

Schlussbericht zum FuE-Vorhaben

Titel: Entwicklung ökologisch nachhaltiger, robuster Beschichtungssysteme für hochwertige Schutztextilien – Ökologische Schaumbeschichtung

Aktenzeichen: 33820/01-31

Verfasser: M. Sc. Martina Maier
Dr. rer. nat. Ralf Lungwitz

Firma/Institution: Trans-Textil GmbH
Pommernstr. 11 – 13
83395 Freilassing

Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.
An-Institut der Technischen Universität Chemnitz
Annaberger Str. 240
09125 Chemnitz

CHT Germany GmbH
Bismarckstr. 102
72072 Tübingen

Freilassing, den 31. Dezember 2020

1. Projektkennblatt

der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	33820/01-31	Referat	31	Fördersumme	340.190 €
Antragstitel	Entwicklung ökologisch nachhaltiger, robuster Beschichtungssysteme für hochwertige Schutztextilien – Ökologische Schaumbeschichtung				
Stichworte	Schutztextilien, Verfahren, Schaumbeschichtung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
31 Monate	01.03.2018	30.09.2020	2		
Zwischenbericht	28.02.2019				
Bewilligungsempfänger	Trans-Textil GmbH Pommernstr. 11 - 13 83395 Freilassing			Tel	08654/6607-0
				Fax	08654/6607-60
				Projektleitung	Matthias Krings
			Bearbeiter	Martina Maier	
Kooperationspartner	Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. An-Institut der Technischen Universität Chemnitz Annaberger Str. 240 09125 Chemnitz			CHT Germany GmbH Bismarckstr. 102 72072 Tübingen	

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ziel des Projektes war die Entwicklung lösemittelfreier rein wässriger Beschichtungssysteme sowie der Technologien zu deren Applikation für den Schutztextilbereich. Der innovative technologische Ansatz bestand in der Kombination aus Schaumbeschichtung (als ökologisches Auftragsverfahren), einer Oberflächenverdichtung mittels mechanischer Kalandrierung und dem Auftrag eines Deckstrichs zum Erzielen einer atmungsaktiven, wasserdichten und waschpermanenten Textilbeschichtung. Durch die Verwendung der umwelt- und gesundheitsfreundlichen rein wässrigen Systeme konnte die Abluftemission drastisch reduziert und die Arbeitssicherheit stark verbessert werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Hauptarbeitsschritte des Projektes waren die Entwicklung der Schaumbeschichtung, einer Kompaktierung mittels Kalandrierung und dem Auftrag eines Deckstrichs. Es wurden ausschließlich rein wässrige Formulierungen verwendet, die frei von schädlichen Lösemittelprodukten waren. Die Entwicklung der Acrylat- und Polyurethandispersionen für die Schaumbeschichtung und den Deckstrich wurde maßgeblich vom Kooperationspartner CHT Germany GmbH (Tübingen) getragen. Mit Hilfe eines Schaummischers wurden die Formulierungen mechanisch aufgeschäumt. Es wurden verschiedene Schäume mit definierten Schaumdichten und Zellstrukturen erzeugt. Die Applikation dieser aufs Textil erfolgt mittels Streichbeschichtung. Dabei wurden unterschiedlich dünne Beschichtungen mit verschiedenen Auftragsgewichten appliziert. Die Beschichtungen wurden thermisch getrocknet. Nach diesem Prozessschritt wurde der Einfluss einer anschließenden Kalandrierung auf die Eigenschaften der Beschichtung untersucht. Durch Kombination von Druck und Temperatur wurden die Schaumbeschichtungen gezielt kompaktiert. Zum Schutz der Schaumschicht und zur Erhöhung der Wasserdichtheit wurde ein dünner Deckstrich einer wässrigen Polyurethandispersion mittels Streichbeschichtung aufgetragen. Parallel zu den Beschichtungsarbeiten wurden für die Nahtabdichtung der entwickelten Textilverbünde der Schweißprozess und die Schweißbänder entwickelt. Die Beschichtungen wurden hinsichtlich der Wasserdampfdurchlässigkeit und Wasserdichtheit untersucht. Mittels bildgebender Untersuchungen wurden der Aufbau der Beschichtung und der Einfluss der Kompaktierung untersucht.

Ergebnisse und Diskussion

In Anlehnung an die Normen DIN EN 343 „Schutzkleidung - Schutz gegen Regen“ und DIN EN 469 „Feuerwehr - Leistungsanforderungen für Schutzkleidung für Tätigkeiten der Feuerwehr“ wurden Atmungsaktivitäten von $R_{et} \leq 20 \text{ m}^2\text{Pa/W}$ bzw. $MVTR \geq 3.000 \text{ g/m}^2\text{24 h}$ und Wasserdichtheiten von $\geq 0,13 \text{ bar}$ als Mindestanforderungen angestrebt.

Im Rahmen dieses Projektes wurden drei verschiedene lösemittelfreie, rein wasserbasierte Schaum- und drei Deckstrichformulierungen entwickelt und getestet. Es konnten definierte Schäume mittels Schaummittel hergestellt und über eine Streichbeschichtung auf Polyester- und Polyamidgewebe appliziert werden. Mit Hilfe eines Kalanders wurde der Schaum heiß kompaktiert. Dabei wurde die Oberfläche geschlossener, ohne jedoch die Schaumstruktur/Poren im Querschnitt zu verlieren. Dadurch konnte die Wasserdichtheit erhöht werden. Auf die kalandrierte Schaumbeschichtung wurde der Deckstrich, ebenfalls mittels Streichbeschichtung, aufgetragen. Abschließend erfolgte eine textilseitige Hydrophobierung.

Mit der Kombination eines Schaumes und eines Deckstrichs konnten atmungsaktive, wasserdichte und waschpermanente Textilbeschichtungen hergestellt werden. Die entwickelten Verbunde bestanden aus:

- Textil (Polyester- und Polyamidgewebe)
- kalandrierten Schaumbeschichtung ($\sim 200 \text{ g/l}$, 40 g/m^2)
- Deckstrich (20 g/m^2)
- textilseitige Hydrophobierung (wasserbasiert, fluorcarbonfrei).

Die Textilbeschichtungen wurden zunächst auf der Laborbeschichtungsanlage entwickelt und dann erfolgreich auf die industrielle Produktionsanlage übertragen.

Die Prüfergebnisse der entwickelten Beschichtungen zeigten, dass die gesetzten Mindestanforderungen im Originalzustand, aber auch nach fünf Reinigungszyklen erreicht werden können. Die MVTR-Werte waren $> 3.000 \text{ g/m}^2\text{24 h}$ und die Wasserdichtheiten $> 500 \text{ mbar}$. Lediglich beim R_{et} lagen die Werte leicht über den gesetzten Anforderungen. Im Bereich der Wasserdichtheiten konnten z. T. Werte von $> 2.000 \text{ mbar}$ erreicht werden.

Auf die beschichteten Textilien wurden, zum mechanischen Schutz, mittels Laminierprozess eine Charmeuselage aufgebracht. Aus diesen hergestellten Laminaten wurde unter Verwendung der entwickelten Nahtabdichtungstechnologie eine Regenjacke als Projektdemonstrator konfektioniert.

Öffentlichkeitsarbeit

Inhalte dieses Forschungsvorhabens wurden in Form einer Pressemitteilung (23. Januar 2017, Nr. 5/2018, AZ 33820) der Deutschen Bundesstiftung Umwelt veröffentlicht. Einen Überblick zu diesem Projekt wurde von Dr. Hempel auf der Fachkonferenz „Nachhaltige Outdoor-Textilien“ 14. März in Bremen gegeben. Auf den Homepages der Projektpartner Trans-Textil und STFI wurde über den Start des Projektes sowie den Inhalten des Forschungsvorhabens berichtet. Nach der Abgabe des Schlussberichts wird eine Zusammenfassung des Forschungsvorhabens auf den Homepages der Projektpartner veröffentlicht. Der Projektdemonstrator wird auf den Ständen des STFI und von Trans-Textil bei der internationalen Leitmesse für Technische Textilien und Vliesstoffe der techtextil in Frankfurt a. M. (4. – 7. Mai 2021) präsentiert. Wesentliche Projektergebnisse werden in Form eines Vortragsvorschlages für die Aachen-Dresdner-Denkendorfer International Textile Conference (9./10. November 2021) eingereicht.

Fazit

Die durchgeführten Arbeiten zeigten, dass der innovative technologische Ansatz der Kombination aus Schaumbeschichtung, einer Oberflächenverdichtung mittels mechanischer Kalandrierung und dem Auftrag eines Deckstrichs umsetzbar sind. Aus ökologischen rein wässrigen Formulierungen konnten wasch- und reinigungsbeständige Textilbeschichtungen mit hohen Wasserdichtheiten von z. T. $> 2.000 \text{ mbar}$ und ausreichende Wasserdampfdurchlässigkeiten von $> 3.000 \text{ g/m}^2\text{24 h}$ hergestellt werden. Im Vergleich mit Referenzlaminaten wurden ähnliche Wasserdichtheiten, aber geringere MVTR-Werte erzielt.

Im Forschungsvorhaben konnte das Potenzial einer wässrigen Schaumbeschichtung aufgezeigt werden. Daraus lassen sich weitere Anwendungsfelder im Bereich der Wärmedämmung (z. B. Hitzeschutztextilien) oder auch bei den Filtertextilien (z. B. Masken) ableiten.

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	2
Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Symbole und Abkürzungen	10
1. Zusammenfassung	11
2. Bericht	12
2.1. Einführung/Motivation	12
2.2. Methodik/Vorgehensweise/Projekttablauf	13
2.2.1. Recherche, Anforderungsprofil, Materialauswahl und -beschaffung (AP1)	14
2.2.2. Entwicklung und Optimierung der Schaum- und Deckstrichbe- schichtung (AP 2)	14
2.2.3. Entwicklung der Schaumapplikation, der Kompaktierung und des Deckstrichauftrags im Labormaßstab (AP 3)	14
2.2.4. Entwicklung der Nahtabdichtung (AP 4)	16
2.2.5. Scale-up auf die Produktionsanlage (AP 5)	18
2.2.6. Herstellung von Funktionsmustern, Demonstratorbauteilen und des prototypischen Bekleidungsstücks (AP 6)	19
2.2.7. Textilphysikalische Prüfung und Funktionstests (AP 7)	19
2.2.8. Ökologische Prozessbewertung (AP 8)	20
2.2.9. Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse (AP 9)	20
2.3. Projektergebnisse	21
2.3.1. Recherche, Anforderungsprofil, Materialauswahl und -beschaff- ung	21
2.3.2. Entwicklung und Optimierung der Schaum- und Deckstrichformu- lierung	22
2.3.3. Entwicklung der Schaumapplikation, der Kompaktierung und des Deckstrichauftrags im Labormaßstab	23
2.3.1.1. Schaumapplikation und Kompaktierung	23
2.3.1.2. Deckstrichauftrag	28
2.3.1.3. Zusammenfassung der Laborversuche	34
2.3.4. Scale-up auf die Produktionsanlage	35
2.3.5. Entwicklung der Nahtabdichtung	41
2.3.6. Herstellung von Funktionsmustern, Demonstratorbauteilen und des prototypischen Bekleidungsstücks	42

2.3.7. Ökologische Prozessbewertung	42
2.4. Öffentlichkeitsarbeit/Veröffentlichungen/Vorträge	46
2.5. Fazit/Ausblick	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung des innovativen technologischen Ansatzes. ...	13
Abbildung 2:	Arbeitsdiagramm des Projektes.....	13
Abbildung 3:	Fotos des Handstreichgeräts (links) und der Laborbeschichtungsanlage (rechts).....	15
Abbildung 4:	Foto der Heißluft-Schweißmaschine 8303i der Firma Pfaff Industriesysteme und Maschinen AG (Kaiserslautern) bei Fa. Trans-Textil GmbH (Freilassing).	16
Abbildung 5:	Erfolgreicher Abziehtest von Tapes auf einem textilen Laminat nach dem Tapen.....	17
Abbildung 6:	Nahtprüfstation von Pfaff mit einem mit Wasserdruck beaufschlagten Prüfling.....	18
Abbildung 7:	Foto und Schema der Beschichtungsanlage der Firma Trans-Textil GmbH.....	18
Abbildung 8:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Schaumseite) von V1 , V5 und V8 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.	24
Abbildung 9:	Graphische Darstellung der Prüfwerte der Wasserdichtheit und Wasserdampfdurchlässigkeit der Kalanderversuche.	25
Abbildung 10:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Schaumseite, oben) und Probenquerschnitte (unten) von V12 bis V16 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.....	26
Abbildung 11:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Schaumseite) von V15 , V17 und V18 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.	27
Abbildung 12:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Schaumseite) von V1 , V15 , V19 , V20 , V21 und V22 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.	27
Abbildung 13:	Fotos der Schaumapplikation (1, 2) an der Laborbeschichtungsanlage und des Kalandrierens am Laminator (3).....	28
Abbildung 14:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) von V23 bis V28 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.....	29
Abbildung 15:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) von V30 , V31 und V32 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.	30

Abbildung 16:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) von V33 - V38 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.	31
Abbildung 17:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) von V39 und V40 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.	32
Abbildung 18:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) und Probenquerschnitt von V39 und V40 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.	33
Abbildung 19:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) und Probenquerschnitt von VA6 und V15 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.	37
Abbildung 20:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) und Probenquerschnitt von VA10/VA14 und VA13/VA17 . Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.	38
Abbildung 21:	REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) und Probenquerschnitt von VA18 und VA19 vor sowie nach fünf Wäschen bei 60 °C. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen..	40
Abbildung 22:	Foto der Messanordnung am Abluftkanal der Laborbeschichtungsanlage zur Bestimmung des Gesamtkohlenstoffanteils.	43
Abbildung 23:	Foto des konfektionierten Projektdemonstrators „Regenjacke“	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR) der hergestellten Referenzlamine nach 5 Waschzyklen bzw. 5 chemischen Reinigungen.....	22
Tabelle 2:	Im Projekt verwendete Formulierungen und Hilfsmittel.	23
Tabelle 3:	Zusammenfassung der Versuche zur Variation des Schaumlitergewichts und der Auftragsmenge (Textil = Polyestergewebe).....	24
Tabelle 4:	Zusammenfassung der Versuche zur Kalandrierung der Probe V1 sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR).....	25
Tabelle 5:	Prüfergebnisse der kalandrierten Proben V1 , V5 und V8	26
Tabelle 6:	Zusammenfassung der Versuche zum Deckstrichauftrag mit der Formulierung Deckstrich 1 auf die Schaumbeschichtung V23 sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR).	29
Tabelle 7:	Zusammenfassung der Versuche (F/L = Faser rakel über Luft; S/W = Schuhrakel über Walze) zur Deckstrichvariation auf der Schaumbeschichtung VA6 sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR).....	31
Tabelle 8:	Zusammenfassung der Applikationsversuche mit der Formulierung Deckstrich 5 auf der Schaumbeschichtung aus V39 (Schaum 3) sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR).	33
Tabelle 9:	Zusammenfassung der Kalanderversuche an der Produktionsanlage sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR).....	36
Tabelle 10:	Zusammenfassung der Schaumbeschichtungsversuche an der Produktionsanlage sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR) vor und nach den Waschzyklen (PES = Polyestergewebe , PA = Polyamidgewebe)..	37
Tabelle 11:	Zusammenfassung der Deckstrichversuche an der Produktionsanlage sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR) (PES = Polyestergewebe , PA = Polyamidgewebe).....	38
Tabelle 12:	Zusammenfassung der abschließenden Produktionsversuche (PES = Polyestergewebe , PA = Polyamidgewebe).....	39

Tabelle 13: Zusammenfassung der Prüfergebnisse der abschließenden Produktionsversuche (VA20 = VA18 + Charmeuse und VA21 = VA19 + Charmeuse; * = nur bis 1000 mbar geprüft).	40
Tabelle 14: Zusammenfassung der Versuche und Prüfungen zur Nahtabdichtung	42
Tabelle 15: Ergebnisse der Abluftuntersuchungen.....	44

Symbole und Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
DBU	Deutsch Bundesstiftung Umwelt
DIN	Norm des Deutschen Instituts für Normung
DMF	<i>N,N</i> -Dimethylformamid
EN	Europäische Norm
FID	Flammionisationsdetektor
F/L	Fasentrakel über Luft
ISO	Norm der Internationalen Organisation für Normung
MEK	Methylethylketon
MVTR	Moisture vapor transmission rate
NMP	<i>N</i> -Methyl-2-pyrrolidon
PA	Polyamid
PEK	Polyetherketon
PES	Polyester
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan
REM	Rasterelektronenmikroskop
R _{et}	Resistance to Evaporating Heat Transfer
S/W	Schutrakel über Walze
V	Volumenstrom
WP	Wasserdurchgangswiderstand

1. Zusammenfassung

Ziel des Projektes war die Entwicklung lösemittelfreier rein wässriger Beschichtungssysteme sowie der Technologien zu deren Applikation für den Schutztextilbereich. Der innovative technologische Ansatz bestand in der Kombination aus Schaumbeschichtung, einer Oberflächenverdichtung mittels mechanischer Kalandrierung und dem Auftrag eines Deckstrichs zum Erzielen einer atmungsaktiven, wasserdichten und waschpermanenten Textilbeschichtung.

In Anlehnung an die Normen DIN EN 343 „Schutzkleidung - Schutz gegen Regen“ und DIN EN 469 „Feuerwehr - Leistungsanforderungen für Schutzkleidung für Tätigkeiten der Feuerwehr“ wurden Atmungsaktivitäten von $R_{et} \leq 20 \text{ m}^2\text{Pa/W}$ bzw. $MVTR \geq 3.000 \text{ g/m}^2\text{24 h}$ und Wasserdichtheiten von $\geq 0,13 \text{ bar}$ als Mindestanforderungen angestrebt.

Im Rahmen dieses Projektes ist es gelungen, lösemittelfreie, rein wasserbasierte Formulierungen für die Schaumbeschichtung und den Deckstrich sowie deren Applikationstechnologien zu entwickeln. Damit konnten atmungsaktive, wasserdichte und waschpermanente Textilbeschichtungen hergestellt werden. Die entwickelten Verbunde bestanden aus:

- Textil (Polyester- und Polyamidgewebe)
- kalandrierten Schaumbeschichtung (~ 200 g/l, 40 g/m²)
- Deckstrich (20 g/m²)
- textilseitige Hydrophobierung (wasserbasiert, fluorcarbonfrei).

Die Textilbeschichtungen wurden zunächst auf der Laborbeschichtungsanlage entwickelt und dann erfolgreich auf die industrielle Produktionsanlage übertragen.

Die Prüfergebnisse der entwickelten Beschichtungen zeigten, dass die gesetzten Mindestanforderungen im Originalzustand, aber auch nach fünf Reinigungszyklen erreicht, werden können. Die MVTR-Werte waren $> 3.000 \text{ g/m}^2\text{24 h}$ und die Wasserdichtheiten $> 500 \text{ mbar}$. Lediglich beim R_{et} lagen die Werte leicht über den gesetzten Anforderungen. Im Bereich der Wasserdichtheiten konnten z. T. Werte von $> 2.000 \text{ mbar}$ erreicht werden. Im Vergleich mit Referenzlaminaten wurden ähnliche Wasserdichtheiten, aber geringere MVTR-Werte erzielt.

Auf die beschichteten Textilien wurden, zum mechanischen Schutz, mittels Laminierprozess eine Charmeuselage aufgebracht. Aus diesen hergestellten Laminaten wurde unter Verwendung der entwickelten Nahtabdichtungstechnologie eine Regenjacke als Projektdemonstrator konfektioniert.

Im Forschungsvorhaben konnte das Potenzial einer wässrigen Schaumbeschichtung aufgezeigt werden. Daraus lassen sich weitere Anwendungsfelder im Bereich der Wärmedämmung (z. B. Hitzeschutztextilien) oder auch bei den Filtertextilien (z. B. Masken) ableiten.

2. Bericht

2.1. Einführung/Motivation

Schutztextilien besitzen ein sehr breites Einsatzspektrum auf dem Gebiet der Berufs-, Arbeitsschutz-, Behörden- und Freizeitbekleidung aber auch im militärischen Bereich. Diese speziellen Funktionstextilien basieren auf Verbundmaterialien mit Beschichtungen oder Membranen. Die daraus gefertigten Bekleidungsstücke, inkl. Nahtabdichtung, müssen eine Reihe an hohen technischen Anforderungen erfüllen. Die Hauptkriterien dabei sind die Atmungsaktivität (Wasserdampfdurchlässigkeit) und die Dichtheit gegenüber Wasser. Das Material muss in der Lage sein, Wasserdampf (Schweiß) von innen durch den Textilverbund hindurch nach außen zu transportieren, gleichzeitig aber das Eindringen von Wasser (z. B. Regen) und anderen Flüssigkeiten (z. B. Chemikalien, Öle, Kraftstoffe) sowie von Keimen (Bakterien oder auch Viren) nach innen verhindern. Diese Anforderungen müssen auch noch nach vielen Wiederaufbereitungszyklen (Waschen, Trocknen, chemische Reinigung) gegeben sein.

Zum Erfüllen der genannten Eigenschaften werden im Stand der Technik bei der Schutztextilherstellung hauptsächlich Beschichtungen auf Basis von Polyurethanen (PUR) sowie Membranen aus Polyurethan, gerecktem Polytetrafluorethylen (PTFE), Polyester (PES) oder Polyetherketon (PEK) verwendet. Aufgrund der hohen Anforderungen werden für die PUR-Beschichtungen und Herstellung der PUR-Membranen ausschließlich lösemittelbasierte Formulierungen eingesetzt. Für weitere Einsatzgebiete mit geringeren Anforderungen werden in Deutschland für die PUR-Beschichtungen immerhin noch zu 90 % lösemittelhaltige Systeme verwendet. Im Bereich der PUR-Membranen sind es sogar 100 %. Zu den eingesetzten Lösemitteln zählen *N,N*-Dimethylformamid (DMF, leber- und fruchtschädigend), *N*-Methyl-2-pyrrolidon (NMP, fruchtschädigend, reizend), Toluol (gesundheitsschädlich, fruchtschädigend, wassergefährdend) und Methylethylketon (MEK, gesundheitsschädlich, bewirkt Fortpflanzungsunfähigkeit).

Problematisch ist sowohl die Abluftemission als auch der Kontakt mit diesen schädigenden Chemikalien während des Beschichtungsprozesses. Zwar werden aufgrund thermischer Behandlung in den Endprodukten nur sehr geringe Mengen an Lösemittelresten gefunden, aber das zunehmende Gesundheits- und Umweltbewusstsein sowie die Einhaltung der Gesetzgebung zum Umgang mit leichtflüchtigen organischen Verbindungen erzwingt für die Zukunft die Substitution lösemittelbasierter Formulierungen durch gesundheitlich unbedenkliche und umweltfreundliche Systeme.

Ziel des Projektes war die Entwicklung lösemittelfreier rein wässriger Beschichtungssysteme sowie der Technologien zu deren Applikation für den Schutztextilbereich. Der innovative technologische Ansatz bestand in der Kombination aus Schaumbeschichtung (als ökologisches Auftragsverfahren), einer optionalen Oberflächenverdichtung mittels mechanischer Kalandrierung und dem Auftrag einer Schutzschicht (Deckstrich) zum Erzielen einer atmungsaktiven,

mediendichten und waschpermanenten Textilbeschichtung. In Abbildung 1 ist dieser Ansatz schematisch dargestellt.

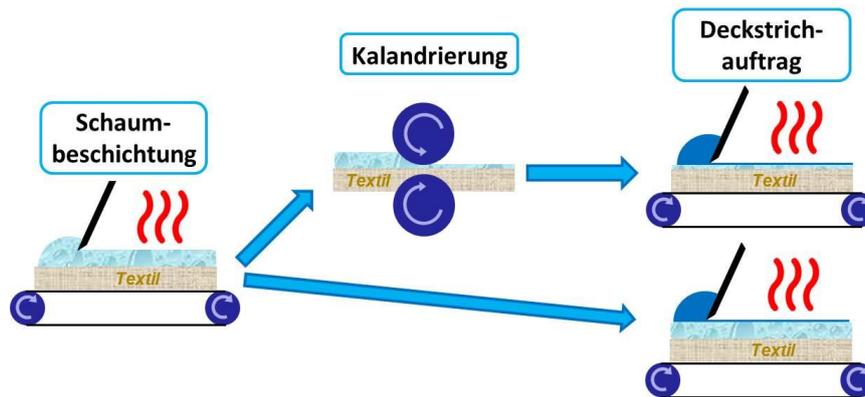


Abbildung 1: Schematische Darstellung des innovativen technologischen Ansatzes.

Durch die Verwendung der umwelt- und gesundheitsfreundlichen rein wässrigen Systeme, kann die Abluftemission drastisch reduziert und die Arbeitssicherheit stark verbessert werden.

2.2. Methodik/Vorgehensweise/Projekttablauf

Zum Erreichen der Projektziele war das Forschungsvorhaben in die folgenden neun Arbeitspakete (AP) unterteilt.

- AP 1: Recherche, Anforderungsprofil, Materialauswahl und -beschaffung
- AP 2: Entwicklung und Optimierung der Schaum- und Deckstrichformulierung
- AP 3: Entwicklung der Schaumapplikation, der Kompaktierung und des Deckstrich-auftrags im Labormaßstab
- AP 4: Entwicklung der Nahtabdichtung
- AP 5: Scale-up auf die Produktionsanlage
- AP 6: Herstellung von Funktionsmustern, Demonstratorbauteilen und des prototypischen Bekleidungsstücks
- AP 7: Textilphysikalische Prüfung und Funktionstests
- AP 8: Ökologische Prozessbewertung
- AP 9: Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse

Der zeitliche Ablauf des Projektes ist im Arbeitsdiagramm in Abbildung 2 dargestellt.

	Zeitschiene																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
AP 1	■	■	■																					
AP 2			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
AP 3																								
AP 4																								
AP 5																								
AP 6																								
AP 7																								
AP 8																								
AP 9																								

Abbildung 2: Arbeitsdiagramm des Projektes.

Im Folgenden wird die Methodik, die Vorgehensweise und der Ablauf der jeweiligen Arbeitspakete beschrieben.

2.2.1 Recherche, Anforderungsprofil, Materialauswahl und -beschaffung (AP 1)

Die mit dem Projektantrag begonnene Literatur- und Patentrecherche wurde fortgesetzt. Aktuelle Literaturstellen und die Ergebnisse einer umfangreichen Patentrecherche wurden ausgewertet. Für die aktualisierende Patentrecherche wurden die Datenbanken DEPATISnet des Deutschen Patent- und Markenamtes und Espacenet des Europäischen Patentamtes genutzt. Im Rahmen des durchgeführten Kick-off-Meetings am 28.02.2018 in Freilassing wurden die Anforderungsprofile für atmungsaktive, mediendichte und waschbeständige Beschichtungen entsprechend der aktuellen Marktanforderung spezifiziert. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden geeignete textile Flächengebilde sowie zu Vergleichszwecken handelsübliche Textil-Membran-Verbunde ausgewählt und beschafft bzw. hergestellt.

Die Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket wurden gemeinsam von Trans Textil, CHT und dem SFTI durchgeführt.

2.2.2 Entwicklung und Optimierung der Schaum- und Deckstrichformulierung (AP 2)

Der Inhalt dieses Arbeitspakets war die Entwicklung von Formulierungen für die Schaumbeschichtung und für den Deckstrich. Die Entwicklungstätigkeiten in diesem Arbeitspaket wurden vom assoziierten Kooperationspartner der CHT Germany GmbH (Tübingen) durchgeführt. Auf Basis von rein wässrigen Acrylat- und Polyurethandispersionen wurden Formulierungen für die Schaumbeschichtung entwickelt. Dafür wurden unterschiedliche Binder, Vernetzer, Verdicker und Schaumhilfsmittel in unterschiedlichen Konzentrationen getestet.

Es wurde eine wässrige Deckstrichformulierung auf der Basis von atmungsaktiven Polyurethanen entwickelt. Auch hier wurden unterschiedliche Binder sowie Vernetzer getestet und deren Zusammensetzung optimiert.

Die entwickelten Formulierungen wurden in den parallel laufenden Arbeitspaketen 3, 5 und die hergestellten Beschichtungen im Arbeitspaket 7 getestet. Dies gewährleistete eine zeitnahe Rückkopplung zur Formulierungsentwicklung.

2.2.3 Entwicklung der Schaumapplikation, der Kompaktierung und des Deckstrichauftrags im Labormaßstab (AP 3)

Innerhalb dieses Arbeitspaketes wurden die in AP 2 entwickelten Formulierungen hinsichtlich ihrer Applikation auf die textile Flächengebilde im Labormaßstab getestet.

Der erste Schritt bei der Schaumbeschichtung war das mechanische Schäumen der entwickelten Formulierungen. Hierzu wurde im Rahmen der Leistung Dritter das am STFI befindliche Schaummischmodul (Fabrikat der Firma Hansa Industrie-Mixer GmbH & Co.KG, Stuh-Heiligenrode) bau- und steuerungstechnische durch die Firma Labor-Pilz Labor- und

Industriebedarf e. K. (Freiberg) erfolgreich modifiziert.

Bei der Schaumentwicklung wurden die Maschinenparameter (Systemdruck, Drehzahl, Gegendruck) variiert, um Schäume mit definierten Schaumlitergewichten zu erhalten. Die Schäume wurden mittels Streichbeschichtung am Handstreichgerät (Fabrikate der Firma Werner Mathis AG, Oberhasli, Schweiz) auf eine textile Fläche appliziert. Es wurden unterschiedliche Rakel, Rakelgeometrien, -anordnungen sowie -spalte variiert, um unterschiedliche Auftragsgewichte zu generieren. Die Beschichtungen wurden im Labortrockner (Fabrikate der Firma Werner Mathis AG, Oberhasli, Schweiz) getrocknet.

Als Folgeschritt zum Trocknen der Schaumbeschichtungen wurde der Einfluss einer mechanischen Kompaktierung auf die Beschichtungsstruktur und Verbundeigenschaften (Wasserdampfdurchlässigkeit und Wasserdichtheit) untersucht. Die Beschichtungen wurden am Laborlaminator (Fabrikat der Firma Anger electronic GmbH, Hallein, Österreich) verpresst. Dabei wurden die Parameter Druck und Temperatur variiert. Im Anschluss an die Kompaktierung wurden die Schaumbeschichtungen im Labortrockner kondensiert.

Nach dem Kalandrieren erfolgte der Auftrag des entwickelten Deckstriches als Streichbeschichtung. Es wurden verschiedene Applikationsarten (Direkt- und Transferverfahren, 1-Strich und 2-Strichverfahren) mit variablen Parametern (Rakelgeometrie, -anordnung und -spalt) getestet. Für den Deckstrich wurden die Trocknungs- und Kondensationsbedingungen bestimmt.

Den letzten Prozessschritt stellte die Hydrophobierung der Textilseite dar. Mittels Revers-Roll-Coater wurde die wässrige und fluorfreie Hydrophobierungsformulierung einseitig auf die Textilseite appliziert, getrocknet und kondensiert. Auch hier wurden die Auftragsparameter angepasst.

Die einzelnen Prozessschritte wurden zunächst diskontinuierlichen an DIN A3 großen Textilmustern getestet und dann auf den kontinuierlichen Rolle-zu-Rolle-Prozess auf der Laborbeschichtungsanlage übertragen. Abbildung 3 zeigt Fotos des Handstreichgerätes und der Laborbeschichtungsanlage (beides Fabrikate der Firma Werner Mathis AG, Oberhasli, Schweiz).



Abbildung 3: Fotos des Handstreichgerätes (links) und der Laborbeschichtungsanlage (rechts).

Die Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket wurden maßgeblich vom STFI durchgeführt.

2.2.4 Entwicklung der Nahtabdichtung (AP 4)

Um die Funktion einer konfektionierten Schutzkleidung sicherzustellen, ist eine Abdichtung der Nähte mit Schweißbändern (Tapes) notwendig. Primär werden bei der Herstellung von gängigen Tapes derzeit organische Lösemittel eingesetzt. Die Firma Trans-Textil hat einen Weg gefunden, wasserdichte Tapes herzustellen, bei denen auf organische Lösemittel verzichtet werden kann. Bisher zeigen diese Bänder eine sehr gute Performance in Verbindung mit der Abdichtung von membranbasierten Laminaten.

In diesem Arbeitspaket wurde untersucht, welche Anpassungen in der Herstellung und im Verarbeitungsprozess der Tapes getätigt werden müssen, um auch die Nähte aus einem wasserbasierten schaumbeschichteten Textil erfolgreich abdichten zu können. Dafür wurde der Prozess des Schweißens sowie die Entwicklung der Schweißbänder (Tapes) auf die schaumbeschichteten Verbünde abgestimmt sowie hinsichtlich Haftung und Wasserdichtheit getestet.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die bereits entwickelten lösemittelfreien Tapes in Kombination mit den beschichteten 2- und 3-lagigen Laminaten prinzipiell funktionieren. Die Hauptaufgabe bestand nun darin, die passenden Verarbeitungsparameter zu identifizieren, damit die Gebrauchseigenschaften Dichtheit und Waschbeständigkeit gegeben sind.

Für die Verarbeitung der Tapes kam die Heißluft-Schweißmaschine 8303i der Firma Pfaff Industriesysteme und Maschinen AG (Kaiserslautern) zum Einsatz. Die Haupteinflussparameter auf die Haftung der Tapes auf einem Laminat sind: Temperatur der Heißluftdüse, Druck der Anpressrolle und Geschwindigkeit. Kleinere Anpassungen können durch die Neigung und dem Abstand der Heißluftdüse erfolgen.

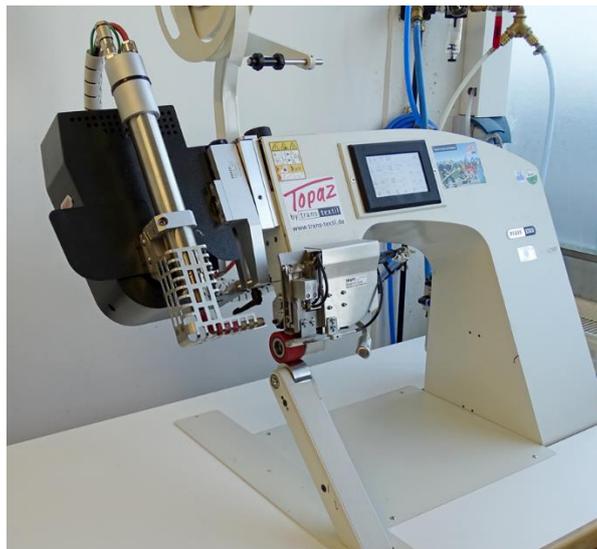


Abbildung 4: Foto der Heißluft-Schweißmaschine 8303i der Firma Pfaff Industriesysteme und Maschinen AG (Kaiserslautern) bei Fa. Trans-Textil GmbH (Freilassing).

Je nachdem aus wie vielen Lagen oder Schichten ein Laminat besteht, dementsprechend

kommen unterschiedliche Tapes zum Einsatz. Für 2-lagige Materialien kommen 2-Lagen-Tapes und für 3-lagige Materialien kommen 3-Lagen-Tapes zum Einsatz. Dementsprechend muss auch die Verarbeitungsparameter angepasst werden.

2-Lagen-Tapes bestehen aus einem Papierträger, welcher während des Schweißprozesses entfernt wird, einer transparenten Deckschicht aus PUR, welches die Nässesperre darstellt und einer Schmelzkleberschicht, welche die Verbindung zur Beschichtung oder zur Membrane des Laminats eingeht. 3-Lagen-Tapes besitzen statt dem Trägerpapier ein fest verbundenes leichtes Textil. Meist sind diese Trikotgewirke, idealerweise in einer ähnlichen Farbe, wie die der inneren Lage eines 3-Lagen-Laminats.

Grundsätzlich werden bei Trans-Textil GmbH zwei Bewertungsstufen angewendet, um die Haftung von Tapes auf einem beliebigen Material und dessen Funktion zu beurteilen:

A – Abziehtest des Tapes direkt nach der Verarbeitung zur Bewertung der grundsätzlichen Haftung

B – Dichtheit der getapten Nähte im Original und nach Wäsche.

Ein Abziehtest ist als erfolgreich zu bewerten, wenn sich das Tape zusammen mit der Beschichtung vom Textil ablösen lässt. Dann ist die Haftung vom Tape zur Beschichtung ausreichend.



Abbildung 5: Erfolgreicher Abziehtest von Tapes auf einem textilen Laminat nach dem Tappen.

Die Wasserdichtheit der Nähte wird mit einer Nahtprüfstation (Fabrikat der Firma Pfaff Industriesysteme und Maschinen AG, Kaiserslautern) überprüft. Hier wird die abgedichtete Naht mit Wasserdruck beaufschlagt. Der Wasserdichtheitstest ist dann bestanden, wenn die getapten Nähte 2 min lang einem Wasserdruck von 0,2 bar standhalten, ohne dass an irgendeiner Stelle Wasser durch tritt. Diese Prüfung wird an mindestens drei Prüflingen pro Prüfmaterial im Original und nach 5 Waschzyklen durchgeführt.



Abbildung 6: Nahtprüfstation von Pfaff mit einem mit Wasserdruck beaufschlagten Prüfling. Die Bearbeitung dieses Arbeitspaketes erfolgte von Trans Textil.

2.2.5 Scale-up auf die Produktionsanlage (AP 5)

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden die Laborentwicklungen aus dem AP 3 (Schaumapplikation, Kompaktierung, Deckstrich und Hydrophobierung) auf den industriellen Herstellungsprozess übertragen. Bei der Firma Trans-Textil steht dafür eine Beschichtungsanlage (Fabrikat der Firma BRÜCKNER Trockentechnik GmbH & Co. KG, Leonberg) mit der beschichtet, kalandriert und ausgerüstet werden kann (siehe Bild in Abbildung 7). Die Arbeitsbreite beträgt dabei 150 cm.



Abbildung 7: Foto und Schema der Beschichtungsanlage der Firma Trans-Textil GmbH, Freilassing.

Ausgehend von den erhaltenen Ergebnissen und ermittelten Applikationsparametern wurden die Einzelschritte: Schaumherstellung, Schaumauftrag mit Trocknung/Kondensation, Kompaktierung, Deckstrichauftrag mit Trocknung/Kondensation und Hydrophobierung mit Trocknung/Kondensation übertragen.

Bei der Schaumherstellung wurden die Parameter: Systemdruck, Drehzahl, Gegendruck dahingehend angepasst, dass ein, zum STFI, vergleichbares Schaumlitergewicht mit der gleichen Schaumarchitektur (Porengrößen) erzielt wurde. Beim Schaumauftrag mittels Streichbeschichtung wurden die Applikationsparameter der Industrieanlage dahingehend angepasst,

dass das angestrebte Auftragsgewicht erhalten wurde. Der Trocknungs- und Kondensationsprozess ist bei der Industrieanlage wesentlich komplexer. So wird nicht bei einer konstanten Temperatur getrocknet, sondern ein Trockenkanal mit mehreren Heizfeldern durchlaufen. Typischer Weise wird ein ansteigendes Temperaturprofil gefahren, bei dem nacheinander getrocknet und kondensiert wird. Das Temperaturprofil musste an die Schaumbeschichtung angepasst werden.

Für die Kompaktierung mittels Inlinekalenders, wurden die Drücke und Temperaturen so angepasst, dass die Ergebnisse mit denen der Laborversuche vergleichbar waren.

Die Anpassung der Deckstrichapplikation und die anschließende Trocknung/Kondensation wurde analog zum Schaumstrich durchgeführt.

Der Unterschied bei der Hydrophobierung ist die Applikationstechnologie. In beiden Fällen wurde ein einseitiger Auftrag mittels Walze durchgeführt. Am Sächsischen Textilforschungsinstitut e.V. (STFI) mit einem Revers-Roll-Coater und bei Trans-Textil mit einem Pflatschwerk. Es wurden die Applikationsparameter dahingehend angepasst, dass die gleiche Auftragsmenge wie bei den Laborversuchen erzielt wurden. Die Trocknungs- und Kondensationsbedingungen wurden ebenfalls angepasst.

Das Scale-up erfolgte maßgeblich durch Trans Textil.

2.2.6 Herstellung von Funktionsmustern, Demonstratorbauteilen und des prototypischen Bekleidungsstücks (AP 6)

Mit den angepassten und optimierten Parametern der Beschichtungsanlage bei Trans-Textil wurden großflächige Funktionsmuster (Textil mit Schaumbeschichtung, Deckstrich und Hydrophobierung) mit ~ 150 cm Warenbreite unter Industriebedingungen hergestellt. Diese Materialien wurden für die Durchführung der Wasch-/Reinigungsversuche, textilphysikalischen Prüfungen, Funktionstest und Tapeversuche verwendet. Zum Abschluss des Projektes wurde aus der Variante mit den besten Prüfwerten ein prototypisches Bekleidungsstück in Form einer Jacke konfektioniert.

Die Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket wurden gemeinsam von Trans Textil und dem STFI durchgeführt.

2.2.7 Textilphysikalische Prüfung und Funktionstests (AP 7)

Inhalt dieses Arbeitspaketes waren die textilphysikalischen Prüfungen und Funktionstest der Beschichtungen und Referenzmaterialien (Membran-Textil-Verbunde). Im Rahmen des Kick-off-Meetings wurde sich auf folgende Prüfungen festgelegt:

- Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit in Anlehnung an DIN EN ISO 15496
- Bestimmung der Wasserdichtheit in Anlehnung an DIN EN 20811

Zum Test der Waschbeständigkeit wurden fünf Wäschen nach DIN EN ISO 6330 (6N/4N + F, 60 °C/40 °C Wäsche + 70 °C Trommeltrocknung, Bezugswaschmittel 3) und fünf chemische

Reinigungen nach DIN EN ISO 3175-2 (Verfahren P17) durchgeführt. Mittels bildgebender Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop wurden die Schaumbeschichtungen hinsichtlich der Schaumstruktur, Porengrößen und Schichtdicken untersucht.

Die Nahtabdichtungen wurden speziell hinsichtlich der Haftfestigkeit der Bänder, der Wasserdichtheit und Reinigungsbeständigkeit geprüft.

Die textilphysikalischen Prüfungen und Funktionstests wurden zusammen von Trans Textil und dem STFI getätigt.

2.2.8 Ökologische Prozessbewertung (AP 8)

Ein wichtiger Punkt in diesem Projekt war die ökologische Beurteilung des entwickelten Prozesses und der Vergleich zum Stand der Technik. Betrachtet wurden die jeweiligen Einzelprozesse Schaumstrich- und Deckstrichapplikation sowie die abschließende Hydrophobierung. Wichtig war dabei die Messung des Gesamtkohlenstoffgehalts der Abluft beim Trocknen und Kondensieren. Diese Messungen wurden an der Laborbeschichtungsanlage durchgeführt, da hier die Abluftleitung leicht zugänglich war und die Messapparaturen (Strömungsmesser, Temperaturmessung und Messsonde für den Kohlenstoffanteil) integriert werden konnten. Die Bestimmung des Kohlenstoffanteils erfolgte mit einem mobilen Gesamt-Kohlenwasserstoff-Analysator FID 2001 T der Firma Testa GmbH (München). Als Kalibriergas wurde Propan verwendet. Ein Datenlogger der Firma Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH (Holzkirchen) wurde in Kombination mit dem Thermoelement PT100 und einem Flügelrad-Anemometer (beides von der Firma Schiltknecht Messtechnik AG, Gossau, Schweiz) verwendet, um die Strömungsverhältnisse der Abluft zu ermitteln.

Es wurden die Stoff- und Energieströme, mit dem Hauptaugenmerk auf Abwasser, Lagerung und Entsorgung, analysiert und bewertet.

Die Tätigkeiten in diesem Arbeitspaket wurden von Trans Textil und dem STFI gemeinsam durchgeführt.

2.2.9 Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse (AP 9)

Dieses Arbeitspaket umfasste die Dokumentation der Ergebnisse mit dem Aufstellen von Zusammenhängen zwischen den entwickelten Rezepturen, der Applikation/Verfahren und den resultierenden Eigenschaften bzw. der Struktur (Schichtdicken, Oberflächenbeschaffenheit, Schaumstruktur). Es erfolgte die Anfertigung der Berichte, die Umsetzung geplanter Strategien zur Ergebnisverwertung und Veröffentlichungen. Es wurden die gewonnenen Erkenntnisse in Form von produktbezogenen und technologischen Empfehlungen für die Anwendung in den angestrebten Einsatzbereichen dokumentiert und Schlussfolgerungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten getroffen.

An der Zusammenfassung und der Dokumentation der Ergebnisse waren alle drei Projektpartner beteiligt.

2.3. Projektergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der im Forschungsprojekt geleisteten Arbeit mit Bezug auf das jeweilige Arbeitspaket dargelegt. Auf die Arbeitspakete 7 „Textilphysikalische Prüfung und Funktionstests“ sowie 9 „Zusammenfassung und Dokumentation der Ergebnisse“ wird nicht gesondert eingegangen. Die erhaltenen Ergebnisse werden jeweils bei den entsprechenden Abschnitten aufgeführt.

2.3.1. Recherche, Anforderungsprofil, Materialauswahl und -beschaffung

Im Rahmen der Patentrecherche wurden keine weiteren Offenlegungsschriften bekannt, die im Konflikt mit den im Rahmen des Forschungsvorhabens geplanten Untersuchungen standen. Der spezifische Kenntnisstand auf dem Gebiet der Schaumbeschichtungen und wasserbasierten Beschichtungsformulierungen wurde mit den durchgeführten Recherchen erweitert. Im Rahmen des Kick-off-Meetings wurden die Anforderungsprofile für die atmungsaktiven, mediendichten und waschbeständigen Beschichtungen spezifiziert. Für den Bereich der Watterschutzbekleidung wurden die Anforderungen entsprechend der DIN EN 343 und für den Einsatz als Feuerwehrsutzbekleidung nach der DIN EN 469 angestrebt. Daraus ergaben sich die Hauptanforderungen an die Wasserdichtheit und Wasserdampfdurchlässigkeit. Der R_{et} -Wert („Resistance to Evaporating Heat Transfer“ angegeben in m^2Pa/W) wird nach DIN EN 31092 quantifiziert und ist eine spezifische Materialeigenschaft textiler Flächengebilde bzw. textiler Materialaufbauten, die den „latenten“ Verdampfungswärmefluss durch eine gegebene Fläche infolge eines bestehenden stationären Partialdruckgradienten bestimmt. Er gibt an, wie stark das Material den Wasserdampfdurchgang einschränkt. Je geringer der R_{et} -Wert ist, desto höher ist die Atmungsaktivität. Oftmals wird auch die Wasserdampfdurchlässigkeit (Moisture Vapor Transmission Rate, MVTR in $g/m^224 h$) angegeben. Der MVTR-Wert gibt an, welche Menge Wasserdampf in 24 Stunden durch einen Quadratmeter Textil verdunstet. Je größer dieser ist, desto höher ist die Atmungsaktivität des Materials.

Die Wasserdichtheit wird als der Wasserdurchgangswiderstand (WP) nach DIN EN 20811 quantifiziert und gibt den von einem Material ausgehaltenen hydrostatischen Druck für den Widerstand gegen den Wasserdurchtritt durch das Material an.

In Anlehnung an das Anforderungsprofil nach DIN EN 343 und DIN EN 469 wird ein R_{et} -Wert von $\leq 20 m^2Pa/W$ bzw. ein MVTR von $\geq 3.000 g/m^224 h$ und eine Wasserdichtheit von $\geq 0,13 bar$ gefordert. Projektziel war jedoch ein wesentlich geringerer R_{et} -Werte von $< 10 m^2Pa/W$ (MVTR $> 10.000 g/m^224 h$) und eine höhere Wasserdichtheit von $> 1.000 mbar$. Basierend auf dem Anforderungsprofil wurden folgende drei textile Flächengebilde ausgewählt:

- **Polyestergewebe** (100 % PES, Leinwandbindung, $86 g/m^2$)
- **Polyamidgewebe** (100 % PA[6.6], Leinwandbindung, $95 g/m^2$)
- **Vliesstoff** (50/50 % Aramid/Viskose FR, wasserstrahlverfestigt, $85 g/m^2$)

Als Referenzmaterialien für die zu entwickelnden Textilien mit Schaumbeschichtungen wurde sich für Membran-Textilverbunde entschieden, da diese in den angestrebten Einsatzbereichen überwiegend eingesetzt werden. Zu diesem Zwecke wurden mit den drei Textilien jeweils Lamine mit einer Polyurethanmembran (markttypisches Produkt) hergestellt. Die Referenzmaterialien wurden jeweils fünf Wasch- und Trockenzyklen bzw. fünf chemischen Reinigungen unterzogen. Anschließend wurden die Wasserdichtheit (standardmäßig bis 1.000 mbar geprüft) und die Wasserdampfdurchlässigkeit bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die erhaltenen Prüfwerte dienen als Benchmark.

Tabelle 1: Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR) der hergestellten Referenzlamine nach 5 Waschzyklen bzw. 5 chemischen Reinigungen.

Referenzlaminat	nach 5 Waschzyklen		nach 5 chem. Reinigungen	
	WP (3. Tropfen) in mbar	MVTR in g/m ² 24 h	WP (3. Tropfen) in mbar	MVTR in g/m ² 24 h
Polyesterge-webe	> 1.000	12.500	> 1.000	13.690
Polyamidge-webe	> 1.000	10.490	> 1.000	11.850
Vliesstoff	> 1.000	11.550	> 1.000	12.770

2.3.2. Entwicklung und Optimierung der Schaum- und Deckstrichformulierung

Die Entwicklung der wässrigen Beschichtungsformulierungen für den Schaum- und den Deckstrich wurde vom assoziierten Kooperationspartner CHT Germany GmbH (Tübingen) durchgeführt. Anhand der Ergebnisse der Vorversuche in den Laboren der CHT wurden insgesamt drei der entwickelten Schaumbeschichtungsformulierungen für die Applikationsversuche ausgewählt (siehe Kapitel 2.3.3.). Alle drei Formulierungen basieren auf einer wässrigen Polyurethan-Acrylat-Chemie als Basiskomponente. Des Weiteren enthalten diese einen polyisocyanatbasierten Vernetzer, ein ammoniumbasiertes Schaumhilfsmittel und einen nichtionogenen Verdicker. Die Schaumformulierung 1 (**Schaum 1**) ist im Gegensatz zu den beiden anderen (**Schaum 2** und **3**) fluorcarbonhaltig.

Im Bereich des Deckstriches wurden zunächst eine der verschiedenen entwickelten atmungsaktiven, wässrigen, polyurethanbasierenden Basisformulierungen (**Deckstrich 1**) als erfolgsversprechend für dieses Projekt angesehen und für die Applikationstests ausgewählt. Im Laufe des Projektes wurde diese Formulierung, auf Basis der Ergebnisse der Applikationstests, weiterentwickelt. Daraus resultierten zwei weitere Formulierungen für den Deckstrich (**Deckstrich 4** und **5**). Zusätzlich wurden noch zwei wasserbasierte Produkte (**Deckstrich 2** und **3**) von Mitwettbewerbern der CHT getestet.

Für die Applikation mussten die Viskosität bzw. das rheologische Verhalten der Basisformulierungen noch mit Verdickern eingestellt werden. Im Projekt wurden drei verschiedene Produkte (**Verdicker 1, 2** und **3**) getestet. Des Weiteren wurde den Formulierungen ein

polyisocyanatbasierter Vernetzer zugesetzt, um die Waschpermanenz zu erhöhen.

Für die abschließende Hydrophobierung des Textilverbundes wurde ein bewährtes fluorfreies Produkt der CHT (**ECOPERL 4**) eingesetzt.

In Tabelle 2 sind die im Projekt verwendeten Formulierungen und Hilfsmittel zusammengestellt.

Es wurden die Meilensteine MS1 (Rezeptur zu Herstellung der Schaumbeschichtung) und MS2 (Rezeptur zu Herstellung des Deckstrichs) erreicht.

Tabelle 2: Im Projekt verwendete Formulierungen und Hilfsmittel.

verwendete Bezeichnung	Beschreibung
Schaumformulierungen	
Schaum 1	fluorcarbonhaltig, wässrig, Polyurethan-Acrylat-Chemie, CHT-Entwicklung
Schaum 2	fluorfrei, wässrig, Polyurethan-Acrylat-Chemie, CHT-Entwicklung
Schaum 3	fluorfrei, wässrig, Polyurethan-Acrylat-Chemie, CHT-Entwicklung
Deckstrichformulierungen	
Deckstrich 1	atmungsaktiv, wässrig, polyurethanbasierend, CHT-Entwicklung
Deckstrich 2	atmungsaktiv, wässrig, polyurethanbasierend, Formulierung der Firma Rudolf GmbH, Geretsried.
Deckstrich 3	atmungsaktiv, wässrig, polyurethanbasierend, Produkt der Firma Covestro AG, Leverkusen.
Deckstrich 4	atmungsaktiv, wässrig, polyurethanbasierend, CHT-Weiterentwicklung von Deckstrich 1
Deckstrich 5	atmungsaktiv, wässrig, polyurethanbasierend, CHT-Weiterentwicklung von Deckstrich 4
Hydrophobierung	
ECOPERL 4	fluorfreies, auf Polymer/Wachs Basis, CHT-Produkt
Verdicker	
Verdicker 1	nichtionogen, Polyurethanbasis, Produkt der Firma OMG Borchers GmbH, Westlake, OH, USA
Verdicker 2	anionisch, Copolymerbasis, CHT-Produkt
Verdicker 3	anionisch, strukturviskos, CHT-Produkt
Vernetzer	
Vernetzer	polyisocyanatbasiert, CHT-Produkt

2.3.3. Entwicklung der Schaumapplikation, der Kompaktierung und des Deckstrichauftrags im Labormaßstab

2.3.3.1. Schaumapplikation und Kompaktierung

Schaumlitergewicht

Im ersten Schritt der Schaumapplikation standen die Untersuchungen zum mechanischen Aufschäumen der Formulierungen. Die ersten Versuche wurden mit der Formulierung **Schaum 1** getätigt. Durch die Variation der Maschinenparameter des Schaummixers konnten stabile Schäume mit unterschiedlichen Schaumlitergewichten zwischen ~ 200 g/l und ~ 400 g/l

hergestellt werden. Diese waren in ihrer Struktur mehrere Minuten stabil, ohne zu kollabieren. In den ersten Beschichtungsversuchen am Handstreichgerät wurden die Schäume mittels Rakelbeschichtung (Schuhrakel über Walze) in unterschiedlichen Auftragsgewichten auf das Polyestergewebe appliziert, getrocknet (1,5 min bei 90 °C) und später kondensiert (1 min bei 170 °C). Die Versuche (**V1 – V8**) sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Es konnten je nach Spalteinstellung Auftragsmengen zwischen 43 g/m² und 91 g/m² erzielt werden. Ohne Kondensation und Kalandrieren waren die Schaumbeschichtungen sehr weich und druckempfindlich. Die Oberflächen waren, vom Beschichtungsbild her gesehen, sehr homogen.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Versuche zur Variation des Schaumlitergewichts und der Auftragsmenge (Textil = **Polyestergewebe**).

Versuch	Schaumformulierung	Schaumlitergewicht in g/l	Auftragsgewicht in g/m ²
V1	Schaum 1	216	48
V2	Schaum 1	216	60
V3	Schaum 1	300	70
V4	Schaum 1	300	57
V5	Schaum 1	300	43
V6	Schaum 1	411	91
V7	Schaum 1	411	60
V8	Schaum 1	411	45

Für die Untersuchungen der Schaumstrukturen wurden REM-Bilder der Proben **V1**, **V5** und **V8** aufgenommen. Die Aufnahmen sind in Abbildung 8 dargestellt.

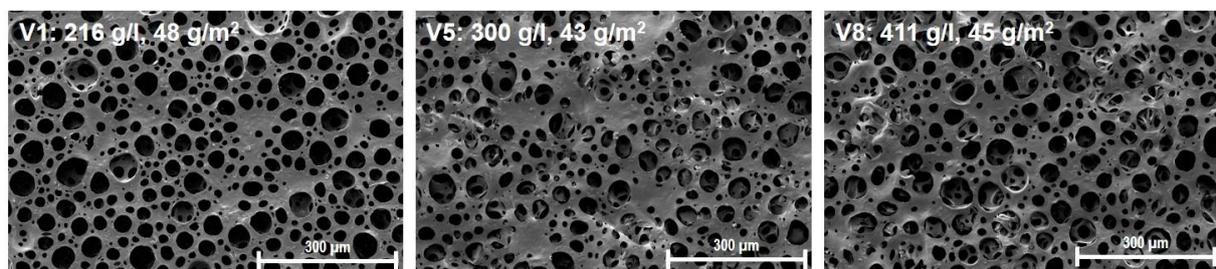


Abbildung 8: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Schaumseite) von **V1**, **V5** und **V8**. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Es ist qualitativ betrachtet ein Trend in der Schaumgeometrie erkennbar. Je höher das Schaumlitergewicht wird, desto höher wird der Anteil der größeren Poren. Gleichzeitig verringert sich der Anteil der kleineren Poren und erhöht sich der Binderanteil (flächenmäßig) zwischen den Poren. Bei der Probe **V1** liegen die meisten Poren im Bereich zwischen 20 µm – 50 µm, bei **V5** zwischen 20 µm – 70 µm und bei **V8** zwischen 20 µm – 80 µm.

Kalandrierung

Gegenstand der anschließenden Versuche war die Untersuchung des Einflusses der Kalandrierung auf die Struktur der Schaumbeschichtung. Dabei wurde die Temperatur und der Druck während der Kalandrierung variiert. Für die Versuche wurde die Schaumbeschichtung **V1** (DIN

A3 Muster vom Handstreichgerät), jedoch ohne Kondensation, verwendet. Bei dieser Probe konnte die feinporigste Struktur erzielt werden. Nach dem Kalandrierprozess wurden alle Proben für 1 min bei 170 °C kondensiert. Von den erhaltenen Proben wurden REM-Bilder angefertigt und die Wasserdichtheit sowie die Wasserdampfdurchlässigkeit geprüft. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 4 zusammengefasst und in Abbildung 9 sind die Prüfwerte graphisch dargestellt.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Versuche zur Kalandrierung der Probe **V1** sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR).

Versuch	Kalandrierdruck in bar	Kalandertemperatur in °C	WP (3. Tropfen) in mbar	MVTR in g/m ² 24 h
V1	-	-	58	30.320
V9	2	23	54	34.120
V10	4	23	60	34.150
V11	6,4	23	59	33.690
V12	6,4	50	64	33.030
V13	6,4	70	66	30.570
V14	6,4	90	64	28.110
V15	6,4	110	67	17.320
V16	6,4	130	67	5.230

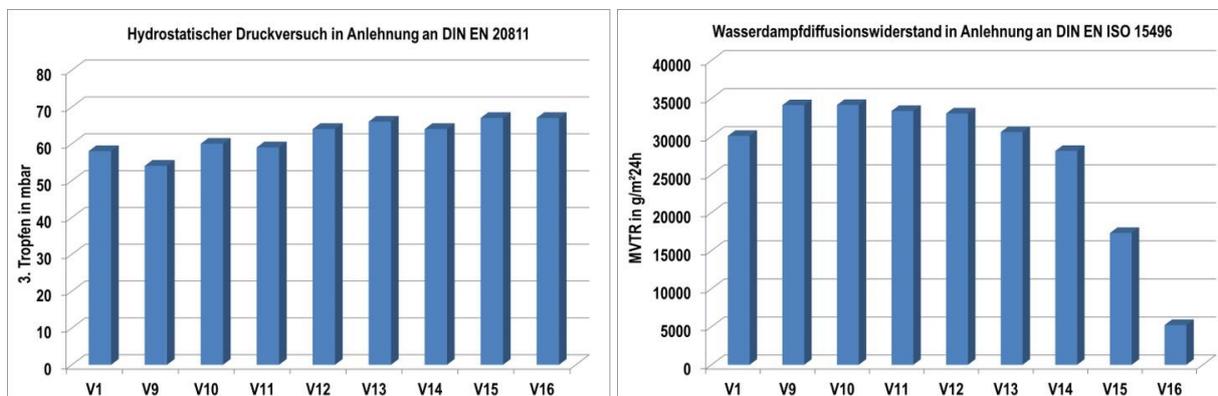


Abbildung 9: Graphische Darstellung der Prüfwerte der Wasserdichtheit und Wasserdampfdurchlässigkeit der Kalanderversuche.

Das Kaltkalandern besaß keinen Einfluss auf die Wasserdichtheit und die Wasserdampfdurchlässigkeit. Ein Effekt war erst durch die Erhöhung der Kalandertemperatur zu beobachten. Anhand der Prüfwerte ist zu erkennen, dass sich die Wasserdichtheit nur sehr gering änderte. Die Dichtheit stieg mit zunehmender Kalandertemperatur leicht an. Einen deutlichen Effekt hat die Kalandertemperatur jedoch auf die Wasserdampfdurchlässigkeit. Diese sank von ~ 30.000 g/m²24 h (unkalandriert) auf 5.230 g/m²24 h bei der höchsten Kalandertemperatur (130 °C).

Die Auswertung der REM-Aufnahmen zeigte, dass das Kaltkalandern keinen Einfluss auf die

Oberflächenstruktur des Schaums besitzt. Lediglich die Schaumdicke wurde von ~ 100 µm (unkalandriert) auf ~ 80 µm (bei 6,4 bar) kompaktiert. Einen deutlichen Einfluss hat hingegen die Erhöhung der Kalandertemperatur. Die Schaumoberfläche wurde zunehmend geschlossener. Aber selbst bei Probe **V16** (130 °C) waren noch Poren erkennbar und die Oberfläche war nicht komplett geschlossen. Dies korrelierte mit der nur geringen Änderung der Wasserdichtheit. Ein deutlicher Einfluss war ebenfalls bei den Schaumdicken erkennbar. Durch die Erhöhung der Kalandertemperatur verringerte sich die Dicke der Schaumschicht von ~ 80 µm (6,4 bar bei 23 °C) auf ~ 40 µm (6,4 bar bei 130 °C). Gleichzeitig war bei der Probe **V16** (130 °C) kaum noch eine typische Schaumstruktur im Querschnitt zu erkennen. Die starke Kompaktierung des Schaums korreliert mit der starken Abnahme der Wasserdampfdurchlässigkeit bei höheren Kalandertemperaturen. In Abbildung 10 sind die REM-Aufnahmen der Oberflächen und Probenquerschnitte der Proben **V12** bis **V16** exemplarisch dargestellt.

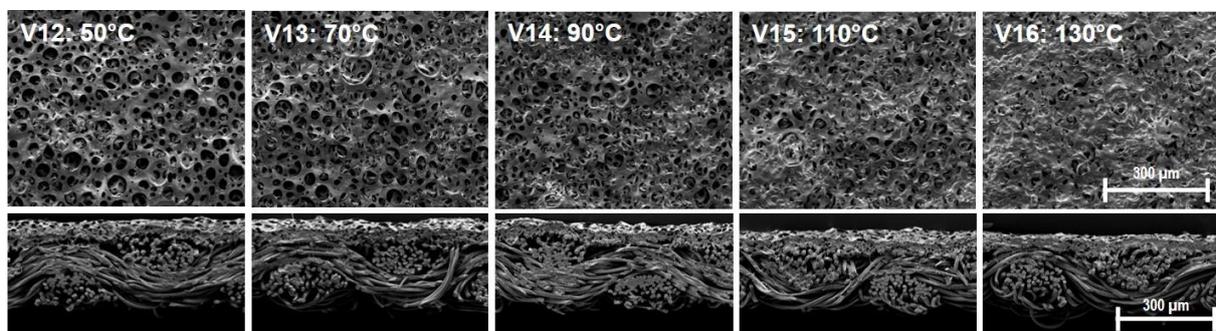


Abbildung 10: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Schaumseite, oben) und Probenquerschnitte (unten) von **V12** bis **V16**. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Als geeignetste Kalandparameter wurde der maximale Druck von 6,4 bar und eine Temperatur von 110 °C evaluiert.

Mit den optimierten Parametern zur Kompaktierung, wurden die Proben **V5** (300 g/l Schaumgewicht) und **V8** (411 g/l Schaumgewicht) kalandriert, um zu sehen, ob eine geschlossene, wasserdichte Oberfläche erzielt werden kann. Es wurden REM-Bilder aufgenommen und die Wasserdichtheit sowie die MVTR-Werte ermittelt. Die Prüfergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Prüfergebnisse der kalandrierten Proben **V1**, **V5** und **V8**.

Versuch	Probe	Schaumlitergewicht in g/l	Kalanderbedingung	WP (3. Tropfen) in mbar	MVTR in g/m ² 24 h
V15	V1	216	6,4 bar bei 110 °C	67	17.320
V17	V5	300	6,4 bar bei 110 °C	45	20.390
V18	V8	411	6,4 bar bei 110 °C	27	29.000

In Abbildung 11 sind die REM-Aufnahmen der Probenoberflächen nach der Kalandrierung gezeigt. An den Aufnahmen ist deutlich zu sehen, dass bei der kalandrierten Probe mit 216 g/l Schaumgewicht (**V15**) die Oberfläche noch am geschlossensten war. Bei beiden anderen

Proben (**V17** und **V18**) waren große bis sehr Poren (bis zu 80 μm) zu erkennen. Dies spiegelt sich auch in den Wasserdichtheiten wieder, welche bis zu 27 mbar sanken. Im Gegenzug erhöhte sich erwartungsgemäß der MVTR-Wert, aufgrund der großen Poren.

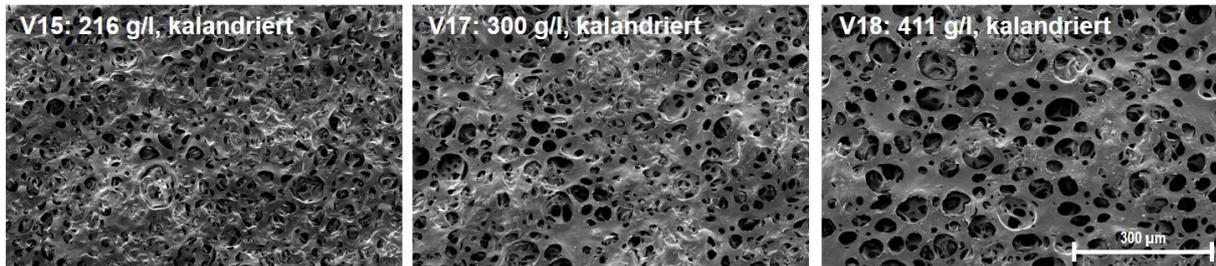


Abbildung 11: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Schaumseite) von **V15**, **V17** und **V18**. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Schaumrezeptur

Die ersten Grundlagenversuche wurden mit der fluorcarbonhaltigen Formulierung **Schaum 1** getätigt, da mit einer ähnlichen Rezeptur bei der CHT schon positive Erfahrung im klassischen Schaumbereich erzielt wurden. Ziel dieses Projektes war jedoch ein Produkt herzustellen, welches komplett auf Fluorcarbone verzichtet. Im nächsten Schritt wurde folglich die fluorcarbonfreie Formulierung **Schaum 2** entwickelt und getestet.

Im Versuch **V19** wurde mit der Formulierung **Schaum 2** ein Schaumlitergewicht von 210 g/l eingestellt und der Schaum mittels Rakelbeschichtung am Handstreichgerät auf das **Polyestergewebe** appliziert. Dabei wurde ein vergleichbares Auftragsgewicht von 46 g/m² realisiert. Die Beschichtung wurde bei 90 °C für 1,5 min getrocknet. Anschließend wurde der erhaltene Verbund bei 110 °C und 6,4 bar kalandriert und bei 170 °C für 1 min kondensiert (Versuch **V20**). Es wurden REM-Bilder vor und nach dem kalandrieren aufgenommen. Diese sind in Abbildung 12 gezeigt.

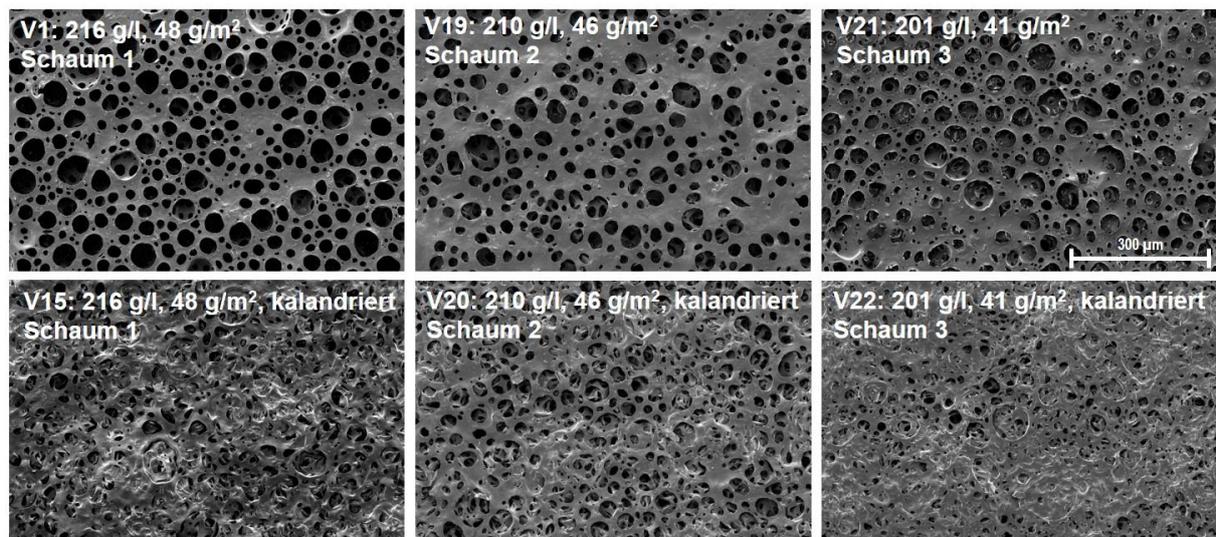


Abbildung 12: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Schaumseite) von **V1**, **V15**, **V19**, **V20**, **V21** und **V22**. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Bei der unkalandrierten Probe mit der Formulierung **Schaum 2 (V19)** war der Binderanteil (flächennmäßig) zwischen den Poren wesentlich größer als bei der Vergleichsprobe vom **Schaum 1**. Die Porengrößen hingegen gleichen einander. Die Schaumdicke war bei beiden unkalandrierten Proben annähernd gleich (~ 100 µm). Folglich ist die Oberfläche der kalandrierten Proben bei der Beschichtung mit **Schaum 2** auch wesentlich offenerporiger. Die Schichtdicken der kalandrierten Proben gleichen einander mit ca. 50 µm.

Die Ergebnisse veranlasste die CHT, diese Formulierung weiterzuentwickeln. Im späteren Projektverlauf stand dann die Formulierung **Schaum 3** zur Verfügung. Mit dieser wurde zunächst analog zum **Schaum 2** verfahren. Mit einem Schaumlitergewicht von 201 g/l wurde ein Auftragsgewicht von 41 g/m² erzielt. Die REM-Aufnahmen der unkalandrierten (**V21**) und kalandrierten (**V22**) Probe ist in Abbildung 12 dargestellt. Im Vergleich zur Formulierung **Schaum 2** ist der Binderanteil bei **V21** zwischen den Poren geringer geworden. Die Porengrößenverteilung ist zudem wesentlich einheitlicher. Nach dem Kalandrieren ist die Oberfläche geschlossener und glatter als bei den Proben **V15** und **V20**. Es traten keine Unterschiede in den Schichtdicken auf.

Zwischenfazit – Schaumrezeptur und Kalandrierung

Als Zwischenfazit der ersten Entwicklungsschritte standen folgende Ergebnisse:

- Schaumlitergewicht ~ 200 g/l
- Schaumauftrag mittels Rakelbeschichtung (Schuhrakel über Walze)
- Auftragsmenge zwischen 40 g/m² und 50 g/m²
- alle drei entwickelten Schaumformulierungen ließen sich aufschäumen, bildeten aber unterschiedliche Schäume
- Kalandrierbedingungen von 6,4 mbar bei 110 °C lieferten einen kompakten Schaum mit einer guten Balance auf Wasserdichtheit und Wasserdampfdurchlässigkeit.

In Abbildung 13 sind Fotos der Schaumapplikation und des Kalandrierens gezeigt.

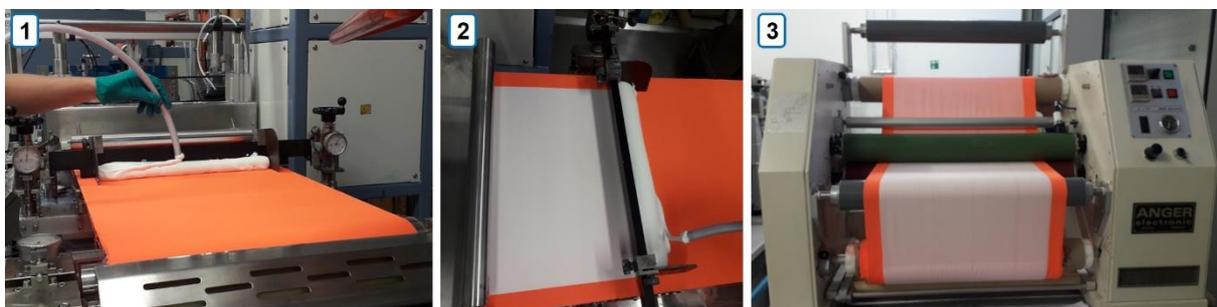


Abbildung 13: Fotos der Schaumapplikation (1, 2) an der Laborbeschichtungsanlage und des Kalandrierens am Laborlaminator (3).

2.3.3.2. Deckstrichauftrag

Als Formulierung für den Deckstrich wurde von der CHT zunächst der **Deckstrich 1** entwickelt,

mit dem die ersten Applikationsversuche durchgeführt wurden. Es erfolgte ein Übertrag des Versuches **V1** auf die Laborbeschichtungsanlage, um für die Deckstrichversuche ein möglichst einheitliches Rollenmaterial (ca. 15 Laufmeter) zu erhalten. Dabei wurde im Versuch **V23** der **Schaum 1** mit 216 g/l und einem Auftragsgewicht von 54 g/m² auf das **Polyestergewebe** appliziert, bei 90 °C mit 1 m/min (entspricht einer Verweilzeit von 1,5 min im Trockenkanal) getrocknet, mit 6,4 bar bei 110 °C kalandriert und anschließend bei 160 °C mit 1 m/min (Trockenzeit = 1,5 min) kondensiert.

Der Deckstrichauftrag erfolgte am Handstreichgerät mit der Rakelbeschichtung (Fasnrakel über Luft) unter Variation der Spalteinstellung. Die Formulierung **Deckstrich 1** wurde mit dem **Verdicker 1** angedickt, so dass eine streichfähige Paste entstand. In Tabelle 6 sind die Versuche zusammengefasst.

Tabelle 6: Zusammenfassung der Versuche zum Deckstrichauftrag mit der Formulierung **Deckstrich 1** auf die Schaumbeschichtung **V23** sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR).

Versuch	Auftragsgewicht (Deckstrich) in g/m ²	WP (3. Tropfen) in mbar	MVTR in g/m ² 24 h
V23	ohne Deckstrich	67	17.320
V24	5	70	9.850
V25	8	69	7.230
V26	12	73	9.120
V27	15	77	6.590
V28	21	87	6.300

Mit Zunahme der Auftragsmenge des Deckstrichs war eine leichte Verbesserung der Wasserdichtheit zu erkennen. Gleichzeitig sank erwartungsgemäß die Wasserdampfdurchlässigkeit. Um zu prüfen, ob die Oberflächen geschlossen waren, wurden REM-Bilder aufgenommen. Diese sind in Abbildung 14 dargestellt.

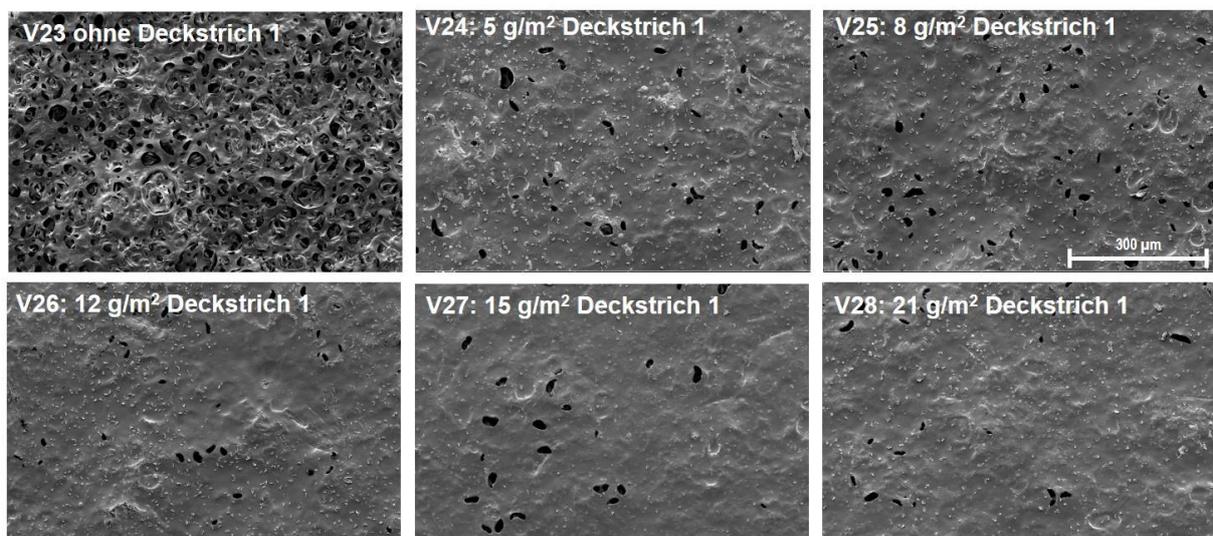


Abbildung 14: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) von **V23** bis **V28**. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Die REM-Aufnahmen zeigen deutlich, dass in allen Beschichtungen mit **Deckstrich 1** noch Löcher vorhanden waren, welche dann zur geringen Wasserdichtheit führen.

Als nächstes wurde diese Deckstrichvariante in Kombination mit einer Schaumbeschichtung auf Basis von **Schaum 2** getestet. Dazu wurde an der Laborbeschichtungsanlage eine Schaumbeschichtung (**V29**) mit einem Schaumlitergewicht von 216 g/l und einem Auftragsgewicht von 46 g/m² auf das **Polyestergewebe** appliziert. Die Trocknung, Kalandrierung und Kondensation erfolgten nach den optimierten Parametern, analog zum **Schaum 1**. Auf die Schaumbeschichtung wurde die Formulierung **Deckstrich 1** (analog zu den oben genannten Versuchen) mittels Streichbeschichtung appliziert. Die Auftragsgewichte betragen 8 g/m² (**V30**), 15 g/m² (**V31**) und 12 g/m² (**V32**). Im Versuch **V32** wurden (mit Zwischentrocknung) zweimal 6 g/m² aufgetragen. Eventuelle Luftblasen in der Formulierung können zu Löchern in der Beschichtung führen. Bei einem 2-Schichtdeckstrich ist jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass sich 2 Löcher überlagern nahezu ausgeschlossen. An den Proben wurde die Wasserdichtheit geprüft und es wurden REM-Bilder (siehe Abbildung 15) erstellt.

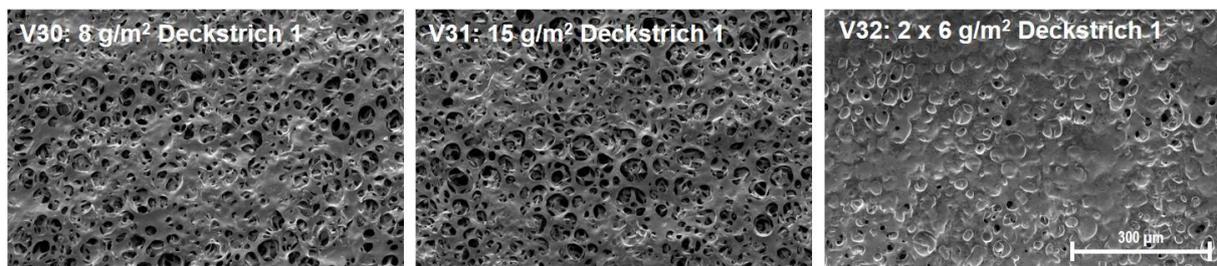


Abbildung 15: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) von **V30**, **V31** und **V32**. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Selbst bei der Applikation eines 2-Schichtdeckstrichs (**V32**) waren noch deutliche Poren auf der Oberfläche zu erkennen. Damit verbunden waren sehr schlechte Wasserdichtheiten von 25 mbar (**V30**), 22 mbar (**V31**) und 28 mbar (**V32**).

Neben der entwickelten CHT-Formulierung **Deckstrich 1** wurden auch am Markt befindliche Produkte von Wettbewerbern getestet. Als Schaumbeschichtung wurde die Variante vom Produktionsversuch **VA6** (**Polyestergewebe**, **Schaum 1**, 216 g/l, 50 g/m², kalandriert und kondensiert) verwendet. Die Versuche sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Von der Formulierung **Deckstrich 2** wurden neben der Standardvariante (analog zum **Deckstrich 1**) noch zwei weitere Varianten verwendet. **Deckstrich 2A** ist dünnflüssiger als **Deckstrich 1** (weniger **Verdicker 1**). Beim **Deckstrich 2B** ist der Binderanteil 50 % geringer, aber die Viskosität ist analog zum **Deckstrich 1**. Im Versuch **V35** wurde der **Deckstrich 2B** 2-fach aufgetragen, um die gleiche Auftragsmenge wie bei **V33** zu erzielen. Mit dem **Deckstrich 4** wurde eine Weiterentwicklung des **Deckstrich 1** getestet.

Auch mit den weiteren getesteten Deckstrichvarianten konnte keine Erhöhung der Wasserdichtheit erzielt werden. Wie in den REM-Aufnahmen (siehe Abbildung 16) zu sehen, wurde bei allen Proben **V33** – **V37** Löcher/Poren in der Oberfläche gefunden.

Tabelle 7: Zusammenfassung der Versuche (F/L = Faser rakel über Luft; S/W = Schuhrakel über Walze) zur Deckstrichvariation auf der Schaumbeschichtung **VA6** sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR).

Versuch	Formulierung	Applikation	Auftragsgewicht in g/m ²	WP (3. Tropfen) in mbar
V33	Deckstrich 2	F/L Direkt	14	63
V34	Deckstrich 2A	F/L Direkt	13	75
V35	Deckstrich 2B	2 x F/L Direkt	20 (2 x 10)	76
V36	Deckstrich 3	F/L Direkt	6	70
V37	Deckstrich 4	F/L Direkt	6	78
V38	Deckstrich 4	2 x S/W Transfer	14	971

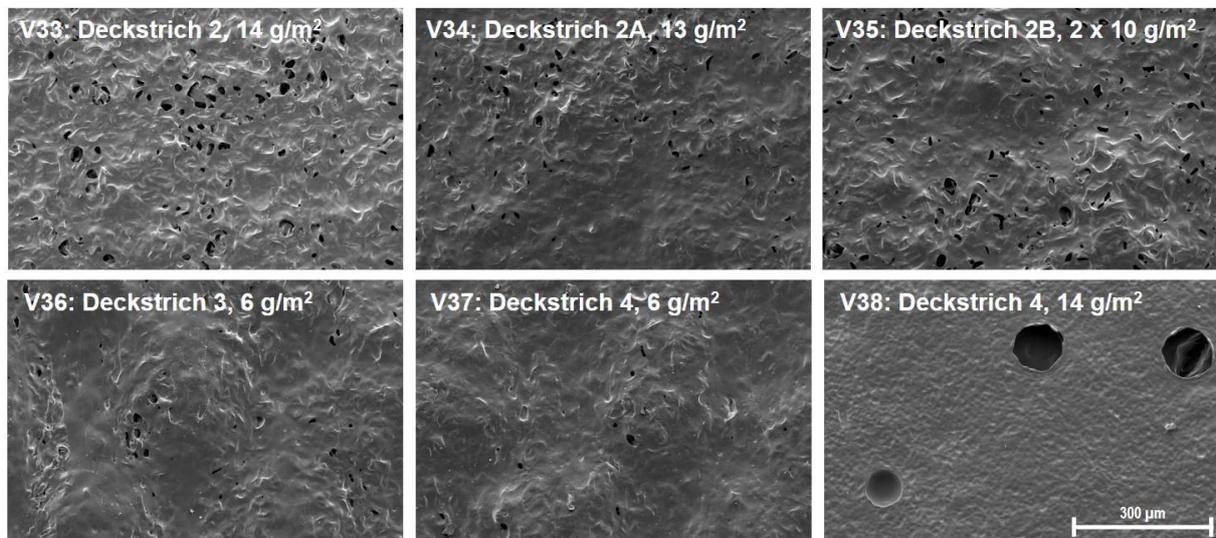


Abbildung 16: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) von **V33 - V38**. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Zum Erzielen einer geschlossenen Oberfläche wurde sich der Transferbeschichtung bedient. Dabei wird der Deckstrich zunächst auf ein glattes Transferpapier (Silikonpapier) appliziert und getrocknet. Anschließend folgt ein weiterer Deckstrichauftrag und der Schaum/Textil-Verbund wurde mit der Schaumseite aufgelegt (zukaschiert). Anschließend erfolgten die Trocknung und Kondensation. In einem Handstreichversuch (**V38**) wurde dies mit dem **Deckstrich 4** durchgeführt (siehe Tabelle 7). Es konnte mit einer Auftragsmenge von 14 g/m² eine Wasserdichtheit von 971 mbar erzielt werden. Die Geschlossenheit der Oberfläche ist auf der REM-Aufnahme (siehe Abbildung 13) auch morphologisch zu erkennen. Die 2 Löcher sind nur in der obersten Deckschicht des 2-Strichsystems vorhanden. Bei dieser Probe wurde ein MVTR-Wert von 1.700 g/m²24 h bestimmt. Damit konnte die prinzipielle Eignung des Systems Schaum/Deckstrich zum Erzielen einer wasserdichten und wasserdampfdurchlässigen Beschichtung demonstriert werden.

Zwischenfazit – Deckstrichapplikation

Mit dem **Deckstrich 4** konnte eine wasserdichte und wasserdampfdurchlässige Schaumbeschichtung im Transferverfahren realisiert werden. Dieses Verfahren ist jedoch für einen industriellen Prozess zu aufwändig und das Produkt wäre preislich nicht konkurrenzfähig. Es ergaben sich für die weiteren Entwicklungsschritte folgende Aufgaben:

- Realisierung einer geschlossenen Oberfläche bei der Direktbeschichtung.
- Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit.

Optimierung – Deckstrichapplikation

Zum Erzielen eines geschlossenen Deckstrichs musste die Deckstrichformulierung dahingehend modifiziert werden, dass die Oberflächenporen/-löcher effektiv geschlossen werden. Um dies zu erzielen, wurden zusammen mit der CHT verschiedene Kombinationen der **Verdicker 2** und **3** mit dem **Deckstrich 4** getestet und eine modifizierte Variante, der **Deckstrich 4mod** entwickelt.

Für die Tests dieses Deckstrichs stand die neue Schaumformulierung **Schaum 3** zur Verfügung. An der Laboranlage wurde im Versuch **V39** das **Polyestergewebe** mit dem **Schaum 3** analog zu den Versuchen **V21/22** beschichtet. Das Schaumlitergewicht betrug 201 g/m^2 und die Auftragsmenge 41 g/m^2 . Die Beschichtung wurde getrocknet, nach den optimierten Bedingungen kalandriert und kondensiert.

In zwei Versuchen wurden unterschiedliche Mengen (**V40** = 10 g/m^2 und **V41** = 15 g/m^2) der Formulierung **Deckstrich 4mod** per Streichbeschichtung (Fasentrakel über Luft) appliziert, getrocknet und kondensiert. Es konnten Wasserdichtheiten von 89 bar (**V40**) und 140 bar (**V41**) sowie Wasserdampfdurchlässigkeiten von $2.590 \text{ g/m}^2\text{24 h}$ (**V40**) und $2.630 \text{ g/m}^2\text{24 h}$ (**V41**) erzielt werden. Die aufgenommenen REM-Bilder sind in Abbildung 17 dargestellt.

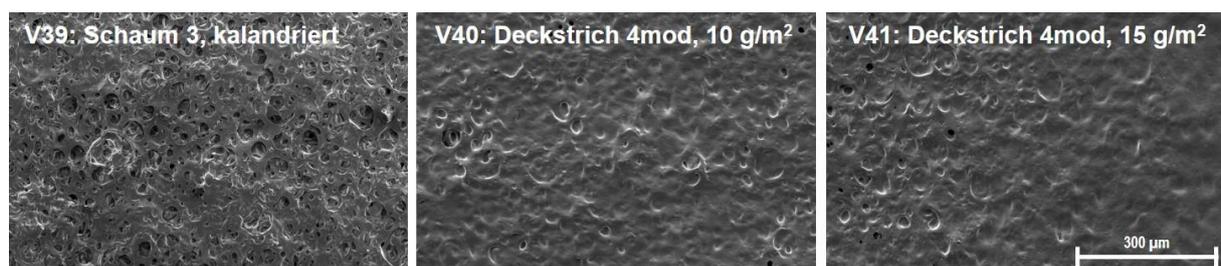


Abbildung 17: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) von **V39** und **V40**.

Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Im Vergleich zu den bislang hergestellten Deckstrichen lieferte der Versuch **V41** eine erhöhte Wasserdichtheit und eine moderate Wasserdampfdurchlässigkeit. Die Oberfläche ist nahezu porenfrei und gleichmäßig. Es wurde erwartet, dass das Beschichtungsbild auf der Produktionsanlage noch einheitlicher und porenfrei sein wird.

Mit dieser Variante des Schaumes und Deckstrichs wurden Versuche an der Produktionsanlage durchgeführt. In den Produktionsversuchen **VA14** – **VA17** konnte festgestellt werden,

dass die Oberflächen leicht blockend (leicht klebrig) waren (siehe Abschnitt 2.3.4.). Bei den Waschversuchen kam es dazu, dass sich überlagernde Oberflächen nicht mehr trennen ließen. Zusätzlich sollte die Wasserdichtheit weiterführend erhöht werden. Auf der Basis dieser Erkenntnisse wurde die Formulierung **Deckstrich 4mod** weiterentwickelt. Als Ergebnis stand der **Deckstrich 5**.

Mit der neuen Deckstrichvariante wurden Applikationstests an der Laborbeschichtungsanlage auf der Schaumbeschichtung aus Versuch **V39 (Schaum 3)** durchgeführt. Bei den fertig beschichteten Proben wurden anschließend noch die Textilseite mit dem **ECOPERL 4** über den Revers-Roll-Coater an der Laborbeschichtungsanlage hydrophobiert. Die Auftragsmenge lag bei ca. 8 – 10 g/m². Die Proben wurden für 1,5 min bei 100 °C getrocknet und anschließend für 1,5 min bei 160 °C kondensiert. Eine Zusammenfassung der Versuche ist in Tabelle 8 gegeben. Die REM-Aufnahmen der Proben sind in Abbildung 18 dargestellt.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Applikationsversuche mit der Formulierung **Deckstrich 5** auf der Schaumbeschichtung aus **V39 (Schaum 3)** sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR).

Versuch	Auftragsgewicht (Deckstrich) in g/m ²	WP (3. Tropfen) in mbar	MVTR in g/m ² 24 h
V42	4	142	4.060
V43	16	25 bis 881	6.550
V44	24	63 bis >1.000	5.890

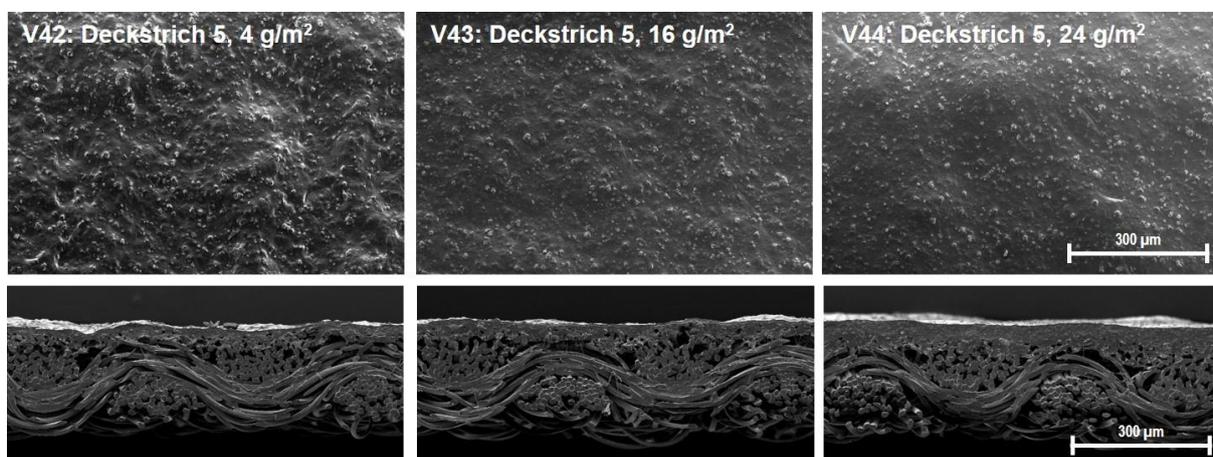


Abbildung 18: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) und Probenquerschnitt von **V39** und **V40**. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Mit Zunahme der Auftragsmenge an **Deckstrich 5** konnte eine deutliche Steigerung der Wasserdichtheit, mit Prüfwerten > 1.000 bar, erzielt werden. Die Prüfwerte der einzelnen Prüflinge der Proben **V43** und **V44** waren jedoch sehr uneinheitlich und zeigten eine große Streuung. Dies ließ eine inhomogene Beschichtung im Schaumstrich oder im Deckstrich vermuten. Auch

eine ungleichmäßige Kalandrierung kann die Ursache gewesen sein.

In den REM-Aufnahmen sind gleichmäßige und vollständig geschlossene Oberflächen, selbst bei nur 4 g/m² Deckstrich zu erkennen. Im Querschnitt der Proben kann erkannt werden, dass die Schaumstruktur erhalten blieb. Für die geplanten Produktionsversuche wurde ein Deckstrichauflage zwischen 16 g/m² und 24 g/m² angestrebt.

2.3.3.3. Zusammenfassung der Laborversuche

Im Rahmen der Laborversuche und in enger Vernetzung mit den Ergebnissen der Formulierungsentwicklung (AP 2) sowie der Rückkopplung der Produktionsversuche (AP 5) konnte an der Laborbeschichtungsanlage, im Rolle-zu-Rolle-Prozess, eine wasserdichte und wasserdampfdurchlässige Schaumbeschichtung entwickelt werden. Dabei kamen nur rein wässrige Beschichtungsformulierungen zum Einsatz. Der entwickelte Verbund bestand aus einem hydrophobierten Polyestergewebe, einem kalandrierten Schaumstrich und einem Deckstrich. Die optimierten Herstellungsparameter sind folgend zusammengefasst.

Schaumbeschichtung:

Formulierung = **Schaum 3**

Schaumlitergewicht = 200 g/l – 216 g/l

Auftragsgewicht = 40 – 50 g/m²

Auftragstechnologie = Rakelbeschichtung mit Schuhrakel/Walze

Trocknung = 90 °C für 2 min

Kalandrierung des Schaums:

Druck = 6,4 bar

Temperatur = 110 °C

Geschwindigkeit = 1 m/min

Anschließende Kondensation = 160 °C für 1,5 min

Deckstrich:

Formulierung = **Deckstrich 5**

Auftragsgewicht = 16 g/m² - 24 g/m²

Auftragstechnologie = Rakelbeschichtung mit Faserakel/Luft

Trocknung = 100 °C für 1,5 min

Kondensation = 160 °C für 1,5 min

Hydrophobierung:

Formulierung = **ECOPERL 4**

Auftragsgewicht = 8 g/m² - 10 g/m²

Auftragstechnologie = Revers-Roll-Coater

Trocknung = 100 °C für 2 min

Kondensation = 160 °C für 1,5 min

Basierend auf diesen optimierten Parametern wurden die abschließenden Versuche an der Produktionsanlage bei Trans-Textil geplant.

Es wurde der Meilenstein MS3 „Technologie zur Schaumbeschichtung, Kompaktierung und dem Deckstrichauftrag auf der Laboranlage“ erreicht.

2.3.4. Scale-up auf die Produktionsanlage

Nach den jeweiligen erfolgreichen Entwicklungen und Tests an der Laborbeschichtungsanlage wurden die Ergebnisse Schritt für Schritt auf die Produktionsanlage übertragen. Dabei mussten die jeweiligen Applikationsparameter angepasst und optimiert werden, da die Anlagentechnik teilweise anders aufgebaut ist und die Resultate nicht 1:1 skalierbar sind. Im Einzelnen wurden die Schritte Schaumapplikation, Kalandrierung, Deckstrichapplikation und Hydrophobierung übertragen.

Schaumapplikation

Im ersten Schritt wurde die Schaummischereinstellung ermittelt. Dafür ist bei der Firma Trans-Textil ein Schaummischer Sicomix der Firma Mischsystemtechnik Wolfgang Groth GmbH (Wedel) vorhanden. Dieser ist jedoch für einen wesentlich höheren Durchsatz ausgelegt, so dass die individuellen Maschinenparameter angepasst werden mussten. Nach der Optimierung konnten die angestrebten Schaumlitergewichte von ~ 200 g/l mit allen drei Formulierungen **Schaum 1, 2** und **3** erzielt werden.

Die grundlegenden Applikationstests wurden mit den Formulierungen **Schaum 1** und **2** zunächst mit dem **Polyestergewebe** durchgeführt. Analog zu den Laborversuchen erfolgte der Schaumauftrag an der Produktionsanlage mittels Rakelbeschichtung (Schuhrakel über Walze). Im Gegensatz zur Laboranlage war die Warenbreite 150 cm (anstatt 50 cm) und die Bahngeschwindigkeit 10 m/min (anstatt 1 m/min). Die Trocknung erfolgte über mehrere Heizzonen mit einem steigenden Temperaturprofil von 80 °C bis 170 °C.

Mit beiden Schaumformulierungen konnten Schaumbeschichtungen im Bereich zwischen 30 g/m² und 60 g/m² realisiert werden. Bei der Analyse der Beschichtungen wurde festgestellt, dass diese sehr uneinheitlich (Auftragsmenge, Schichtdicke, Schaumstruktur) über die Warenbreite war. Die Ursache schien die statische Dosierung des Schaums an der Rakelmitte zu sein. In einem weiteren Versuch wurde die Dosierung changierend über die komplette Rakelbreite durchgeführt. Es wurde eine homogene und einheitliche Beschichtung erhalten.

Neben der Beschichtung des **Polyestergewebes** wurden auch Versuche mit dem **Polyamidgewebe** und dem **Vliesstoff** durchgeführt. Bei gleichen Applikationsparametern konnten beide Schaumformulierungen erfolgreich auf das **Polyamidgewebe** appliziert werden. Der **Vliesstoff** hingegen konnte nicht beschichtet werden, da dieser direkt nach dem Schaumauftrag instabil wurde und riss.

Kalandrierung

Ziel der Kalanderversuche an der Produktionsanlage war es, eine ähnliche Kompaktierung wie in den Laborversuchen zu erzielen. Dabei sollte die Schaumoberfläche möglichst geschlossen und die generelle Schaumstruktur noch erhalten sein. Die Versuche wurden mit Formulierungen von **Schaum 1** und **2** durchgeführt. Es wurde auf das **Polyestergewebe** appliziert. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 9 gegeben.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Kalanderversuche an der Produktionsanlage sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR).

Ver-such	Schaum/ Schaumli- tergewicht in g/l	Auf- tragsge- wicht in g/m ²	Ge- schwin- digkeit in m/min	Kalan- dertem- peratur in °C	Kalan- derdruck in N/mm	WP (3. Tropfen) in mbar	MVTR in g/m ² 24 h
VA1	2 / 200	40 - 50	15	ohne	ohne	0	27.050
VA2	2 / 200	40 - 50	15	40	150	0	29.640
VA3	2 / 200	40 - 50	15	80	150	0	24.760
VA4	2 / 200	40 - 50	15	120	150	0	20.570
VA5	2 / 200	40 - 50	15	150	150	0	10.500
VA6	1 / 216	42	10	80	100	61	7.290
VA7	1 / 216	42	10	80	200	61	6.110
VA8	1 / 216	50	10	110	100	73	4.610
VA9	1 / 216	43	10	110	200	62	6.750

In der ersten Versuchsreihe wurde die Formulierung **Schaum 2** auf das Polyestergewebe appliziert (200 g/l, 40 – 50 g/m²) und bei der Kalandrierung der Druck konstant gelassen sowie die Temperatur variiert. Erwartungsgemäß wurde die Schaumbeschichtung mit steigender Temperatur kompakter und die Wasserdampfdurchlässigkeit sank. Die Auswertung der REM-Bilder zeigte, dass bei den Versuchen **VA4** und **VA5** eine geschlossene Oberfläche erhalten wurde. Jedoch war im Querschnitt kaum noch eine Porenstruktur zu erkennen. In allen Fällen konnte keine Wasserdichtheit festgestellt werden. Aus diesem Grund wurden die weiteren Versuche mit der Formulierung **Schaum 1** durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurden jeweils zwei Drücke und zwei Temperaturen getestet. Die geprüften Wasserdichtheiten waren bei allen Versuchen nahezu gleich.

Als beste Variante stellte sich der Versuch **VA6** mit einem Druck von 100 N/mm bei einer Temperatur von 80 °C heraus. Ein Vergleich der REM-Aufnahmen zeigte die Ähnlichkeit mit vergleichbaren Proben der Laboranlage (siehe Abbildung 19). Beim Muster von der Laboranlage war die Oberfläche noch offenerporiger. In den Querschnittsaufnahmen ist erkennbar, dass bei der Probe von der Produktionsanlage das Textil stärker kompaktiert wurde. Beide Schaumstriche weisen in etwa die gleiche Dicke auf. Die Variante **VA6** wurde für die Deckstrichversuche im Labormaßstab verwendet.

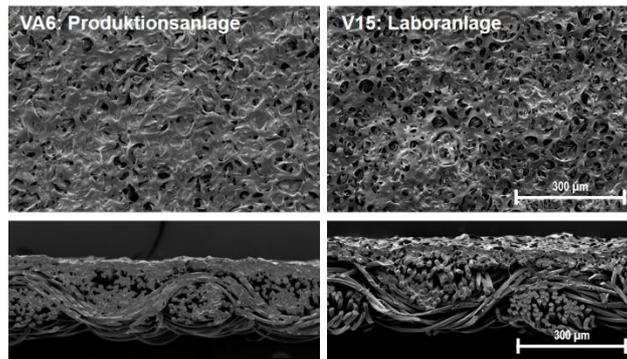


Abbildung 19: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) und Probenquerschnitt von **VA6** und **V15**. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Deckstrich

Die ersten Produktionsversuche zum Deckstrichauftrag wurden im Rahmen einer Versuchsreihe mit dem Test der Formulierung **Schaum 3** und der Applikation auf **Polyamid-** und **Polyestergewebe** durchgeführt. Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurde auch die Waschbeständigkeit (5 x 60 °C + Tumbler Trocknung bei 70 °C) untersucht. In Tabelle 10 sind die Versuche zur Schaumbeschichtung zusammengefasst. Das Schaumlitergewicht wurde jeweils auf 216 g/l und die Bahngeschwindigkeit auf 10 m/min eingestellt.

Tabelle 10: Zusammenfassung der Schaumbeschichtungsversuche an der Produktionsanlage sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR) vor und nach den Waschzyklen (**PES = Polyester**, **PA = Polyamid**gewebe).

Ver-such	Tex-til	Schaum-formulie-rung	Auftrags-gewicht in g/m ²	WP (3. Tropfen) in mbar		MVTR in g/m ² 24 h	
				vor der Wäsche	nach der Wäsche	vor der Wäsche	nach der Wäsche
VA10	PA	3	51	38	57	6.690	7.760
VA11	PA	1	40	56	66	6.710	7.690
VA12	PES	1	48	71	84	7.570	8.100
VA13	PES	1	42	53	85	8.070	10.940

Die erhaltenen Ergebnisse zeigten keinen signifikanten Einfluss des Textilmaterials auf die Prüfwerte. Ebenso hatte die Verringerung der Auftragsmenge nur einen leicht positiven Effekt auf die Wasserdampfdurchlässigkeit. Generell waren die Wasserdichtheiten mit denen der Laborversuche vergleichbar. Die Wasserdampfdurchlässigkeiten waren jedoch geringer. Dies lag wahrscheinlich an der Verwendung des Produktionskalenders, der stärker komprimiert (insbesondere das Textil) als der Laborlaminator. Es konnte eine Waschpermanenz nachgewiesen werden. Die Wäsche hatte sogar einen leichten positiven Einfluss auf die Wasserdichtheit und Wasserdampfdurchlässigkeit.

Auf die erhaltenen Schaumbeschichtungen wurde der **Deckstrich 4mod** mittels

Streichbeschichtung (Rakel über Walze) appliziert. In Vorversuchen wurde der Rakelspalt dahingehend variiert, dass Auftragsgewichte zwischen 20 g/m² und 40 g/m² realisiert werden konnten. Der Auftrag erfolgte bei einer Warengeschwindigkeit von 5 m/min und es wurde stufenweise von 80 °C bis 160 °C getrocknet/kondensiert. Die Muster wurden anschließend mit **ECOPERL 4** mittels pflatschen hydrophobiert. Dabei wurde die Einstellung eines vorhandenen Ausrüstungsprozesses (laufende Produktion) verwendet. Die Versuche sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Exemplarisch sind die REM-Aufnahmen der Proben **VA10/VA14** und **VA13/VA17** in Abbildung 20 dargestellt.

Tabelle 11: Zusammenfassung der Deckstrichversuche an der Produktionsanlage sowie die zugehörigen Wasserdichtheiten (WP) und Wasserdampfdurchlässigkeiten (MVTR) (**PES = Polyestergewebe, PA = Polyamidgewebe**).

Ver-such	Sub-strat	Deck-strich	Auftrags-gewicht in g/m ²	WP (3. Tropfen) in mbar		MVTR in g/m ² 24 h	
				vor der Wäsche	nach der Wäsche	vor der Wäsche	nach der Wäsche
VA14	VA10	4mod	29	781	588	3.190	2.603
VA15	VA11	4mod	35	548	113	4.520	3.390
VA16	VA12	4mod	21	527	-	4.430	-
VA17	VA13	4mod	20	790	1.068	4.860	1.790

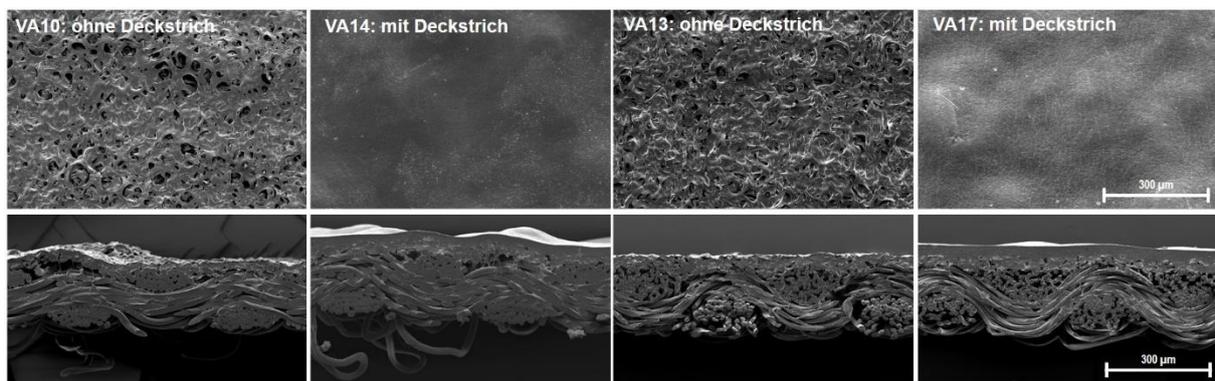


Abbildung 20: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) und Probenquerschnitt von **VA10/VA14** und **VA13/VA17**. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Durch die Aufbringung des Deckstrichs konnte bei allen Proben eine gute Wasserdichtheit erzielt werden. Die Erhöhung der Auftragsmenge hatte dabei keinen positiven Einfluss. Bei den Proben auf dem **Polyamidgewebe** sank die Wasserdichtheit nach dem Waschzyklus merklich. Dies lag sehr wahrscheinlich an der schon rauen Oberfläche des Gewebes. Dies ist in Form von abstehenden Fasern in den REM-Aufnahmen der Proben erkennbar. Nach der Schaumbeschichtung war die Rauheit noch deutlich ausgeprägter. Erwartungsgemäß nahm bei allen Proben die Wasserdampfdurchlässigkeit durch die Aufbringung des Deckstrichs ab. Zusätzlich sanken die MVTR-Werte durch die Waschbehandlung. Aus den REM-Aufnahmen wird ersichtlich, dass die Oberflächen der Proben mit Deckstrich geschlossen und einheitlich

waren.

Das größte Problem des Deckstrichs war die „Schmierigkeit“ bei Wasserkontakt. Dies führte dazu, dass die Probe **VA16** beim Waschprozess komplett zusammenklebte und keine Prüfungen mehr damit durchgeführt werden konnten. Wie bereits beschrieben, war dies der Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung des Deckstrichs durch die CHT.

Zwischenfazit

Es konnten alle Prozesse erfolgreich vom Labormaßstab auf die Produktionsanlage übertragen werden. Durch die Optimierung der einzelnen Prozessparameter wurden Wasserdichtheiten von über 1.000 mbar bei gleichzeitigem Erhalt der Wasserdampfdurchlässigkeit erzielt werden. Die Oberflächen waren gleichmäßig, geschlossen und frei von Poren.

Ansatzpunkt für die weiterführende Prozessoptimierung war die Erhöhung der MVTR-Werte und Wasserdichtheiten bei der Verwendung der Formulierung **Schaum 3**. Durch den Einsatz des entwickelten **Deckstrich 5** sollte die Schmierigkeit und das Zusammenkleben verhindert werden.

Optimierung des Produktionsprozesses

Entsprechend des Zwischenfazits wurde der Produktionsprozess angepasst und hinsichtlich der gesetzten Anforderungen optimiert. Die abschließenden Produktionsversuche dieses Projektes sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Die Bahngeschwindigkeit betrug 10 m/min. Zum Erhöhen der Wasserdampfdurchlässigkeit wurde die Kalandertemperatur auf 60 °C abgesenkt.

Tabelle 12: Zusammenfassung der abschließenden Produktionsversuche (**PES = Polyestergerewebe, PA = Polyamidgerewebe**).

Ver-such	Tex-til	Schaumstrich		Kalandrierung		Deckstrich	
		Formulie-rung	Auftrags-gewicht in g/m ²	Tempera-tur in °C	Druck in N/mm	Formu-lierung	Auftrags-gewicht in g/m ²
VA18	PA	3	40	60	100	5	20
VA19	PES	3	40	60	100	5	20

Für eine spätere Anwendung im Bereich der Behörden- und Funktionsbekleidung wurde teilweise auf die jeweilige Deckstrichseite ein PES-Charmeuse aufkaschiert (**VA20** und **VA21**) und textilseitig mit ECOPERL 4 hydrophobiert (gepfaltscht). Die zusätzliche leichte Charmeuselage dient dem mechanischen Schutz der Beschichtung und ist im Bereich der Funktionsbeschichtungen/-lamine üblich. Des Weiteren erhöht es den Tragekomfort, da somit kein direkter Hautkontakt zur glatten Beschichtung besteht. Die erhaltenen Materialien wurden Waschzyklen (40 °C und 60 °C Wascht Temperatur) und die Lamine auch einer chemischen Reinigung unterzogen. Von den Proben wurde die Wasserdichtheit und die Wasserdampfdurchlässigkeit (MVTR) sowie der R_{et}-Wert bestimmt. Die Prüfwerte sind in Tabelle 13 zusammengefasst. In Abbildung 21 sind die REM-Aufnahmen der Proben **VA18** und **VA19** vor

sowie nach fünf Wäschen bei 60 °C aufgezeigt.

Tabelle 13: Zusammenfassung der Prüfergebnisse der abschließenden Produktionsversuche (**VA20** = **VA18** + Charmeuse und **VA21** = **VA19** + Charmeuse; * = nur bis 1.000 mbar geprüft).

Ver-such	WP (3. Tropfen) in mbar				MVTR in g/m ² 24 h / Ret in m ² Pa/W			
	vor der Wäsche	40 °C Wä-sche	60 °C Wäsche	Chem. Reinigung	vor der Wäsche	40 °C Wäsche	60 °C Wäsche	Chem. Reinigung
VA18	1.770	2.000	526	-	4.430 / 17,5	2.880 / 27,2	3.670 / 21,1	-
VA19	2.000	1.570	2.000	-	4.110 / 18,8	2.450 / 32,1	3.040 / 25,6	-
VA20	980	722	696	800	2.510 / 31,3	2.640 / 29,6	2.040 / 38,5	2.940 / 26,5
VA21	>1.000*	>1.000*	>1.000*	>1.000*	2.060 / 38,4	1.750 / 46,8	2.160 / 36,4	2.800 / 27,7

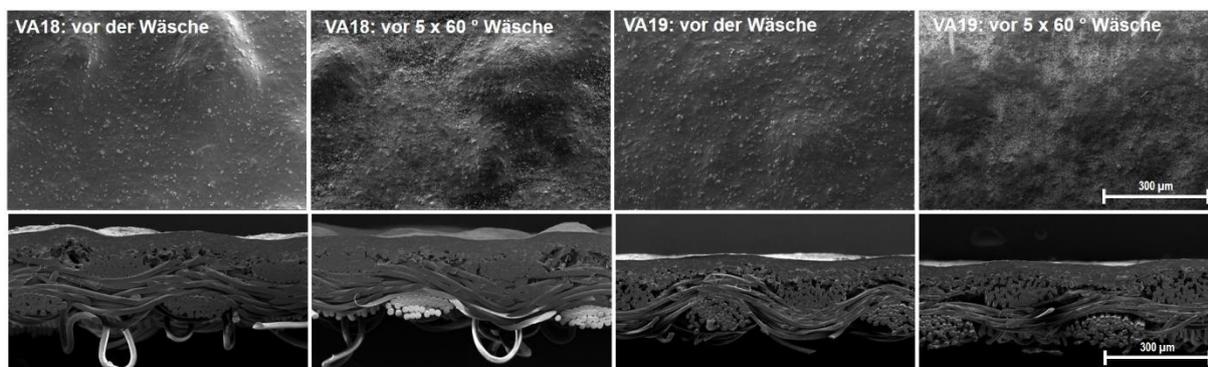


Abbildung 21: REM-Aufnahmen der Probenoberflächen (Deckstrichseite) und Probenquerschnitt von **VA18** und **VA19** vor sowie nach fünf Wäschen bei 60 °C. Die Bilder wurden bei 5 kV mit 500-facher Vergrößerung aufgenommen.

Es konnte in allen Fällen, auch bei den Laminaten eine erhöhte Wasserdichtheit, z. T. mit Werten von > 1.000 mbar erzielt werden. Gleichzeitig blieben die Verbunde mit MVTR-Werten von > 2.000 g/m²24 h wasserdampfdurchlässig. Der MVTR-Wert der Lamine ist durch die zusätzlich aufgeklebte Charmeuselage stets geringer als bei den reinen Beschichtungssystemen. Die Oberflächen (Deckstrich) waren in allen Fällen nicht mehr klebrig, so dass keine Probleme bei den Waschversuchen auftraten. Durch die Reinigungszyklen verringerte sich die Wasserdichtheit und auch die Wasserdampfdurchlässigkeit. Aufgrund der raueren Oberfläche des **Polyamidgewebes** war dieser Effekt hier stärker ausgeprägt als beim **Polyestergewebe**. Im Vergleich der Reinigungsarten war die chemische Reinigung am schonendsten für diese Materialien.

In den REM-Aufnahmen war zu sehen, dass auch nach den Waschzyklen noch eine gleichmäßig geschlossene Oberfläche vorlag und die Schaumstruktur erhalten blieb.

Es konnte der Meilenstein MS5 „Technologie zur Schaumbeschichtung, Kompaktierung und dem Deckstrichauftrag auf der Produktionsanlage“ erzielt werden.

2.3.5. Entwicklung der Nahtabdichtung

Im Gegensatz zum aktuellen Stand der Technik setzt die Firma Trans-Textil bei der Nahtabdichtung auf selbst entwickelte Tapes, welche ohne den Einsatz von Lösemitteln auf rein wässriger Basis hergestellt werden. In ersten Handversuchen wurde die Haftung der Tapes auf Schaumbeschichtungsmustern mit dem **Deckstrich 1** getestet. Dabei wurden die Parameter bei der Applikation der Tapes (Geschwindigkeit, Druck, Temperatur) variiert und optimiert. Nach anfänglichen Haftungsschwierigkeiten wurde letztendlich eine Einstellung gefunden, die eine gute Verklebung der Tapes garantierte. Dies wurde durch das Bestehen des Abziehtests bestätigt.

Nach den ersten positiven Tests wurde die Anwendung der Tapes an Mustern der Produktionsversuche **VA8** und **VA9** (beides kalandrierter **Schaum 1** ohne Deckstrich) getestet. Dazu wurden jeweils zwei identische Muster miteinander vernäht und die entstandene Naht mit dem Tape thermisch verschweißt. Anschließend wurden die Muster 3 x bei 40 °C gewaschen und die Haftfestigkeit der Nahtabdichtungsbänder beurteilt. In beiden Fällen konnten keine Ablöseerscheinungen festgestellt werden. Damit wurde die prinzipielle Eignung der entwickelten Tapes nachgewiesen.

Im nächsten Schritt wurde die Anhaftung an Mustern mit der Schaumformulierung **Schaum 3** überprüft. Mit dem Produktionsmustern **VA10** wurden die gleichen Applikationstests, wie bereits beschrieben, durchgeführt. Dabei mussten die Parameter zum Aufbringen und Verschweißen der Tapes angepasst werden. Es gelang das Tape haftfest aufzubringen. Nach dem Vernähen und Tapes wurden die Proben fünf Waschzyklen bei 60 °C unterzogen, wobei kein Ablösen der Tapes beobachtet werden konnte.

Analog zu bislang durchgeführten Nahtabdichtungstest wurde mit den Proben der Produktionsversuche **VA14, 15, 16** und **17** (alle mit **Deckstrich 4mod**) verfahren. In diesen Fällen wurde ein Ablösen der Nahtabdichtungsbänder nach den Waschzyklen beobachtet, daraufhin wurde der Deckstrich optimiert.

Die finalen Untersuchungen wurden mit den Proben **VA18, 19, 20** und **21** (**Schaum 3, Deckstrich 5**) durchgeführt. Die Muster wurden vernäht und getapet und anschließend gewaschen (5 x 40 °C bzw. 5 x 50 °C). In allen Fällen wurden beständige Nahtabdichtungen erhalten, welche durch den Wasserdichtheitstest an der Nahtprüfstation bestätigt wurde. Eine Zusammenfassung der Versuche und Prüfungen zur Nahtabdichtung ist in Tabelle 14 gegeben.

Es konnte der Meilenstein MS4 „Technologie und Bänder für die Nahtabdichtung“ erreicht werden.

Tabelle 14: Zusammenfassung der Versuche und Prüfungen zur Nahtabdichtung.

Versuch	Schaum	Deckstrich	Abziehtest	Wasserdichtheit (2min; 0,2 bar)		
				original	nach 5 x 40°C Wäsche	nach 5 x 60°C Wäsche
VA8, VA9, VA11, VA12, VA13	Schaum 1	ohne	bestanden	nicht geprüft	nicht geprüft	nicht geprüft
VA10	Schaum 3	ohne	bestanden	nicht geprüft	nicht geprüft	nicht geprüft
VA14	Schaum 3	Deckstrich 4mod	bestanden	bestanden	nicht geprüft	nicht geprüft
VA15, VA16, VA17	Schaum 1	Deckstrich 4mod	bestanden	bestanden	nicht geprüft	nicht geprüft
VA18, VA19	Schaum 3	Deckstrich 5	bestanden	bestanden	bestanden	bestanden
VA20, VA21	Schaum 3	Deckstrich 5	bestanden	bestanden	bestanden	bestanden

2.3.6. Herstellung von Funktionsmustern, Demonstratorbauteilen und des prototypischen Bekleidungsstücks

Mit den abschließenden optimierten Produktionsversuchen wurden größere Menge an Textil beschichtet. Zum einen wurden diese Materialien für die verschiedenen Waschprüfungen (5 x 60 °C und 5 x 40 °C) und den anschließenden Prüfungen verwendet. Zum anderen wurden mittels Screenprint-Technologie und Hotmeltklebstoff die 3. Lage appliziert. Als Textil wurde eine leichtes Charmeuse-Kettengewirke ausgewählt. Die daraus entstandenen 3-Lagen-Lamine wurden ebenfalls umfassend geprüft, gewaschen und zusätzlich chemisch gereinigt.

Aus den 3-Lagenlaminaten wurden Hardshelljacken konfektioniert, die diesem Projekt als prototypisches Bekleidungsstück/Demonstrator dienen. In der Verarbeitung der Materialien konnten keine gravierenden Unterschiede zu traditionellen Laminaten festgestellt werden. Sie ließen sich mit den traditionellen Konfektionsmethoden Nähen und Heißluftschweißen gut verarbeiten. In Abbildung 23 (Absatz 2.5. Fazit/Ausblick) ist ein Foto dieses Prototyps gezeigt.

Der Meilenstein MS6 „Fertiges prototypisches Bekleidungsstück“ wurde erreicht.

2.3.7. Ökologische Prozessbewertung

Abluftemissionen

Ein erheblicher Vorteil der entwickelten Beschichtungssysteme ist der komplette Verzicht auf lösemittelhaltige Formulierungen. Stattdessen wurden wässrige Systeme eingesetzt. Zum Nachweis wurde der Gesamtkohlenstoffanteil der Abluft bestimmt. Die Messung erfolgte direkt

an der Abluftleitung über dem Trockenkanal der Laborbeschichtungsanlage (siehe Abbildung 22). Für die Berechnung des Gesamtkohlenstoffanteils wurden die Parameter Messwert des C-Messgerätes (= FID-Anzeige in ppm; mit dem Kalibriergas Propan; Molares Volumen = 22,4 mol/l), der Volumenstrom der Abluft (an der Messstelle) und die Abgastemperatur (an der Messstelle) benötigt. Der Volumenstrom (V_{real} in m^3/h) berechnet sich aus der Abluftgeschwindigkeit (Messdaten des Anemometers) und dem Rohrdurchmesser am Messpunkt. Mit Hilfe der Abgastemperatur kann der Volumenstrom (V_{Norm}) in Nm^3/h umgerechnet werden. Durch das Einsetzen der ermittelten Werte in die folgenden Gleichungen 1 bis 3 wurde der Gesamtkohlenstoffgehalt in mg/Nm^3 berechnet.

$$c_{\text{Kohlenstoff}} \left(\frac{\text{mg C}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{C-Anzahl Propan} \times 12}{\text{Molares Volumen Propan}} \times \text{FID - Anzeige (ppm)} \quad (1)$$

$$c_{\text{Kohlenstoff}} \left(\frac{\text{mg C}}{\text{m}^3} \right) = \frac{3 \times 12}{22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol}}} \times \text{FID - Anzeige (ppm)} \quad (2)$$

$$c_{\text{Kohlenstoff Norm}} \left(\frac{\text{mg C}}{\text{Nm}^3} \right) = \frac{c_{\text{Kohlenstoff}} \left(\frac{\text{mg C}}{\text{m}^3} \right)}{V_{\text{Norm}} \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right)} \times V_{\text{real}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \quad (3)$$

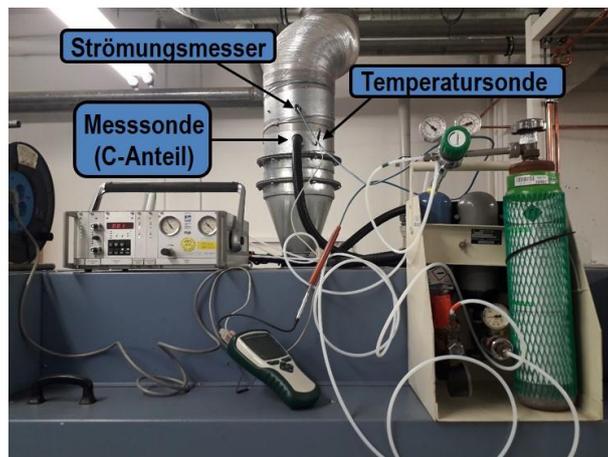


Abbildung 22: Foto der Messanordnung am Abluftkanal der Laborbeschichtungsanlage zur Bestimmung des Gesamtkohlenstoffanteils.

Die Messungen wurden bei den folgenden Versuchen an der Laborbeschichtungsanlage durchgeführt:

Schaumbeschichtung: Formulierung **Schaum 3** mit $201 \text{ g}/\text{m}^2$, Auftragsgewicht = $40 \text{ g}/\text{m}^2$, Trocknung für 2 min bei $90 \text{ }^\circ\text{C}$

Kalandrierung des Schaums: $110 \text{ }^\circ\text{C}$ bei 6,4 bar mit 1 m/min, anschließende Kondensation bei $160 \text{ }^\circ\text{C}$ für 1,5 min

Deckstrich: Formulierung **Deckstrich 5** mit einem Auftragsgewicht von $16 \text{ g}/\text{m}^2$, Trocknung für 1,5 min bei $100 \text{ }^\circ\text{C}$ und Kondensation für 1,5 min bei $160 \text{ }^\circ\text{C}$

Hydrophobierung: Formulierung **ECOPERL 4** mit einem Auftragsgewicht von 8 g/m², Trocknung für 1,5 min bei 100 °C und Kondensation für 1,5 min bei 160 °C

Die erhaltenen Messwerte sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Als Blindwerte wurde das reine unbeschichtete Polyestergewebe für 1,5 min bei 90 °C (Blindwert 1) und für 1,5 min bei 160 °C (Blindwert 2) durch die Laborbeschichtungsanlage gefahren.

Tabelle 15: Ergebnisse der Abluftuntersuchungen.

Prozessschritt	FID-Anzeige in ppm	Ablufttemperatur in °C	Abluftstrom in m ³ /h	Abluftstrom in Nm ³ /h	Gesamtkohlenstoffanteil in mg/Nm ³
Blindwert 1	1	33,3	198,96	177,33	1,80
Blindwert 2	1	57,9	191,81	158,24	1,95
Trocknung Schaumstrich	2	33,3	198,96	177,33	3,61
Kondensation Schaumstrich	3	57,9	191,81	158,24	5,84
Trocknung Deckstrich	30	38,1	219,00	192,18	54,94
Kondensation Deckstrich	7	50,0	216,86	183,29	13,31
Trocknung Hydrophobierung	1	36,6	203,26	179,23	1,82
Kondensation Hydrophobierung	1	49,8	250,49	211,85	1,90

Anhand der ermittelten Werte zum Gesamtkohlenstoffgehalt wird ersichtlich, dass die Emissionsbelastung des gesamten Prozesses sehr gering war. Die Trocknung und Kondensation des Schaumstrichs und der Hydrophobierung sind im Anbetracht der Blindwerte vernachlässigbar. Einzig die Trocknung und Kondensation des Deckstrichs zeigten einen, wenn auch sehr geringen, Gesamtkohlenstoffanteil an. Ursache könnten die in der Formulierung enthaltenen Verdicker oder Entlüfteradditive (verhindern die Bildung von Luftblasen) sein, die teilweise mit verdampfen.

Zum Vergleich liegen die Werte der FID-Anzeige bei der Trocknung von lösemittelhaltigen Systemen zwischen 500 ppm und 600 ppm (Messwernerfahrung des STFI bei Industriemessungen/Kundenaufträgen). Daraus resultiert ein Gesamtkohlenstoffanteil von 900 mg/Nm³ – 1.080 mg/Nm³.

Somit verringert die Projektentwicklung des Schaumbeschichtungssystems die Emissionen um ca. das 13-fache, im Vergleich zu einer klassischen Lösemittelbeschichtung.

Verglichen mit den Lösemittelsystemen ist keine intensive Abluftreinigung durch Nachverbrennung (CO₂-Emission!) notwendig. Dies verringert vor allem den CO₂-Ausstoß des Prozesses und verbessert den Carbon-Footprint der Produkte um bis zu 85 % (Vergleich mit Pro-

duktinformation der Covestro AG, Leverkusen, zu wässrigen PUR-Beschichtungsformulierungen) und wirkt der globalen Erwärmung entgegen.

Stoff- und Energieströme

Die im entwickelten Prozess wichtigsten Aspekte bei den Stoffströmen waren der Transport, die Lagerung und die Entsorgung. Durch die Verwendung von rein wässrigen Systemen sind die Formulierungen kein Gefahrgut mehr, wie z. B. die Lösemittelsysteme (leichtentzündlich, gesundheitsschädlich und z. T. umweltgefährlich). Es ist somit beim Umgang nicht auf besondere Präventionen, Reaktionen und Lagerbedingungen zu achten. Die Arbeitssicherheit wird dadurch deutlich verbessert. Bei der Lagerung muss nicht, wie bei den Lösemittelsystemen, durchgängig belüftet werden. Auch dies senkt den Energieverbrauch und spart Kosten. Im Prozess nicht verwendete oder nicht mehr verwendbare Formulierungsreste müssen entsorgt werden. Da die entwickelten wässrigen Formulierungen kein Gefahrgut darstellen, wäre eine Entsorgung über den reinen Hausmüll möglich. Dies ist jedoch unwirtschaftlich, da die Reste zunächst getrocknet werden müssen und damit zusätzliche unnötige Energie aufgewendet werden muss. Folglich sollten möglichst keine Formulierungsreste entstehen und eventuelle Reste werden über Gefahrgutbehälter entsorgt.

Die Reinigung von Ansatzgefäßen, Schaummischer und Anlageteilen von Formulierungsresten kann mit Wasser, anstatt mit speziellen Reinigern oder Lösemitteln, erfolgen. Dies verbessert die Arbeitsplatzsicherheit der Arbeiter. Die Spülabwässer werden in Absatzbecken gesammelt, wobei der Bodensatz regelmäßig abgepumpt und analog zu den Pastenresten entsorgt wird.

Neben den bereits erwähnten Energieeinsparungen war die Betrachtung der Energieströme komplizierter. Die Trocken- und Kondensationstemperaturen sind bei den Lösemittelprozesse gleich zu denen der wässrigen Formulierungen. Jedoch benötigen die Lösemittel oft kürzere Trocknungszeiten. Das bedeutet, dass die Bahngeschwindigkeit der Anlage beim Prozess schneller gewählt werden kann.

Eine direkte Energiebilanzierung des entwickelten Prozesses im Vergleich zu einer Lösemittelbeschichtung war im Rahmen des Projektes nicht möglich. Bei der Firma Trans-Textil werden ausschließlich wässrige System verarbeitet und auch am STFI war keine Möglichkeit zur Verarbeitung von Lösemitteln gegeben (keine Explosionsgeschützte Anlagen vorhanden). Damit konnten keine Referenzdaten ermittelt werden.

Arbeitsplatzsicherheit

Durch die Substitution von lösemittelhaltigen Systemen durch wasserbasierte Formulierungen wird die Arbeitsplatzsicherheit signifikant erhöht. Es wird das Risiko zur Bildung von entzündlichen Gemischen (Lösemittel) während des Beschichtungsprozesses, dem Transport und der Entsorgung auf Null minimiert. Bei denselben Prozessen wird die Belastung der Arbeiter durch die gesundheitsschädlichen Lösemittel stark verbessert. Das Arbeiten mit den Formulierungen bedingt einen geringeren Aufwand bezüglich der persönlichen Schutzausrüstung der Arbeiter

und trägt dazu bei, dass sich dieser freier bewegen kann und weniger eingeschränkt wird. Hinzu kommt, dass Anteile an Lösemittelresten im fertigen Produkt ausgeschlossen werden können. Dies ist gerade für den potenziellen Anwender der Bekleidung von Vorteil.

2.4. Öffentlichkeitsarbeit/Veröffentlichungen/Vorträge

Inhalte dieses Forschungsvorhabens wurden in Form einer Pressemitteilung (23. Januar 2017, Nr. 5/2018, AZ 33820) der Deutschen Bundesstiftung Umwelt veröffentlicht. Einen Überblick zu diesem Projekt wurde von Dr. Hempel auf der Fachkonferenz „Nachhaltige Outdoor-Textilien“ 14. März in Bremen gegeben. Auf den Homepages der Projektpartner Trans-Textil und STFI wurde über den Start des Projektes sowie den Inhalten des Forschungsvorhabens berichtet. Nach der Abgabe des Schlussberichts wird eine Zusammenfassung des Forschungsvorhabens auf den Homepages der Projektpartner veröffentlicht. Der Projektdemonstrator wird auf den Ständen des STFI und von Trans-Textil bei der internationalen Leitmesse für Technische Textilien und Vliesstoffe der techtexil in Frankfurt a. M. (4. – 7. Mai 2021) präsentiert. Wesentliche Projektergebnisse werden in Form eines Vortragsvorschlages für die Aachen-Dresdner-Denkendorfer International Textile Conference (9./10. November 2021) eingereicht.

2.5. Fazit/Ausblick

Als Ziel des Projektes stand die Entwicklung lösemittelfreier, rein wässriger Beschichtungssysteme sowie der Technologien zu deren Applikation für den Schutztextilbereich. Der innovative technologische Ansatz bestand in der Kombination aus Schaumbeschichtung, einer Oberflächenverdichtung mittels mechanischer Kalandrierung und dem Auftrag eines Deckstriches zum Erzielen einer atmungsaktiven, wasserdichten und waschpermanenten Textilbeschichtung. In Anlehnung an die Normen DIN EN 343 „Schutzkleidung - Schutz gegen Regen“ und 469 „Feuerwehr - Leistungsanforderungen für Schutzkleidung für Tätigkeiten der Feuerwehr“ wurden Atmungsaktivitäten von $R_{et} \leq 20 \text{ m}^2\text{Pa/W}$ bzw. $MVTR \geq 3.000 \text{ g/m}^2\text{24 h}$ und Wasserdichtheiten von $\geq 0,13 \text{ bar}$ als Mindestanforderungen angestrebt.

Im Rahmen dieses Projektes ist es gelungen, lösemittelfreie, rein wasserbasierte Formulierungen für die Schaumbeschichtung und den Deckstrich sowie deren Applikationstechnologien zu entwickeln. Damit konnten atmungsaktive, wasserdichte und waschpermanente Textilbeschichtungen hergestellt werden. Die entwickelten Verbunde bestanden aus:

- Textil (**Polyester-** und **Polyamidgewebe**)
- kalandrierten Schaumbeschichtung (**Schaum 3**, ~ 200 g/l, 40 g/m²)
- Deckstrich (**Deckstrich 5**, 20 g/m²)
- textilseitige Hydrophobierung (wasserbasiert, fluorkarbonfrei, **ECOPERL 4**)

Die durchgeführten Arbeiten zeigten, dass der innovative technologische Ansatz der Kombination aus Schaumbeschichtung, einer Oberflächenverdichtung mittels mechanischer

Kalandrierung und dem Auftrag eines Deckstrichs umsetzbar ist.

Die Prüfergebnisse der entwickelten Beschichtungen ergaben, dass die gesetzten Mindestanforderungen im Originalzustand, aber auch nach fünf Reinigungszyklen erreicht werden können. Die MVTR-Werte liegen bei $> 3.000 \text{ g/m}^2\text{24 h}$ und die Wasserdichtheiten bei $> 500 \text{ mbar}$. Lediglich beim R_{et} liegen die Werte leicht über den gesetzten Anforderungen.

Hinsichtlich der angestrebten höheren Ziele konnten Wasserdichtheiten von über z. T. $> 2.000 \text{ mbar}$ erreicht werden. Bei den Atmungsaktivitäten konnten die Neuentwicklungen keine MVTR-Werte von $> 10.000 \text{ g/m}^2\text{24 h}$ bzw. R_{et} -Werte $< 10 \text{ m}^2\text{Pa/W}$ erreichen. Im Vergleich zu den Referenzlaminaten (siehe Tabelle 1) wurden ähnliche Wasserdichtheiten erzielt, die MVTR-Werte der Schaumbeschichtungen waren aber stets geringer.

Im Projekt konnte zeigte sich wieder, dass Wasserdichtheit und Atmungsaktivität stark miteinander verknüpft sind, eine steigende Wasserdichtheit war stets mit einer sinkenden Atmungsaktivität verbunden. Beide Eigenschaften waren besonders von der Intensität der Kalandrierung und der Dicke des Deckstriches (Auftragsgewicht) abhängig. Durch eine weiterführende Abstimmung dieser beiden Faktoren und einem Finetuning an den Formulierungen könnten die Wasserdampfdurchlässigkeiten, bei ausreichenden Wasserdichtheiten, erhöht werden. Dies bildet einen Ansatzpunkt für weiterführende Forschungstätigkeiten.

Auf die beschichteten Textilien wurden, zum mechanischen Schutz, mittels Laminierprozess leichte Charmeuse-Textilien als Innenlage aufgebracht. Aus einem der hergestellten Lamine wurde unter Verwendung der entwickelten Nahtabdichtungstechnologie eine dreilagige Regenjacke als Projektdemonstrator konfektioniert.

Im Forschungsvorhaben konnte das Potenzial einer wässrigen Schaumbeschichtung aufgezeigt werden. Daraus lassen sich weitere Anwendungsfelder im Bereich der Wärmedämmung (z. B. Hitzeschutztextilien) oder auch bei den Filtertextilien (z. B. für Masken) ableiten.

Das Projektziel wurde erreicht.



Abbildung 23: Foto des konfektionierten Projektdemonstrators „Regenjacke“.