

An die
 Deutsche Bundesstiftung
 Umwelt An der Bornau 2
 49090 Osnabrück

30/09/2023		Schlussbericht der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az.	38260/01	Referat	31	Fördersumme	120.587 €
Antragstitel	MoMenT (Monomaterial-Membran-Textilien) Entwicklung von Monomaterialkonzepten für recyclingfähigen Membrantextilien am Beispiel von Schuhen und Arbeitskleidung				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
18 Monate	01.01.2023	30.06.2024			
Bewilligungsempfänger	Sympatex Technologies GmbH (STX) Feringastrasse 7a 85774 Unterföhring Deutschland +49 (0) 89 / 9400 58 0				
	Projektleitung / Ansprechpartner				
	Nicole Hühn nicole.huehn@sympatex.com Dr. Martin Mayershofer martin.mayershofer@sympatex.com				
Kooperationspartner	Hochschule Niederrhein, Forschungsinstitut für Textil und Bekleidung (FTB) Richard-Wagner-Str. 97 41065 Mönchengladbach Deutschland +49 (0) 2161 / 186 6110				
	Projektleitung / Ansprechpartner				
	Prof. Dr. Robert Groten robert.groten@hs-niederrhein.de M. Sc. Isabel Hofmann isabel.hofmann@hs-niederrhein.de				

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vorliegende Garnmaterialien für Versuche.

Tabelle 2: Mikroskopaufnahmen der vorliegenden Garnmaterialien (LiM = LichtMikroskop, LaM = LaserMikroskop).

Tabelle :3: Auf der Laboranlage hergestellte Muster der Maschenwaren.

Tabelle 4: Ergebnisse der Scheuerversuche. Die erheblich geringere Beständigkeit von Polyester gegenüber Abrieb ist klar zu erkennen.

Tabelle 5: Mikroskopaufnahmen der ungeprüften Strickproben (Lichtmikroskop).

Tabelle 6: Mikroskopaufnahmen der nass geschuerten Strickproben.
(Lichtmikroskop)

Tabelle 7: Vergleich technischer Produktparameter der Lamine **5A/5B**, **6A/6B** und **7A/7B**.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ergebnisse der Scheuertests nach den in Tabelle 4 genannten Scheuertouren.

Abbildung 2: Beispielhafte Ansicht eines Testschuhs für Trageversuche.

Abbildung 3: Lichtmikroskopische Aufnahmen des PES/EL-Gestricks vor (links) und nach (rechts) Trageversuch.

1 Kurzfassung

Das im Januar 2023 gestartete Projekt „MoMenT“ hatte zum Ziel, eine PA-Wirkware mittels scheuerbeständiger PES-Garne sowie den eingesetzten PU-Kleber mittels PES-Kleber zu ersetzen, um ein sortenreines und somit recyclingfähiges Verbundmaterial herzustellen. Die im Arbeitspaket 1 festgelegten Aufgaben zur Definition des Anforderungsprofils und Auswahl sowie Spezifikation der Materialien erfolgten im zeitlich gesetzten Rahmen. Erhebliche Herausforderungen gab es bei der Beschaffung des Garns sowie der Verarbeitung der beschafften Materialien. Da der Erwerb der angedachten, sehr feinen und hochfesten PES-Monofilamente bereits im fünfstelligen EUR-Bereich gelegen hätte, wurden zuerst Vorversuche im Kleinstmaßstab gestartet. Diese dienten dem besseren Verständnis des Potentials für hochfeste PES-Garne. Um die Vorversuche durchzuführen, mussten einige aufwendige Vorbereitungsmaßnahmen, wie bspw. das Beschaffen, resp. Ausleihen eines speziellen Strickkopfs durchgeführt werden, weshalb das Arbeitspaket 2, die Entwicklung der Maschenwaren, mit leichter Verspätung gestartet werden konnte. Die Untersuchung der Gestricke hat ergeben, dass diese weit unter den gesetzten Zielparametern zurückbleiben. Die mechanische Festigkeit der Garne, bzw. die Abriebbeständigkeit der Gestricke, ist unzureichend. Es wurde versucht, die mechanische Festigkeit zu erhöhen, indem das Garn doppelt gefacht wurde. Die dafür notwendige Umspulung auf zwei Spulen war aufgrund von geräteseitigen Limitierungen problematisch, konnte jedoch schlussendlich durchgeführt werden. Wiederholte Strickversuche mit dem doppelt gefachten Garn blieben jedoch leider erfolglos, da immer wieder zu Verknotungen und Garnrissen kam.

Zeitgleich wurden Kleberhersteller ausgewählt, kontaktiert und das Projektvorhaben dargestellt. Die starke Erhöhung des PES-Anteils im Kleber bringt nach Angaben der kontaktierten Kleberhersteller sowohl im Laminierprozess als auch bei den angestrebten Produkteigenschaften (u. a. hinsichtlich Gleichmäßigkeit des Kleberauftrags, Wasserdampfdurchlässigkeit und Steifigkeit) unvereinbare Eigenschaften des Haftvermittlers mit sich. Daher wurde entschieden, im Rahmen des Projektes im Vergleich zu den bislang standardmäßig genutzten Haftvermittlern lediglich Polyester-reichere, kommerziell verfügbare Varianten, jedoch nach wie vor mit einem gewissen Polyurethananteil, zu untersuchen. Zukünftige Recyclingversuche werden zeigen müssen, ob ein wenn auch reduzierter, aber dennoch verbleibender PU-Anteil im Laminat für ein wirtschaftliches und hochwertiges Recycling hinnehmbar ist. Die Ergebnisse der im Rahmen des Arbeitspaketes 5 durchgeführten Trageversuche wiesen darauf hin, dass Möglichkeiten bestehen könnten, die Ansprüche an die Abriebbeständigkeit der im Wesentlichen als Schutzschicht für die darunterliegende Membran dienenden Maschenwarenschicht für Schuh laminate zu senken. So könnten sich zukünftig vielleicht doch noch Wege eröffnen, die bislang an den Einsatz von PA geknüpften Anforderungen den in der Praxis notwendigen Gegebenheiten anzupassen und so evt. doch den Einsatz vollständig PES-basierter Maschenwaren in entsprechenden Schuh laminaten zu ermöglichen. Vertiefte zukünftige Trageversuche und Feldtests

und daraus abzuleitende praxisrelevante technische Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften und die Abriebbeständigkeit der Maschenware werden diesen Ansatz jedoch noch untermauern müssen.

Die zahlreich aufgetretenen Herausforderungen über den kompletten Projektzeitraum hinweg zeigen den nach wie vor vorhandenen hohen Entwicklungsbedarf sowie den erheblichen Innovationsgrad des Projektes auf, die weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten als notwendig und sinnvoll erscheinen lassen.

2 Einführung und Motivation

Das jährliche Aufkommen von Alttextilien beträgt in Deutschland rund 1,3 Mio. t bzw. 15 kg / Person, wovon im Jahr 2018 nur 12% recycelt wurden. Geschätzt werden etwa 23 Milliarden Schuhe jährlich hergestellt, wovon 95% auf Mülldeponien oder in Verbrennungsanlagen enden. Das werterhaltende Recycling für einfache funktionelle Bekleidungsstücke ist bereits technisch machbar. Schuhe zählen, wie Arbeitskleidung, zu komplexeren Funktionstextilien, für welche die Entwicklung des Recyclings noch am Anfang steht. Gerade bei Schuhen besteht die große Herausforderung des Recyclings in der Trennung einer beträchtlichen Materialmischung sowie einer unklaren Gesetzeslage des KrWG im Rahmen des CEAP.

Das Unternehmen Sympatex Technologies strebt an, eigene wasserdichte und gleichzeitig wasserdampfdurchlässige Booties für Schuhe recyclingfähig zu gestalten. Produkte des Schuh- und Arbeitsschutzbereiches müssen deutlich höheren Stabilitätsanforderungen entsprechen, weshalb bisher nur sehr dünne, mechanisch sehr beständige Polyamid-Textilien über einen Polyurethankleber mit der atmungsaktiven Polyester-Membran kombiniert werden. Ein solches, heterogenes Laminat ist jedoch nicht sortenrein recycelbar. Mechanisch weniger beanspruchte Bekleidungs-Laminat setzen bereits einen Verbund aus PES-Membran und PES-Textil ein. Kann dies auch für Schuhe umgesetzt werden, so entsteht ein Monomaterial-Laminat, das dem werterhaltenden Recycling zugeführt werden könnte.

Ziel des Forschungsvorhabens war es daher, leistungsfähige Monomateriallaminat zu entwickeln, die hohe technische Anforderungen zur Scheuerbeständigkeit erreichen und dennoch recyclingfähig sind. Dazu mussten zunächst neuartige PES-Maschenwaren entwickelt werden, die den PA-Gewirken in identischer Qualität entsprechen. Danach sollte die Materialverbindung selbst fokussiert werden, indem der PUR-Kleber gegen einen PES-Haftvermittler ersetzt werden sollte, sodass final ein reines PES- Verbundmaterial entstehen sollte. Es gab bereits Forschungsansätze zur Trennung von Laminatverbunden an der Verklebungsstelle oder zur Entwicklung von veränderten Füge-technologien. Jedoch erzielte bisher keiner dieser Ansätze ausreichende Ergebnisse.

3 Projektergebnisse

Die Partner trafen sich zum regelmäßigen Austausch, um Tätigkeiten, Ergebnisse und Anforderungen zu besprechen.

Im ersten Schritt des Projektes wurde eine Arbeitsbasis für alle folgenden Teilschritte geschaffen, indem die Definition und Beschaffung von Basismaterialien für die Versuche erfolgten. Die Erarbeitung dieser Grundlagen war weitaus komplexer als erwartet. Zeitgleich wurden die Anforderungen an die Zielprodukte festgelegt. Dabei stellte sich heraus, dass der Entwicklungsspielraum in einem äußerst minimalen Bereich liegt, sodass grundsätzlich nur wenige Materialien

möglich waren. Kernpunkte der zu wählenden Garne waren:

- Die Feinheit, um sowohl die Atmungsaktivität als auch die Vertapebarkeit beizubehalten; Ausgangsfeinheit von 22dtex mit potentiellen Garnfeinheiten zwischen 18 und 26 dtex
- Monofilament, um eine geringe Steighöhe im Schuh zu erhalten
- Hohe Scheuerfestigkeiten zu erreichen, um die erforderlichen Abriebswerte zu erreichen und damit den Schutz der Membran zu gewährleisten. Mindestanforderung 30.000 Touren bei 12 kPa nass

Materialien, die diesen Anforderungen entsprechen sind sehr selten in der textilen Industrie beziehungsweise es gibt nur wenige Hersteller, die so feine und gleichzeitig so feste Garne produzieren. Aus diesem Grund dauerte die Beschaffung dieser Materialien weitaus länger, als ursprünglich dafür geplant war. Das Material Polyester als solches ist grundsätzlich deutlich weniger stabil gegen Abrieb als Polyamid, etwa um den Faktor 4. Aus diesem Grund wurde angestrebt, das Polyestergerne einzusetzen, das die höchste Festigkeit aller auf dem Markt verfügbaren Produkte aufweist. Dieses Produkt stellt ein sogenanntes, hochfestes (= high tenacity = HT) Gerne dar. Hier sind die Polymerketten besonders parallel orientiert, sodass die Molekülketten eine festere Bindung untereinander aufbauen können. Damit wird auch der gesamte Gerneverbund automatisch stabiler.

Ebenfalls wird in dem bestehenden Produkt des heterogenen Schuhlaminates Monofilamente und keine Multifilamente eingesetzt. In der Textilindustrie werden – gerade für die Bekleidungsprodukte - primär Multifilamente verwendet und keine Monofilamente. In dem heterogenen Laminat werden jedoch Monofilamente zu einer sehr feinen Maschenware verarbeitet. Würden hier statt Monofilamenten Multifilamente eingesetzt, so würde es die Eigenschaften des Laminates weitreichend verändern. Beispielsweise würde sich die Feuchtigkeitsaufnahme des Materials deutlich erhöhen und somit von außen eintretendes Wasser auf der äußeren Seite des Laminats nach oben steigen. Dies wiederum führt zum Verlust des Wasserdampftransportes von innen, aufgrund des sinkenden Wasserdampfdruckgefälles. Um diesen Effekt zu verhindern, müsste eine zusätzliche Beschichtung des Materials oder eine gesonderte Ausrüstung der Garne erfolgen, was einen zusätzlichen Prozessschritt und Mehrkosten bedeuten würde. Aus diesem Grund wurden Monofilamente als Anforderung definiert. Diese sind in der besonders dünnen Feinheit im Bereich Polyester sehr limitiert verfügbar. Aufgrund all der zuvor beschriebenen Besonderheiten war die Materialbeschaffung des alternativen Polyestergerneamaterials äußerst langwierig, da es u. a. nur sehr wenige Anbieter für diese Materialien gab.

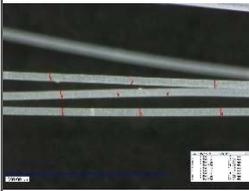
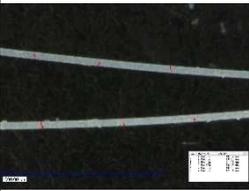
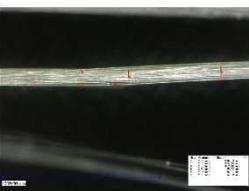
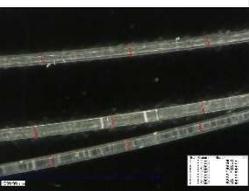
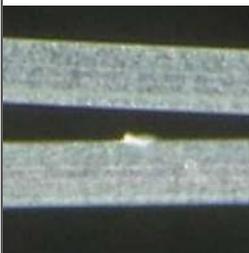
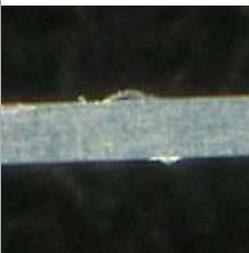
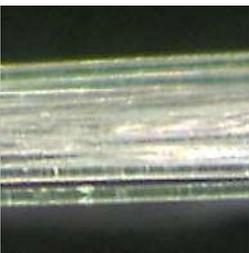
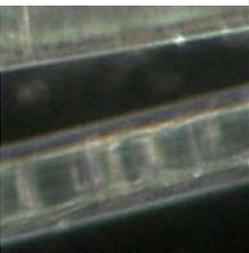
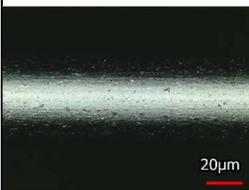
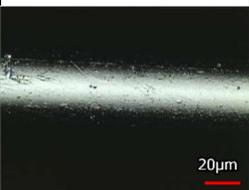
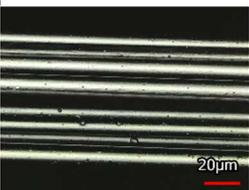
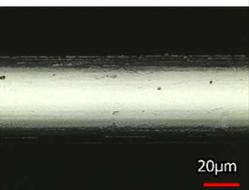
Für die Strickvorversuche lagen letztlich nachstehende Materialien vor (Tabelle 1), darunter ein Multifilament, welches aufgrund der Verfügbarkeit und für Vergleichszwecke in die Vorversuche aufgenommen wurde:

Tabelle 1: Vorliegende Garnmaterialien für Versuche.

Nr.	[1]	[2]	[3]	[4]
Material	Polyamid	Polyester	HT-Polyester	HT-Polyester
Garn	Monofilament	Monofilament	Multifilament	Monofilament
Feinheit	22 dtex	22 dtex	22 dtex	55 dtex
Prüfung	Dient als Referenzmuster, da Garn des Ausgangsmaterials	Direkter Vergleich Abriebfestigkeiten PA und PES, d.h. Muster [1] und [2]	Vergleich PES und HT-PES	Vergleich Garnstärken verschiedener HT-PES Garne

Die nachfolgende Tabelle zeigt Mikroskopaufnahmen der eingesetzten Garne:

Tabelle 2: Mikroskopaufnahmen der vorliegenden Garnmaterialien (LiM = LichtMikroskop, LaM = LaserMikroskop).

Nr.	[1]	[2]	[3]	[4]
Material	Polyamid	Polyester	HT-Polyester	HT-Polyester
Garn	Monofilament	Monofilament	Multifilament	Monofilament
LiM Vergrößerung x200				
Ausschnitt				
Mittelwert Durchmesser [µm]	51,14	48,86	116,08 14,68	76,68
LaM Vergrößerung x2000				

Die Aufnahmen in den ersten beiden Zeilen zeigen die Aufsicht auf die Materialien unter einem Lichtmikroskop (Keyence VHX-600K) mit Beleuchtung von oben zur Veranschaulichung der optischen Beschaffenheit. In der unteren Zeile sind Aufnahmen mit einem Lasermikroskop (VK-X160K) zu sehen, bei denen der Fokus auf einer genauen Darstellung der Oberflächenstruktur liegt. Erkennbar ist, dass die Monofile 1 (PA) und 2 (PES) mit 48 bis 52 μm Durchmesser eine ähnliche Dicke und Struktur aufweisen. Das Material ist mattiert und weist eine leichte Strukturierung auf der Oberfläche auf. Monofil 4 (HT-PES) ist mit 75 bis 79 μm im Vergleich etwas dicker, transparent und glatter. Auf Position 3 ist das HT-PES Multifilament dargestellt, welches als Verbund mit 116 μm etwa doppelt so dick ist wie die Monofile, wobei die Einzelfilamente mit 15 μm ungefähr $\frac{1}{4}$ der Dicke der Monofile entsprechen. Die Oberfläche der Filamente ist relativ glatt, der Verbund erzeugt entsprechend eine deutliche Strukturierung, die sowohl Einfluss auf die Verarbeitbarkeit wie auch Eigenschaften der erzeugten Maschenware hat.

Die beschafften Garnmaterialien wurden zu einer Maschenware verarbeitet. Da aufgrund der Rarität des Materials und des hohen Preises keine große Menge bestellt werden konnte, konnten die Flächen nicht wie geplant auf der Anlage des assoziierten Partners Mattes & Ammann hergestellt werden. Hierfür wären mindestens 30 Spulen nötig, die nicht bzw. nur zu einem höheren fünfstelligen EUR-Betrag beschaffbar gewesen wären. Verfügbar war jeweils nur eine Spule pro Material. Aus diesem Grund wurden die Strickversuche auf einer Laboranlage in der Hochschule Niederrhein durchgeführt. Dazu musste im Vorfeld ein spezieller Strickkopf beschafft werden, der für die enorme Feinheit des vorliegenden Garnmaterials passend war. Der zunächst in der Maschine eingesetzte Strickkopf war um ein 15-faches zu grob und war somit ungeeignet, um eine Maschenware für das zu entwickelnde Laminat zu erstellen. Allein die Anfrage und Beschaffung eines alternativen, passenden Strickkopfes für die vorhandene Strickmaschine war aufgrund der internen und externen Organisation enorm zeitintensiv, wodurch sich die Zeitplanungen ebenfalls verzögerte. Zudem ist der Strickkopf nur mietbar für 4 Wochen. Ein Kauf des Kopfes war innerhalb des Projektbudgets nicht realisierbar. Ebenfalls war die Strickmaschine aufgrund der in der Lehre angebotenen Vorlesungen, Praktika und Studienarbeiten hoch frequentiert.

Die Garne wurden auf dem ausgeliehenen Strickkopf verarbeitet. Begonnen wurde mit dem größten Garn aus Polyester mit der Feinheit von 50 dtex. Dieses Garn lief äußerst schlecht auf der Maschine, da es aufgrund der hohen Feinheit ständig an Stellen der Umlenkung oder Positionen der Spannung riss. Mit aufwendigen und detailreichen Anpassungen der Kuliertiefe der Maschen und Handbetrieb der Strickmaschine konnte ein 2 Meter langes Stück des Gestricks (siehe Tabelle 3) hergestellt werden.

Alle weiteren Garne waren mit 22 dtex noch feiner als das zuvor getestete Garn mit 50 dtex. Eine Verarbeitung dieser 22 dtex Garne war noch problembehafteter. Die 22 dtex Garne rissen noch schneller als das 50 dtex Garn. Von jedem Material

konnte nur ca. ein halber Meter Strickschlauch hergestellt werden, der für die weitere Analytik eingesetzt werden konnte (siehe Tabelle 3). Jedoch waren diese produzierten Muster nicht fehlerfrei und wiesen einige Fehlstellen und Unregelmäßigkeiten auf. Aus diesem Grund wird die Varianz der Muster als sehr groß eingeschätzt. Für die Analytik wurde zwar darauf geachtet, fehlerfreie Stellen einzusetzen, trotzdem können Ungleichmäßigkeiten oder vorgeschädigte Stellen im Garn nicht ausgeschlossen werden.

Tabelle :3: Auf der Laboranlage hergestellte Muster der Maschenwaren.

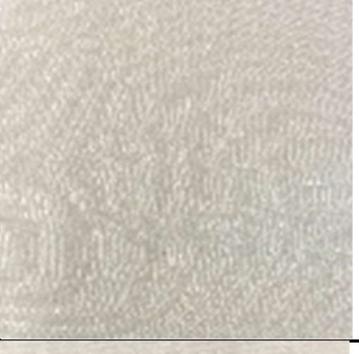
Material	Anmerkungen	Hergestellte Gestricke
[1]	PA-Monofilament 22dtex: Das verarbeitete Garn ist das standardmäßig eingesetzte PA-Garn in Sympatex Laminaten. Es dient als Referenzmaterial für Scheuerprüfungen gegenüber Material [2] und [3].	
[2]	PES-Monofilament 22dtex: Das verarbeitete Garn wurde bereits in der Vergangenheit für Vorversuche eingesetzt und soll einen Anhaltspunkt geben, um welchen Faktor die Scheuerwerte gegenüber Material [1] geringer sind, jedoch vor allem, wie der Unterschied zu Muster [3] ist.	
[3]	HT-PES-Multifilamentent 22dtex: Aufgrund der Nicht-Verfügbarkeit des 22dtex HT-PES Monofilaments wurde das beschaffbare Multifilament verstrickt. Dieses soll einen Anhaltspunkt zum Potential von HT-PES Garnen geben. Sollte das hochfeste PES-Garn die gewünschte Scheuerbeständigkeit aufweisen, so wäre die eingangs erwähnte Steighöhe zu beheben.	

[4]	<p>HT-PES-Monofilament 55dtex: Als feinst verfügbares hochfestes PES-Monofilament gibt dieses Garn Aufschluss über das Potential hochfester Polyester. Aufgrund der gröberen Garnfeinheit sind sowohl das steigende Gewicht als auch die schlechtere Vertapbarkeit zu betrachten.</p>	
-----	--	--

Die Probleme bei der Herstellung der Strickschläuche demonstrierten klar die bereits erwartete geringere mechanische Belastbarkeit von Polyester im Vergleich zu Polyamid. Basierend auf diesen Beobachtungen wurden die Gestricke zur ersten Charakterisierung Scheuerversuchen unterzogen, die ihr Verschleißverhalten während des Gebrauchs simulieren sollten.

Die Scheuerversuche wurden nach DIN EN ISO 20344:2022-04 im Nassscheuerverfahren gegen Wolle durchgeführt. Hierzu wurden die Proben über Nacht befeuchtet, und nach 6400 Zyklen nachbefeuchtet. Während der Versuche wurden die Proben mit 12 kPa belastet. Die Bewertung des Ergebnisses fand rein optisch statt. Die Versuche wurden jeweils beendet, sobald ein Loch erkannt wurde, bzw. bei den Polyamid Proben nach 12.800 Touren. Zu diesem Zeitpunkt war bei diesen Proben lediglich Fusselbildung, jedoch keine Löcher und keine Fadenrisse zu erkennen (siehe Abbildung 1).

Abbildung 1: Ergebnisse der Scheuertests vor und nach den in Tabelle 4 genannten Scheuertouren.

Nr.	Vorher	Nachher	Beurteilung
1			Fusselbildung, minimale Fadenzüge
2			starke Löcher, Fadenrisse
3			starke Löcher, Fadenrisse
4			Löcher, Fadenrisse
5			nahezu keine Veränderung, minimale Fusselbildung

Wie Tabelle 4 zu entnehmen ist, wurden die Scheuerversuche bei den untersuchten Polyesterproben bereits nach 139 bis maximal 226 Touren beendet, da Löcher und Fadenrisse auftraten. Wie erwartet war, besitzt das HT-Polyester (22 dtex) mit durchschnittlich 189 Touren eine höhere Abriebbeständigkeit als das reguläre Polyester (22 dtex) mit durchschnittlich 144 Touren. Noch etwas besser fiel das Ergebnis beim regulären Polyester mit 55 dtex aus, hier wurden durchschnittlich 207 Touren erreicht. Diese Scheuerbeständigkeit ist jedoch leider für den geplanten Einsatz völlig unzureichend, und entspricht gerade einmal 0,6% des Zielparameters von 30.000 Touren.

Tabelle 4: Ergebnisse der Scheuerversuche. Die erheblich geringere Beständigkeit von Polyester gegenüber Abrieb ist klar zu erkennen.

Nr.	Material	getestete Proben			Abriebwiderstand (Zyklen)			
				Feinheit	Durchschnitt	Einzel		
1	Polyamid	Monofil	Gestrick	22 dtex	12.768	12.800	12.800	12.703
2	Polyester	Monofil			144	139	151	143
3	HT-Polyester	Multifil			189	189	178	201
4	Polyester	Monofil	Gewirk	55 dtex	207	226	181	215
5	Polyamid "STX"	Monofil		22dtex	12.800	12.800	12.800	12.800

Zwar wurde beim Einsatz von Polyester anstelle von Polyamid mit einer geringeren mechanischen Belastbarkeit gerechnet, welche auch in den Strickversuchen deutlich wurde, eine so große Abweichung vom Verhalten des Polyamids war dennoch überraschend. Aus diesem Grund wurden Proben des gestrickten Materials mikroskopisch untersucht. Die Strickproben wurden sowohl vor wie auch nach dem Scheuern unter einem Lichtmikroskop analysiert. Dazu wurden die Gestricke glatt auf einen dunklen Hintergrund aufgelegt und mit Auflicht bei unterschiedlichen Vergrößerungen betrachtet. In den jeweiligen Tabellen sind die Aufnahmen bei 20-facher Vergrößerung dargestellt, da die Qualität der Ware dort am besten zu beurteilen ist.

Tabelle 5: Mikroskopaufnahmen der ungeprüften Strickproben (Lichtmikroskop).

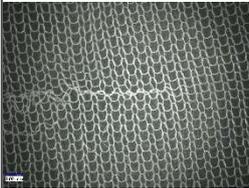
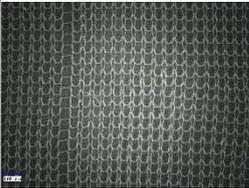
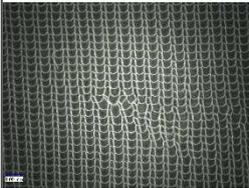
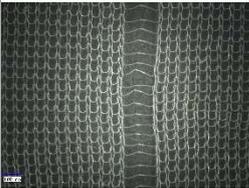
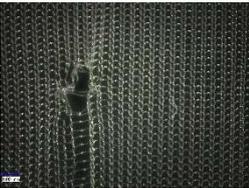
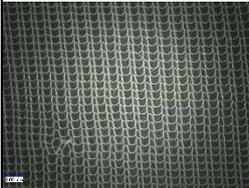
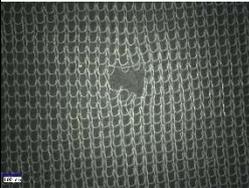
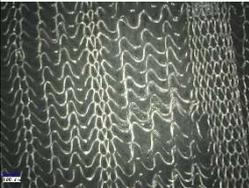
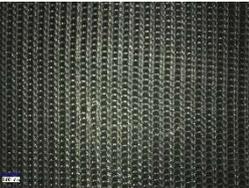
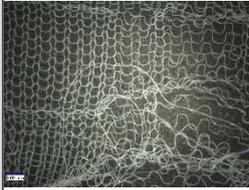
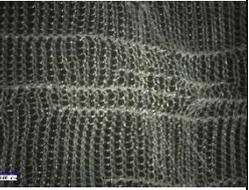
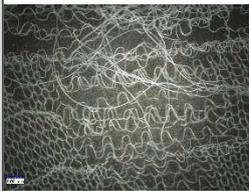
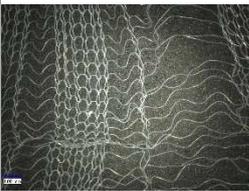
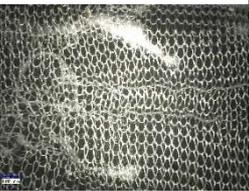
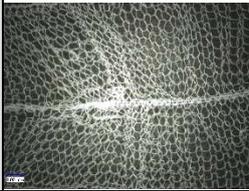
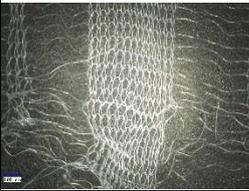
Nr.	[1]	[2]	[3]	[4]
Material	Polyamid	Polyester	HT-Polyester	HT-Polyester
Garn	Monofilament	Monofilament	Multifilament	Monofilament
Bereich a x20				
Bereich b x20				
Bereich c x20				

Tabelle 5 zeigt jeweils 3 Bereiche der hergestellten Strickproben. Materialien 1 PA und 2 PES zeigen eine ähnliche Qualität. Es ist eine geschlossene Strickstruktur sichtbar, die vereinzelt Fehlstellen aufweist. Das Gestrick aus Polyamid weist eher geschlossene Verdichtungen / Verhakungen / Knötchen auf, wogegen bei dem Polyester-Gestrick offenere „Laufmaschen“ und Löcher entstanden sind. Die Probe mit dem HT-PES-Multifilament zeigt die stärksten Fehlstellen auf, sodass ein Einsatz von Multifilamenten am wenigsten empfehlenswert ist. Aus Material 4, dem etwas dickeren, glatten HT-PES konnte am meisten ausgestrickt werden und das Muster ist größtenteils gleichmäßig mit nur wenigen Fehlstellen.

Tabelle 6: Mikroskopaufnahmen der nass geschauerten Strickproben (Lichtmikroskop).

Nr.	[1]	[2]	[3]	[4]
Material	Polyamid	Polyester	HT-Polyester	HT-Polyester
Garn	Monofilament	Monofilament	Multifilament	Monofilament
Probe a x20				
Probe b x20				
Probe c x20				

Die Scheuerversuche wurden an jeweils 3 Proben der einzelnen Materialien durchgeführt. In Tabelle 6 sind Mikroskop Aufnahmen von jeweils 3 Proben aller Materialien dargestellt. Alle 4 Materialien weisen Zerstörungen der Strickstruktur auf, wobei die Proben der Materialien 1 bis 3 am stärksten beschädigt wurden. Alle Muster weisen starke Laufmaschen, Löcher, und Verknotungen auf. Es ist deutlich erkennbar, dass diese Gestricke so nicht mehr einsatzfähig sind. Wie zu erwarten, sieht man bei Material 4 (HT-PES) noch eine geschlossene Fläche ohne Löcher oder größere Fehlstellen. Allerdings ist auch hier erkennbar, dass das Gestrick geschädigt ist.

Da auf diese Weise kein ausreichend belastbares Gestrick erhalten werden konnte, wurde überlegt, mit welchen Techniken sich eine belastbarere Alternative erreichen lassen könnte.

Eine Überlegung, um das Gestrick bzw. Garn etwas belastbarer und stabiler zu machen, war das doppelte Fachen des Garnes. Dabei laufen 2 Garnfäden desselben Materials gleichzeitig in die Strickmaschine und werden auch zusammen zu einer Masche verarbeitet.

Trotz wiederholter Versuche war dies leider technisch nicht realisierbar. Zum einen stehen innerhalb der Hochschule Niederrhein nicht die geeigneten Maschinen zur Verfügung solche hochfeinen Garne umzuspulen. Vor Ort wurde dennoch ein Versuch vorgenommen das hochfeine Garn auf der deutlich überdimensionierten

Umspulmaschine auf eine zweite Spule aufzutrennen. Dabei hielt das Garn nur sehr schwer auf den Spulkopsen und löste sich wiederholt aufgrund der Glätte der Garne von den konischen Spulen. Somit konnten nur minimale Mengen Garn auf eine zweite Spule umgespult werden. Mit den Kleinstmengen umgespulten Garnes wurde dann ein Strickversuch mit dem doppelt genommenen Garn durchgeführt. Jedoch kam es hier aufgrund von Verknotungen während des Strickprozesses noch vor dem Strickkopf zu Fadenbrüchen, sodass kein fertiges Gestrick entstehen konnte.

Neben diesen Strickversuchen wurde zeitgleich eine recycelte PES-Wirkware eines italienischen Rohwarenanbieters geprüft. Diese Rohware hatte exakt die gleichen Materialangaben wie das Ausgangsmaterial des PA-Gewirks und wies überraschenderweise mehr als dreimal so hohe Scheuerfestigkeiten wie vorab getestete PES-Wirkwaren auf. Zugleich lag die Scheuerbeständigkeit etwa 10.000 Touren unter den angedachten Zielwerten für die Abriebbeständigkeit sowie etwa 40.000 Touren unter den bisher bei PA erreichten. Die auf Grundlage dieser (noch) vergleichsweise vielversprechenden Daten beabsichtigte Beschaffung der entsprechenden PES-Wirkware im technischen Maßstab zerschlug sich im Laufe des Projektes, da der Garnhersteller die Produktion dieser Garntype zwischenzeitlich eingestellt hat.

Parallel wurden Recherchen zu Alternativen des bestehenden PUR-Klebers aus Polyester durchgeführt. Im ersten Schritt des dritten Arbeitspakets „Evaluation von Haftvermittlern auf Polyesterbasis“ wurde mit dem assoziierten Partner Köba Sewifa geklärt, welche Kleber für die Laminierung in Frage kommen. Mit diesen Angaben haben die Projektpartner Recherchen durchgeführt, um zu ermitteln, welche Optionen am Markt erhältlich sind.

Aus 21 Anbietern von Klebstoffen für textile Anwendungen konnten fünf Hersteller priorisiert werden. Diese wurden kontaktiert und die Produktpalette mit dem für dieses Projekt angedachten Einsatzbereich abgeklärt. Dabei wurde seitens der Kleberhersteller erklärt, dass zum einen PU-Kleber bereits einen teils beträchtlichen Polyesteranteil beinhalten. Zugleich würde die Erhöhung des Polyesteranteils den Verlust an Elastizität des Klebers bedeuten, die für das Laminat benötigt wird.

Trotz dieser eher zurückhaltenden Einschätzung / Prognose wurde mit einem der fünf Hersteller ein Haftvermittlersystem mit einem im Vergleich zu der aktuell von Sympatex genutzten Type nochmals deutlich erhöhten Polyestergehalt identifiziert und in Versuchen auf einer industriell gängigen Hotmeltanlage Laminatsprodukte aus ausgewählten Textilien mit der Sympatex-Membran hergestellt.

Polyestergehalt bisheriger Standardhaftvermittler auf PU-Basis: ca. 50% (w/w) - **A**

Polyestergehalt alternativer Haftvermittler auf PU-Basis: ca. 85% (w/w) - **B**

Nach einigen Vorversuchen zur Ermittlung möglichst optimaler Verarbeitungsbedingungen wurden mit beiden Haftvermittlern **A** und **B** jeweils drei Lamine erfolgreich hergestellt.

Laminat **5A**:

PA-Wirkware, die bislang standardmäßig in Schuhlaminaten eingesetzt wird + Sympatex Membran + Haftvermittler **A**

Laminat **5B**:

PA-Wirkware, die bislang standardmäßig in Schuhlaminaten eingesetzt wird + Sympatex Membran + Haftvermittler **B**

Laminat **6A**:

PES-Maschenware, die in Futterlaminaten bestimmter Arbeitsschutzbekleidungsartikel eingesetzt wird + Sympatex Membran + Haftvermittler **A**

Laminat **6B**:

PES-Maschenware, die in Futterlaminaten bestimmter Arbeitsschutzbekleidungsartikel eingesetzt wird + Sympatex Membran + Haftvermittler **B**

Laminat **7A**:

rec. PES-Gewebe, das in Oberstofflaminaten von Arbeitsschutz- und Endkonsumentenbekleidungsartikeln eingesetzt wird + Sympatex Membran + Haftvermittler **A**

Laminat **7B**:

rec. PES-Gewebe, das in Oberstofflaminaten von Arbeitsschutz- und Endkonsumentenbekleidungsartikeln eingesetzt wird + Sympatex Membran + Haftvermittler **B**

Die sechs Lamine wurden hinsichtlich folgender Parameter untersucht: Warengriff – Haftung – Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} . In der nachstehenden Tabelle sind die jeweils ermittelten Werte zusammengefasst.

Tabelle 7: Vergleich technischer Produktparameter der Lamine **5A/5B**, **6A/6B** und **7A/7B**.

	Norm	5A	5B	6A	6B	7A	7B
Warengriff	-	ok	ok	ok	ok	ok	ok
Haftung (25 mm), längs / N	DIN 53530	3,9	1,9	7,5	7,2	n. d.	n. d.
Haftung (25 mm), quer / N	DIN 53530	3,2	1,5	6,0	6,4	n. d.	n. d.
R _{et} / (m ² Pa/W)	ISO 11092	3,9	4,7	8,7	9,2	5,4	5,6

n. d. = nicht getestet. Die Haftung der Lamine **7A/7B** wurde nicht mit der obengenannten Methode, sondern mit einem anderen Verfahren untersucht, das auf keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Haftvermittlern hinwies.

Der Warengriff der Lamine wurde in Abhängigkeit des genutzten Haftvermittlers zunächst rein subjektiv haptisch bewertet. Bei den untersuchten Laminatskonstruktionen konnten keine signifikanten grifflichen Unterschiede festgestellt werden, sodass der im Vergleich zu Haftvermittler **A** um ca. 35% (w/w) höhere Polyesteranteil in Haftvermittler **B** zumindest bei den im Rahmen des Arbeitspaketes 3 des Projektes untersuchten Laminaten keine nachteiligen Effekte aufwies.

Auch die Wasserdampfdurchlässigkeit der jeweiligen Lamine blieb für beide untersuchten Haftvermittler auf einem vergleichbaren Niveau. So lagen die R_{et}-Werte der beiden PA-Wirkwaren-basierten Schuhlamine **5A** und **5B** im Bereich von etwa 4 m²Pa/W, die der PES-Maschenwaren-basierten Arbeitsschutzfutterlamine **6A** und **6B** um etwa 9 m²Pa/W sowie die der rec. PES-Gewebe-basierten Oberstofflamine **7A** und **7B** bei ca. 5-6 m²Pa/W (siehe Tabelle 7).

Einzig bei der Untersuchung der Haftung zwischen den jeweiligen Textil- und Membranlagen der Lamine zeigten sich für die Lamine **5A** und **5B** signifikantere Unterschiede zwischen den beiden Haftvermittlersystemen **A** und **B**. Die am bisherigen Standardprodukt gemessenen Werte von 3-4 N konnten mit dem Haftvermittler **B** mit höherem Polyesteranteil mit Werten von etwas unter 2 N nicht ganz erreicht werden. Auch wenn diese geringeren Haftungswerte als nicht ganz unkritisch einzustufen sind, erscheinen noch etwas verbesserte Werte durch weitere Optimierungsschleifen erreichbar. Demgegenüber zeigten sich bei der Untersuchung der beiden anderen Laminatsysteme **6A/6B** bzw. **7A/7B** faktisch keine Haftungsunterschiede zwischen den Haftvermittlern **A** und **B** (siehe Tabelle 7).

Sollten die im Projekt in Arbeitspaket 4 ursprünglich zwar vorgesehenen, aufgrund der so nicht vorhersehbaren Herausforderungen zeitlich jedoch leider nicht mehr umzusetzenden Tests zur mechanisch-thermischen Recyclingfähigkeit der PES-basierten Lamine **6A/6B** und **7A/7B** einen positiven Einfluss des reduzierten PU-Anteils im Haftvermittlersystem **B** gegenüber dem bisherigen Standardsystem **A** zeigen, könnten die im Projekt erzielten Ergebnisse dazu beitragen, die bislang beim

mechanisch-thermischen Recycling von PES-basierten Verbundmaterialien mit Haftvermittlersystemen mit höherem PU-Gehalt festgestellten Herausforderungen zumindest zu reduzieren.

Nachdem im Laufe des Projektes keine PES-Maschenwaren für die Herstellung geeigneter PES-Monomateriallaminat für Schuhe hergestellt werden konnten, gleichzeitig bislang jedoch auch noch keine öffentlich zugänglichen Studien vorliegen, die verlässliche Aussagen zur Korrelation zwischen Laborergebnissen zur Scheuerbeständigkeit an der textilen Fläche und Ergebnissen von Tragetests im Schuh in der Praxis zuließen, sollten erste Tragetests dazu beitragen, diese Lücke zu schließen und dadurch eine bessere Einschätzung ermöglichen, wie hoch die Abriebbeständigkeit der Rohware für unterschiedliche Anwendungsfelder wasserdichter und gleichzeitig wasserdampfdurchlässiger Schuhe in der Praxis überhaupt sein muss.

Dazu wurden Testschuhe (siehe beispielhaft Abbildung 2) genutzt, die einerseits die bisher standardmäßig eingesetzte PA-Wirkware mit hoher Abriebbeständigkeit enthielten, andererseits aber auch Testschuhe, in denen eine kommerziell erhältliche Maschenware auf PES/EL-Basis verarbeitet war, deren Abriebbeständigkeit deutlich geringer ist.

Nassscheuerung nach DIN EN ISO 20344:2022-04, 12 kPa, gegen Wolle:

PA-Wirkware als Referenz: > 40.000 Touren

PES/EL-basiertes Gestrick: ca. 10.000 Touren

Abbildung 2: Beispielhafte Ansicht eines Testschuhs für Trageversuche.

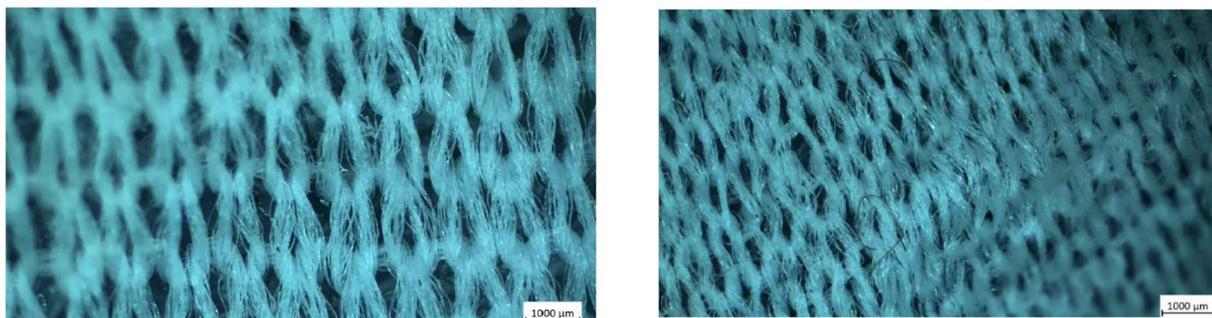


Fünf Probanden trugen über einen Zeitraum von etwa 10 Wochen einen Schuh, der ein Schuhfutterlaminat auf Basis der PA-Wirkware, das klassisch über zuschneiden, vernähen und Versiegelung der Nähte in den Schuh integriert wurde, enthielt, sowie einen Schuh, in den ein über Thermoformen nahtlos dreidimensional verformtes Schuhfutterlaminat mit dem PES/EL-Gestrick eingearbeitet wurde. Nach dem ca. 10-wöchigen Untersuchungszeitraum, in dem die Probanden durchschnittlich etwa 400 km mit den Schuhen zurückgelegt hatten, wurden die Schuhe aufgeschnitten

und die Schuhfutterlamine auf ihre Wasserdichtigkeit in der Fläche hin untersucht. Sämtliche Schuhfutterlamine wiesen dabei keine Undichtigkeiten auf. Die Ergebnisse zeigen, dass zumindest im Rahmen des bisherigen Untersuchungszeitraums, sowohl die höher abriebbeständige PA-Wirkware als auch das PES/EL-Gestrick mit deutlich geringerer Abriebbeständigkeit offensichtlich geeignet sind, um die Membran in der Praxis im Schuh ausreichend zu schützen, sodass diese im Gebrauch nicht beschädigt wird und ihre Wasserdichtigkeit nicht verliert.

Lichtmikroskopische Aufnahmen (siehe Abbildung 3) des PES/EL-Gestricks vor und nach Beanspruchung im Tragetest zeigen trotz der im Labor ermittelten geringeren Abriebbeständigkeit lediglich ein leichtes Aufrauen der Oberfläche.

Abbildung 3: Lichtmikroskopische Aufnahmen des PES/EL-Gestricks vor (links) und nach (rechts) Trageversuch.



Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass ggf. die Möglichkeit besteht, die Ansprüche an die Abriebbeständigkeit der im Wesentlichen als Schutzschicht für die darunterliegende Membran dienende Maschenwarenschicht für Schuhlamine nach unten geschraubt werden kann. Dadurch könnten sich doch noch Optionen ergeben, die bislang an den Einsatz von PA geknüpften Anforderungen den in der Praxis notwendigen Gegebenheiten anzupassen und so evtl. doch den Einsatz vollständig PES-basierter Maschenwaren in entsprechenden Schuhlaminaten zu ermöglichen.

Allerdings sind zur Bestätigung und Untermauerung dieser ersten Erkenntnisse noch weitere, deutlich ausgiebigere Tragetests notwendig. Zudem gilt es zu berücksichtigen, dass das in dem vorliegenden Feldtest genutzte PES/EL-Gestrick im Unterschied zu den bislang im Schuhbereich breit eingesetzten PA-Wirkwaren deutlich schwerer ist, nicht aus Monofilamenten, sondern Multifilamenten besteht und vergleichsweise dicht gestrickt ist, sodass ein in herkömmlichen Fertigungsverfahren wasserdichter Schuhe notwendiges Versiegeln der Nähte nicht möglich ist.

Nichtsdestotrotz eröffnen die vorliegenden Erkenntnisse aus den Tragetests neue Chancen, doch Ansatzpunkte zu finden, die zur Entwicklung Polyester-basierter Maschenwaren mit ausreichender Abriebbeständigkeit, ggf. auch für die bislang

weit verbreitete Standardfertigungstechnologie über Zuschnitt – Nähen – Nahtversiegelung führen könnten.

4 Methodik / Vorgehensweise / Projektablauf

Die Nachwirkungen der Corona-Pandemie, waren im Verlauf des Projektes immer noch zu spüren. Weniger Materialien sind verfügbar bzw. Unternehmen am Markt, die solche hochfesten, enorm feinen Garne im Produktportfolio führen, die für das Projekt benötigt werden. Somit verzögerte sich der Zeitplan aufgrund der Materialsuche etwas. Aufgrund der schwierigen Beschaffungslage und der damit einhergehenden Verzögerungen wurde das Personal seitens der Hochschule nicht auf die beantragten 50 % aufgestockt.

Arbeitspaket 1 „Planung der Materialien und Anforderungen“ mit den Unterpaketen „Abstimmung unter den Partnern“ (1.1), Definition des Anforderungsprofils (1.2) und Auswahl, Spezifikation und Beschaffung der Garne für die Maschenwareentwicklung (1.3) wurde erfolgreich abgeschlossen.

Arbeitspaket 2 „Entwicklung mechanisch hoch belastbarer PES-Maschenwaren“ konnte aufgrund der entstandenen Probleme bei der Beschaffung der Materialien und der Beschaffung eines geeigneten Strickkopfes für die Herstellung der Gestricke nur bedingt durchgeführt werden. Daraus resultierend konnte nur eine Charge kleiner Mengen von Strickmustern erzeugt werden, die zur anschließenden Analytik in Unterpaket 2.1 „Materialprüfungen der Rohware/n inkl. 1 Optimierungsschleife“ zur Verfügung standen. Die vorhandenen Materialproben konnten aufgrund der unzureichenden Qualität nur auf deren Verschleiß- / Abriebeigenschaften hin untersucht werden. Keines der Materialien hat den Mindestanforderungen auch nur annähernd entsprochen, so dass weitere Prüfungen nicht vorgenommen wurden. Die mikroskopische Untersuchung der Muster vor und nach der Prüfung bestätigte diese Problematik. Die Herstellung von Gestricken mit doppelt gelegten Garnen konnte nicht abschließend fertiggestellt werden, da die Garne sich schon vor dem Strickkopf verknotet haben. Es konnte kein nutzbares Gestrick für weiterführende Untersuchungen erzeugt werden. Eine zusätzliche Schleife zur Optimierung der Gestricke und Herstellung neuer Muster war aufgrund der Menge an Garnen und der kurzen Leihgabe des speziellen Strickkopfes nicht möglich. Die Lamination von im Rahmen des Projektes entwickelten Rohwaren sowie die Materialprüfung von Verbundstoffen war basierend auf diesen Grundlagen nicht durchführbar.

Arbeitspaket 3 „Evaluation von Haftvermittlern auf Polyesterbasis“ ist innerhalb des Unterpakets „Auswahl, Spezifikation und Beschaffung der Haftvermittler“ (3.1) nach Zeitplan abgeschlossen. Auch die die Unterpakete „Testlaminierungen von Rohware und evaluierten Haftvermittlern“ (3.2) und „Materialprüfung Verbundstoffe“ (3.3) konnten abgeschlossen werden. Da die Herstellung eines geeigneten Gestricks nicht möglich war, musste anders als geplant auf die von Sympatex bislang für Schuhlamine eingesetzte PA-Wirkware und weitere ausgewählte PES bzw. rec.

PES-basierte Textilkomponenten zur Herstellung von Laminaten zurückgegriffen werden. Dennoch lieferten die Untersuchungsergebnisse wertvolle Erkenntnisse in Bezug auf Haftvermittlersysteme mit deutlich erhöhtem Polyestergehalt, die zukünftig auf weitere PES-basierten Laminatverbundsysteme übertragen werden können.

Arbeitspaket 4 „Überprüfung der Recyclingfähigkeit“ konnte nicht begonnen werden, da die für die Herstellung entsprechender Lamine benötigte Maschenware aus AP2 trotz aller Anstrengungen nicht erfolgreich war. Die erheblichen zeitlichen Verzögerungen in AP2 führten dazu, dass erst zu einem vergleichsweise späten Zeitpunkt im Laufe des Projektes entschieden werden konnte, auf bestehende Textilien zur Evaluierung von Haftvermittlersystemen zuzugreifen. Für Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit geeignete Lamine standen nach Abschluss des AP3 gegen Ende des Projektes zwar zur Verfügung, die geplanten Untersuchungen konnten jedoch innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr in Angriff genommen werden.

Arbeitspaket 5 „Anfertigung Demonstrator“ konnte zwar nicht wie ursprünglich geplant mit in AP2 und AP3 gefertigten PES-basierten Laminaten durchgeführt werden. Allerdings konnte über trotzdem mit Alternativmaterialien angestoßene Praxistests wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die Optionen für weitere Entwicklungsansätze bieten könnten.

Arbeitspaket 6 „Übertragung der Ergebnisse auf Arbeitsschutz- und light-weight Materialien“ konnte aufgrund der zeitlichen Verzögerungen und der technischen Herausforderungen nicht umgesetzt werden.

Die „Dokumentation der Ergebnisse“ in AP7 fand nach Zeitplan über die Projektlaufzeit statt.

Innerhalb des Berichtszeitraumes kam es zu Verzögerungen in einigen Arbeitspaketen, so dass die Entwicklungen nicht wie ursprünglich geplant mit im Projekt speziell entwickelten PES-Waren final durchgeführt und abgeschlossen werden konnten. Alternativ wurde jedoch auf ein schon verfügbares Gestrick zurückgegriffen, um die weiterführenden Prüfungen und die Herstellung eines Demonstrators umsetzen zu können.

5 Öffentlichkeitsarbeit / Veröffentlichungen / Vorträge

Von Veröffentlichungen hinsichtlich der Projektergebnisse wurde aufgrund der unzureichenden Ergebnisse und der entstandenen Verzögerungen abgesehen. Es wurden sowohl von Sympatex als auch der Hochschule Niederrhein Informationen zum Projektinhalt auf den jeweiligen Websites veröffentlicht.

6 Fazit und Ausblick

Während des Projektes kam es zu deutlichen Verzögerungen und Herausforderungen, durch die Beschaffung geeigneter Materialien einerseits und im Kleinmaßstab eingeschränkten Möglichkeiten diese zu einer Fläche zu verarbeiten andererseits. Die Probleme waren im Vorfeld nicht absehbar, zeigen jedoch das hohe Innovationspotential dieses Projektes. Die Basis eines vollständig recycelbaren Monomateriallaminates stellen die Textilien dar. Insbesondere die Ergebnisse der Versuche hinsichtlich der Herstellung eines leistungsfähigen Gestrickes aus PES, welches der Qualität und den Anforderungen eines PA-Gestrickes entspricht, haben zu keinem ausreichenden Ergebnis geführt. Weder das HT-PES Multifilament, noch das HT-PES Monofilament konnten die Anforderungen erfüllen. Von einer Anschaffung weiterer Spulen der Garne wie auch der Herstellung einer größeren Menge an Maschenware bei Mattes & Ammann wurde daher abgesehen. Auch wenn diese eine Säule des Projektes nicht zufriedenstellend abgeschlossen wurde, konnten dennoch zielgerichtete Schritte unternommen werden, um weitere wichtige Materialanalysen durchzuführen.

Für die Evaluation und Prüfung der Haftvermittler und des Verbundmaterials konnte auf Alternativprodukte aus PA und PES zurückgegriffen werden, so dass die Beurteilung von Haftvermittlern mit höherem PES-Anteil durchgeführt werden konnte. Es war möglich, Lamine mit Klebstoffen herzustellen, die einen deutlich höheren Polyesteranteil als die bislang üblicherweise genutzten aufweisen. Recyclingversuche auf Basis thermisch-mechanischer Verfahren sind zwar im Rahmen des Projektes nicht durchführbar gewesen, die erzielten Erkenntnisse sowie die vorliegenden Materialien bieten jedoch vielversprechende neue Ansatzpunkte für zukünftige Recyclingversuche.

Des Weiteren konnte ein Demonstrator erstellt und Tragetests umgesetzt werden, die wichtige Erkenntnisse für mögliche Stoßrichtungen künftiger Weiterentwicklungen generiert haben. Der Feldtest hat beispielsweise ergeben, dass die Scheuerbeständigkeit der Maschenware möglicherweise nicht so hoch angesetzt werden muss, wie ursprünglich gedacht bzw. durch den in der Branche bislang weit verbreiteten Einsatz von PA-basierten Maschenwaren etabliert. Eine noch detailliertere Analyse der tatsächlichen Praxisanforderungen, ggf. kombiniert mit neuen Produktions- und Verarbeitungstechnologien könnte dazu beitragen, in Zukunft Polyester-basierte Monomateriallösungen auch für wasserdichte und wasserdampfdurchlässige Schuhe bereitstellen zu können und so die Grundlage für ein wirtschaftliches und werterhaltendes Recycling auch von Schuhmaterialien zu bilden.