmte Eigenschaften hervorzuheben. Durch die heterogene Verteilung der verschiedenen Materialien war es notwendig, ein geeignetes Applikationsverfahren zu finden sowie das Mischungsverhältnis der Antihaftmaterialien und deren Lösemittel zu optimieren. Hierzu wurden spezielle hydraulische Düsen verwendet. Bei diesem Applikationsverfahren wird die Zerstäubung kleinster Flüssigkeitsmengen durch ein pulsweitenmoduliertes Düsenventilsystem erreicht.

Die nun homogenere Durchmischung in der Funktionslösung ermöglichte eine Rückkehr zur Spritzapplikation unter Verwendung von handelsüblichen Becherpistolen. Der Vorteil gegenüber dem pulsweitenmodulierten Düsenventilsystem von Lechler lag in der einfachen Handhabung und der höheren geometrischen Flexibilität beim Spritzauftrag. Ferner reagierte der Sprühvorhang des Lechlersystems empfindlich auf Luftzüge aus Umgebung und Absaugsystem. Mit der Becherpistole ließ sich nun durch gleichmäßige, einzelne, nicht zu nass ausgeführte, Beschichtungsübergänge ebenfalls eine dünne nanoskalige Funktionsschicht aufbringen, welche die Oberfläche der Oxidkeramik bedeckte ohne die Struktur zuzuschwemmen (Abbildung 4).

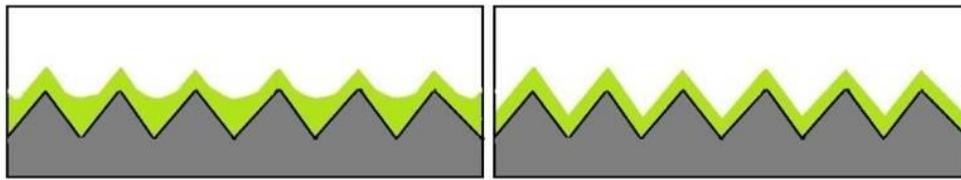


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer zugeschwemmten und einer gleichmäßig beschichteten Oberflächenstruktur

Durch eine Auftragung in mehreren Kreuzgängen wurde schließlich eine gleichmäßig verteilte Beschichtung erzielt, welche sowohl in die Täler reichte als auch die Spitzen bedeckte (Abbildung 5).

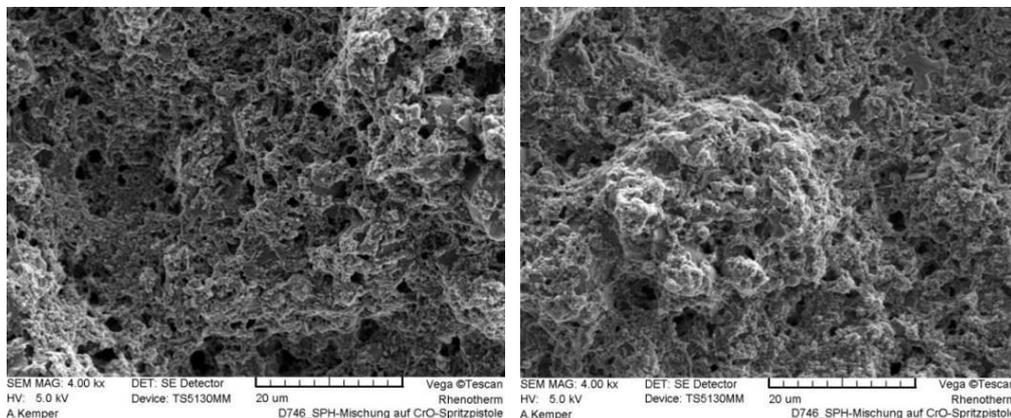


Abbildung 5: REM-Aufnahmen der Funktionsschicht auf Chromoxid: (links Tal; rechts Spitze)

Es wurde dabei der Lösungsansatz verfolgt, eine Imprägnierung durch wiederholten Auftrag mit einer niedrig konzentrierten Lösung zu ermöglichen. So waren einzelne Bestandteile der Funktionslösung in der Lage, in die poröse Struktur der Keramikschicht einzudringen und diese zu versiegeln.

Als Lösungsmittel kamen fluoridierte Lösungsmittel zum Einsatz wie etwa die Galden-Produktreihe von Solvay Solexis oder die Novec-Produktreihe von 3M Deutschland GmbH. Es handelt sich hierbei um chemisch sehr inerte und damit wenig bis kaum reaktive Lösungsmittel, die nicht brennbar und physiologisch relativ unbedenklich sind. Sie haben einen geringen Dampfdruck und verflüchtigen sich bereits bei Raumtemperatur oder unter leicht erhöhter Temperatur bis 150 °C sehr schnell. Im Rahmen unseres Beschichtungsprozesses werden die Dämpfe sowohl während der Beschichtung als auch während des Sinterprozesses abgesaugt. Im Vergleich zu herkömmlichen Beschichtungen sind die verwendeten fluoridierten Lösungsmittel wesentlich unkritischer, da sie, anders als N-Methyl-2-pyrrolidon oder Xylol nicht toxisch oder gar fruchtschädigend sind. Lediglich ihre Zersetzungsprodukte sind kritisch zu betrachten, da wie bei allen fluorhaltigen Verbindungen HF entsteht. Bei sachgemäßem Gebrauch ist dies jedoch nicht zu erwarten.

Allgemein werden in der Funktionsschicht verschiedene Antihafmaterialien miteinander kombiniert, um jeweils bestimmte Eigenschaften hervorzuheben. Zusätzlich werden die Antihafeffekte aber auch durch die Oberflächenstruktur der Funktionsschicht beeinflusst. Diese Oberflächenstruktur lässt sich sowohl über die Zusammensetzung der Funktionsschicht als auch über das Applikationsverfahren und die verwendeten Konzentrationen beeinflussen.

Die **Trägerschicht** wurde mit einer dünnen, nanoskaligen Funktionsschicht versehen, wobei die Schwierigkeit darin bestand, die Struktur der Oxidkeramik zu erhalten und gleichzeitig deren Porosität und die durch die Rauheit erzeugte große Oberfläche zu versiegeln.

Als Lösungsansatz wurden hier niedrig konzentrierte Lösungen der Antihafschichten als Imprägnierung verwendet, die in der Lage sind, die poröse Keramikschicht zu tränken und zu versiegeln. Um auch die Spitzen der Struktur zu beschichten, wurde eine zweite Schicht aufgebracht. Mit diesem Verfahren konnte sowohl eine gleichmäßige Verteilung der unterschiedlichen Antihafmaterialien als auch eine Versiegelung der Plasmaschicht erreicht werden.

Zur **Analyse der entwickelten Beschichtungen** wurden diverse Untersuchungen durchgeführt: Um die Gleichmäßigkeit der Beschichtung zu überprüfen, wurden Mehrfachbestimmungen des Wasserkontaktwinkels pro Probe durchgeführt. Durch das neue Applikationsverfahren konnte schließlich eine gleichmäßige Verteilung erzielt werden, wie in der folgenden Graphik gut zu erkennen ist.

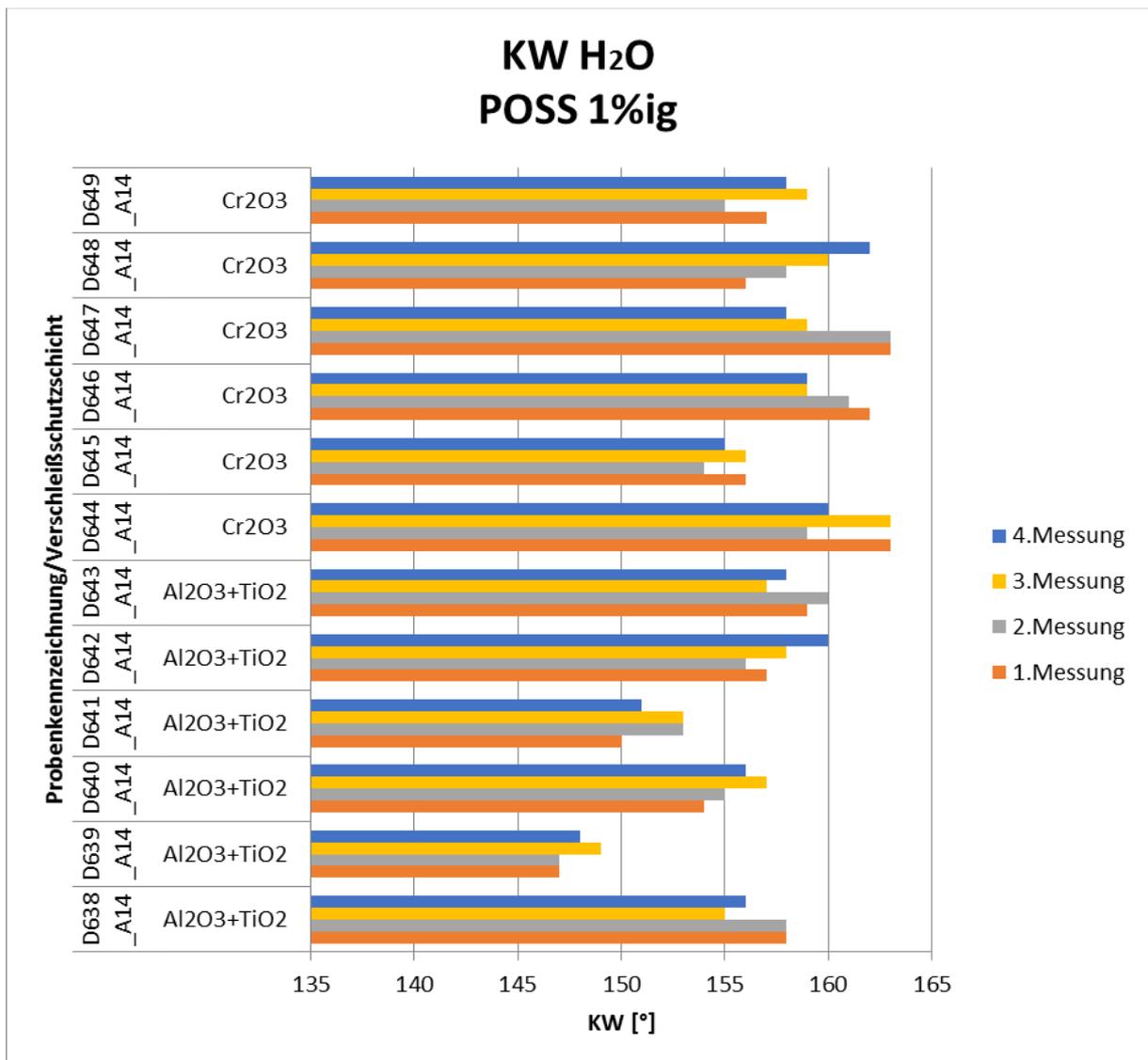


Abbildung 6: Mehrfachbestimmung des Wasserkontaktwinkels

Unabhängig davon, ob ein Beschichtungsmaterial alleine oder unterschiedliche Materialien als Gemisch verwendet worden waren, ergaben sich innerhalb einer Toleranz von $\pm 5^\circ$ keine Unterschiede beim Wasserkontaktwinkel auf derselben Musterplatte.

Da keines der getesteten Materialien alleine allen Anforderungen gerecht wurde, mussten die verschiedenen Antihafmaterialien zusammengemischt werden. Als Antihafmaterialien kamen Silikone, Dünnschichtsilane, amorphe Fluorpolymere und Fluorelastomere zum Einsatz. Aufgrund der chemisch ähnlichen Beschaffenheit einiger Grundwerkstoffe traten dabei keine größeren Probleme auf. Allerdings musste das optimale Mischungsverhältnis noch ausgetestet werden.

Zu Beginn waren einige der gewählten Materialien mechanisch wenig stabil und wiesen nur eine geringe Haftung zum Untergrund auf. Mithilfe eines Peeltests wurde deutlich, dass z. B.

das hinsichtlich der Antihafteigenschaften am besten geeignete System (POSS) vom Klebeband einfach abgelöst wird. Durch die Kombination der Antihaftmaterialien konnte auch dieses Problem behoben werden. Zur Bestätigung dieser Annahme wurden auf einer Musterplatte je fünf Klebebandabzüge gemacht und nach jedem Abzug der Wasserkontaktwinkel gemessen. Bei den Systemen, die vom Klebeband nicht abgelöst oder beschädigt wurden, konnte nach jedem Abzug der gleiche Kontaktwinkel gemessen werden.

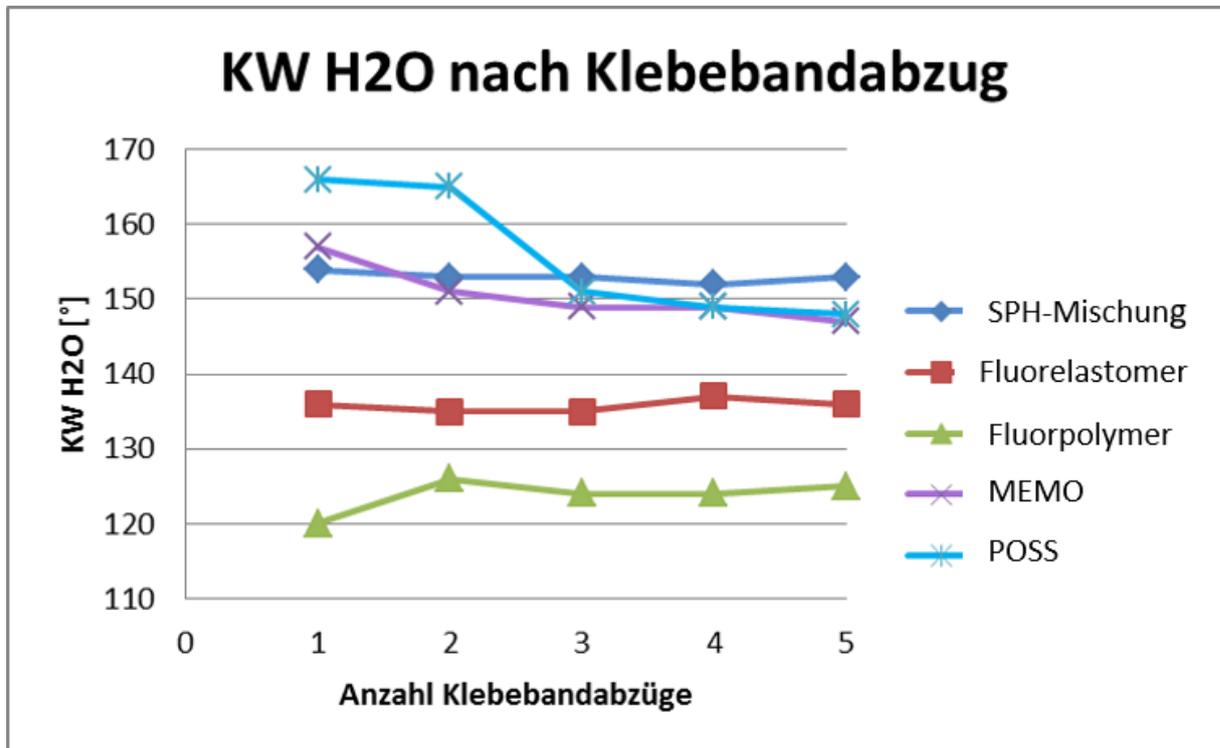


Abbildung 7: KW Messung nach Klebebandabzug

Während bei den einzelnen Materialien eine gewisse Unregelmäßigkeit bzw. eine starke Reduzierung des Kontaktwinkels erkennbar ist, bleiben die Werte bei den gemischten Systemen konstant. Auch die benötigte Kraft, um das Klebeband abzuziehen, ändert sich nicht. Dies belegt ebenfalls eine konstant bleibende Antihafteigenschaft.

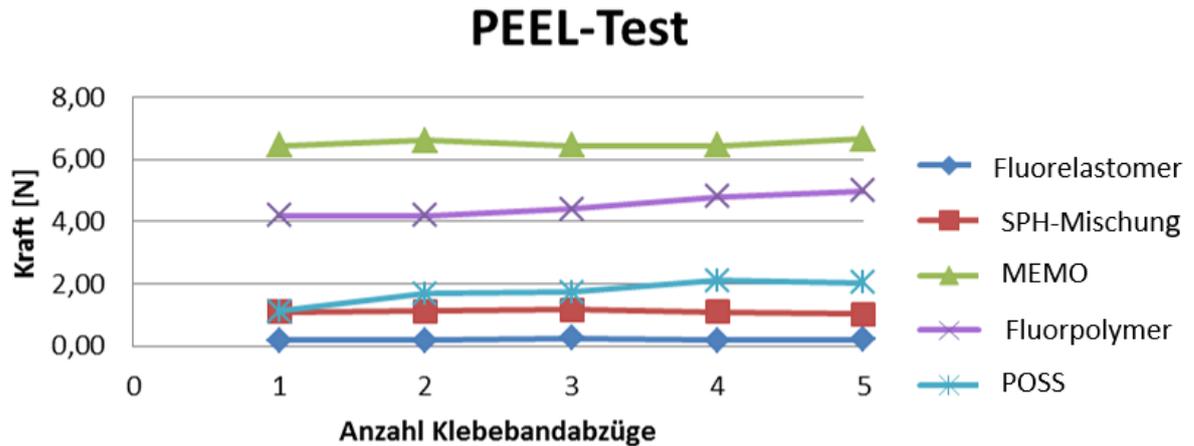


Abbildung 8: Kraftmessung nach Klebebandabzug

Zur Bewertung der Eigenschaften der optimierten applizierten Beschichtungen wurden neben 90 °-Peeltests und den Kontakt- sowie Abrollwinkelmessungen auch Oberflächenaufnahmen im REM erstellt. Zusätzlich konnte über einen EDX-Detektor und ein höher auflösendes Feldelektronenmikroskop die Verteilung charakteristischer Elemente in der Oberfläche bei hohen Vergrößerungen (ca. 10.000 x bis 80.000 x) gezeigt werden. Ein Nachweis kovalenter Bindungen mittels IR-Spektroskopie war nicht möglich, da die Rauheit der erzeugten Schichten auch nach den durchgeführten Optimierungen zu hoch war, um einen ausreichenden Kontakt der Probe zum Messgerät herstellen zu können. Die Haftung der neuen Schichten konnte somit nur anhand der Peeltests bestimmt werden.

Die abgebildeten REM-/FEM-Aufnahmen zeigen zunächst die Struktur einer reinen keramischen Plasmaschicht aus Chromoxid, wie sie vor der Beschichtung mit der Funktionslösung vorlag (Abbildung 9):

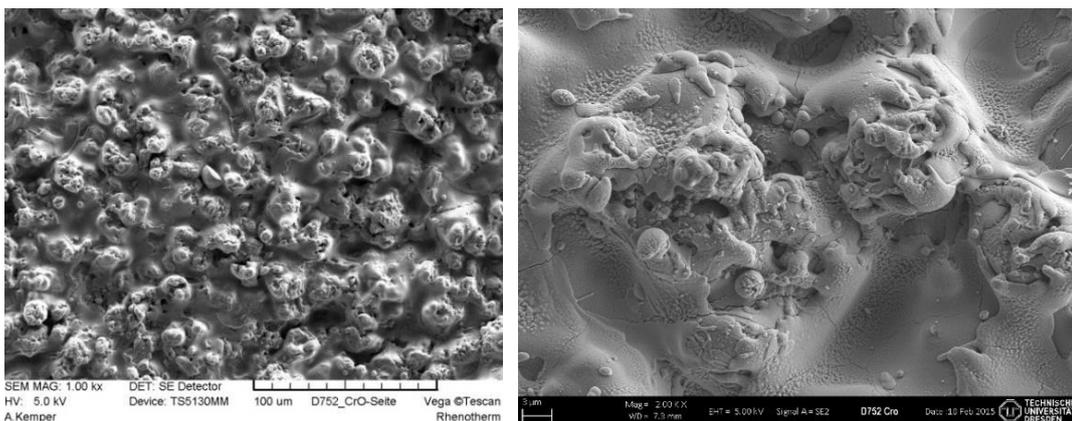


Abbildung 9: REM-/FEM-Aufnahmen einer plasmagespritzten Chromoxid-schicht

Zu sehen ist die für dieses thermische Spritzverfahren typische Struktur. Aufgeschmolzene Metall- oder Metalloxydpartikel, welche als Tropfen auf das Substrat auftreffen und dort zum

Teil zerplatzen und sich verteilen. Dadurch baut sich eine miteinander verschmolzene Oberfläche mit Spitzen und Tälern auf.

Eine Betrachtung der mit Funktionsmischung beschichteten Oberfläche im Mikroskop wird in den folgenden REM-/FEM-Aufnahmen (Abbildung 10) dargestellt:

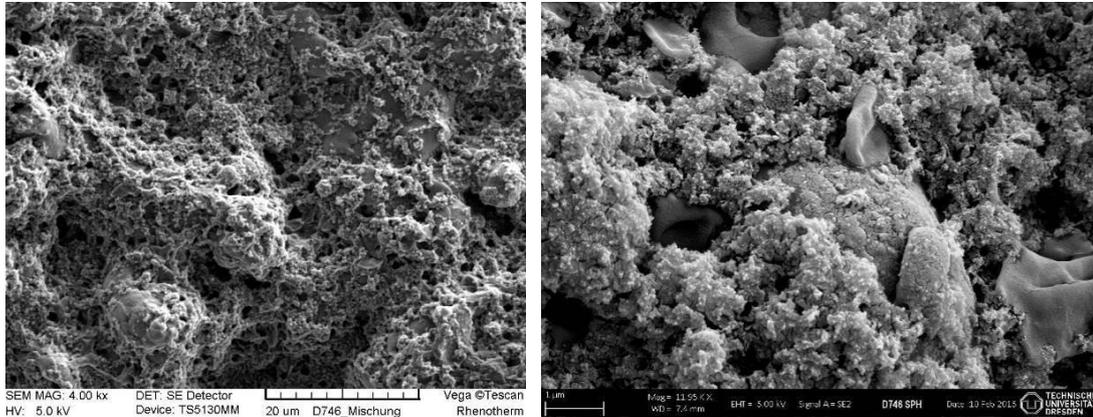


Abbildung 10: REM-/FEM-Aufnahmen der Funktionsschicht auf einer plasmagespritzten Chromoxidschicht

Sehr deutlich zu erkennen ist die stark ausgeprägte Struktur, welche durch den Anteil einer bestimmten Komponente des Funktionsgemisches erzeugt wird. Diese Struktur unterstützt den Antihafteffekt der Beschichtung. Zwischen den offensichtlichen Beschichtungsstrukturen lassen sich jedoch vermeintlich unbeschichtete Bereiche ausmachen. Wären diese Lücken tatsächlich unbeschichtet gewesen, hätte dies die Integrität und Funktion der Beschichtung beeinträchtigen können.

Das verwendete Beschichtungsmaterial enthielt aber noch weitere funktionelle Bestandteile, welche optisch im Mikroskop nicht klar erkennbar sind. Deren Vorhandensein und Funktion ließ sich in Einzelversuchen jedoch eindeutig anhand der auftretenden Effekte nachweisen.

So wurde mithilfe eines EDX-Detektors nachgewiesen, dass die vermeintlich unbeschichteten Bereiche mit den anderen beiden Komponenten der Antihafschicht versiegelt waren.

Auf dem linken Bild (Abbildung 11, grau) ist beispielhaft eine der so untersuchten Stellen gezeigt, wie sie im REM/FEM zu sehen war. Auf den ersten Blick scheinen hier deutliche Lücken in der Beschichtung erkennbar.

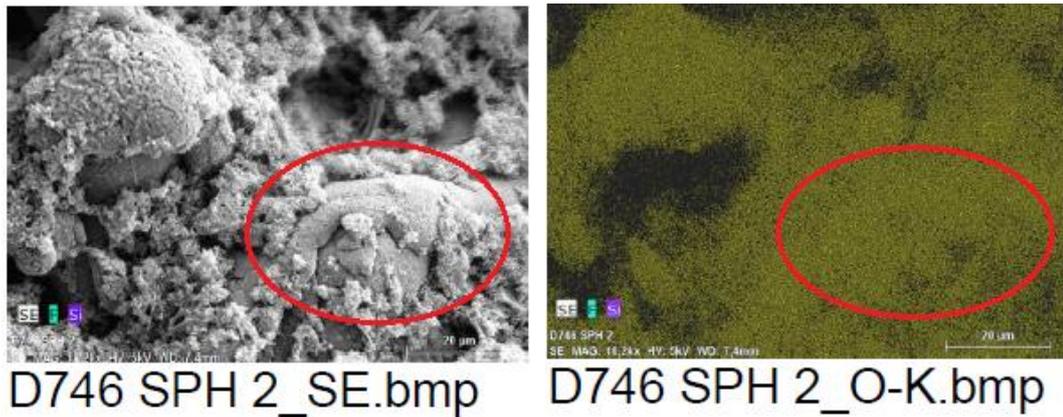


Abbildung 11: **REM-/FEM-Aufnahmen und EDX-Aufnahme (rechts: Sauerstoff, gelb)**

Als Referenzbild wurde in der EDX-Analyse der enthaltene Sauerstoff (Abbildung 11 rechts, gelb) gemessen. Dieser ist sowohl in der Beschichtung als auch im Untergrund vorhanden. Demnach wäre ein komplett gelb ausgefülltes Bild zu erwarten. Die im Bildausschnitt sichtbaren schwarzen Flecken sind Bereiche, die vom EDX-Detektor nicht erfasst werden können. Dies liegt an Abschattungseffekten, die durch den physikalischen Aufbau und die Funktionsweise der Messmethode bedingt sind. Dies war für die weitere Auswertung der für die Beschichtung spezifischen Elemente zu berücksichtigen.

Die für die Antihaft-Funktion verwendeten Beschichtungsmaterialien basierten vor allem auf Fluor und/oder Silicium. Diese beiden Elemente wurden ebenfalls mittels EDX-Mapping gemessen und sind in den folgenden Bildern dargestellt (Abbildung 12).

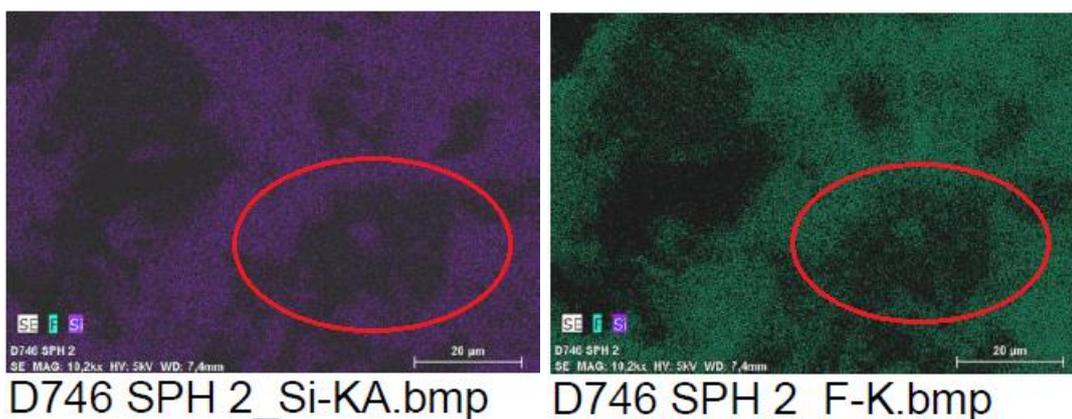


Abbildung 12: **EDX-Aufnahme (links: Silicium (violett); rechts: Fluor (grün))**

Unter Berücksichtigung der abgeschatteten Bereiche ist immer noch eine breite Abdeckung erkennbar. Selbst auf den im Mikroskop optisch unbeschichtet erscheinenden Bereichen lassen sich noch Signale des Fluors und Siliciums nachweisen.

Daraus ließ sich schließen, dass auch die Zwischenbereiche der Keramikoberfläche durch das Funktionsgemisch erfolgreich beschichtet und bedeckt worden sind. Demnach war von einer vollständigen Beschichtung auszugehen.

Die Betrachtung anderer Stellen auf dem Testmuster (Abbildung 13) ergab analog zu dem vorherigen Beispiel ähnliche Rückschlüsse über den Beschichtungsgrad.

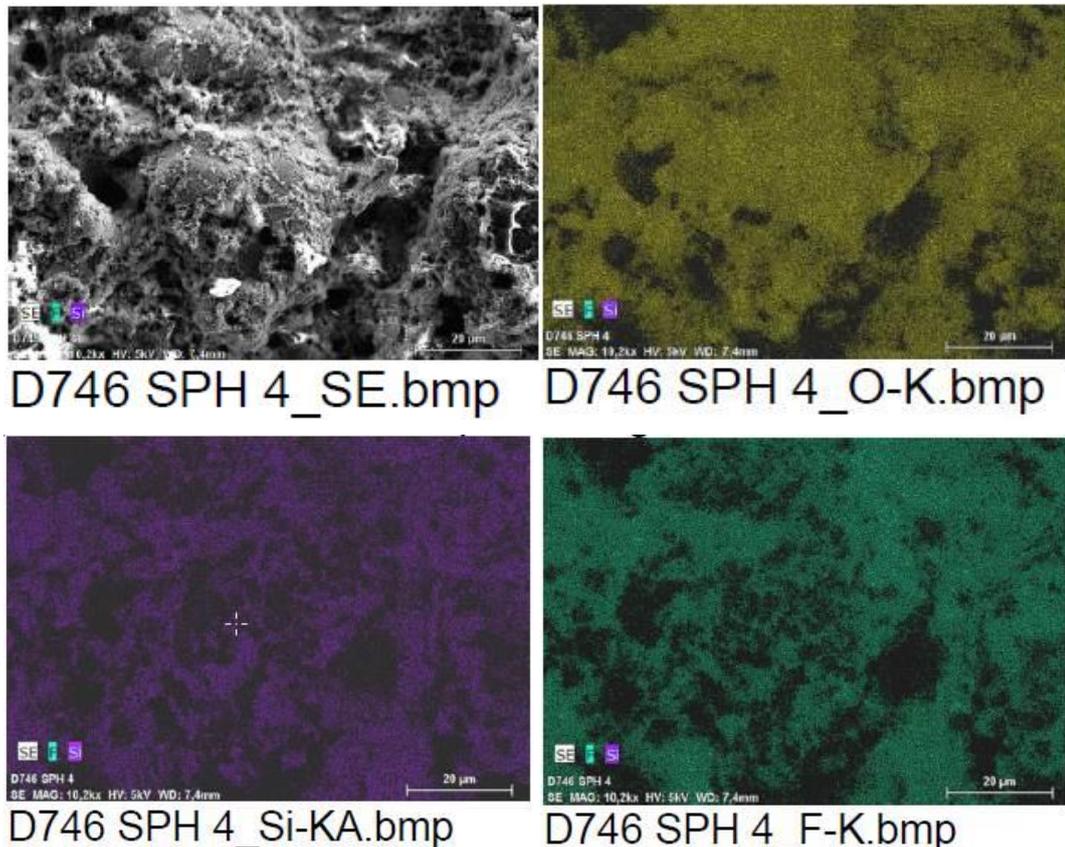


Abbildung 13: REM-/FEM-Aufnahmen mit verschiedenen EDX-Einstellungen
(oben links: FEM-Aufnahme; oben rechts: EDX-Sauerstoff; unten links: EDX-Silicium; unten rechts: EDX-Fluor)

Zwar zeigten sich vereinzelt etwas geringere Fluorkonzentrationen auf der Oberfläche, dennoch lässt sich insgesamt von einer vollständigen Beschichtung sprechen. Auch eine gesonderte Untersuchung von Beschichtungsmustern mit den einzelnen optisch nicht nachweisbaren Bestandteilen des eingesetzten Funktionsgemisches zeigte mittels EDX-Analyse eine gute Materialverteilung.

Es wurde weiterhin eine Optimierung der Funktionsschicht in Bezug auf **Antihafwirkung** gegen Klebstoffe vorgenommen.

Aus den vorangegangenen Untersuchungen hatte sich die Fluorelastomer-Komponente als ein maßgeblicher Bestandteil für die oberflächliche Struktur der Funktionsschicht herausge-

stellt. Von anderen Anwendungen mit höheren Konzentrationen (bis zu 25 %-iger Festkörperanteil) ist die Schicht jedoch als dicker und eher glatter Film bekannt. Aus diesem Grund wurde eine genauere Betrachtung der Auswirkung unterschiedlicher Fluorelastomer-Konzentrationen auf die Struktur und Eigenschaften der Beschichtung untersucht.

Hierzu wurden Testmuster mit verschiedenen Konzentrationen (25 %, 20 %, 15 %, 10 %, 5 %, 1 %) und unterschiedlicher Anzahl an Beschichtungsübergängen angefertigt. Die so erhaltenen Muster wurden nach den gängigen Testmethoden untersucht und gegenübergestellt.

Eine dicke Beschichtung mit dem Fluorelastomer zeichnete sich im Allgemeinen nicht durch einen sehr hohen Wasserkontaktwinkel aus (ca. 135 °). Mit abnehmender Konzentration zeigte sich jedoch ein leichter Anstieg in den Werten.

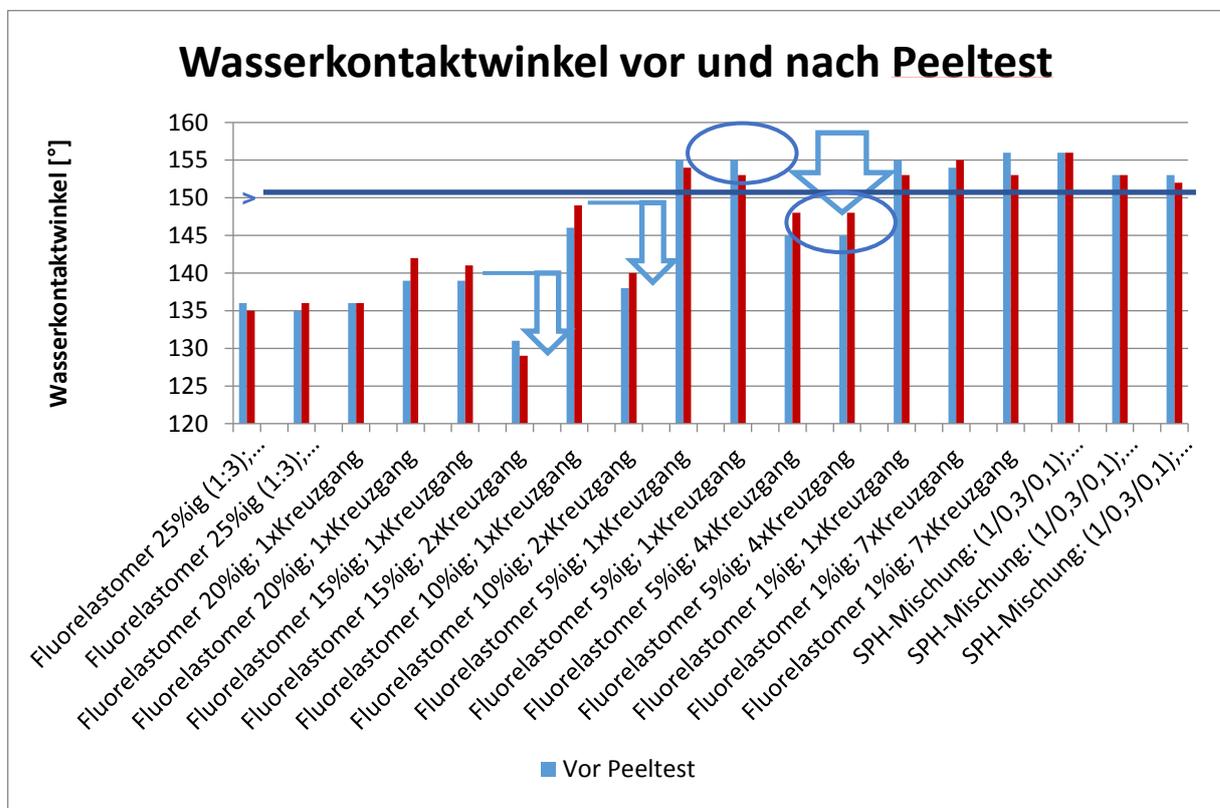


Abbildung 14: Ergebnisse der Bestimmung des Wasserkontaktwinkels vor und nach durchgeführtem Peelttest

Wenn aber Muster in einem bestimmten Konzentrationsbereich mit zusätzlichen Beschichtungsübergängen appliziert wurden, ließ sich ein Abfall des Kontaktwinkels beobachten. So zeigte beispielsweise ein Kreuzgang mit 10 % Fluorelastomer einen Wert von ca. 146 °, wogegen zwei Kreuzgänge nur noch etwa 138 ° erreichten. Dies ließ sich in Kombination mit REM-Aufnahmen der entsprechenden Muster erklären (Abbildung 15).

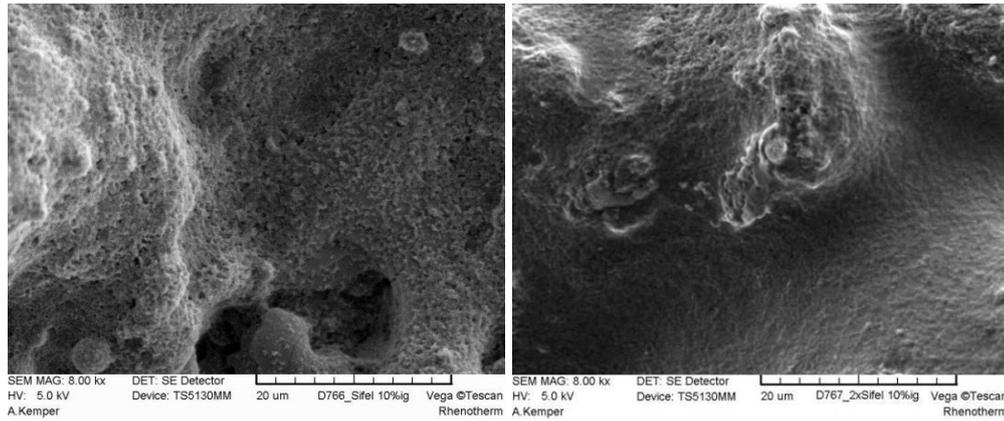


Abbildung 15: REM-Aufnahmen (links: 10 % Fluorelastomer mit einem Kreuzgang beschichtet; rechts: analog mit zwei Kreuzgängen beschichtet)

Wie in den REM-Aufnahmen zu erkennen, zeigt sich im linken Bild eine ausgeprägte Mikrostruktur, die neben den hydrophoben Eigenschaften des Beschichtungsmaterials selbst ebenfalls einen Einfluss auf die Antihafteffekt und den Kontaktwinkel besitzt. Im rechten Bild, nach einem zweiten Kreuzgang, wurde diese Mikrostruktur durch die zusätzliche Materialmenge zugeschwemmt, wodurch sich die niedrigeren Werte des Kontaktwinkels erklären lassen. Diese Beobachtungen wiederholen sich im Bereich der Konzentrationen von 15 % und 5 %. Erst bei sehr niedrigen Konzentrationen (z. B. 1 %) ist es möglich, mit mehreren Kreuzgängen eine deckende und gleichmäßige Verteilung zu applizieren, ohne die hilfreiche Struktur durch zu viel Material zuzuschwemmen. Danach richtet sich auch die Zusammensetzung der Funktionsmischung, in welcher das Fluorelastomer den größten Bestandteil ausmacht.

Bei den Ergebnissen der Abrollwinkel von Wasser auf der Oberfläche lassen sich ähnliche Unterschiede erkennen (Abbildung 16).

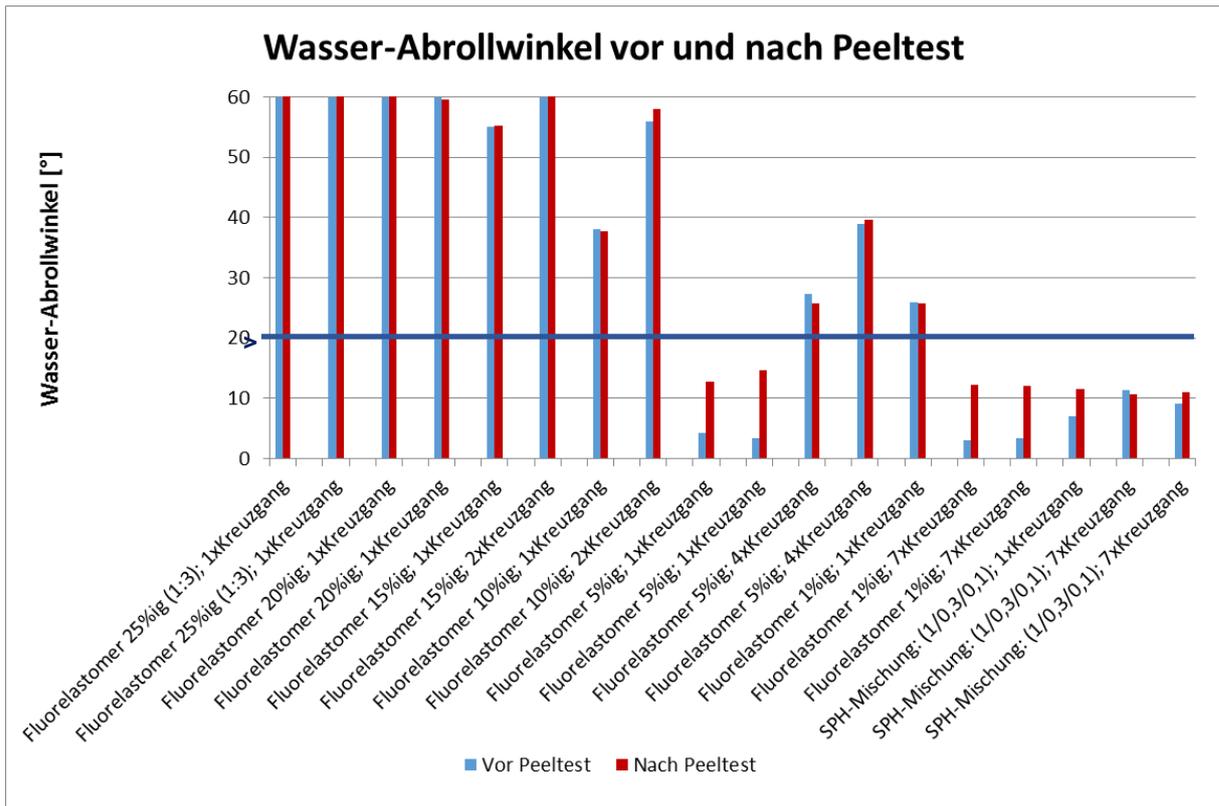


Abbildung 16: Bestimmung des Abrollwinkels von Wasser vor und nach durchgeführtem Peeltest

Dick aufgetragene Fluorelastomerschichten benötigen deutlich höhere Abrollwinkel als dünnere und strukturierte Schichten. Hier lassen sich mit stark verdünntem Materialauftrag niedrigere Werte erzielen.

Um die Auswirkungen auf den Antihafteffekt gegen Klebstoffe und die Haftbeständigkeit des Fluorelastomers auf dem Substrat zu untersuchen, wurden die Muster dem 90 °-Tesatape-Peeltest unterzogen. Hier zeigte sich die Stärke des Materials gegenüber Klebstoffen (Abbildung 17).

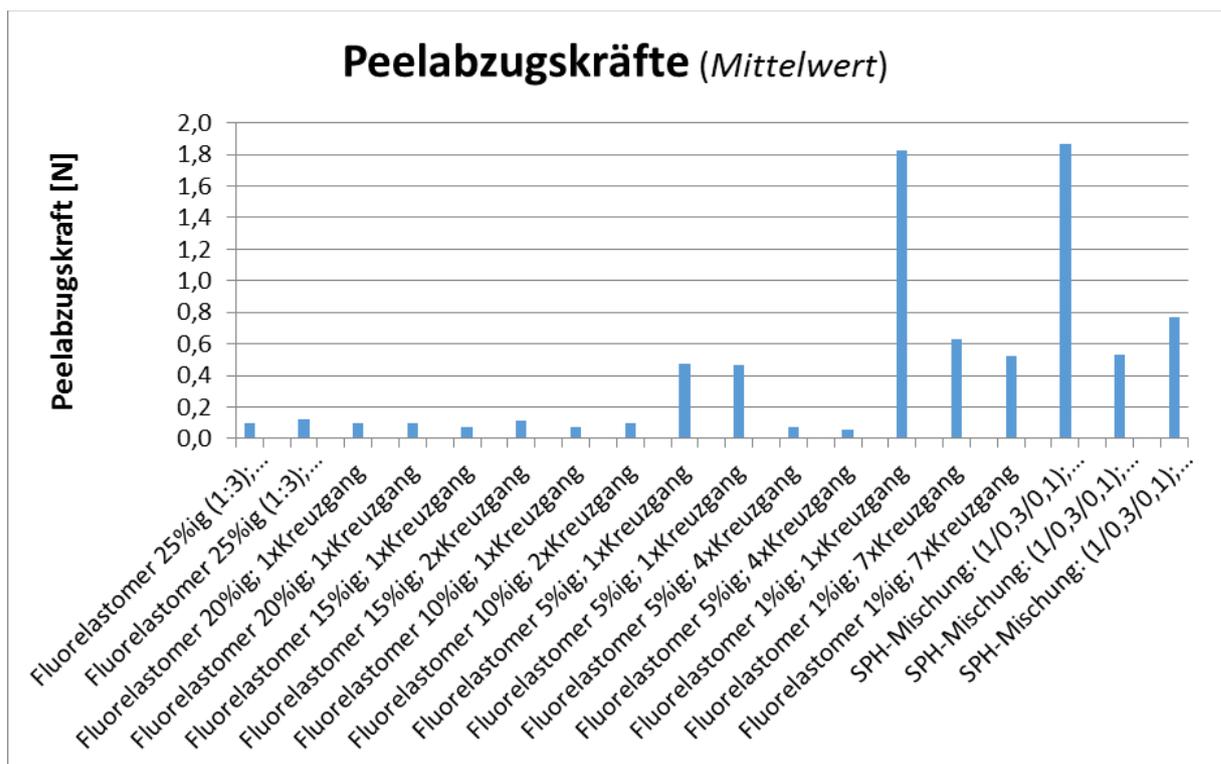


Abbildung 17: Gemittelte Ergebnisse der 90 °-Tesatape-Peeltests von unterschiedlichen Musterproben

Allgemein lässt sich sagen, dass höhere Mengen Fluorelastomer deutlich niedrigere Abzugskräfte ermöglichen. Je mehr dieser Komponente auf der Oberfläche vorhanden war, desto leichter löste sich also der Testklebestreifen vom Muster. Dies ließ sich auch mit niedrigeren Konzentrationen durch eine entsprechend höhere Anzahl an Übergängen erreichen. In der Beständigkeit gegenüber mehrfachen Abzügen zeigten sich die Muster mit leichten Schwankungen insgesamt als relativ stabil (Abbildung 18).

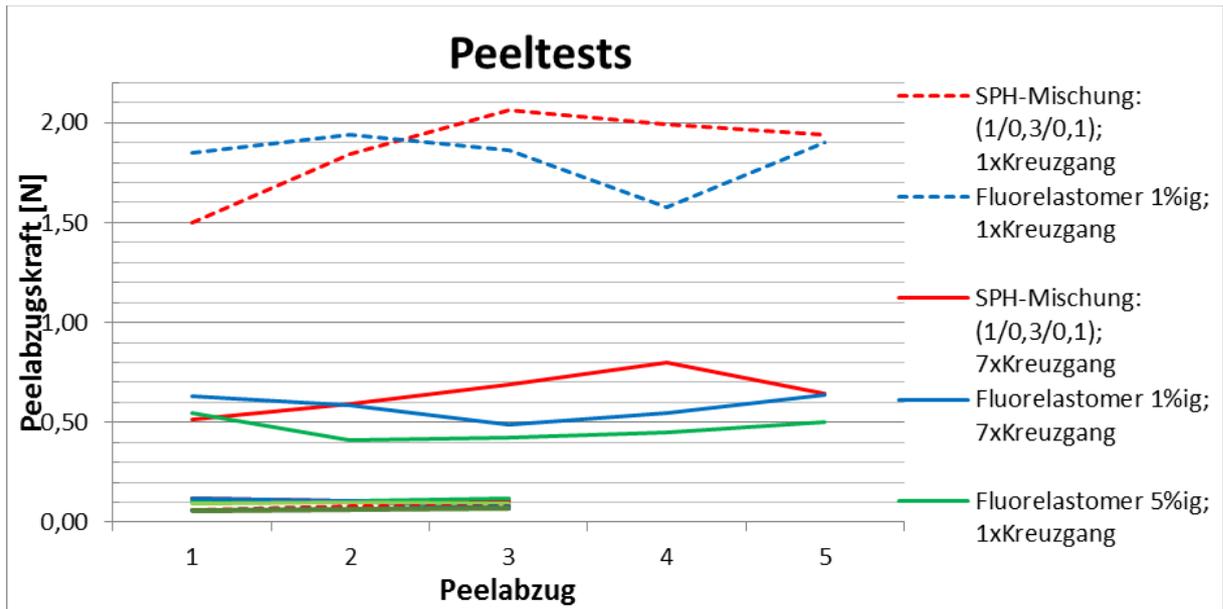


Abbildung 18: Verlauf der Ergebnisse des Peeltests mit mehreren aufeinanderfolgenden Abzügen

Dies wurde als erster Hinweis auf die Beständigkeit gegenüber mechanischer Belastung interpretiert.

3.2 Entwicklung Beschichtungsaufbau für geplante Anwendung

Speziell für Klebstoffschichten-berührende Walzen wurde eine Versuchsreihe mit unterschiedlichen Silikonen durchgeführt. Bekanntermaßen haben Silikone ausgezeichnete Antihaftwirkung gegen Klebstoffe, Klebebänder und Etiketten, weisen aber alleine eine geringe Härte und Abriebbeständigkeit auf. Daher ist eine Kombination mit geeigneten Hartstoffschichten erforderlich, um eine ausreichende Standzeit zu gewährleisten. Zudem ist eine Vielzahl von bei Raumtemperatur vernetzenden Silikonen, sog. RTVs am Markt verfügbar, die sich wiederum hervorragend für die Beschichtung temperatursensitiver Substrate wie CFK eignen. Ein weiterer Vorteil liegt in der Löslichkeit der unvernetzten Silikone in geeigneten Lösemitteln, sodass eine gewisse Imprägnierung der porösen Plasmaschicht zu erwarten war. Der Fokus der Versuchsreihe lag zum einen auf der Antihaftwirkung gegen Klebeband, aber auch auf der chemischen Beständigkeit der Silikone gegen Lösemittel, die in einigen Industriezweigen zur Reinigung von Oberflächen verwendet werden.

Im Peeltest zeigte sich kaum ein messbarer Unterschied zwischen den verschiedenen Produkten. Das Testklebeband konnte mit Abzugskräften von weniger als 0,07 N abgezogen werden (siehe Abbildung 19).

Bislang wurden vor allem Oximvernetzende Silikone eingesetzt, wobei Oximverbindungen im Verdacht stehen, karzinogen zu sein. Daher lag der Fokus der Untersuchung auch darin, Silikone mit anderen Vernetzungsmechanismen auf ihre Eignung für die industrielle Beschichtung zu prüfen. Es wurden sowohl acetox- als auch alkoxyvernetzende Silikone geprüft.

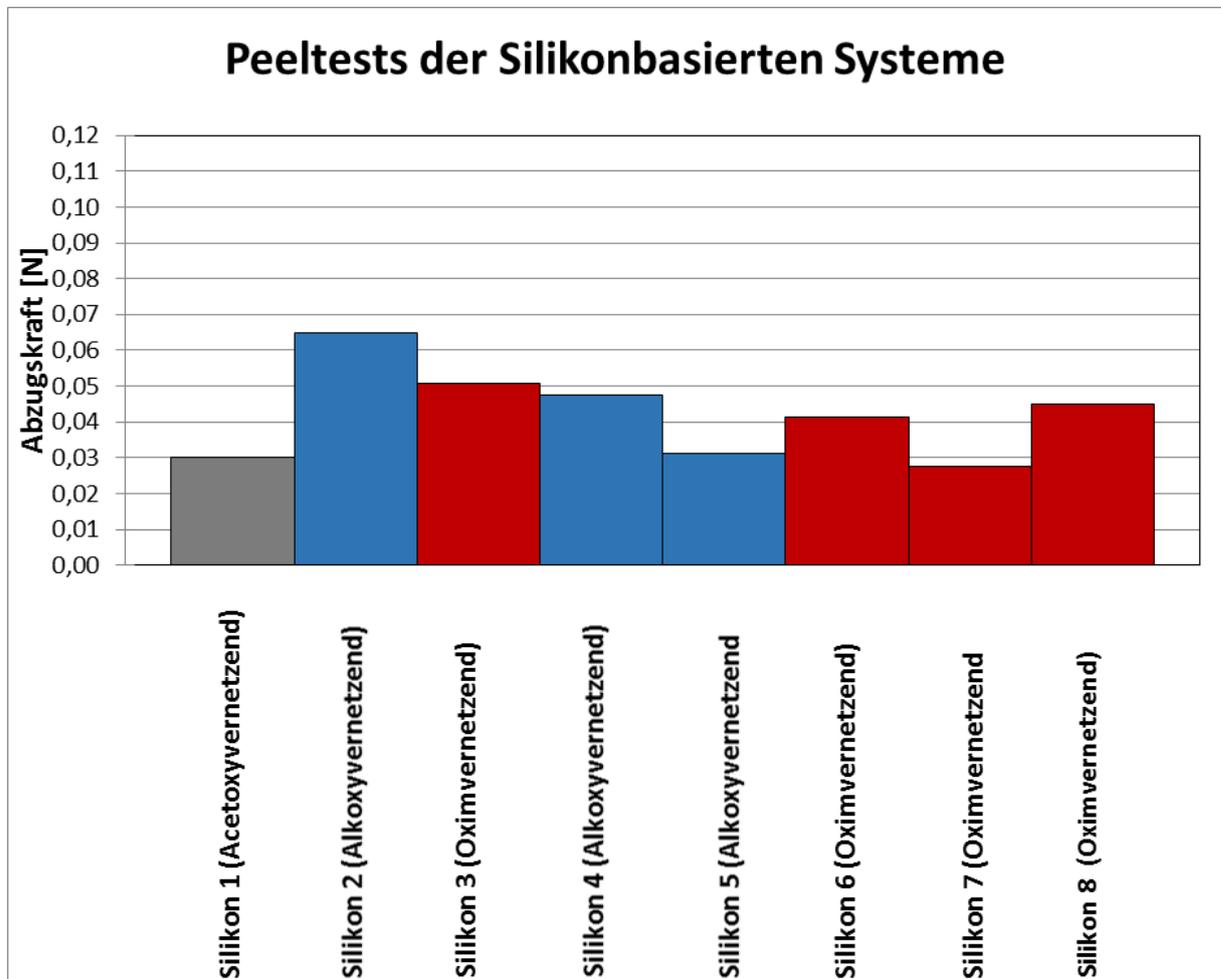


Abbildung 19: Ergebnisse Peeltest mit Klebeband

Erst die Untersuchung der Lösemittelbeständigkeit zeigte deutliche Unterschiede zwischen den untersuchten Silikonen. Dazu wurden beschichtete Probenplatten für 24 Stunden in folgende Lösemittel eingelegt:

- Isopropanol
- Aceton
- Xylol
- Methylisobutylketon

Im Anschluss wurde der prozentuale Gewichtsverlust der jeweiligen Probe bestimmt, wobei davon auszugehen ist, dass der Gewichtsverlust durch Ablösung von Silikon bedingt wurde.

Durch einen weiteren Peeltest mit Klebeband wurde außerdem geprüft, ob die Antihafte Wirkung durch die Lösemittel beeinträchtigt wurde. Eine Verschlechterung der Abzugskraft wäre ein Indiz für einen chemischen Angriff auf das jeweilige Silikon.

Im Beständigkeitstest (Abbildung 20) zeigte sich, dass alle getesteten Silikone deutlich aufquellen, wenn sie einer größeren Menge Lösemittel ausgesetzt sind. Die Quellung erwies sich jedoch bei allen Proben als reversibel, da die eingelagerten Lösemittel schon durch Lagerung bei Raumtemperatur wieder ausgedampft werden konnten. Dennoch wurde eine forcierte Trocknung im Ofen durchgeführt, um sicher feststellen zu können, ob auch ein Ablösen der Silikonschichten stattgefunden hat. Speziell die Silikone 5, 7 und 8 wiesen einen Gewichtsverlust von 9 – 12 % auf und sind daher für den industriellen Einsatz weniger geeignet. Die Silikone 1, 2 und 6 dagegen zeigten nur geringe Gewichtsverluste nach längerer Exposition in Lösemitteln und wurden in das Portfolio für die Beschichtung von Walzen für die Verpackungsindustrie aufgenommen.

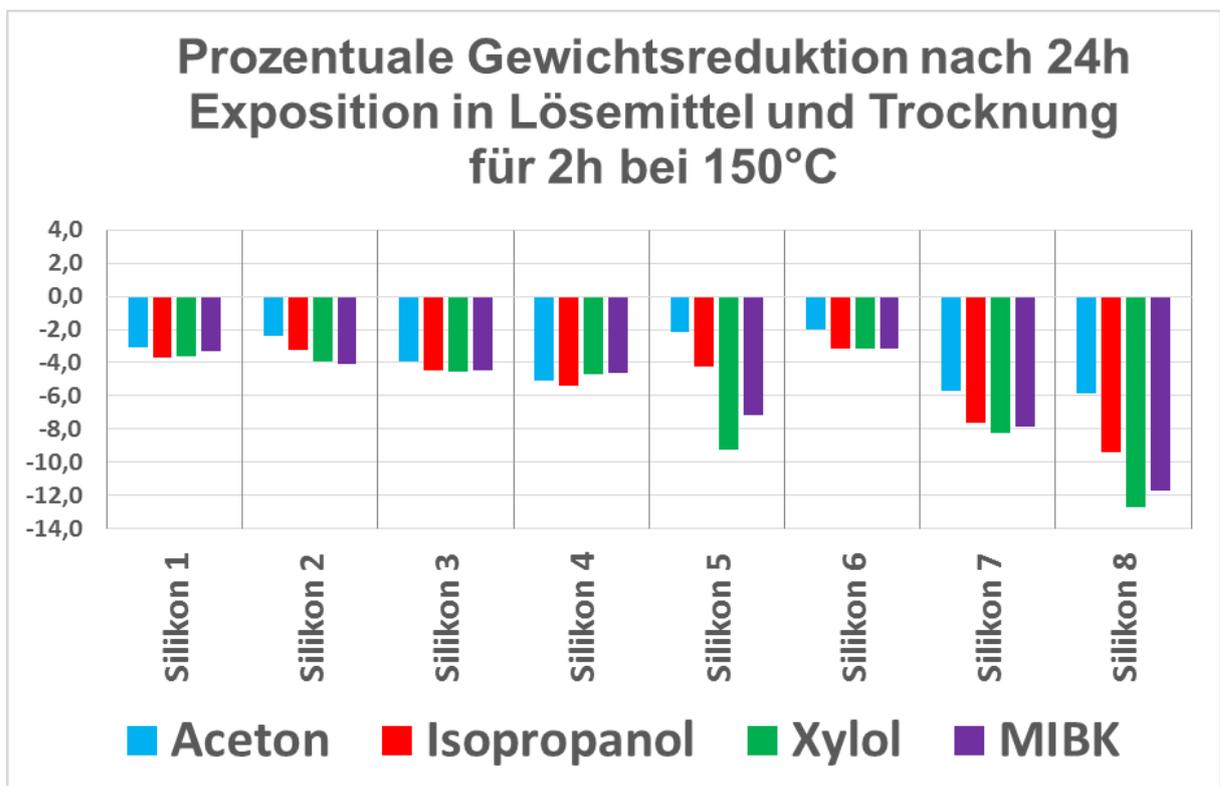


Abbildung 20: Ergebnisse der Lösemittelbeständigkeit

3.3 Entwicklung von Beschichtungsprototypen und Test der Beschichtungsprototypen

Für die **Entwicklung von Beschichtungsprototypen** wurde ein Leichtbauprototyp einer CFK-Walze mit folgenden Maßen beschafft:

Durchmesser	100 mm
Ballenlänge	1700 mm
Gesamtlänge	2000 mm
Restwandstärke	10 mm

Die Harzmatrix dieser Walze besteht aus einem Epoxidharz, sodass dieser Prototyp mit dem in Projektphase 1 entwickelten Schichtaufbau ohne weitere Anpassungen beschichtet werden konnte. Die Oberfläche dieser CFK-Walze ist steingeschliffen. Hier empfiehlt es sich, vor der Behandlung mit Korund einen EP-Überzugslack zu applizieren, um die Oberfläche des CFKs vor der mechanischen Einwirkung beim Strahlvorgang zu schützen.

Es wurden Walzen beschichtet und die resultierenden Eigenschaften untersucht.

Zur Auswahl einer **geeigneten Anwendung** (Ziel: Demonstration der erzielbaren Effekte in der Praxis) wurden Gespräche mit potenziellen Anwendern geführt. Da der ursprüngliche Kooperationspartner im Rahmen dieses Projektes kein Interesse mehr an einer weiteren Entwicklung gezeigt hatte, mussten neue Partner gesucht werden.

Hier hat sich ein neuer Kontakt mit einer Firma ergeben, welche die innovative Ausrichtung des Projektes begrüßte und sowohl die Musterwalzen aus CFK für die Testbeschichtungen anbieten konnte als auch über ihren Kundenstamm Kontakte zu interessierten Endanwendern vermitteln kann. Im Zuge dieser Zusammenarbeit wurde ein „Letter of Intent“ aufgesetzt, in welchem die gemeinsame Zielsetzung festgehalten wurde. Ein Anwender, der bereit war, die Beschichtungsprototypen in seinen Produktionsanlagen zu testen, konnte im Rahmen des Berichtszeitraum leider nicht gefunden werden, sodass keine Praxistests erfolgen konnten. Derzeit steht Rhenotherm jedoch in Kontakt zu einem Partner, der ein hohes Interesse an den Beschichtungen und Anwendungstests aufweist, sodass die Anwendungstests nun durchgeführt werden sollen.

3.4 Kleinserien im industriellen Maßstab

Wie bereits erläutert wurde, war im Rahmen der Arbeiten eine Rückkehr zur Applikation mit Becherpistolen erfolgt. Diese Technologie ermöglichte eine höhere Flexibilität hinsichtlich der Größe und Geometrie der zu beschichtenden Bauteile. Weiterhin konnte im Fall rotations-symmetrischer Körper auf bereits vorhandene Vorrichtungen zurückgegriffen werden.

Ein Scale-up wurde somit durch die bereits in Abschnitt 3.1 beschriebenen Arbeiten durchgeführt. Es konnten alle verwendeten Probekörper im üblichen Produktionsmaßstab gefertigt werden.

3.5 Ent- und Neubeschichtung verschlissener Bauteile

Zur Untersuchung der Ent- und Neubeschichtung verschlissener Bauteile (AP 10) wurden bereits beschichtete CFK-Zylinder abgestrahlt und erneut beschichtet. Das mehrfache Entschichten erwies sich durch den hohen Materialabtrag des CFK jedoch als problematisch. Die Harzmatrix wurde dabei so stark zerstört, dass ein Auffüllen der dadurch entstandenen Topographien notwendig war. Das Bauteil war damit für die eigentliche Anwendung nicht mehr geeignet. Durch die Sandstrahlung wurden die Kohlefasern freigelegt und je nach Beschaffenheit des CFK tiefe Riefen und starke Unebenheiten verursacht.

Da für die Haftung der thermischen Spritzschichten dennoch eine Aufrauung der Oberfläche erforderlich war, wurde das Ziel verfolgt, vor dem Sandstrahlen eine zusätzliche Schicht aus Epoxidharz auf die CFK-Bauteile aufzubringen. So sollte es ermöglicht werden, die Oberfläche aufzurauen, ohne das Bauteil zu beschädigen. Dies war vor allem deswegen wichtig, weil das CFK nicht beschädigt werden durfte, auch nicht durch eine Vorbehandlung mit Korund. Durch diesen Ansatz sollte sichergestellt werden, dass die ursprünglichen Eigenschaften nicht verändert und die CFK-Fasern durch die dickere Harzschicht beim Sandstrahlen zum Aufrauen oder beim späteren Entschichten geschützt werden. Die Steifigkeit und die Festigkeit des Bauteils hätte ansonsten nicht mehr dem entsprochen, was vom Werk geliefert wurde. In vielen Anwendungen wäre dies ein hohes Sicherheitsrisiko.

Alle Proben wurden zunächst mit Isopropanol entfettet und anschließend mit Korund gestrahlt (FEPA 24 oder FEPA 60). Es wurde immer ein Druck von höchstens 2,5 bar eingestellt.

Wurden die CFK-Rohre nicht automatisiert gestrahlt, entstanden weitere Probleme.

Durch die Staubablagerungen, die beim Strahlen entstehen, war es während des Strahlvorgangs schwer zu erkennen, wo das Bauteil bereits aufgeraut worden war. Dadurch entstanden bei den handgestrahlten Proben immer wieder Unregelmäßigkeiten, die eine Reproduzierbarkeit nicht zuließen.

Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit wurde das Verfahren für die Aufrauung der Oberfläche daher automatisiert. Dazu wurden alle Proben auf einer Drehbank mit automatisiertem Vorschub gestrahlt.

Es wurden sowohl eine feine Körnung (FEPA 90) als auch eine etwas gröbere Körnung (FEPA 60) als Strahlgut getestet. Die weiteren Versuche zeigten allerdings, dass die Oberfläche mindestens eine Rauheit von $R_a = 14 \mu\text{m}$ aufweisen musste, da es sonst zu Haftungsproblemen kommen konnte. Im Allgemeinen werden Bauteile für die thermische Spritzverfahren mit grobem Korund gestrahlt (FEPA 24), damit die Struktur für eine mechanische Verklammerung ausreichend ist.

Die Verwendung von grobem Korund war jedoch nicht möglich, da keine geeignete Düse zur Verfügung stand.

Die ersten Proben bereiteten auch bei der automatisierten Sandstrahlung Probleme, da der Durchmesser der CFK-Rohre für die Vorrichtung zu gering war und zudem die optimalen Parameter für Vorschub und Druck noch nicht bekannt waren.

Außerdem konnten die Proben nicht komplett gestrahlt werden, da die Düse mit einer mobilen Absaugung ausgestattet war, die einen gewissen Abstand zum Backfutter der Drehbank bedingt.

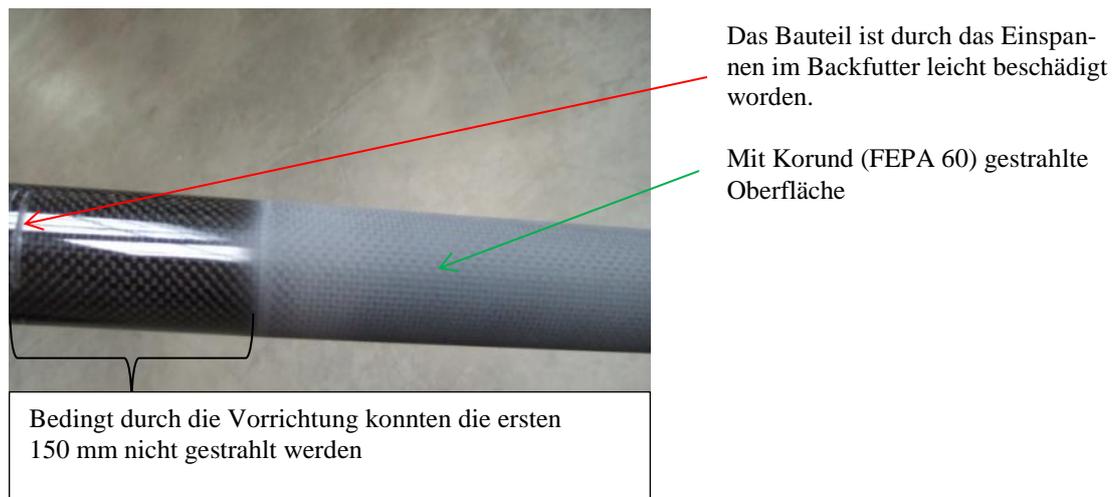


Abbildung 21: gestrahltes CFK-Rohr

Durch weitere Anpassungen der automatisierten Methode war es schließlich möglich, eine gewisse Reproduzierbarkeit bei der Vorbehandlung zu gewährleisten.

Untersucht wurde auch der Einfluss des Sandstrahlens auf die Harzmatrix, da bei der Vorbehandlung des Bauteils keine Beeinflussung der Matrix oder der Fasern stattfinden durfte. Da die Faserverbundkunststoffe in unterschiedlicher Ausführung (lackiert und geschliffen oder nur lackiert) vorlagen, mussten auch hier verschiedene Behandlungsverfahren getestet werden.

Bei den Versuchen wurde ein 2K-EP-Harz verwendet, das problemlos auf die entfettete ungestrahlte Oberfläche appliziert werden konnte. Diese zusätzliche EP-Schicht wurde aufgeraut und anschließend mit Zink beschichtet. Auf diese Weise kann ein CFK-Bauteil mehrere Male neu beschichtet werden, ohne seine ursprünglichen Eigenschaften zu verlieren.

Zu beachten ist jedoch auch die Qualität des, später meist vom Kunden, gelieferten CFK-Werkstückes, da hier deutliche Unterschiede beim Aufbringen des Epoxid-Überzuglackes auftreten können. In vielen Fällen besitzt das CFK-Bauteil, bedingt durch den Herstellungsprozess eine mehr oder weniger stark ausgeprägte Oberflächenstruktur bis hin zu Poren. Diese müssen möglichst ausgeglichen und geschlossen werden, da sich die Strukturen sonst

auch unter der thermischen Spritzschicht abzeichnen können. Auch muss auf mögliche Verunreinigungen und Rückstände von Trennmitteln oder Schichten geachtet werden, welche an die Oberfläche des Bauteils diffundieren und so stellenweise für Benetzungsprobleme sorgen können.

Nach einigen Vorversuchen hatte sich herausgestellt, dass ein höherer Harzanteil an der Oberfläche die Flexibilität des Bauteils erhöhte und eine thermische Beschichtung deutlich erleichterte. Zudem wurde die Haftung zwischen dem Bauteil und der thermischen Spritzschicht deutlich verbessert.

Als alternativer Faserverbundkunststoff wurde ein GFK gewählt, da Glasfasern mehr Halt bieten. Für die Vergleichbarkeit wurden die GFK-Rohre unter den gleichen Bedingungen getestet wie die CFK-Rohre. Dabei stellte sich heraus, dass GFK leichter zu verarbeiten ist. Glasfasern haben im Gegensatz zu Kohlefasern keinen negativen Ausdehnungskoeffizienten, so dass weniger Spannungen während der thermischen Beschichtung im Bauteil entstanden. Allerdings sind GFK-Rohre mechanisch nicht so stabil wie CFK-Rohre und deshalb für die industrielle Anwendung der Beschichtung wenig geeignet.

Somit ist ein Recycling der Rohre möglich: Die CFK-Rohre können mit den neuen Beschichtungen im Fall des Verschleißes der Beschichtung erneut beschichtet werden. Es muss also kein neues Rohr gefertigt werden, um die benötigten Eigenschaften wieder herstellen zu können. Im Rahmen des Projekts sind je nach Wicklung und CFK-Type bis zu 5 Ent- und Neubeschichtungen durchgeführt worden, ohne dass die Oberflächenqualität der Beschichtung in Mitleidenschaft gezogen worden wäre. Dies stellt einen erheblichen Vorteil gegenüber Aluminiumzylindern mit herkömmlichen Beschichtungen dar. Hier ist eine Neubeschichtung nur maximal dreimal möglich, da das Aluminium bedingt durch die für die Entschichtung notwendigen Sandstrahlprozesse so stark in Mitleidenschaft gezogen wird, dass sich dies in der Oberflächengüte der Beschichtung niederschlägt. Recycling kann dann nur energieaufwendig über das Einschmelzen des Aluminiums erfolgen. Mit der Wiederbeschichtung durch die neue entwickelte Beschichtung für CFK-Rohre können somit die Lebensdauer der Bauteile erhöht und Kosten sowie Ressourcen eingespart werden.

3.6 Bilanzierung

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die angestrebte Funktionalisierung der Oberfläche der CFK-Walzen mit dem entwickelten Beschichtungsprozess und dem Schichtaufbau erfolgreich umgesetzt werden konnte und stabile Schichten hergestellt werden können. Wie in den Kontaktwinkelmessungen und Abrollwinkelmessungen gezeigt, wird eine Anhaftung von Verunreinigungen vermieden, was die Reinigung und Entsorgung der Walzen erleichtert.

Auch der Beschichtungsprozess wurde gegenüber der Teflonbeschichtung von Metallwalzen verbessert. So sind wesentlich geringere Sintertemperaturen nötig ($< 200\text{ °C}$ statt 400 °C) und es kann eine deutliche Energie- und Rohstoffersparnis erzielt werden (Abbildung 22).

Bei der Optimierung des Beschichtungsverfahrens wurde bei allen Prozessschritten auf eine möglichst hohe Energie- und Materialeffizienz geachtet. So wurde beispielsweise der Bedarf an Druckluft zur Kühlung durch die Verwendung geeigneter Düsen um bis zu 43 % reduziert, sodass auch hier Kosten und Ressourcen eingespart werden konnten (Tabelle 1). Weiterhin konnte die Beschichtungszeit um $2/3$ reduziert werden und es werden weniger Zündvorgänge benötigt. Somit kann ein erheblicher Anteil an Prozessgasen eingespart werden und die Abnutzung der Verschleißteile reduziert werden (Tabelle 1).

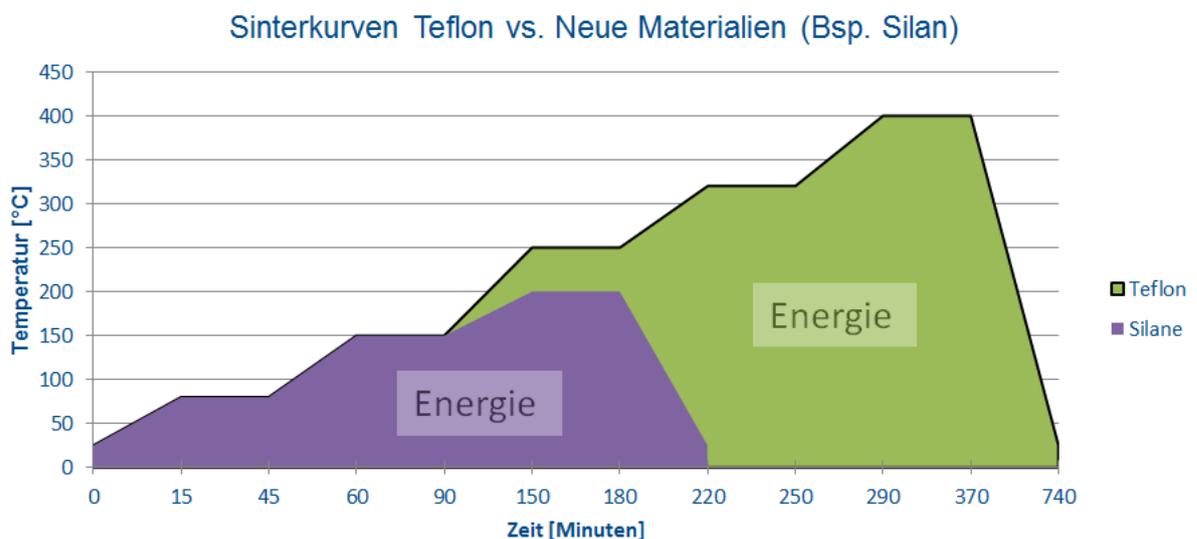


Abbildung 22: Einsparung von Energie infolge reduzierter Sintertemperaturen

Tabelle 1: Vergleich der Energieeinsparung beim Abkühlen der Schichten durch Verwendung der neu entwickelten Kühldüsen

	Ohne Kühldüsen	Mit Kühldüsen	Prozentuale Ersparnis
Beschichtungszeit [min]	30	10,78	64
Materialverbrauch [g]	413	340	18
Verbrauch Argon [l]	598	442	26
Verbrauch Wasserstoff [l]	174	129	26

Bereits geringe Schichtdicken sind ausreichend und der Materialverlust des ausgearbeiteten Prozesses ist gering, sodass ein geringerer Materialaufwand als im Fall der teflonbeschichteten Metallwalzen resultiert. Auch wenn die Materialien teurer sind, ist daher die Wirtschaftlichkeit des Herstellprozesses sichergestellt, wie in der folgenden Tabelle dargelegt:

Tabelle 2: Vergleich der verwendeten Materialien und der resultierenden Kosten

	PTFE [50 µm]	POSS [2 - 3 µm]
€/kg	85	5.000
ρ [g/cm ³]	2,1	1,8
Verbrauch [g]	100	3,5
Verlust	60 %	30 %
Kosten [€/m ²]	19	22

Durch die Möglichkeit, verschlissene Walzen durch eine entsprechende Behandlung und erneute Beschichtung aufzubereiten, können die Walzen länger eingesetzt werden. Somit führt der Verschleiß der Beschichtung nicht dazu, dass ein neues Bauteil gefertigt werden muss. Da bisher noch keine Anwendungstests möglich waren, kann jedoch noch keine Aussage über die Lebensdauer der Walzen im Betrieb und daraus resultierenden Energie- und Materialeinsparungen getroffen werden.

Mit den neuen Beschichtungen bzw. den beschichteten CFK-Bauteilen können gegenüber teflonbeschichteten Aluminiumbauteilen somit folgende Vorteile erzielt werden:

- Antihalt-Beschichtungen auf CFK werden erstmals ermöglicht, da Sinterung im Bereich der für CFK zulässigen Temperaturen möglich ist.
- Geringerer Energieverbrauch im Vergleich zu Teflonbeschichtungen durch reduzierte Sintertemperaturen der neuen Beschichtungen.
- Einsparung von Ressourcen durch Reduzierung der Beschichtungsdicke.
- Verbesserung der Antihaltwirkung im Vergleich zu Teflonbeschichtungen.
- Silikonfreie Beschichtung.
- Recycling der Rohre durch Erneuerung der Beschichtung ermöglicht höhere Lebensdauer gegenüber Aluminiumzylindern.

Somit werden erhebliche Vorteile der neuen Beschichtungen von CFK-Bauteilen gegenüber beschichteten Aluminiumbauteilen erzielt, wobei die Kosten für die Beschichtungen ver-

gleichbar sind. Werden Aluminiumzylinder oder andere rotierende bzw. bewegte Aluminiumbauteile durch CFK-Leichtbaukomponenten ersetzt, sind deutliche Gewichts- und damit Energieeinsparungen im Betrieb möglich.

Gegen Ende des Projekts wurde in Zusammenarbeit mit einem namhaften Textilmaschinenhersteller zudem eine Beschichtung eines CFK-Barrens (siehe Abbildung 23: CFK-Barren mit Verschleißschutzschicht) durchgeführt, für den eine fadenfreundliche aber gleichzeitig verschleißfeste Oberfläche benötigt wurde. Dazu wurden zunächst kleine Abschnitte eines Barrens bemustert, im Kundentest auf ihre Verschleißbeständigkeit hin geprüft und im Anschluss auf einen Barren in Produktionsgröße appliziert. Derzeit befindet sich die Maschine, in der der CFK-Barren eingebaut und getestet werden soll, noch in Konstruktion. Die avisierbaren Leistungsdaten der Maschine liegen uns jedoch vor, sodass eine Bilanzierung bezogen auf das hergestellte Produkt pro Stunde möglich ist:

Die Maschine hat bei Vollaustattung einen Verbrauch von 13,5 kW/h und produziert mit einem herkömmlichen Aluminiumbarren rund 50 m Stoff pro Stunde. Mit einem CFK-Barren kann die Maschine aufgrund des geringeren Gewichts rund 30 % schneller betrieben werden, sodass bei gleichem Verbrauch von 13,5 kW/h 65 m Stoff produziert werden. Bezogen auf das Endprodukt des Kunden kann also pro Meter Stoff eine Energieeinsparung von ca. 60 Watt erzielt werden. Dies entspricht einer Einsparung von etwa 23 %.

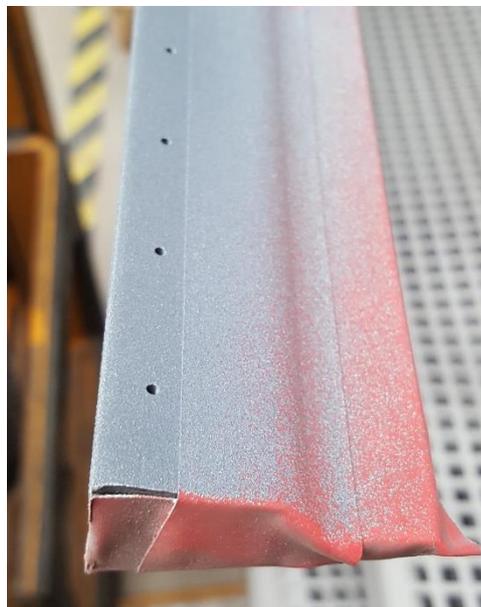


Abbildung 23: CFK-Barren mit Verschleißschutzschicht

Diese Betrachtung zeigt, dass durch die im Projekt entwickelte neue Beschichtung, die die Verwendung von CFK-Bauteilen anstelle schwererer Aluminiumbarren ermöglicht, deutliche Energieeinsparungen, beispielsweise in Produktionsprozessen, möglich sind.

3.7 Öffentlichkeitsarbeit

Die Ergebnisse wurden interessierten Herstellern von CFK-Leichtbauzyklindern vorgestellt. Weiterhin waren die Projektergebnisse Inhalt der Gespräche mit potenziellen Anwendungspartnern.

Des Weiteren wurden Prototypen auf der ICE Messe 2017 (Internationale Converting Fachmesse) in München vorgestellt und beworben.

4. Fazit

Wie die Projektergebnisse zeigen, konnte ein geeignetes Schichtsystem für die funktionale Oberflächenbeschichtung für CFK-Leichtbauwalzen entwickelt werden. Es wurden eine geeignete Vorbehandlung und ein Schichtaufbau ausgearbeitet, die die geforderten Eigenschaften erzeugen.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- Beschichtung des Grundwerkstoffes CFK und GFK durch mehrschichtiges System.
- Erfüllung der hydrophoben und oleophoben Eigenschaften durch geeignete Zusammensetzung und Struktur der Funktionsschicht.
- Stabilität und Haftung der Beschichtung nachgewiesen in Peeltests.
- Erzeugung homogener Oberflächeneigenschaften mit gleichmäßiger Bedeckung durch die funktionale Schicht.
- Möglichkeit zur Einstellung gezielter Oberflächeneigenschaften je nach Anwendungsfall durch Modifizierung der Funktionsschicht.
- Erzielung einer stabilen Antihafwirkung gegen Klebstoffe und Stabilität gegenüber Lösungsmitteln durch Zugabe geeigneter Silikone.
- Möglichkeit zur Ent- und Neubeschichtung verschlissener Bauteile ohne Schädigung des Grundwerkstoffes.
- Keine Verschlechterung der Substrateigenschaften.
- Die geringe Schichtdicke ermöglicht es, die Struktur des Substrates abzubilden.
- Eignung zur Anwendung im Maßstab industrieller Kleinserien.
- Erhöhung der Rundlaufgenauigkeit durch Vermeidung hoher Sintertemperaturen.
- Infolge der Gewichtsreduzierung der Bauteile durch Verwendung von CFK werden neue Anwendungen ermöglicht, die infolge des Eigengewichtes von Aluminiumzylindern bisher nicht möglich sind.

Da trotz intensiver Kontakte und einer Zusammenarbeit mit einem CFK-Walzenhersteller noch keine Anwendungstests durchgeführt werden konnten, war eine Bewertung der Schichten und der CFK-Walzen unter Anwendungsbedingungen sowie der im Betrieb resultierenden Umweltvorteile noch nicht möglich, da diese Effekte stark von der jeweiligen Anwendung abhängig sind.

Da die Ergebnisse der erzeugten Beschichtungen jedoch sehr vielversprechend sind, sollen die Arbeiten fortgesetzt werden. Rhenotherm steht in Kontakt zu einem Anwendungspartner aus der Textilindustrie und geht davon aus, Anwendungstests durchführen und die Vorteile der beschichteten CFK-Bauteile gegenüber Metallbauteilen auch unter Praxisbedingungen nachweisen zu können.

Der Nachweis der prinzipiellen Eignung konnte bereits erbracht werden, da kurze Abschnitte beschichteter CFK-Barren im hauseigenen Verschleißtest unseres Kunden als sehr gut eingestuft wurden. In Zusammenarbeit mit dem Anwender wurde bereits ein Prototyp konstruiert, hergestellt und beschichtet. Allerdings wird die zugehörige Strickmaschine derzeit noch umkonstruiert, sodass ein Test unter Praxisbedingungen zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch aussteht. Besonders die mechanische, thermische und chemische Beständigkeit der Beschichtung soll dabei untersucht werden. Im Mittelpunkt steht, die Betriebseigenschaften der Bauteile zu optimieren und den Nachweis der Eignung der Beschichtung zu erbringen. Die bereits erfolgten Betrachtungen zeigen jedoch, dass infolge der Gewichtseinsparungen durch Verwendung von CFK- anstelle von Aluminiumbauteilen in Produktionsprozessen deutliche Energieeinsparungen möglich sind.

Langfristig soll es so möglich sein, das Beschichtungssystem für unterschiedliche Anwendungen und Anforderungen an die Oberflächeneigenschaften auf den Markt zu bringen, so dass die bisher verwendeten teflonbeschichteten Metallbauteile durch CFK-Leichtbauteile ersetzt werden können.

Somit soll schließlich das System in Anwendung gebracht und ein Beitrag zur Energie- und Ressourceneinsparung geleistet werden.