

Schlussbericht vom 31.08.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 22268 BR

Thema

Entwicklung eines Konzeptes zur Vermeidung des abrasiven Verschleißes polymerbasierter, leitfähiger Fadenmaterialien beim Wirken von sensorischen und elektronischen Textilien

Berichtszeitraum

01.06.2022 - 31.05.2024

Forschungsvereinigung

Forschungskuratorium Textil e.V.-FKT

Forschungseinrichtung(en)

Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e.V.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zusammenfassung

Im geplanten Forschungsprojekt wird für polymerbasierte leitfähige Fadenmaterialien auf Basis von Metall- und Kohlenstoffpartikeln untersucht, welchen tribologischen Einfluss die wirkenden Spannungs- und Reibungskräfte der einzelnen Prozessschritte auf die leitfähigen Fadenmaterialien bei der wirktechnischen Verarbeitung (inkl. Vor- und Nachbereitung) haben. Es wird untersucht, ob die Menge abgelöster Partikel derzeit zulässige Arbeitsschutzgrenzwerte übersteigt und so die Gesundheit der Beschäftigten im unmittelbaren Maschinenumfeld beeinflusst. Ein besonderer Fokus des Projektes liegt auf der Vermeidung/Verminderung tribologischer Effekte bei der Maschenbildung mit polymerbasierten leitfähigen Fadenmaterialien, welche abgesehen vom Verschleiß der Wirkwerkzeuge wie Loch- und Zungennadeln Partikel aus den leitfähigen Schichten der Fäden lösen. Zur Verbesserung der Tribologie stehen neben Fragen der Werkstoffauswahl, der Geometrie, der Oberflächenbehandlung und -beschichtung sowie der Oberflächentopografie der Wirkwerkzeuge, die Entwicklung reibungsminimierender Schichten auf den leitfähigen Fäden und Wirkwerkzeugen im Vordergrund. Die Optimierung der Oberflächenbeschaffenheit und die damit verbundene Reduzierung der Reibungsbeanspruchung zwischen Nadel und Faden ermöglicht KMU, zuverlässige und gesundheitlich unbedenkliche Gewirke für Smart Textiles auf Basis von leitfähigen Fadenmaterialien herzustellen. /1/-/3/

Danksagung

„Das IGF-Vorhaben 22268 BR der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Reinhardtstraße12-14, 10117 Berlin wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.“

Wir bedanken uns für die Bereitstellung der Fördergelder für die Durchführung des Projektes. Weiterhin gilt unser Dank den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses für die freundliche, engagierte Zusammenarbeit, die fachliche Unterstützung sowie die rege Diskussion.

Gefördert durch:



Auf Grund eines Beschlusses des
Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	1
1.2 Stand der Forschung und Entwicklung	4
1.2.1 Gewirke mit integriertem leitfähigen Fadenmaterial	4
1.2.2 Leitfähige Fadenmaterialien	6
1.2.3 Abrieb bei textiltechnologischer Verarbeitung	7
2. Ziel und Darstellung des Lösungsweges	9
2.1 Forschungsziel und angestrebte Ergebnisse	9
2.2 Lösungsweg	11
3. Darstellung der durchgeführten Arbeiten und der erzielten Vorhabensergebnisse	12
3.1 AP 1 - Erstellen des Versuchsplanes und Systemanalyse der Tribologie	12
3.2 AP 2 - Entwicklung technischer Layouts gewirkter partiell leitfähiger Textilstrukturen	13
3.3 AP 3 - Ist-Stand-Analyse zur quantitativen und qualitativen Prüfung des Abriebes mit am Markt verfügbaren polymerbasierten, leitfähigen Fadenmaterialien und verfügbaren Wirkwerkzeugen am TENS-O-MAT II	14
3.4 AP 4 - Herstellung gewirkter, leitfähiger Textilstrukturen mit ausgewählten leitfähigen Fadenmaterialien auf Doppelraschelmashinen	18
3.5 AP 5 - Entwicklung, Prüfung und Herstellung beschichteter leitf. Fadenmaterialien sowie beschichteter Wirkwerkzeuge zur Verbesserung der tribol. Einflussfaktoren und damit der Abrieb- und Verschleißminimierung	28
3.5.1 AP 5.1, AP 5.3 und AP 5.4	28
3.5.2 5.2 - Entwicklung und Aufbringen von Beschichtungen auf Wirkwerkzeuge	34
3.6 AP 6 und AP 7	35
3.7 AP 8 - Herstellung von Funktionsmustern inklusive Veredelung	42
3.8 AP 9 - Textilphysikalische und elektrotechnische Prüfung der einzelnen Materialien und Gewirke	44
3.9 AP 10 - Konzept zur technischen und industriellen Umsetzung	44
3.10 AP 11 - Dokumentation und Berichterstattung	51
4. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung	51
4.1 Angaben zur Finanzierung	52
4.2 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	52
5 Wirtschaftlichkeit und Umsetzung der Ergebnisse in kleinen und mittelständigen Unternehmen	52
5.1 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	52
5.2 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU sowie voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU	54
5.3 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der FuE- Ergebnisse nach Projektende	57
6 Durchführende Forschungsstelle(n)	58
7 Literaturverzeichnis	I

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AP	Arbeitspaket
Bzw.	Beziehungsweise
Elektr.	elektrisch
Feinheitsbez.	Feinheitsbezogen
G-G	Garn-Garn
Leitf.	Leitfähig
Max.	Maximal/e/s
MSt.	Maschenstäbchen
PBA	Projektbegleitender Ausschuss
Rp.	Rapport
Tab.	Tabelle
Tribol.	tribologisch
usw.	Und so weiter
Versch.	Verschieden/e
Z.B.	Zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Darstellung des tribologischen Systems mit Einflussfaktoren beim Verwirken leitfähiger Fäden
- Abb. 2: Schema des Lösungsweges
- Abb. 3: Layouts mit geringer tribologischer Belastung
- Abb. 4: Layouts mit starker tribologischer Belastung
- Abb. 5: Layout Franse offen (Warpknit Simulation)
- Abb. 6: Layout Tuch geschlossen (Warpknit Simulation)
- Abb. 7: Layout Schuss (Warpknit Simulation)
- Abb. 8: Setup der Reibungsversuche am TENS-O-MAT II
- Abb. 9: Setup der Reibungsversuche am TENS-O-MAT II
- Abb. 10: Lochnadelblech
- Abb. 11: Zungennadel
- Abb. 12: Leitfähige Partikel nach TENS-O-MAT-Versuch in AP 3 (Sample 19 mit Lochnadel)
- Abb. 13: Spuren abrasiven Verschleißes nach TENS-O-MAT-Versuch in AP 3 (Sample 19 mit Lochnadel)
- Abb. 14: Schärversuche mit dem kohlenstoffhaltigen hiTEX-Faden in AP 4
- Abb. 15: Schärversuche mit dem kohlenstoffhaltigen hiTEX-Faden in AP 4
- Abb. 16: Schärversuche mit dem kohlenstoffhaltigen hiTEX-Faden in AP 4
- Abb. 17: Abriebserscheinungen bei den Wirkversuchen auf der Doppelraschelmachine RD 7 DPLM 12-3
- Abb. 18: Abriebserscheinungen bei den Wirkversuchen auf der Doppelraschelmachine RD 7 DPLM 12-3
- Abb. 19: Unbeschichte Shieldex[®]-Variante vor der Reinigung
- Abb. 20: Unbeschichte Shieldex[®]-Variante nach der Reinigung
- Abb. 21: Versuchsbegleitende Staubmessungen zu AP 4
- Abb. 22: Versuchsbegleitende Staubmessungen zu AP 4
- Abb. 23: Einzelfadenbeschichtung mit Galette
- Abb. 24: Applikator der Firma Graf
- Abb. 25: Schematische Darstellung der erzeugten reibungsminimierenden Schicht auf den versilberten Fadenmaterialien
- Abb. 26: Ergebnisse Friktion – Shieldex[®]
- Abb. 27: Schematische Darstellung der erzeugten kratzfesten Schicht auf den versilberten Fadenmaterialien

- Abb. 28: Veränderungen des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit zu Beschichtungsauflage
- Abb. 29: Schematische Darstellung der erzeugten reibungsminimierenden Schicht auf den kohlenstoffbeschichteten Fadenmaterialien (hiTEX)
- Abb. 30: Schematische Darstellung der erzeugten reibungs- und abriebminimierenden Schicht auf den kohlenstoffbeschichteten Fadenmaterialien (hiTEX)
- Abb. 31: Auswahl einer modifizierten Vorzugsvariante für die silberbeschichteten Fadenmaterialien
- Abb. 32: Auswahl einer modifizierten Vorzugsvariante für die kohlenstoffbeschichteten Fadenmaterialien
- Abb. 33: Verschleiß an beschichteter Lochnadel nach Versuchen am TENS-O-MAT II
- Abb. 34: Verschleiß an beschichteter Lochnadel nach Versuchen am TENS-O-MAT II
- Abb. 35: Verschleiß an beschichteter Zungennadeln nach Versuchen am TENS-O-MAT II
- Abb. 36: Verschleiß an beschichteter Zungennadeln nach Versuchen am TENS-O-MAT II
- Abb. 37: Wirkversuche AP 6
- Abb. 38: Lochnadelblei 8 mit modifizierter Shieldex[®]-Variante M2 (Tuch) vor der Reinigung
- Abb. 39: Lochnadelblei 9 mit modifizierter hiTEX-Variante M9A (Franse) vor der Reinigung
- Abb. 40: Wirkversuch (Tuch) bei optimierter Beschichtungsauflage bei Shieldex[®]-Variante M2
- Abb. 41: Wirkversuch (Franse) bei optimierter Beschichtungsauflage bei hiTEX-Variante M9A
- Abb. 42: Nadelblei Wirkversuch (Tuch) bei optimierter Beschichtungsauflage bei Shieldex[®]-Variante M2 vor der Reinigung
- Abb. 43: Nadelblei Wirkversuch (Franse) mit optimierter Beschichtungsauflage bei hiTEX-Variante M9A vor der Reinigung
- Abb. 44: Funktionsmuster 1 als Warpknit Simulation
- Abb. 45: Funktionsmuster 1 mit Shieldex[®]
- Abb. 46: Funktionsmuster 2 als Warpknit Simulation
- Abb. 47: Funktionsmuster 2 mit hiTEX

Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Leitfähige Fadenmaterialien mit für die wirktechnische Verarbeitung geeigneten Endfeinheiten
- Tab. 2: Zusammenspiel Wirkwerkzeuge und Polymerbasierter leitfähiger Faden
- Tab. 3: Textilphysikalische und elektrische Kennwerte ausgewählter Fadenmaterialien
- Tab. 3: Einzugschema für die ausgewählten Layouts
- Tab. 4: Eingesetzte leitfähige Fadenmaterialien sowie Zungen- und Lochnadeln bei der Abriebprüfung am TENS-O-MAT II
- Tab. 6: SEQ Tabelle * Arabic 6: Beurteilung quantitativer Abrieb auf den Wirkwerkzeugen AP 3
- Tab. 5: Widerstandsänderungen der unbehandelten Fadenmaterialien nach TENS-O-MAT-II Versuch in AP 3
- Tab. 6: Maschinenparameter AP 4 und AP 6
- Tab. 9: Bewertung des Abriebs nach der wirktechnischen Verarbeitung der leitfähigen Garne in Korrelation zur Bindung
- Tab. 7: Untersuchung der Garn-Garn Reibungspunkte für das Layout Franse (offen)
- Tab. 8: Untersuchung der Garn-Garn Reibungspunkte für das Layout Schuss
- Tab. 9: Untersuchung der Garn-Garn Reibungspunkte für das Layout Tuch (geschlossen)
- Tab. 10: Flächenwiderstände Layouts vor und nach der thermischen Behandlung
- Tab. 11: Versuchsbegleitende Staubbmessungen AP4
- Tab. 12: Versuchsbegleitende Untersuchungen bei versilberten Fadenmaterialien mit Silwa AP 5
- Tab. 16: Friktionswerte des hiTEX-Fadens mit abrieb- und reibungsminimierender Schicht
- Tab. 17: Versuchsbegleitende Untersuchungen der hiTEX-Fadenmaterialien AP 5
- Tab. 13: Bewertung des Abriebs bei partiell leitfähiger Textilstrukturen in Korrelation zur Fadenmodifikation
- Tab. 14: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Franse aller Shieldex®-Garne vor und nach der thermischen Behandlung
- Tab. 15: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Tuch aller Shieldex®-Garne vor und nach der thermischen Behandlung

- Tab. 16: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Franse aller hiTEX-Garne vor und nach der thermischen Behandlung
- Tab. 22: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Tuch aller hiTEX-Garne vor und nach der thermischen Behandlung
- Tab. 17: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Tuch mit Shieldex[®]-Variante M2 vor und nach der thermischen Behandlung
- Tab. 18: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Franse mit Hitex-Variante M9A vor und nach der thermischen Behandlung
- Tab. 19: Gegenüberstellung der Projektziele mit den erreichten Ergebnissen besilberte Fadenmaterialien
- Tab. 20: Gegenüberstellung der Projektziele mit den erreichten Ergebnissen kohlenstoffbasierte Fadenmaterialien
- Tab. 21: Geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit
- Tab. 28: Geplante spezifische Transfermaßnahme nach Abschluss des Vorhabens

1. Einleitung

1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Bei den vergangenen drei Techtexilmessen 2019-2024 stand der Trend zur Anwendung von Smart Textiles im Mittelpunkt. Anwenderbereiche für Smart Textiles reichen von Fashion, Workwear, Medizintechnik, Bau und Architektur bis hin zum gesamten Mobilitätssektor. Ein neuer Schwerpunkt liegt auf der Umsetzung von Schnittstellen zwischen Textil und Elektronik für die zunehmende Digitalisierung der Mensch/Technik – Interaktionen, z. B. Sportbekleidung von sanSirro oder die Denim-Jacke von Levi's und Google.^{/4/, /5/} Um die Prognose von Jacquard by google zu erfüllen, dass bis 2025 jeder zehnte auf irgendeine Weise seine Kleidung mit dem Internet verbinden kann, müssen Hersteller von Textilien elektronische Funktionen direkt in den Stoff einarbeiten.^{/4/}

Gewirke werden auf Grund ihrer Eigenschaften wie Drapierbarkeit, Elastizität, Atmungsaktivität, Thermoisolation, Knitter- und Laufmaschenfestigkeit häufig im Bekleidungssektor verarbeitet. Insbesondere die Integration leitfähiger Fadenmaterialien in dreidimensionale Gewirke birgt großes Potential für die Herstellung elektronischer Funktionsgewirke. Grundvoraussetzung dafür ist die Verarbeitung polymerbasierter, leitfähiger Fadenmaterialien auf der Wirkmaschine. Bei der Verarbeitung in der Wirkereivorbereitung (z. B. Schären) und an der Wirkmaschine, bei der Fadenzuführung zu den Fadenführungselementen und Wirkwerkzeugen sowie letztlich bei der Ausbildung der Maschen, sind die leitfähigen Fäden neben hohen Zug- und Reibebeanspruchungen, Biegeradien von fast 360° ausgesetzt. Sie werden dabei mit Fadenspannungen von 5g bis 20g beim Bilden der Masche beansprucht. Durch die orthogonale Bewegung der Lochnadeln und die Zunahme der Kontaktfläche zwischen Nadel und Faden erhöht sich die Zugbelastung auf den Faden. Zudem führt die Verarbeitung leitfähiger Fadenmaterialien durch sogenanntes „Einsägen“ zu schnellerem Verschleiß der Nadeln. Die polymerbasierten leitfähigen Fadenmaterialien sind mit entweder mit Metallschichten [Shieldex[®] /6/, ELITEX[®] /7/, Resistat[®], Sanistat[®] /8/, Silver-tech /1/] überzogen oder mit Polymerschichten, die Kohlenstoffpartikel enthalten [hiTEX-Fäden /9/, CNTEC /10/], wobei diese Schichten eine Dicke von weniger als < 10 µm aufweisen. Bei der wirktechnischen Verarbeitung werden von dieser Schicht einzelne Partikel an der Fadenoberfläche abgelöst /11/, /12/, /1/-/3/. Da die leitfähigen Fäden aus Multifilamenten bestehen, bleibt die Leitfähigkeit an sich

erhalten, der elektrische Widerstand wird jedoch undefiniert erhöht. Im Gewirke führt dies zu einer unzureichenden Stromtragfähigkeit und Produktzuverlässigkeit, vor allem, wenn eben genannte Fehlstellen an Bindungspunkten der Maschen aneinander liegen.

Abgesehen davon führt der Partikelabrieb zur Verschmutzung der Fadenführungselemente und Wirkwerkzeuge und zur Verunreinigung des Arbeitsumfeldes. Gefährlich sind dabei im Besonderen Partikel im Feinstaubbereich (PM 10, Größe < 10 µm), welche für den Maschinenbediener zu einem einatembaren Gesundheitsrisiko werden können. Arbeitsschutztechnisch darf bei der textiltechnologischen Verarbeitung von polymerbasierten, leitfähigen Fadenmaterialien ein Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) für Silberpartikel von 0,8 mg/m³ innerhalb von 15 min nicht überschritten werden. Nur dann ist nicht mit einer akuten oder chronischen Schädigung der Gesundheit der Beschäftigten zu rechnen. Der AGW für elementaren Kohlenstoff liegt bei 0,05 mg/m³.^{/13/} Bisher liegen keine belastbaren Zahlen vor, welche Art und Konzentration des Staubes bei der wirktechnischen Verarbeitung leitfähiger polymerbasierter Fadenmaterialien entstehen. Auch für die Verarbeitung von metallischen Drähten liegen solche Fakten nicht vor. Laut ^{/14/} liegt bei der Herstellung von Zwirnen bei einer Expositionsmessung im Raum und an der Maschine auf einatembaren bzw. alveolengängigen Staub beim Auftrennen versilberter Polyamidgestricke der AGW von Silber im E-Staub bei 0,1 mg/m³ und der Kurzzeitwert bei 0,8 mg/m³. Ähnliche Werte werden bei der Verarbeitung leitfähiger Fäden in der Wirkerei erwartet.

Die beschriebenen produkt- und arbeitsschutztechnischen Herausforderungen bei der Verarbeitung polymerbasierter, leitfähiger Fadenmaterialien sind in der Branche bekannt und stellen für Wirkereien eine erhebliche Hürde zum Einstieg in das Marktsegment der Smart Textiles dar.^{/15/, /16/} Bei der Herstellung leitfähiger Gewirke muss derzeit auf Grund des enormen Abriebes eine höhere Anzahl von leitfähigen Fadenmaterialien eingesetzt werden als elektronisch notwendig ist, um die geforderte Leitfähigkeit und Funktion der Gewirke sicherzustellen. Die Preise leitfähiger Fadenmaterialien auf Basis von Silber liegen z. B. für Shieldex[®] bei ca. 300 - 400 €/kg (ELITEX[®] ca. 2.500 €/kg). Bei kohlenstoffbasierten leitfähigen Fadenmaterialien, z. B. hiTEX, liegen die Preise zwischen 200 - 300 €/kg.^{/11/} Ein weiterer wichtiger Kostenaspekt ist der beschleunigte Verschleiß von Fadenführungselementen und Wirkwerkzeugen durch die tribologischen Effekte bei der Verarbeitung der leitfähigen Fäden. Aus Fachgesprächen mit Wirkereien und aus eigenen Erfahrungen ist bekannt,

dass sich die Lebensdauer von Fadenführungselementen und Wirkwerkzeugen um bis zu 30 % reduziert. Zudem werden die Kosten durch zusätzliche Rüstzeiten und damit lange Maschinenstillstände erhöht. Die erhöhten Materialkosten sind enorme Kostentreiber, welche sich in hohen Marktpreisen des Endproduktes niederschlagen. Das wird nicht von jedem Endkunden für Smart Textiles am Markt akzeptiert.

Im durchgeführten Forschungsprojekt werden die tribologischen Einflussgrößen beim Verwirken polymerbasierter leitfähiger Fäden durch Optimierung der Oberflächenbeschaffenheit der Wirkwerkzeuge und der leitfähigen Fäden selbst verringert und somit der Abrieb minimiert. Erfahrungen von Nadelherstellern zeigen, dass durch Anpassung der Nadelöhrform und Oberflächenbeschichtung (Vergrößerung des Fadenfreiraumes in der Nadel) Reibungskräfte und damit Verschleißerscheinungen verringert werden können. Für textile Fadenmaterialien ist die Applikation reibungsminimierender Schichten aus Silikon, Wachs oder Paraffin Stand der Technik, um eine gute textiltechnologische Verarbeitung und geringe tribologische Einflussfaktoren zu erreichen. Allerdings lassen sich diese Beschichtungen nicht einfach auf metallisierte oder kohlenstoffhaltige leitfähige Fäden übertragen, ohne einen Einfluss auf den elektrischen Widerstand oder die Kontaktierungsmöglichkeit auszuschließen. Grundlegende Erkenntnisse sind aus /17/, /1/-/3/ zur Umsetzung eines leitfähigen Näh- bzw. Stickfadens bekannt. Auch im Stickprozess wird der leitfähige Faden bei der Verarbeitung als Oberfaden und einer industriellen Nähgeschwindigkeit von ca. 5.000 Stichen/min hohen Zug- und Reibungsbelastungen ausgesetzt, was letztendlich einen hohen Partikelabrieb und damit veränderte elektrische Kennwerte mit sich führt. /19/ Auch hier spielt die Tribologie eine wesentliche Rolle und erschwert den Marktzugang. Mit steigender Beschichtungsauflage entsteht jedoch eine Isolationsschicht, welche die Kontaktierung erschwert. Bisherige eigene Forschungsarbeiten /18/ sowie Erfahrungen von Unternehmen aus dem projektbegleitenden Ausschuss (PBA) favorisieren derzeit Beschichtungen auf Basis Polyurethan, Wachs, Polyethylen, Polysilazanen mit einer Beschichtungsauflage von max. 5 %.

Zusammenfassend sind Entwickler von Smart Textiles mit folgenden Problemen/Markteintrittsbarrieren konfrontiert:

- Verschleiß der Wirkwerkzeuge □> höhere Kosten durch Rüstzeiten und Maschinenstillstände

- Partikelabrieb leitfähiger Faden □> Veränderung der elektrischen Kennwerte
- Partikelabrieb leitfähiger Faden □> Einhaltung AGW-Werte
- Absetzen der Partikel in der Wirkware □> Verschmutzung, Hotspots
- Absetzen der Partikel auf elektronischen Komponenten der Maschine à Hotspots
- Absetzen der Partikel auf Maschinenbauteilen □> Verschmutzung
- Geringe Produktzuverlässigkeit □> höhere Kosten durch erhöhten Materialeinsatz

Die Reduzierung dieser Markteintrittsbarrieren führt langfristig zu höherem Umsatz und verbesserter Wettbewerbsfähigkeit der KMU.

1.2 Stand der Forschung und Entwicklung

1.2.1 Gewirke mit integriertem leitfähigen Fadenmaterial

Laut /19/ kommen textile Gewirke in vielen Lebensbereichen zum Einsatz, insbesondere im Bereich der Smart Textiles. Seit Mitte der 90-er Jahre suchen die Textil- und Elektrotechnikindustrien gemeinsam Lösungen, um leitfähige Litzen und später polymerbasierte leitfähige Fadenmaterialien in komplexe Gewirkestrukturen einzuarbeiten. Solche Strukturen wurden erstmals im Oktober 1997 in Cambridge, Massachusetts vorgestellt./20/ Bis heute wurde eine Vielzahl von Demonstratoren und Funktionsmuster aufgebaut, allerdings fanden nur wenige ihren Weg als etabliertes Produkt in den Markt. Bestehende Markteintrittsbarrieren sind dabei sowohl technologischer als auch kaufmännischer Natur. Einer der ausschlaggebenden technischen Aspekte für funktionelle gewirkte leitfähige Strukturen sind die bei der Verarbeitung auftretenden tribologischen Effekte an den Wirkwerkzeugen, Fadenführungselementen und leitfähigen Fadenmaterialien und der damit entstehende Abrieb bei den Fäden und der Verschleiß an den Wirkwerkzeugen sowie Fadenführungselementen. Die Firma Statex Produktions- und Vertriebs GmbH, welche versilberte Gewirke mit antibakterieller Wirkung anbietet, realisiert die nasschemische Metallisierung erst nach dem Verwirken von Polyamid-Fadenmaterialien und umgeht so die beschriebenen Abriebproblematiken in der Wirkerei. Die nasschemische Metallisierung der gesamten Wirkfläche ist nicht für jede Anwendung sinnvoll, macht das Endprodukt teuer und kann insbesondere zu einer Schwachstelle bei den elektrischen Kontakten (Kopf- bzw. Fußbindung) führen. Bekannt aus Firmenbesuchen und –kontakten ist, dass nahezu alle Wirkereien (z. B. Eschler Textil GmbH /21/, Pressless GmbH) intern an Smart Textiles Produkten entwickeln./17/ Die Müller Textil

GmbH (Marktführer im Bereich der technischen dreidimensionalen Gewirke) schützt in drei Patenten /22/-/24/ die vollflächige oder partielle Vermaschung leitfähiger Fadenmaterialien in dreidimensionalen Gewirken. Die Patente beschreiben Gewirkestrukturen mit Heizfunktion, in welchen metallisch beschichtete, multifile Fadenmaterialien (Fadenfeinheit < 250 dtex) und leitfähige Litzen (Gesamtquerschnitt $< 0,05 \text{ mm}^2$) vermascht sind. Auch die Karl Jahn GmbH & Co. KG und die Kufner Group bieten Smart Textiles Gewirke an. Das Ethermity[®]-Heiztextil der Karl Jahn GmbH & Co KG wurde 2018 auf den Markt gebracht und arbeitet im Niederspannungsbereich. Das Produkt wird auf Wirkmaschinen mit groben Feinheiten hergestellt und in technischen Gewirken als Wand-, Boden- und Deckenheizung eingesetzt./25/ Die verarbeiteten Litzen und leitfähigen Monofile werden vorwiegend als Steh- bzw. Schussfäden eingearbeitet. Da kein Vermaschungsvorgang erfolgt, sind die Reib- und Zugbelastung auf die Litzen bzw. das Monofilament und damit auch der Abrieb gering. Die Kufner Group bietet ein leitfähiges Gewirke (XShield) zur Abschirmung elektromagnetischer Strahlung an /26/, wobei die Einarbeitung von leitfähigen Fadenmaterialien in die gesamte Fläche erfolgt. Damit und durch die textile Konstruktion ergibt sich eine Redundanz, d. h. die Leitfähigkeit des einzelnen Fadens oder der einzelnen Leiterbahn ist vernachlässigbar.

Ähnliche Problemstellungen zur Abrasion bei der Verarbeitung leitfähiger Fadenmaterialien wurden bereits in verwandten Textiltechnologiebereichen untersucht. In der Stickerei wird die Problematik durch das Auftragen geeigneter Funktionsschichten auf den leitfähigen Stickfaden gelöst. Dies verbessert die textiltechnologische Verarbeitbarkeit sowie die Beständigkeit gegenüber chemischen, mechanischen und thermischen Prozessen. Das Aufbringen einer Polymerbeschichtung auf Polyurethanbasis verändert die mechanische Beständigkeit nachweislich positiv./27/ Bei der wirktechnischen Verarbeitung sind die zu verarbeitenden leitfähigen Fadenmaterialien ähnlich hohen Zug- und Reibungsbelastungen ausgesetzt wie in der Stickerei. Die größte Belastung tritt an den Wirkwerkzeugen, vor allem bei Ausbildung der Maschen auf. Dies ist aus tribologischer Sicht wie folgt schematisch darstellbar (Abb. 1), wobei die Wirkwerkzeuge und der leitfähige Faden als Beanspruchungskollektiv im tribologischem System dargestellt sind. Partikelabrieb vom Faden und der Verschleiß sowie der Materialverlust der Wirkwerkzeuge sind die Verlustgrößen. Schon kleine Veränderungen im System wirken sich in beträchtlichem

Maße auf die Reibungsbelastung und den Verschleiß aus. Das Modifizieren der Wirkwerkzeuge und leitfähigen Fäden verringert die Verlustgrößen.

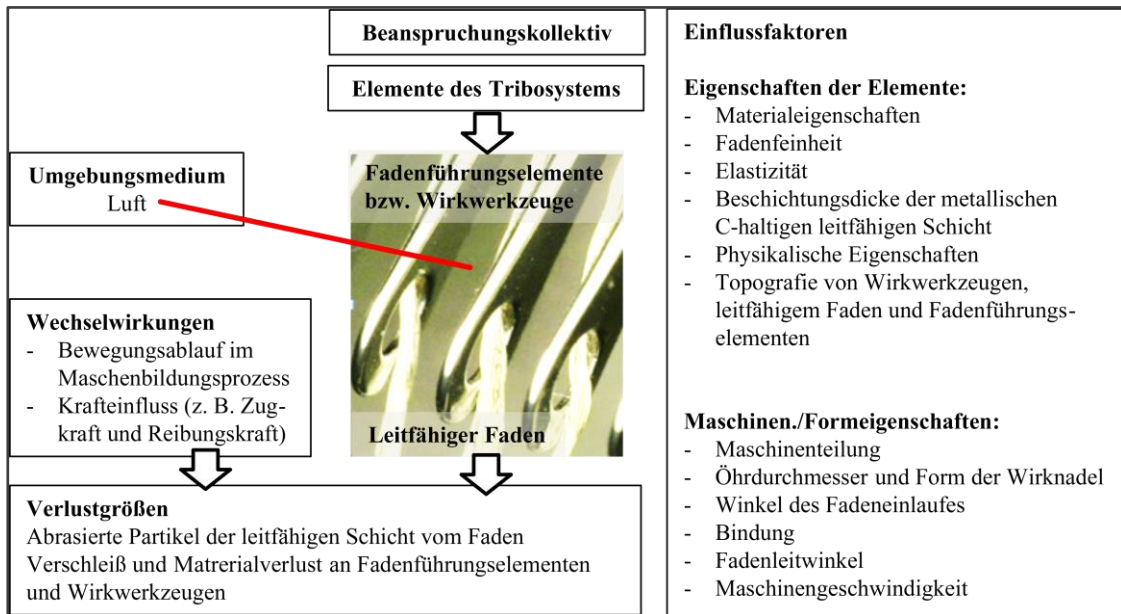


Abb. 1: Darstellung des tribologischen Systems mit Einflussfaktoren beim Verwirken leitfähiger Fäden /28/

1.2.2 Leitfähige Fadenmaterialien

Auf dem Markt sind derzeit vielfältige leitfähige Fadenmaterialien bekannt, die sich in drei wesentliche Kategorien unterteilen lassen: Drahtlitzen u. a. aus Kupfer und Edelstahl, Garne auf Basis von Kohlenstoff sowie kohlenstoffgefüllte Polymere und leitfähig beschichtete/metallisierte Polymere. Eine prinzipielle Einteilung leitfähiger linienförmiger Materialien, welche sich für einen Einsatz in Textilien eignen, ist im Schlussbericht zum IGF-Projekt Nr. 146 ZBR zugänglich./29/ Elektrische Leiter wie z. B. Drähte und Litzen werden wie Metallfasern auf Grund der hohen Fadenfeinheiten, welche für die wirktechnische Verarbeitung zu grob sind, im Verlauf nicht aufgeführt. Für die Vermaschung der Fadenmaterialien auf den im Projekt verwendeten Wirkmaschinen mit Teilungen von E 22 bis E 24 eignen sich leitfähige Fadenmaterialien bis zu einer Fadenfeinheit von maximal 450 dtex. In Tabelle 1 sind geeignete verfügbare, leitfähige Fadenmaterialien in Hinblick auf die Leitfähigkeitswerte sowie Endfeinheiten dargestellt. Seit den 80iger Jahren sind metallisierte (versilberte) PA-Fadenmaterialien (Shieldex[®]) verfügbar. Die Metallisierung durchdringt dabei das gesamte Material, jedes Filament wird selbst ringsum versilbert./7/, /30/, /31/ Die Technologie zur Herstellung von hochleitfähigen PA/Ag – Fadenmaterialien (ELITEX[®]) auf der Basis von Shieldex[®] Materialien ist Ergebnis eines Forschungsprojektes des

TITV Greiz mit erfolgreicher Umsetzung in die industrielle Fertigung./32/ Weitere recherchierte metallisierte Fadenmaterialien sind in /33/-/37/ aufgeführt. Carbonfasergarne sind Filamentgarne auf Basis Polyacryl, Pech oder Viskose, welche durch Pyrolyse karbonisiert werden /38/, mit einem Kohlenstoffgehalt von > 80 %./29/ Größte Hersteller von Carbonfasern sind Toray, Toho Tenax, Mitsubishi Ryon und SGL Carbon. Die Fa. Kurarayliving Co. stellt leitfähige Garne auf Basis eines Polyester-Multifilaments mit einer Beschichtung von Carbon Nanotubes her./36/ Ergebnis eines Forschungsvorhabens des TITV Greiz ist ein hochohmiger Faden mit permanenten und gleichmäßigen elektrischen Eigenschaften auf Basis einer thermisch aktivierbaren Polymerbeschichtung mit Kohlestoffpartikeln. /9/, /10/

Tab. 22: Leitfähige Fadenmaterialien mit für die wirktechnische Verarbeitung geeigneten Endfeinheiten

Beschreibung	Hersteller	Produktname	Elektr. Widerstand	Endfeinheit
Leitfähige Polymere	Shakespeare Monofilaments	Resistat [®] , Sanistat [®] /9/	960 kΩ/m	Ø 200 µm
	TITK e.V., Rudolstadt	PTC /39/	425 bis 1264 kΩ/ m	300 dtex
	KURARALIVING Co., Ltd.	CNTEC /10/	1050 Ω/m	240 dtex
Metall-beauflagte Polymere	imbut GmbH	ELITEX [®] /7/	20 Ω/m	450 dtex
	Statex Produktions- und Vertriebs GmbH	Shieldex [®] 117f17*2 /30/,/31/	120-130 Ω/m	235 dtex
	R.STAT SAS	silveR.STAT [®] 240dtex /40/	100 Ω/m	300 dtex
	SHIJIAZHANG SHIELDAY IMP & EXP CO. LTD	Shielday /41/	300 Ω/m	200 dtex
	TIBTECH innovations	Silverpam 250 dtex /42/	170-260 Ω/m	322 dtex
	Schoeller GmbH & CoKG	S-Shield PES 80 % / 20 % Inox /43/	-	-

1.2.3 Abrieb bei textiltechnologischer Verarbeitung

Das mit hoher Geschwindigkeit (1000 m/min Spulgeschwindigkeit in der Wirkereivorbereitung, 5000 Stiche/min bei der nähtechnischen Verarbeitung, 1.000 Stiche/min bei der sticktechnischen Verarbeitung) die Fadenleitelemente

durchlaufende Fadenmaterial wirkt durch mechanische Belastung und elektrostatische Aufladung extrem verschleißend auf die Fadenführungen und andere Kontaktelemente in arbeitenden Textilmaschinen. Die Kontaktflächen müssen abriebbeständig und von hoher Oberflächengüte sein, damit es weder zu Fadenabrieb noch zu Fadenbruch kommt./11/ Deshalb werden textile Fadenmaterialien mit Präparationen für reibungsminimierende Eigenschaften und die Fadenführungselemente mit verschleißminimierenden Schichten versehen. In der Spinnerei eingesetzte Spulöle schützen die Garne gegen mechanische Beschädigung und gegen elektrostatische Aufladung und sorgen für gute Verarbeitungseigenschaften u. a. beim schnellen Umspulen oder bei der Herstellung von Kettbäumen. Bei der weiteren Verarbeitung der Garne zu textilen Flächengebilden werden Schichten (auch auf Basis von Ölen), eingesetzt, um die Garne bei der Verarbeitung vor Beschädigung zu schützen und die Garnfestigkeit zu erhöhen. Art und Zusammensetzung der Präparationsmittel hängen von der Faserart und dem Verarbeitungsprozess ab. Sie bestehen meist aus Gleitmitteln auf Basis von Polyglykol und Esterölen, Antistatika oder Emulgatoren. Schlichtemittel bestehen aus natürlichen Polymeren und ihren Derivaten oder synthetischen Polymeren (u. a. Polyvinylalkohol, Polyacrylat)./50/ Diese gängigen Präparationen (0,1-1,5 % Auflage) für textile Fadenmaterialien beeinflussen die tribologischen Einflussgrößen. In verschiedenen Vorlaufprojekten zeigte sich, dass diese jedoch nur bedingt für die metallisierte bzw. kohlenstoffhaltige Schicht geeignet sind. Die Wirkung (auf leitfähigen Fadenmaterialien) ist u. a. abhängig von der Beschichtungsaufgabe. Ist diese zu hoch, führt dies zur Isolierung der leitfähigen Schicht und damit zum Funktionsverlust der Stromübertragung an den Bindungsstellen.

Im IGF-Forschungsvorhaben 15116 N vom Institut für Textil- und Verfahrenstechnik wurde in 2010 der Einfluss von thermostabilen Präparationen und Maschinenölen auf das Verschleißverhalten von Maschenbildungselementen untersucht. Die Untersuchung der antikorrosiven Eigenschaften nach Norm zeigte, dass sich die thermostabilen Präparationen/Spulöle in ihrer Beurteilung nicht von den klassischen Typen unterscheiden. Für die korrosionsinhibierenden Eigenschaften an den Werkzeugen ist weniger der Wasseranteil als die eingesetzten Additive verantwortlich. Resultate aus dem ZIM-Verbundvorhaben „TexPermasens“ der Firmen Alterfil Nähfaden GmbH und Lefatex Chemie GmbH /12/ sowie eigene Ergebnisse /1/-/3/ zeigen, dass durch das Aufbringen reibungsminimierender Schichten auf leitfähigen Fadenmaterialien die Reibungskräfte an Näh- und Stickwerkzeugen deutlich reduziert und somit der

Metallabrieb bei der näh- und sticktechnischen Verarbeitung verringert werden. Zur Optimierung der Verarbeitungseigenschaften leitfähiger Garne werden aufbauend auf diesen Ergebnissen Präparationen bzw. Beschichtungen auf Basis von u. a. Polyurethan (PU) bzw. Wachs und Polyethylen (PE) mit einer Beschichtungsaufgabe von max. 5% favorisiert. PU ist ein vielfach verwendeter Kunststoff, dessen Eigenschaften sehr unterschiedlich sind. Eine PU Beschichtung kann hart und spröde, aber auch elastisch und weich sein./44/ Im Textilbereich werden PU-Schichten u. a. für wasserabweisende, reiß-, knick- und abriebfeste Eigenschaften eingesetzt.// PE hat eine geringere Festigkeit, Härte und Steifigkeit. Dagegen weist es hohe Dehnbarkeit und Kälteschlagfestigkeit, ein gutes Gleitreibverhalten, hohe chemische Beständigkeit und abhängig vom Mengeneinsatz elektrische Isolationseigenschaften auf./46/

2. Ziel und Darstellung des Lösungsweges

2.1 Forschungsziel und angestrebte Ergebnisse

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Konzeptes zur Vermeidung des abrasiven Verschleißes an Wirkwerkzeugen (Zungen- und Lochnadeln) und des Partikelabriebs bei der wirktechnischen Verarbeitung von polymerbasierten, leitfähigen Fadenmaterialien durch Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Nadeln und Fäden zur Umsetzung gewirkter elektronischer Textilien mit hoher Produktzuverlässigkeit. Dabei spielen die Wechselwirkung zwischen Wirkwerkzeugen und leitfähigen Fäden sowie deren Modifizierungen durch Beschichtung oder Veränderung der Nadelgeometrie eine entscheidene Rolle zur Beeinflussung der tribologischen Effekte (vgl. Abb. 1). Im Rahmen der Projektarbeit ist dieses Zusammenspiel im Labor- und im Technikumsmaßstab betrachtet und daraus das Konzept zur verschleiß- und abriebarmen wirktechnischen Verarbeitung von leitfähigen polymerbasierten Fadenmaterialien erarbeitet worden (Tab. 2):

Tab. 23: Zusammenspiel Wirkwerkzeuge und Polymerbasierter leitfähiger Faden

Wirkwerkzeug/Nadel	Polymerbasierter leitfähiger Faden
Kommerziell verfügbare Nadeln	Kommerziell verfügbarer Faden
Kommerziell verfügbare Nadeln	Beschichteter leitfähiger Faden
Modifizierte Nadeln	Kommerziell verfügbarer Faden
Modifizierte Nadeln	Beschichteter leitfähiger Faden

Leitfähig Garne werden bereits in der Wirkereivorbereitung (Schären, Spulen) und bei der wirktechnischen Verarbeitung hohen Zug- und Reibungsbelastungen ausgesetzt. Die auf den Faden wirkenden Kräfte führen zum Abrieb von leitfähigen Partikeln, u. a. Metall- oder Kohlenstoffpartikel, aus der Schicht des polymerbasierten leitfähigen Fadens und zum Verschleiß der Wirkwerkzeugen. Um die in 1.1 beschriebenen Problematiken zu beheben, erfolgen im ersten Schritt Laboruntersuchungen an leitfähigen Einzelfäden und den Wirkwerkzeugen (Zungennadeln, Lochnadeln) am TENS-O-MAT II im Labormaßstab. Am Testgerät wird die mechanische Belastung zwischen Faden und Nadel ähnlich der Beanspruchung an der Wirkmaschine nachgestellt und anschließend werden der Partikelabrieb, Fadenbeschädigungen und Beschädigungen an den Loch- und Zungennadeln mikroskopisch beurteilt. Ein Lösungsansatz besteht darin, auf die leitfähigen Fadenmaterialien reibungsminimierende Schichten u. a. auf Basis von Polyurethan, Wachsen und Polyethylen aufzubringen. Ein weiterer Lösungsansatz ist, auf Grundlage der Erfahrungen der Fa. Merck KGaA aus dem PBA Beschichtungen auf Polysilazan-Basis auf die leitfähigen Fäden aufzubringen. Diese werden bisher hauptsächlich für Antigrffiti-Schichten auf Zügen eingesetzt. /47/,/48/ Erste Vorversuche zeigen, dass diese grundsätzlich in sehr dünnen abriebfesten Schichten auf Fäden applizierbar sind. Damit bleibt der textile Charakter erhalten. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass die Korrosionsbeständigkeit und die Reibungseigenschaften verbessert werden. Die Überprüfung der Abriebminimierung und der Funktionserhalt erfolgen dabei sowohl im Labormaßstab als auch im Technikumsmaßstab. Geplant ist ebenso, die Verringerung des Abriebes durch den Einsatz modifizierter Wirkwerkzeuge zu erreichen. Die Nadeln werden dazu in ihrer Form und Oberflächenbeschaffenheit verändert. Durch die Untersuchungen der tribologischen Kenngrößen und deren Einflussfaktoren entlang der wirktechnologischen Verarbeitungskette (Spulen, Schären, Wirken) werden konkrete Empfehlungen für die gewirketechnische Verarbeitung polymerbasierter, leitfähiger Fadenmaterialien erarbeitet, um neben einer hohen Produktqualität auch dem Arbeits- und Maschinenschutz gerecht zu werden. Durch das zusätzliche Beschichten der leitfähigen Fadenmaterialien werden die gewirkten Smart Textiles Produkte zwar preisintensiver, jedoch erhöhen sich gleichzeitig die Produktzuverlässigkeit und die Produktstandzeit. Der zusätzliche Verarbeitungsschritt Beschichten, welcher sich durch eine Kostenerhöhung von 5 - 20 €/kg Fadenmaterial auswirkt, kann durch eine sparsamere Verarbeitung des 300 - 2.500 €/kg teuren leitfähigen Fadenmaterials schnell kompensiert werden. Die Prüfergebnisse werden fortlaufend mit dem unter

gleichen Bedingungen ermittelten Abrieb der beschichteten leitfähigen Fadenmaterialien auf Polymerbasis und den modifizierten Wirkwerkzeugen verglichen und eine Kosten/Nutzen-Analyse bzw. Wirtschaftlichkeitsrechnung erstellt.

2.2 Lösungsweg

Der Lösungsweg sieht vor allem eine chronologische Bearbeitung der einzelnen Arbeitspakete vor. Ein Teil der Projektaufgaben einiger Arbeitspakete, z. B. von Arbeitspaket 5, können gemäß dem Ansatz simultaner Projektbearbeitung (Concurrent Engineering) bearbeitet werden. Folgende Arbeitspakete (AP) sind zur Realisierung der Zielstellung vorgesehen (Abb. 2):

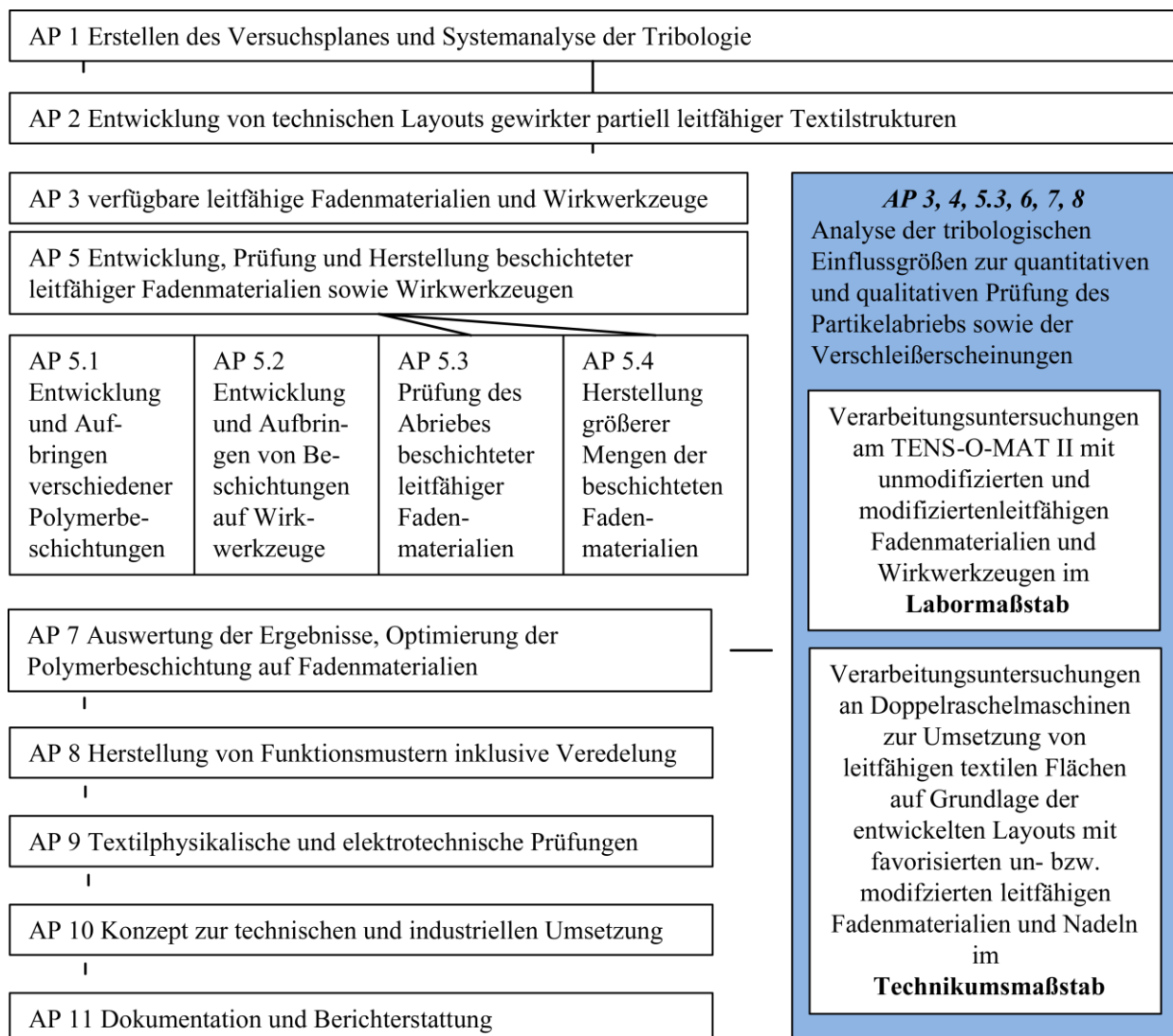


Abb. 2: Schema des Lösungsweges

3. Darstellung der durchgeführten Arbeiten und der erzielten Vorhabensergebnisse

3.1 AP 1 - Erstellen des Versuchsplanes und Systemanalyse der Tribologie

In Zusammenarbeit mit dem PBA sind polymerbasierte leitfähige Fäden auf Metallbasis (ELITEX[®], Shieldex[®]) bzw. Kohlenstoffbasis (hiTEX) für die geplante Anwendung ausgewählt und charakterisiert worden. An Hand der Fadeneigenschaften (Fadenfeinheit, Kraft-Dehnungsverhalten, Oberflächenhärte, Biegesteifigkeit) sowie der elektrischen Kennwerte ist, unter Berücksichtigung geplanter Anwendungen, gemäß dem Eigenschaftsprofil der Versuchsplan erstellt worden. Tabelle 3 stellt die textilphysikalischen und elektrischen Kennwerte der ausgewählten Fadenmaterialien dar. Parallel dazu ist die in 1.2.1 aufgezeigte Systemanalyse der Tribologie für die wirktechnische Verarbeitung hinsichtlich der zu untersuchenden Einflussfaktoren (u. a. Bindung, Maschinengeschwindigkeit) festgelegt worden.

Tab. 3: Textilphysikalische und elektrische Kennwerte ausgewählter Fadenmaterialien

Leitfähiges Fadenmaterial	Feinheit in tex	Höchstzugkraft in cN	Dehnung in %	feinheitsbez. Höchstzugkraft in cN/tex	Elektrischer Widerstand
Shieldex [®] 117dtexf17x2	30,00	1438,7	21,3	48	Ø 127,3 Ohm/m
ELITEX [®] 117dtexf17x2	40,5	1392,1	19,4	34,4	Ø 18,4 Ohm/m
PES mit kohlenstoffhaltiger Beschichtung (hiTEX)	21,4	413,6	22,2	19,3	200 – 700 kOhm/m

Des Weiteren sind mit dem PBA ein Anforderungsprofil für die nasschemische Vorbehandlung der leitfähigen Fadenmaterialien erstellt sowie das geplante Eigenschaftsprofil wie folgt weiter konkretisiert worden.

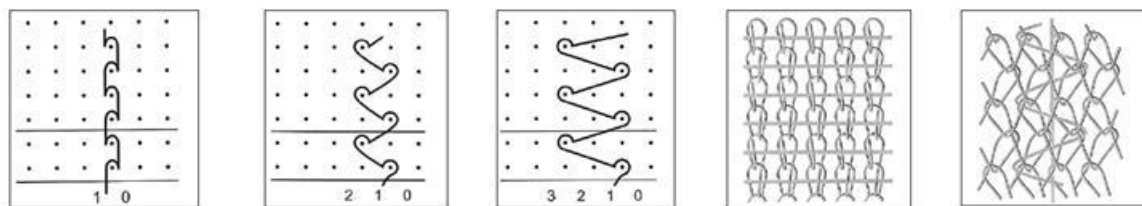
- max. 20 % Veränderung in der Höchstzugkraft sowie des elektrischen Fadenwiderstands nach Aufbringen der Polymerbeschichtung
- 25 % Verringerung der Reibungskräfte durch Aufbringen der reibungsminimierenden Schicht
- Max. 5% Beschichtungsaufgabe
- Verringerung des Abriebes

- Steigerung der Produktivität bei der Verarbeitung von leitfähigen Fäden mit Polymerbeschichtung

Nach Verarbeitung der leitfähigen Fäden in den Produktionsmaschinen (Spulerei, Schärerei und Wirkerei) ist eine um max. 25 % Veränderung der Höchstzugkraft sowie des elektrischen Fadenwiderstands angestrebt worden. Die Verbesserungen sollen zudem dazu führen, dass die Arbeitsplatzgrenzwerte betreffend Feinstaubbelastung durch Silber- bzw. Kohlenstoffpartikel nicht überschritten werden.

3.2 AP 2 - Entwicklung technischer Layouts gewirkter partiell leitfähiger Textilstrukturen

In diesem Arbeitspaket sind Layouts für 2D- und 3D-Gewirke mit Grundbindungen zum Aufbau leitfähiger, elektronischer Gewirke für Heizstrukturen entwickelt worden. Hierbei ist in Zusammenarbeit mit dem PBA unterschieden worden, bei welchen Grundbindungen eine geringe (Abb. 3) und bei welchen eine starke tribologische Belastung (Abb. 4) des Fadens bei der wirktechnischen Verarbeitung vermutet wird.



Franse
offen

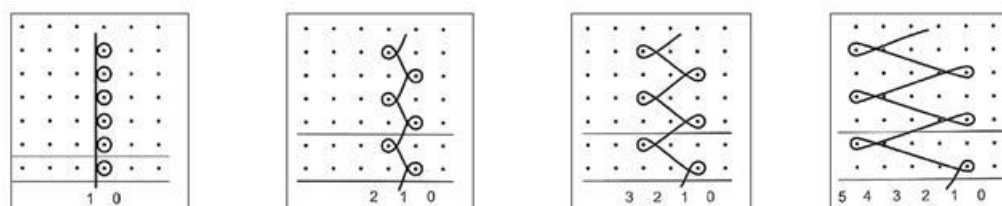
Trikot
offen

Tuch
offen

Schuss

Stehfaden

Abb. 3: Layouts mit geringer tribologischer Belastung



Franse
geschlossen

Trikot
geschlossen

Tuch
geschlossen

Samt
geschlossen

Abb. 4: Layouts mit starker tribologischer Belastung

Zur Umsetzung der verschiedenen Layouts sind immer nicht leitfähige mit leitfähigen Fadenmaterialien kombiniert worden. Die nicht leitfähigen Fäden auf Polyesterbasis (in Abb. 5-7 hell dargestellt) dienen als isolierende Bereiche im Gewirke. Es sind drei Layouts (Franse offen, Trikot geschlossen und Schussbindung) ausgewählt und auf der Doppelraschelmaschine umgesetzt worden.

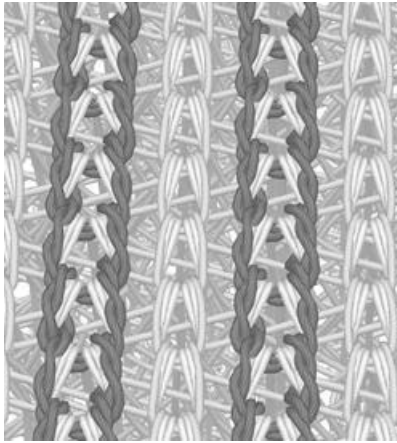


Abb. 5: Layout Franse offen
(Warpsimulation)



Abb. 6: Layout Tuch geschlossen
(Warpsimulation)

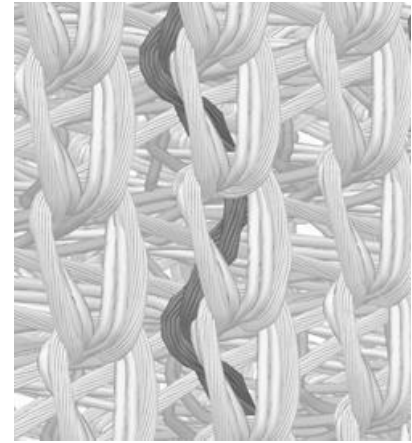


Abb. 7: Layout Schuss (Warpsimulation)

Tabelle 4 stellt das Einzugschema für die ausgewählten Layouts dar. Für eine gut sichtbare Beurteilung der tribologischen Effekte und der Abrieberscheinungen ist die Verarbeitung der leitfähigen Fadenmaterialien in Legeschiene 7 und damit in der Deckfläche erfolgt.

Tab. 24: Einzugschema für die ausgewählten Layouts

Fräsblechabstand		6,5 mm			
	Material	Fadeneinlauf	Legung	Bindung	Einzug
L 1	76f24 dtex PES	2450	1-0-1-1/2-3-2-2/	Tuch	voll (1 TKB á 460 Fd.)
L 2	76f24 dtex PES	2500	2-3-2-2/1-0-1-1/	Tuch	voll (1 TKB á 460 Fd.)
L 3	PES Monofil 108f1 dtex	11300	1-0-0-1/3-4-4-3/	X-Pol	voll (1 TKB á 460 Fd.)
L 4	Leer				
L 5	PES Monofil 108f1 dtex	11150	1-0-0-1/3-4-4-3/	X-Pol	voll (1 TKB á 460 Fd.)
L 6	76f24 dtex PES	2400	2-3-2-2/1-0-1-1/	Tuch	voll (1 TKB á 460 Fd.)
L 7	76f24 dtex PES + versch. leitf. Materialien gemäß AP 1 mit je 20 Fäden (Einzug 1 voll / 1 leer)	1700	0-0-0-1/1-1-1-0	Franse	voll (1 TKB á 460 Fd.)
L 7	Siehe Franse	500	1-1-2-3/2-2-1-0	Schuss	voll (1 TKB á 460 Fd.)
L 7	Siehe Franse	2600	0-0-1-1/1-1-0-0	Tuch	voll (1 TKB á 460 Fd.)

3.3 AP 3 - Ist-Stand-Analyse zur quantitativen und qualitativen Prüfung des Abriebes mit am Markt verfügbaren polymerbasierten, leitfähigen Fadenmaterialien und verfügbaren Wirkwerkzeugen am TENS-O-MAT II

Die Reibungsbelastung und damit der Abrieb sind abhängig von der Haftung der leitfähigen Schichten auf dem Faden sowie von der Beschaffenheit der Wirkwerkzeuge. In diesem Arbeitspaket sind die in Punkt 3.1 vorgestellten, kommerziell verfügbaren

Fadenmaterialien hinsichtlich des Abriebs leitfähiger Partikel bei Reibungsbelastung an verfügbaren Standardzungen- und Lochnadeln untersucht worden. Tabelle 5 stellt die eingesetzten Zungen- und Lochnadeln dar.

Tab. 25: Eingesetzte leitfähige Fadenmaterialien sowie Zungen- und Lochnadeln bei der Abriebprüfung am TENS-O-MAT II

Muster	Nadeltyp	Leitfähiger Faden
Sample 18	<ul style="list-style-type: none"> Lochnadel Karl Mayer ML-22-93-49 7 unbeschichtet Zungennadel Groz Beckert 35.60 G04 unbeschichtet 	Shieldex [®] , 117 dtex 17*2
Sample 19	<ul style="list-style-type: none"> Lochnadel Karl Mayer ML-22-93-49 7 unbeschichtet Zungennadel Groz Beckert 35.60 G04 unbeschichtet 	Elitex, 117dtexf17*2
Sample 21	<ul style="list-style-type: none"> Lochnadel Karl Mayer ML-22-93-49 7 unbeschichtet Zungennadel Groz Beckert 35.60 G04 unbeschichtet 	hiTEX Standard, 205dtexf36*1

Für die Untersuchung ist ein Prüfaufbau (Abb. 8 und Abb. 9) am TENS-O-MAT II entwickelt worden. Dieser Prüfaufbau dient der labortechnischen Nachstellung der tribologischen Effekte zwischen Faden und Nadel, die bei der Verarbeitung auf einer Wirkmaschine entstehen. Für den Versuch ist mit dem PBA ein Bewegungsprofil, für Loch- und Zungennadel besprochen und festgelegt worden, welches den Bewegungen und der Kontaktanzahl zwischen Faden und Nadel bei der wirktechnischen Verarbeitung entspricht. Für die Simulation eines durch die Maschine laufenden Fadens sind am TENS-O-MAT II zusätzlich eine Fadenbremse zur definierten Zuführung und ein Motor für den Durchzug installiert worden.

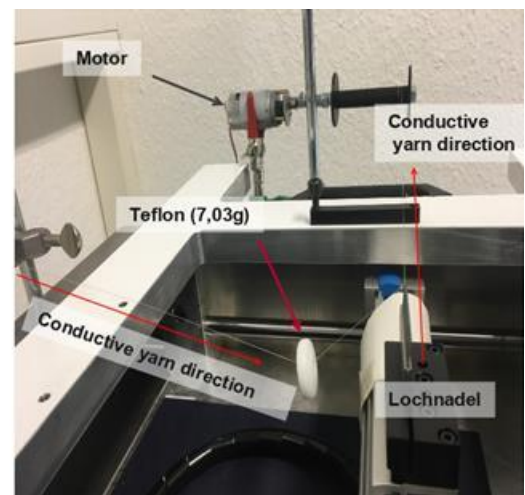
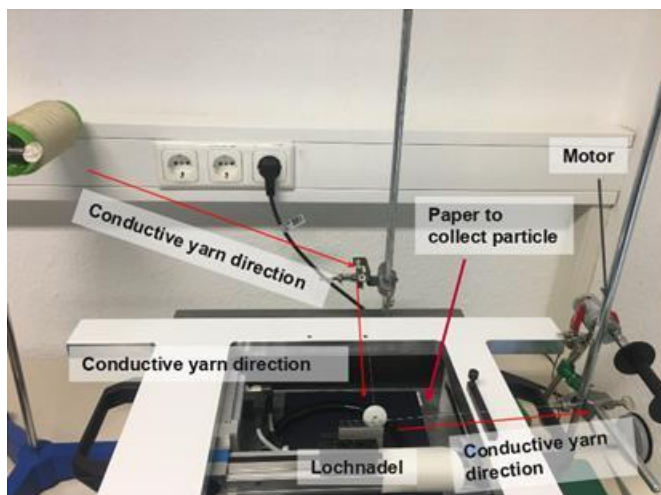


Abb. 8 und 9: Setup der Reibungsversuche am TENS-O-MAT II

Erarbeitetes Bewegungsprofil für die Lochnadeln:

Der leitfähige Faden ist mit einer Umschlingung von maximal 90° durch das Loch der Lochnadel (Abb. 10) eingezogen worden. Dies entspricht der Umschlingung bei einer Bindung mit hohem Versatz der Nadeln, d. h. einem hohen tribologischen Effekt für die Lochnadel und den leitfähigen Faden. Der Kontakt zwischen Lochnadel und Faden ist auf 4 Zyklen und die Gesamtanzahl an Zyklen für die Lochnadel auf 1000 festgelegt worden.

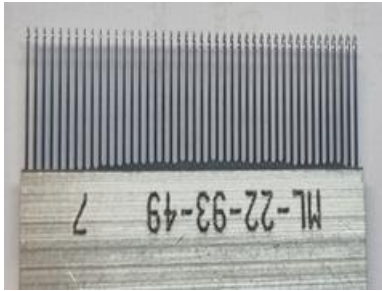


Abb. 10: Lochnadelblech



Abb. 9: Zungennadel

Erarbeitetes Bewegungsprofil für die Zungennadeln:

Für die Zungennadeln (Abb. 11) beträgt die maximale Umschlingung des Fadens 180° um den Nadelkopf. Dies entspricht einer Bindung mit geringem Versatz der Nadeln, aber hohem tribologischen Effekt für die Zungennadel und den leitfähigen Faden. Der Kontakt zwischen Zungennadel und Faden ist auf 2 Zyklen, die Gesamtanzahl an Zyklen für die Zungennadel ebenfalls auf 1000 festgelegt worden. Nach den Beanspruchungsuntersuchungen sind die entstandenen abgeriebenen Partikel erfasst worden. Zusätzlich ist die Gesamtfläche der Wirkwerkzeuge ermittelt worden, die mit leitfähigem Abrieb bedeckt ist (Tab. 6).

Tab. 6: Beurteilung quantitativer Abrieb auf den Wirkwerkzeugen AP 3

Muster	Nadel	Gesamtfläche (mm ²)	Fläche Leitfähige Partikel (mm ²)	Anteil der Fläche der mit leitfähigen Partikeln bedeckt ist (%)
Sample 18	Lochnadel	2790.75	5.79	0.21
Sample 19	Lochnadel	2790.75	4.57	0.16
Sample 21	Lochnadel	2790.75	5.12	0.18
Sample 18	Zungennadel	2790.75	3.76	0.13
Sample 19	Zungennadel	2790.75	4.23	0.15
Sample 21	Zungennadel	2790.75	6.58	0.24

Nach Beendigung der Belastungszyklen konnte bei allen untersuchten Wirkwerkzeuge und Fadenmaterialien abrasiver Verschleiß, in Form von leitfähigen Partikeln in der umgebenden Fläche des Versuchsaufbaus und auf den Wirkwerkzeugen selbst, festgestellt werden. Der quantitativ höchste Abrieb an den Wirkwerkzeugen ist bei der Kombination aus Zungennadel und dem hiTEX-Standardmaterial mit 6,58 leitfähigen Partikeln/mm² und einer prozentualen Bedeckung von 0,24 % der Zungennadel festgestellt worden. In einem folgenden Untersuchungsschritt ist die Sicherstellung der Funktionalität des leitfähigen Fadens im Rahmen einer Gegenüberstellung des elektrischen Widerstandes vor und nach den Belastungszyklen erfolgt (Tab. 7).

Tab. 7: Widerstandsänderungen der unbehandelten Fadenmaterialien nach TENS-O-MAT II-Versuch in AP 3

Ausgangsmaterial	Vorher	Nachher	Erhöhung in Prozent
Shieldex [®] 117/17-2ply*	Ø 127,3 Ω /Meter	148 Ω /Meter	16,2%
ELITEX 117/17-2ply	18,34 Ω /Meter	20,91 Ω /Meter	14,0%
hiTex A	520 k Ω /Meter	680 k Ω /Meter	30,8%
hiTex B	250 k Ω /Meter	310 k Ω /Meter	24,0%

Es zeigt sich, dass sich der elektrische Widerstand der Ausgangsmaterialien nach der Belastungsprüfung erhöht hat. Dies kann auf den bereits festgestellten Verlust der leitfähigen Partikel zurückgeführt werden. Die mikroskopischen Aufnahmen (Abb. 12 und Abb. 13) bekräftigen die bisherigen Ergebnisse. Bereits nach 1000 Zyklen können, durch das abrasive Zusammenspiel der metallischen Oberflächen von Nadel und Faden, sichtbare Verschleißerscheinungen im Nadelkopf und auf der restlichen Nadeloberfläche festgestellt werden. Ausgehend von den durchgeführten Untersuchungen kann bereits ein erster Eindruck des zu erwartenden Partikelabriebs bei der Verarbeitung leitfähiger Fäden auf den Wirk- und Raschelnmaschinen sowie den Verschleißerscheinungen an den Nadeln in den nachfolgenden Arbeitspaketen gewonnen werden.



Abb. 12: Leitfähige Partikel nach TENS-O-MAT-Versuch in AP 3 (Sample 19 mit Lochnadel)

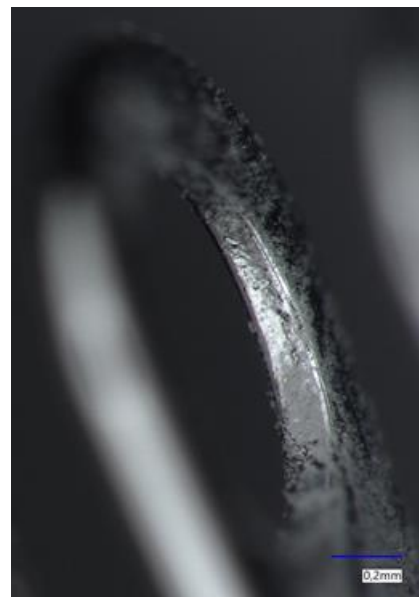


Abb. 13: Spuren abrasiven Verschleißes nach TENS-O-MAT-Versuch in AP 3 (Sample 19 mit Lochnadel)

3.4 AP 4 - Herstellung gewirkter, leitfähiger Textilstrukturen mit ausgewählten leitfähigen Fadenmaterialien auf Doppelraschelmachines

Grundsätzlich müssen vor dem eigentlichen Wirkprozess die leitfähigen Fadenmaterialien einen potentiell abrasiven Prozessschritt durchlaufen bei dem das Garn durch mehrere Fadenführungselemente geführt wird, das Schären. Auch für das Projekt sind die Fadenmaterialien zur Weiterverarbeitung in der Schärerei auf konische Hülsen umgespult worden (Abb. 14 – Abb. 16) . Anschließend sind 20 Einzelfäden des jeweiligen leitfähigen Fadens auf ein Schärgatter aufgesteckt, eingezogen und auf 7,5 Zoll Teilkettbäume geschärt worden. Beim Schären der leitfähigen Fadenmaterialien ist der entstandene Abrieb an festgelegten Positionen beurteilt worden. Hierbei ist die sogenannte „Filterpapiermethode“, bei welcher ein tariertes Filterpapier an einer festgelegten Position ausgelegt wird, verwendet worden. Nach der Verarbeitung ist der auf dem Filterpapier vorhandene Abrieb bewertet worden.

Die Beurteilung des Abriebs ist an drei Stellen erfolgt:

- an der Bremse des Schärgatters
- dem Einlauf in die Schärmaschine durch Keramikösen
- dem Geleseblatt (zur Einstellung der Breite der Fadenschar)

Während des Schärprozesses ist an oben genannten Stellen Abrieb in Form metallischer bzw. kohlenstoffhaltiger Beschichtung aufgetreten. Der Abrieb ist visuell

nachweisbar, für eine quantitative Analyse jedoch nicht ausreichend. Hierfür ist ein längerer Versuch mit deutlich mehr Material notwendig, der im erforderlichen Umfang nicht im Projekt durchgeführt werden konnte. Der entstehende Abrieb wird sich bei Produktionsmengen im industriellen Maßstab aufsummieren, was neben den bereits in Punkt 3.3 erwähnten Nachteilen, zu einem erhöhten Putzaufwand führt.



Abb. 14-16: Schärversuche mit dem kohlenstoffhaltigen hiTEX-Faden in AP 4

Die nicht leitfähigen Fadenmaterialien (gemäß Einzugschema Tab. 4, Punkt 3.2) sind im Unterauftrag auf der Anlage der KSO Textil GmbH auf 22 Zoll Teilkettbäume geschärt worden. Nach dem Schären sind die nicht leitfähigen und leitfähigen Fadenmaterialien in aufeinanderfolgenden Wirkversuchen in die Doppelraschelmachine RD 7 DPLM 12-3 mit einer Feinheit von E 22 der Firma Karl Mayer Textilmaschinen GmbH eingezogen worden. Vor jedem Versuch mit einem neuen leitfähigen Fadenmaterial ist darauf geachtet worden, dass die Wirkmaschine gereinigt und sämtliche Nadeln, die leitfähige



Abb. 17-18: Abriebserscheinungen bei den Wirkversuchen auf der Doppelraschelmachine RD 7 DPLM 12-3


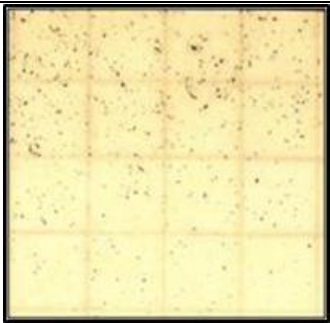
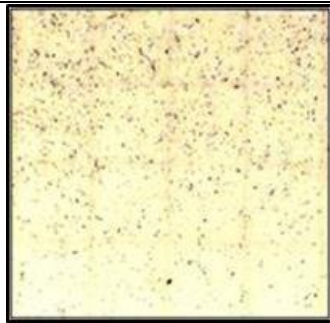
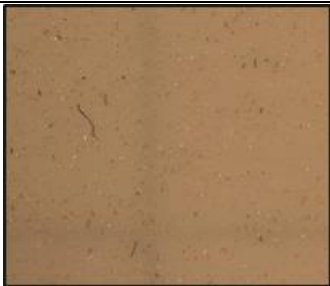

Garne führen, ausgewechselt werden. Bei der eingesetzten Doppelraschelmachine ist darauf geachtet worden, dass alle Maschineneinstellungen, die neben der Bindung und dem Fadeneinlauf Einfluss auf den Verschleiß und die Menge des Abriebes haben können, so gewählt worden sind, dass eine vergleichende Bewertung möglich ist (Tab. 8).

Tab. 26: Maschinenparameter AP 4 und AP 6

Maschinenparameter	Einstellung
Maschinengeschwindigkeit/Maschinendrehzahl	140 U/min
Fräsblechabstand	6,5 mm
Abzugsverhältnis	11 Maschen/cm
Arbeitsbreite	17 Zoll
Maschinenlaufzeit	60min

Um den Abrieb des leitfähigen Fadens zu bestimmen, ist an unten festgelegten Positionen doppelseitiges Klebeband aufgeklebt worden. Der anfallende Abrieb auf dem Klebeband mikroskopisch beurteilt worden. Der Abrieb im Wirkprozess ist an der Fadenzuführung (Umlenkwalzen), den Wirkwerkzeugen (Lochnadeln und Zungennadeln) und der Aufwicklung (Umlenkwalzen) beurteilt worden. Tabelle 9 zeigt in mikroskopischen Aufnahmen den Abrieb der getesteten leitfähigen Garne (hiTEX, Shieldex®) bei den verschiedenen Layouts – offene Franse, geschlossene Tuchbindung und Schusseintrag.

Tab. 9: Bewertung des Abriebs nach der wirktechnischen Verarbeitung der leitfähigen Garne in Korrelation zur Bindung

Layout/ leit. Faden	Offene Franse	Schuss	Geschlossenes Tuch
Abrieb hiTEX (Ausgangsmaterial M8)			
Abrieb Shieldex® (Ausgangsmaterial M1)		Schussvariante Shieldex® nicht durchgeführt	

Entgegen ursprünglicher Annahmen hat das Layout der Franse (offen) keine geringere tribologische Belastung als die Einbindung der leitfähigen Materialien durch die Tuch-Bindung (geschlossen) bewirkt. Dies wird nicht nur durch den Abrieb an der Maschine, sondern auch in den mikroskopischen Aufnahmen der doppelseitigen Klebestreifen verdeutlicht. Bei der hiTEX-Variante der Franse (offen) ist dies aufgrund der kohlenstoffhaltigen, dunklen Partikel (Tab. 9) besonders deutlich gewesen. Zur Ursachenfindung sind die Layouts in der Software Warpknit der Firma DesignScope visuell nachgestellt und hinsichtlich potentieller Reibungspunkte analysiert worden. Die Software wurde speziell für die Entwicklung von Gewirken konzipiert. Folgende Reibungspunkte sind analysiert worden:

- Die Reibungspunkte des leitfähigen Fadens mit sich selbst
- Die Reibungspunkte mit den leitfähigen Fäden der benachbarten Nadeln
- Die Reibungspunkte mit den abbindenden Fadensystemen der Legebarren (3, 5 und 6)

Es sind immer die Reibungspunkte eines Maschenstäbchens in einem definierten Rapportbereich (Tab. 10 bis Tab. 12) gezählt worden. Da bei Ausgestaltung der textilen Flächen auf die Vergleichbarkeit der Wirkversuche untereinander geachtet worden ist, können die Ursachen für den erhöhten Abrieb, die in Zusammenhang mit der Einbindung des leitfähigen Garnes stehen, auf folgende Möglichkeiten reduziert werden:

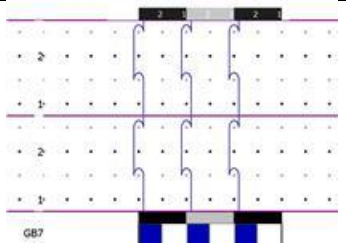
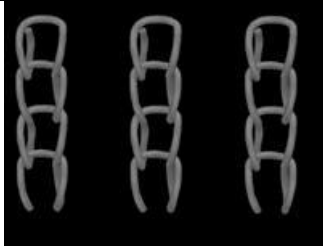
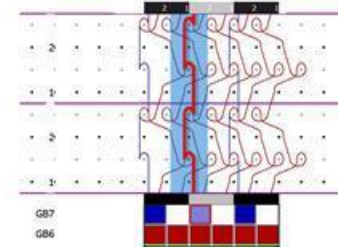
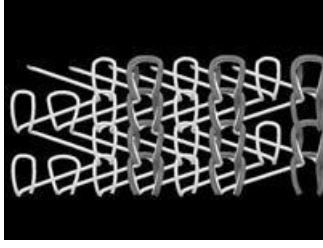
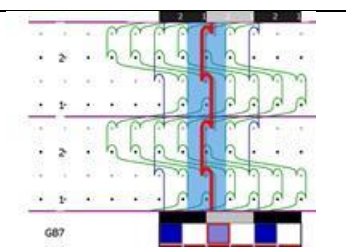
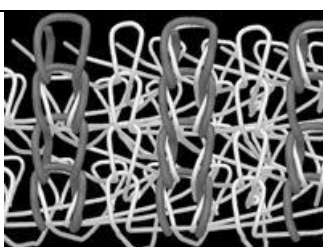
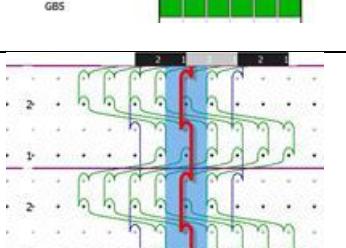

- Verhältnis Versatzzahl zu Garn-Garn-Reibungspunkten
- Kinematik der Wirkwerkzeuge Zungennadel und Lochnadel
- Fadeneinlauf

Bezogen auf die Garn-Reibungspunkte wird für das Layout mit dem Schusseintrag (Tab. 11) die geringste Anzahl gezählt. Diese Beobachtung deckt sich mit der festgestellten Abriebsmenge an der Maschine und unter dem Mikroskop. Somit kann das Schuss-Layout von den untersuchten Bindungen als jene mit der geringsten tribologischen Belastung für den leitfähigen Faden festgestellt werden. Sowohl bei dem Layout Franse (offen) als auch bei der Tuchbindung (geschlossen) können insgesamt 32 Garn-Reibungspunkte gezählt werden. Zwar unterscheiden sich beide Bindungen in den Punkten

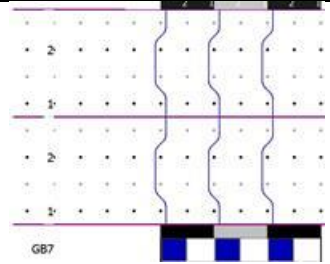
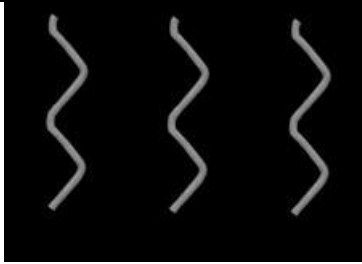
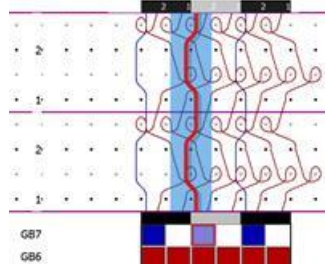
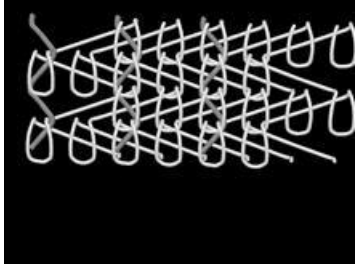
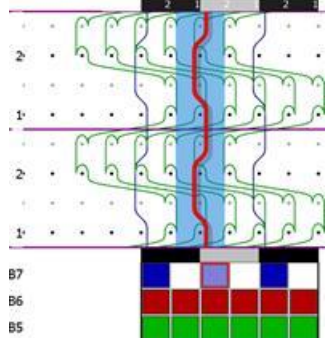
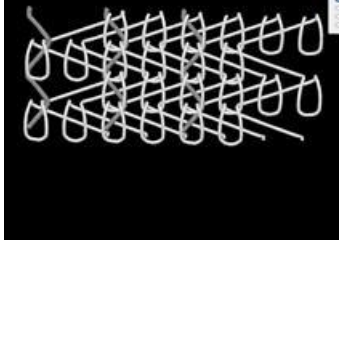
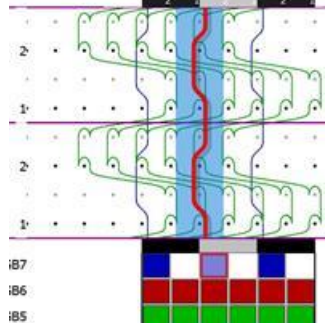
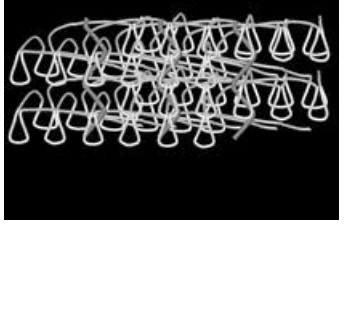
- Garn-Garn-Reibungspunkte des leitf. Fadens mit sich selbst

- Die Garn-Garn-Reibungspunkte mit den leitf. Fäden der benachbarten Nadeln, die Gesamtzahl ist jedoch identisch.

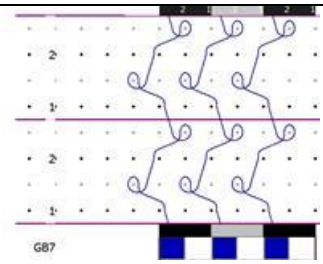
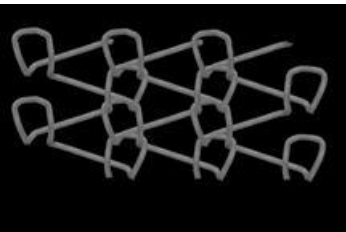
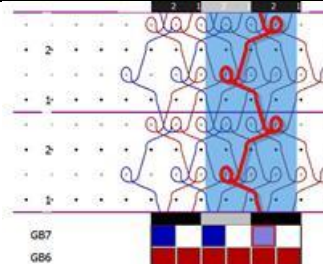
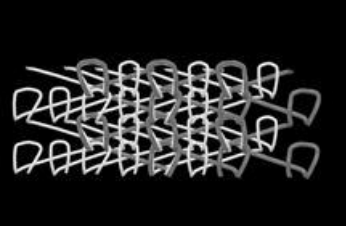
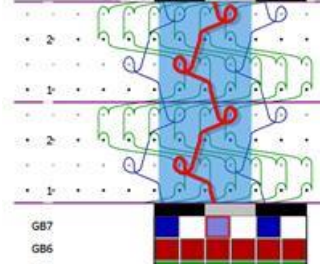
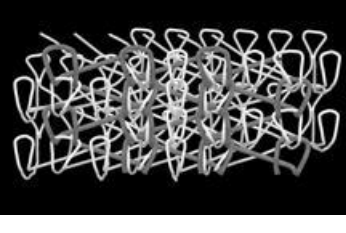
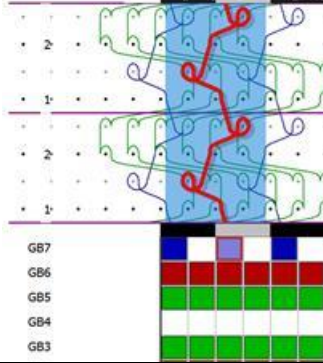
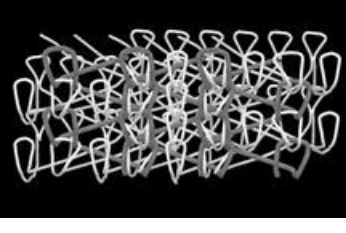
Tab. 27: Untersuchung der Garn-Garn Reibungspunkte für das Layout Franse (offen)

	Legungsbild	3D-Simulation mit Warpknit	Anzahl Reibungspunkte über 3 Rp. in der Breite und 2 Rp. In der Länge pro MSt.
Nur GB7			Mit sich selbst: 8 Mit den LF-Fäden benachbarter Nadeln: 0 (zur Besseren Veranschaulichung als Monofilament dargestellt)
Reibung Faden GB7 mit GB6			8
Reibung Faden GB7 mit GB5			8
Reibung Faden GB7 mit GB3			8
Insgesamt			32

Tab. 28: Untersuchung der Garn-Garn Reibungspunkte für das Layout Schuss

	Legungsbild	3D-Simulation mit Warpknit	Anzahl Reibungspunkte über 3 Rp. in der Breite und 2 Rp. In der Länge pro MSt.
Nur GB7			Mit sich selbst: 0 Mit den LF Fäden benachbarter Nadeln: 0 (zur Besseren Veranschaulichung als Monofilament dargestellt)
Reibung Faden GB7 mit GB6			4
Reibung Faden GB7 mit GB5			4
Reibung Faden GB7 mit GB3			4
Insgesamt			12

Tab. 29: Untersuchung der Garn-Garn Reibungspunkte für das Layout Tuch (geschlossen)

	Legungsbild	3D-Simulation mit Warpknit	Anzahl Reibungspunkte über 3 Rp. in der Breite und 2 Rp. In der Länge pro MSt.
Nur GB7			Mit sich selbst: 0 Mit den LF Fäden benachbarter Nadeln: 8 (zur Besseren Veranschaulichung als Monofilament dargestellt)
Reibung Faden GB7 mit GB6			8
Reibung Faden GB7 mit GB5			8
Reibung Faden GB7 mit GB3			8
Insgesamt			32

Somit kann die Vermutung, die Ursache für den erhöhten Abrieb der Franse (offen) liege im Verhältnis Versatzzahl zu Garn-Garn-Reibungspunkten begründet, nicht untermauert werden. Wahrscheinlicher ist der Zusammenhang zwischen der Kinematik der Wirkwerkzeuge und deren tribologischer Effekt auf das leitfähige Fadenmaterial. Um diesen Zusammenhang zu evaluieren, sind die nicht modifizierten Lochnadeln nach der Verarbeitung der leitfähigen Fäden mikroskopisch untersucht sowie bewertet worden. Ziel ist die Überprüfung u. a. auf das sogenannte Einschleifen des Fadens gewesen, welches durch die Reibung zwischen Nadel und Faden entsteht. Ein

Einschleifen an der Nadel wird bei allen leitfähigen Material nicht festgestellt. Allerdings sind bei allen untersuchten Lochnadeln vor allem Partikel an der Nadeloberfläche und im Nadelkopf sichtbar. Diese stammen von der leitfähigen Beschichtung der eingesetzten Fadenmaterialien. Beispielhaft ist dies in Abb. 19 und Abb.20) mit dem Shieldex[®]-Ausgangsmaterial dargestellt.

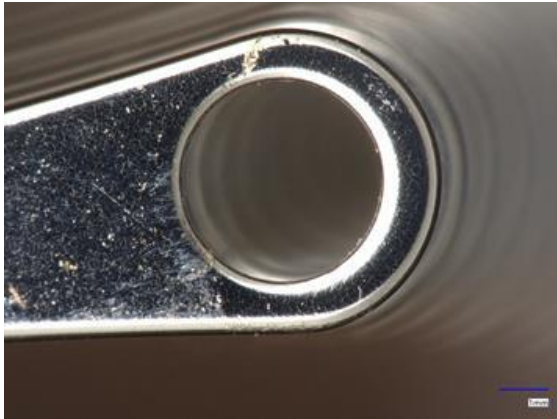


Abb. 19: unbeschichte Shieldex[®]-Variante vor der Reinigung



Abb. 20: unbeschichte Shieldex[®]-Variante nach der Reinigung

Durch die tribologischen Effekte beim Verarbeiten der Fäden in der Wirkerei können die elektrischen Kennwerte des leitfähigen Fadenmaterials verändert werden. Als Zielsetzung ist eine maximale Veränderung des elektrischen Fadenwiderstandes um 25 % nach dem Wirkprozess durch die im Projekt getätigten Anpassungen festgelegt worden. Da das leitfähige Fadenmaterial nach dem Wirken nicht ohne weitere Beschädigungen der leitfähigen Oberfläche aus der textilen Fläche entnommen werden kann, ist diese Zielstellung bei Ermittlung der Flächenwiderstände untersucht worden.

Für die nachfolgende Verarbeitung bzw. den Gebrauch der Smart Textiles ist es grundsätzlich notwendig, die Maschenstruktur thermisch zu fixieren, um ein homogenes, spannungsfreies und dimensionsstabiles Gewirke zu erhalten (Veredlung). Aufbauend auf bestehenden Kenntnissen sind die Gewirke veredelt worden. Dabei müssen durch Anpassung der Veredelungsparameter die unterschiedlichen Schrumpfeigenschaften der leitfähigen und nicht leitfähigen Fadenmaterialien ausgeglichen werden. Alle gewirkten Proben mit den ausgewählten leitfähigen Fadenmaterialien und Layouts sind nach Voruntersuchungen bei einer Fixiertemperatur von 160 °C und einem freien Schrumpf behandelt worden. Um einen tribologischen Effekt der Veredlung auf die textilen Flächen ausschließen bzw. feststellen zu können, ist der Flächenwiderstand mit Hilfe eines handelsüblichen Multimeters gemessen

worden. Tabelle 13 zeigt den Flächenwiderstand vor und nach der thermischen Behandlung.

Tab. 30: Flächenwiderstände Layouts vor und nach der thermischen Behandlung

Probe	Material	Fadenwiderstand in Ohm/m	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Ø Flächenwiderstand in Ohm/square	Standardabweichung
Franse vor	Shieldex® Ausgangsware	130-140	1,1	1,1	1	1,1	1,1	1,1	0,0
Franse nach	Shieldex® Ausgangsware	130-140	1	1	1,1	1,3	1,4	1,2	0,2
Tuch vor	Shieldex® Ausgangsware	130-140	7,5	4,4	2,8	2,2	2,4	3,9	2,2
Tuch nach	Shieldex® Ausgangsware	130-140	6,5	5,4	9,3	3	5,6	6,0	2,3
Probe	Material	Fadenwiderstand in kOhm/m	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Ø Flächenwiderstand in kOhm/square	Standardabweichung
Franse vor	hiTEX-Standard	437.8	5,8	5,2	4,5	5,6	7,5	5,7	1,1
Franse nach	hiTEX-Standard	437.8	4,7	4,2	3,2	3,7	2,9	3,7	0,7
Schuss vor	hiTEX-Standard	437.8	35,1*	OL	OL	OL	OL	OL	
Schuss nach	hiTEX-Standard	437.8	42,4	OL	1962	OL	OL	OL	OL
Tuch vor	hiTEX-Standard	437.8	4,4	3,5	3,7	3,4	3,4	3,7	0,4
Tuch nach	hiTEX-Standard	437.8	3,24	2,8	2,1	1,7	2,1	2,4	0,6

Es ist davon ausgegangen worden, dass sich die Flächenwiderstände der untersuchten Layouts durch die schrumpfbedingte Flächenänderung verringern werden. Dies konnte vor allem bei den Layouts Franse (offen) und Tuch (geschlossen) mit den nicht modifizierten hiTEX-Fäden festgestellt werden. Die Messungen des Schuss-Layouts können nicht ausgewertet werden. Hier können die Flächenwiderstände zum Teil aufgrund von dem schwer zugänglichen leitfähigen Fadenmaterial unterhalb der Deckfläche nicht vom Messgerät erfasst und angezeigt werden (OL). Anders als bei den Layouts Franse (offen) und Tuch (geschlossen) des nicht modifizierten hiTEX-Fadens erhöhen sich die Flächenwiderstände der gleichen Layouts mit dem nicht modifizierten

Shieldex®-Fadenmaterial. Bei der Tuch-Variante beträgt die Erhöhung des Flächenwiderstandes knapp 54 %. Da bei den Untersuchungen zum Abrieb bei den Wirkversuchen zumindest visuell mehr Abrieb bei der hiTEX-Variante festgestellt worden ist, muss davon ausgegangen werden, dass die Veredlung durchaus einen zusätzlichen tribologischen Effekt auf das leitfähige Fadenmaterial ausübt. Diese Vermutung kann damit begründet werden, dass alle untersuchten Layouts im Rahmen der Veredlungsversuche durchschnittlich um 9-10 % ihrer Ausgangsgröße geschrumpft sind. Ausgehend von Erfahrungswerten liegt die maximale Dimensionsänderung, die bei einem silberbeschichteten Fadenmaterial vorgenommen werden kann, bei maximal 7 %. Wird dieser Wert überschritten, kann es zu einem Abplatzen der Silberauflage und so zu Verringerung der Leitfähigkeit kommen.

Innerhalb des Arbeitspaketes sind bei der Verarbeitung metallisierter und kohlenstoffbeschichteter Fadenmaterialien Messungen mit einem Staub-Probenahmegerät Gravikon VC 25 G von GSA (Abb. 21 und Abb. 22) zum Partikelgehalt der Arbeitsplatzumgebung durchgeführt worden. Um bereits eine Vorbelastung der Umgebungsluft auszuschließen, sind an mehreren Tagen Aufnahmen zur Ermittlung eines IST-Wertes vorgenommen worden. Hierzu ist der in das Staubnahmegerät eingelegte Papierfilter vor und nach den Messungen gewogen worden. Um Ergebnisverfälschungen durch Feuchtigkeitsaufnahme ausschließen zu können, sind die Papierfilter vor und nach dem Wiegen und jeder Messung für mindestens 60 min bei 50 °C und 30 % Lüftung im Trockenschrank entfeuchtet worden. Bei den Voruntersuchungen im Technikum ist keine gesundheitsschädliche Staubbelastung festgestellt worden. Der allgemeine Staubgrenzwert liegt bei 1,25 Milligramm pro Kubikmeter (mg/m^3). Im Technikum ist ein Durchschnittswert von $0,000139 \text{ mg}/\text{m}^3$ gemessen worden. Auch bei den im Rahmen der Wirkversuche durchgeführten Staubmessungen sind keine gesundheitsschädlichen Staubbelastungen im Technikum gemessen worden (Tab 12). Weder die Grenzwerte für Feinstaub durch Kohlenstoff ($< 0,05 \text{ mg}/\text{m}^3$) noch die für Silberpartikel ($< 0,8 \text{ mg}/\text{m}^3$ bei 15 min) sind überschritten worden.



Abb. 21 und 22: Versuchsbegleitende Staubmessungen zu AP 4

Allerdings hat sich ein deutlicher Unterschied in den Werten bei den verschiedenen tribologischen Effekten bei den unterschiedlichen Bindungen gezeigt. Bei den Versuchen für das Layout Franse (offen) ist eine 3,5 –fache Feinstaubbelastung bei dem Shieldex[®]-Faden und die 2,9-fache Feinstaubbelastung bei dem hiTEX-Faden im Vergleich zu den Versuchen für das Layout Tuch (geschlossen) ermittelt worden.

Tab. 14: Versuchsbegleitende Staubmessungen AP4

Proben	Datum (2024)	Zeit in h	Filtergewicht vor Messung in g	Filtergewicht nach Messung in g	Delta	Luftmenge GS/Q	MAK ¹ /G [mg/m ³]
hiTex Tuch	09.01	1,01	0,708	0,241	0,1510	22,770	0,006633
hiTex Franse	10.01	1,00	0,742	0,7	0,43869	22,50	0,019497
hiTex Schuss	11.01	0,30	0,659	0,303	0,1898	6,750	0,028132
Shieldex [®] Tuch	16.01.	1,00	0,9527	0,3146	0,1971	22,500	0,008763
Shieldex [®] Franse	17.01.	0,29	1,0544	0,327	0,2049	6,615	0,030980

3.5 AP 5 - Entwicklung, Prüfung und Herstellung beschichteter leitf. Fadenmaterialien sowie beschichteter Wirkwerkzeuge zur Verbesserung der tribol. Einflussfaktoren und damit der Abrieb- und Verschleißminimierung

3.5.1 AP 5.1, AP 5.3 und AP 5.4

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeitspakete 5.1, 5.3 und 5.4 gemeinsam dargestellt, da die Arbeitspakete inhaltlich verknüpft sind.

Eine Analyse der Auflagerungen und Begleitstoffe der leitfähigen Fadenmaterialien, hat Restauflagen von 0,1 - 0,2 % ergeben. Restauflagen unter 0,5 % haben keinen Einfluss auf die Gleichmäßigkeit der aufzubringenden reibungsminimierenden Schicht sowie deren Haftung. Somit ist keine nasschemische Vorbehandlung notwendig gewesen. Anschließend sind Polymerbeschichtungen zur Verbesserung des Reibverhaltens und zur Minimierung des Partikelabriebs evaluiert worden. Es haben Polymerbeschichtungen auf Basis von PU, Wachsen, PE oder Polysilazan zur Auswahl gestanden. Dabei ist berücksichtigt worden, dass die Beschichtung den elektrischen Widerstand der Ausgangsmaterialien nicht verändert sowie keine elektrische Isolierung generiert, um eine Kontaktierung über bindungstechnische Verknüpfungspunkte weiterhin sicherzustellen. Zielstellung sind Beschichtungsauflagen von maximal 5 % gewesen. Für die Realisierung der reibungs- und abriebminimierenden Eigenschaften sind folgende Beschichtungen ausgewählt worden:

Silwa[®] S 280

- 50%ige wasserhaltige Emulsion. Basis Silikon/Paraffinwachs
- Applikatorauftrag; Reibungsminimierende Eigenschaften

Silwa[®] KL 30

- 30%ige wasserhaltige, reine Paraffinwachs Emulsion
- Applikatorauftrag; Reibungsminimierende Eigenschaften

Silwa[®] Bond TEC

- 25%ige wasserhaltige Polymerdispersion
- Galettenauftrag; Abriebminimierende Eigenschaften

Durazane[®] 1500

- 100%iges organisches Polysilazane
- Galettenauftrag; Kratzfeste Schichten

Mithilfe zwei verschiedener Einzelfadenbeschichtungsverfahren, Galette und Applikator (Abb. 23 und Abb. 24), sowie entsprechender Einstellungen der Verfahrensparameter Geschwindigkeit, Fördermenge, Anzahl der Durchläufe und Modifikation der Polymerbeschichtung sind diese auf die versilberten bzw. kohlenstoffbeschichteten Ausgangsmaterialien aufgetragen und charakterisiert worden. Nachfolgend werden die durchgeführten Modifikationen der Fadenmaterialien beschrieben. Der elektrische Widerstand ist bei allen Varianten vor und nach der Beschichtung mithilfe einer Messchiene zur Widerstandsbestimmung nach DIN EN 16812 bestimmt worden.



Abb. 23: Einzelfadenbeschichtung mit Galette



Abb. 24: Applikator der Firma Graf Chemicals GmbH

Reibungsminimierende Schicht bei versilberten Fadenmaterialien

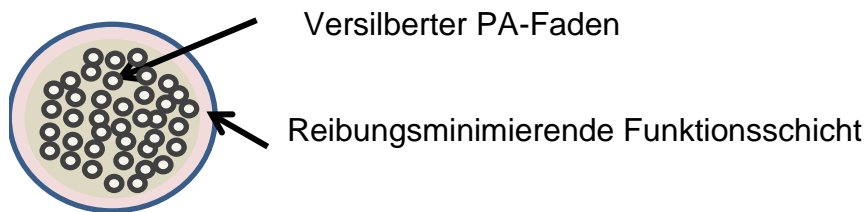


Abb. 25: Schematische Darstellung der erzeugten reibungsminimierenden Schicht auf den versilberten Fadenmaterialien

Die versilberten Fadenmaterialien (Shieldex[®], ELITEX) haben, in Verbindung mit reibungsminimierenden Schutzschichten (Silwa S280 und Silwa KL 30), nur geringfügige Veränderungen des elektrischen Widerstands gezeigt. Bei Untersuchungen am Friktionsmessgerät der Firma Graf Chemicals GmbH ist durch die Beschichtung der leitf. Fadenmaterialien eine Verringerung der Reibungskräfte von mind. 40 % bei einer maximal 4%-igen Beschichtungsaufgabe erreicht worden. Das beste Ergebnis zeigt sich bei der Beschichtung des Shieldex[®] –Fadens mit Silwa[®] S280, (Tab. 15 und Abb. 26.)

Tab. 31: Versuchsbegleitende Untersuchungen bei versilberten Fadenmaterialien mit Silwa AP 5

	Friktion F in cN	elektrischer Widerstand in Ohm/m	Friktion F in cN	elektrischer Widerstand in Ohm/m	Höchstzugkraft in cN
	ELITEX [®]		Shieldex [®]		
Ausgangsware	253	18,4	222	127,3	1438,7
Silwa [®] S280	130	19,8	88	146,8	1408,6
Silwa [®] KL30	95	22	85	126,8	

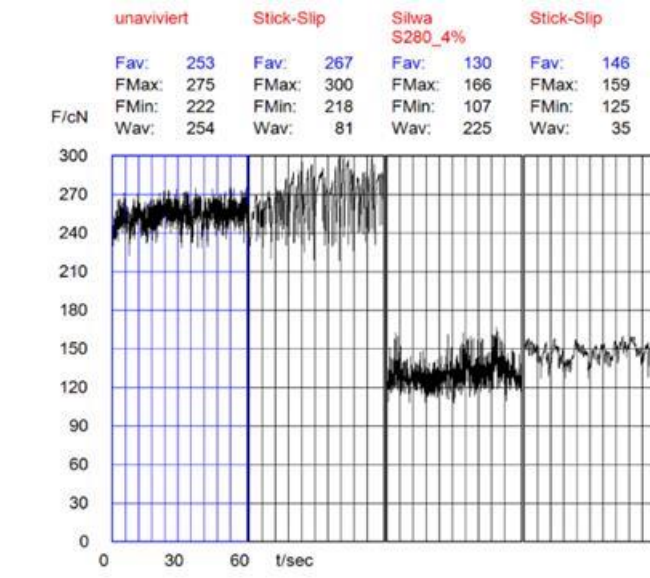


Abb. 26: Ergebnisse Friktion – Shieldex®

Kratzfeste Schicht bei versilberten Fadenmaterialien

Abb. 27: Schematische Darstellung der erzeugten kratzfesten Schicht auf den versilberten Fadenmaterialien

Mit dem Durazane® 1500 erhöht sich der elektrische Widerstand nach der Beschichtung um 16,4 bis 60,7 % zum Ausgangsmaterial. Die Widerstandsänderung ist dabei abhängig von der Beschichtungsauflage (Abb. 28).

Abb. 28: Veränderungen des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit zur Beschichtungsauflage

Reibungsminimierende Schicht bei kohlenstoffbeschichteten Fadenmaterialien

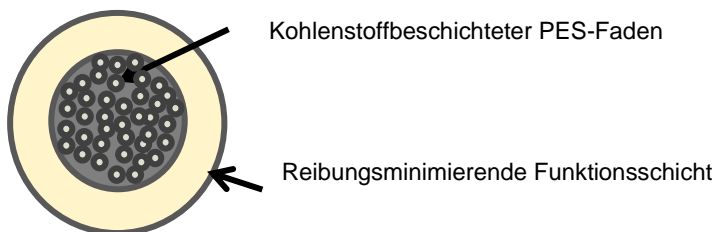


Abb. 29: Schematische Darstellung der erzeugten reibungsminimierenden Schicht auf den kohlenstoffbeschichteten Fadenmaterialien (hiTEX)

Die reibungsminimierenden Schichten sind auf die kohlenstoffbeschichteten Fäden aus zwei Chargen, Charge A und B, aufgebracht worden. Diese Chargen haben in der kohlenstoffhaltigen Beschichtung leicht veränderte Zusammensetzungen im

Bindersystem sowie den Textilhilfsmitteln. Der Ausgangsfraktionswert liegt bei beiden Varianten weit über 300 cN. Ergebnisse aus anderen Projekten haben gezeigt, dass die reibungsminimierende Schicht die Reibungskräfte bei der Verarbeitung verringert, es aber dennoch Abrieberscheinungen gibt. Um diese zu verhindern, wird eine zusätzliche abriebminimierende Schicht (Silwa® Bond TEC) vor der eigentlichen reibungsminimierenden Schicht auf das hiTEX-Fadenmaterial aufgebracht (Abb. 30). Die Friktionswerte der Variante B mit abriebminimierender Schicht liegen über denen der Variante A. Nach Aufbringen der reibungsminimierenden Schicht konnten annähernd gleiche Friktionswerte erreicht werden (Tab. 16). Es ist bei beiden Varianten eine Verringerung der Reibungskräfte von mindestens 40 % zum Ausgangsmaterial erreicht worden. Die elektrischen Widerstände verändern sich wesentlich und liegen bei 200 bis 300 % des Ausgangswiderstandes.

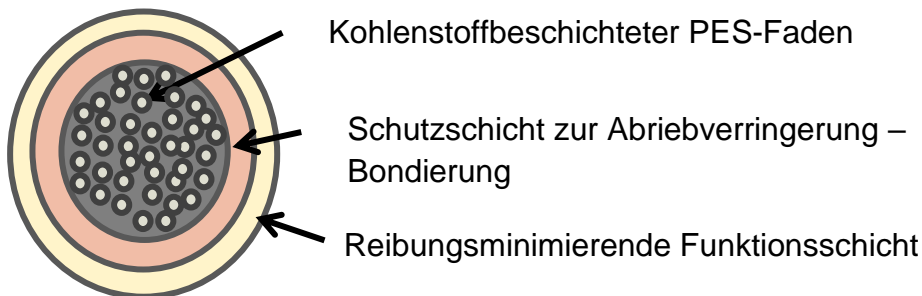


Abb. 30: Schematische Darstellung der erzeugten reibungs- und abriebminimierenden Schicht auf den kohlenstoffbeschichteten Fadenmaterialien (hiTEX)

Tab. 16: Friktionswerte des hiTEX-Fadens mit abrieb- und reibungsminimierender Schicht

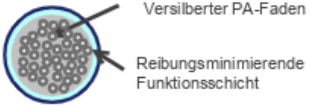
	Reibungskraft in cN					
	Funktionsschicht zur Abriebverbesserung (Silwa® Bond TEC)		Funktionsschicht zur Reibungsminimierung (Silwa® S280)		Funktionsschicht zur Reibungsminimierung (Silwa® KL30)	
	A	B	A	B	A	B
kohlenstoffbeschichteter Faden_ Ausgang	173	210	81	84	89	89
Silwa Bond (6 U/min)	219	210	64	63	96	69

Die Höchstzugkraft in cN hat sich im Vergleich zur hiTEX-Standardvariante bei beiden Fadenmodifikationen erhöht (Tab. 17).


Tab. 17: Versuchsbegleitende Untersuchungen der hiTEX-Fadenmaterialien AP 5

Material	Höchstzugkraft in cN	Dehnung in %	feinheitsbezogene Höchstzugkraft in cN/tex
hiTEX-Standard	413,6	22,2	19,3
hiTEX + reibungsminimierende Schicht (Silwa®S280)	423,3	18,5	17,9
hiTEX + abriebminimierende Schichten (Silwa® Bond Tec) + reibungsminimierende Schicht (Silwa®S280)	421,5	18,2	14,8

Basierend auf diesen und den Ergebnissen der Wirkversuche in AP 6 sind Vorzugsvarianten (Abb. 31 und 32) ermittelt und gemäß AP 5.4 in größeren Mengen bei der Alterfil Nähfaden GmbH im Rahmen eines Unterauftrages hergestellt worden.



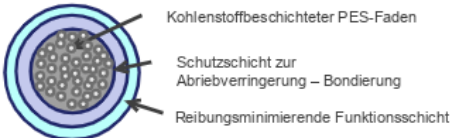
Versilberter PA-Faden
Reibungsminimierende Funktionsschicht



Versilberter PA-Faden
kratzfeste Schutzschicht

Favorit Modifikation Silberbeschichtung		
M1	M2	M15
Shieldex Ausgangsware, 117dtextf17-2ply	Shieldex + reibungsminimierende Schicht (Silwa® S280, 50%ige wasserhaltige Emulsion. Basis Silikon / Paraffinwachs), 4 % Auflage	Shieldex + kratzfeste Schutzschicht (Durazane® 1500 rapid cure, Polysilazan)
130-140 Ohm/m	140-143 Ohm/m	131-132 Ohm/m

Abb. 31: Auswahl einer modifizierten Vorzugsvariante für die silberbeschichteten Fadenmaterialien



Kohlenstoffbeschichteter PES-Faden
Schutzschicht zur Abriebverringern – Bondierung
Reibungsminimierende Funktionsschicht

Favorit Modifikation kohlenstoffhaltige Polymerbeschichtung		
M8	M9	M9A
hiTEX-Standard, Produktion Mai 2023	hiTEX + reibungsminimierende Schicht (Silwa® S280)	hiTEX + Schutzschicht zur Abrieb-minimierung (Silwa® Bond TEC) + reibungsminimierende Schicht (Silwa® S280)
437.8 Ohm/m	383.6 Ohm/m	1027.8 Ohm/m

Abb. 32: Auswahl einer modifizierten Vorzugsvariante für die kohlenstoffbeschichteten Fadenmaterialien

Die Laborergebnisse sind auf die Technikumsanlage übertragen worden. Dazu ist u. a. die Anpassung der Verfahrensgeschwindigkeit auf 100 m/min notwendig, da die Antriebstechnik zum Aufwickeln der Garne an der Technikumsanlage nicht für geringere Geschwindigkeiten geeignet ist. Im Labormaßstab sind Geschwindigkeiten von 50

m/min eingesetzt worden. Die höhere Prozessgeschwindigkeit verlangt die Anpassung von Galettengeschwindigkeit und Trocknungsparametern. Zudem sind die Anlagen bei Alterfil für einen reibungsfreien und spannungsarmen Fadenlauf durch spezielle Fadenleitelemente modifiziert worden. Auch bei den größeren Mengen werden Friktionswerte der versilberten sowie kohlenstoffbeschichteten Fäden erreicht, die in einem ähnlichen Bereich wie nach den Laborversuchen gewesen sind. Der elektrische Widerstand bei den versilberten Garnen hat sich ebenfalls gegenüber dem für das Ausgangsmaterial nur unwesentlich verändert. Nach dem Aufbringen der abrieb- und reibungsminimierenden Schichten auf das hiTEX-Fadenmaterial beträgt der elektrische Widerstand 1.027,8 kOhm/m (Ausgangswiderstand: 437,8 kOhm/m). Die aufgetragenen Schichten haben zu einer Isolierung der leitfähigen Schicht geführt. Dies ist auf die hohe Beschichtungsaufgabe zurückzuführen und kann durch die Reduzierung der Beschichtungsaufgabe optimiert werden.

3.5.2 5.2 - Entwicklung und Aufbringen von Beschichtungen auf Wirkwerkzeuge

Im Arbeitspaket 5.2 sind auf Grundlage der Ergebnisse aus AP 3 sowie in Absprache mit der Firma Groz Beckert KG (PBA) Modifikationen an den Zungen- und Lochnadelsegmenten in Form von Oberflächenbeschichtungen durchgeführt worden. Die Beschichtungen sind im Tauchverfahren bei der Firma DurXreme GmbH aufgebracht worden, um die Reibung beim Fadenkontakt zu minimieren und die Lebensdauer der Wirkwerkzeuge zu erhöhen. Hierzu ist eine Polysilazan-Beschichtung ausgewählt worden, die normalerweise Einsatz in den Bereichen Schienenverkehr, Marine, Luft- und Raumfahrt findet und sich besonders für eine Beständigkeit gegen „Korrosion, Abrieb, Temperatur, chemische Belastungen und Anschmutzungen“ auszeichnet./49/ Die Versuche zu AP 5.2 haben sich als nicht zielführend erwiesen, da während der Funktionsversuche beobachtet worden ist, dass die zusätzliche Beschichtung die Funktionsfähigkeit der beschichteten Wirkwerkzeuge beeinträchtigt hat. Vor allem der Schließmechanismus der Zungennadeln kann nicht mehr vollumfänglich ausgeführt werden. Zudem wird eine erhöhte Menge Abrieb durch die zusätzliche Polysilazan-Beschichtung beobachtet (Abb. 33 bis Abb. 36). Es wären weitere Versuche in dieser Hinsicht notwendig, sodass ein funktionierendes Werkzeug entsteht. Diese können im Rahmen der Projektarbeit nicht durchgeführt werden (Budget). Weitere Ansätze in diese Richtung müssen in einem Folgeprojekt betrachtet werden.

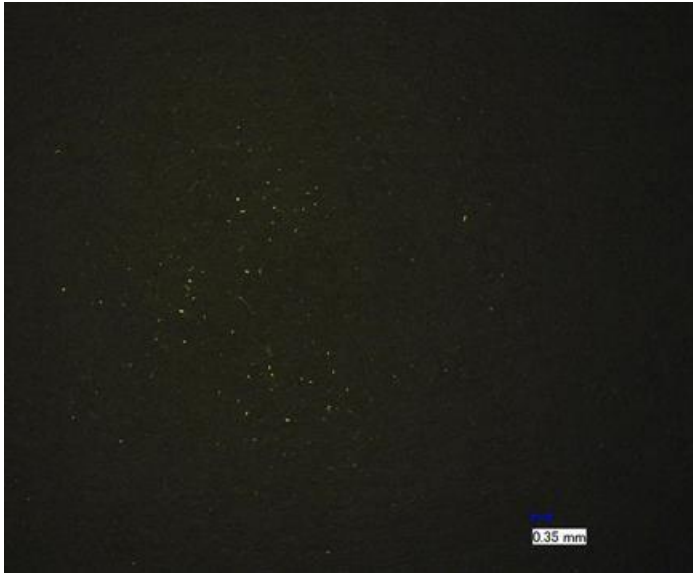


Abb. 33 und 34: Verschleiß an beschichteter Lochnadel nach Versuchen am TENS-O-MAT II

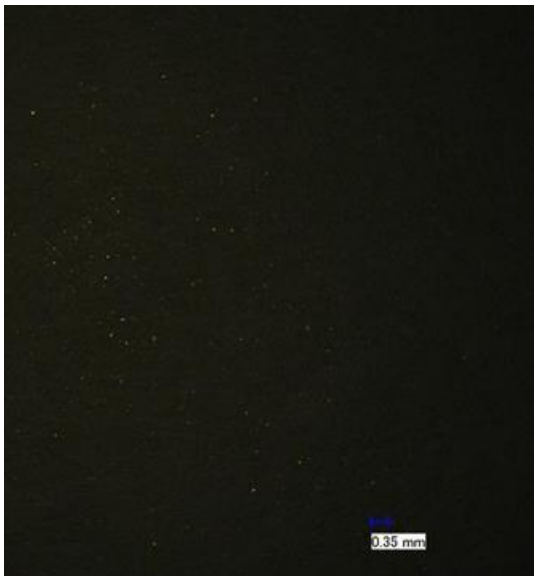


Abb. 35 und 36: Verschleiß an beschichteter Zungennadeln nach Versuchen am TENS-O-MAT II

3.6 AP 6 und AP 7

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Arbeitspakete 6 (Herstellung gewirkter partiell leitfähiger Textilstrukturen mit den entwickelten leitfähigen, beschichteten Fäden und Wirkwerkzeugen auf Doppelraschelmashinen) und Teile von Arbeitspaket 7 (Optimierung der Polymerbeschichtung sowie anschließende Verarbeitungsversuche auf den Doppelraschelmashinen) gemeinsam dargestellt, da die Arbeitspakete inhaltlich verknüpft sind. Die für Arbeitspaket 7 geplante Auswertung der Ergebnisse wird als Bestandteil von Arbeitspaket 10 den entwickelten Konzepten zur technischen und industriellen Nutzung gegenübergestellt werden.


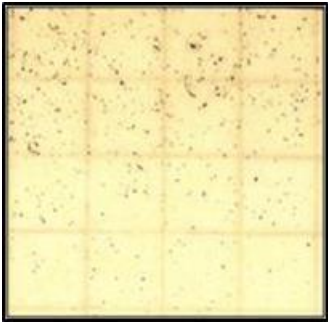

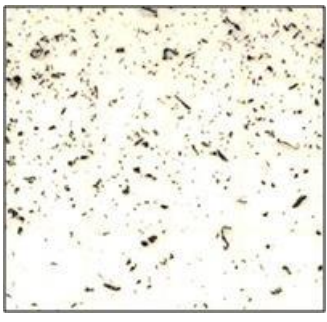
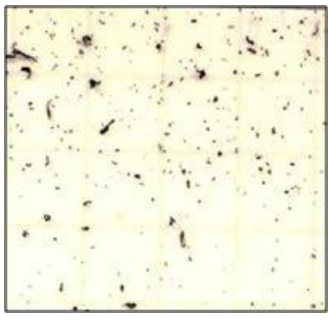
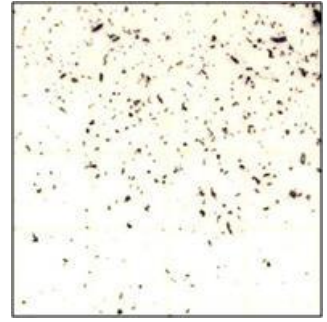
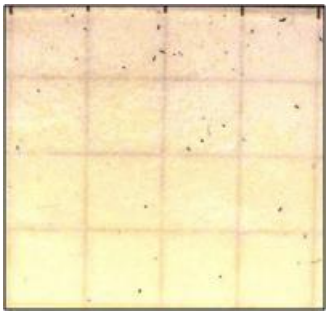
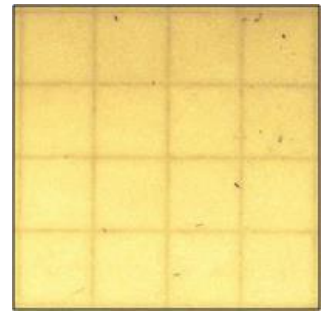
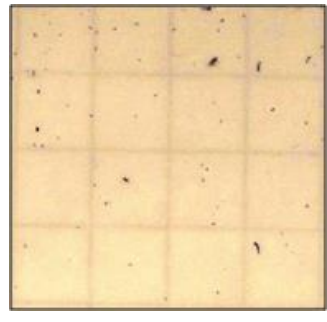
Die in AP 5.4 modifizierten, leitfähigen Fadenmaterialien sind auf der institutseigenen Raschelmachine in die Deckflächen der vorhandenen Layouts eingearbeitet und untersucht worden. Wie bereits in AP 4, sind die beschichteten, leitfähigen polymerbasierten Fadenmaterialien vor dem Verwirken gemäß den entwickelten Layouts zur Vorlage an der Wirkmaschine geschärft bzw. gespult worden. Abweichend zur Vorgehensweise in AP 4 sind die leitfähigen Fadenmaterialien nicht auf 7,5 Zoll Teilkettbäume geschärft worden, sondern wurden auf 20 Einzelspulen mit entsprechender Lauflänge verteilt. Beim Spulen der leitfähigen Fadenmaterialien ist der entstandene Abrieb an festgelegten Positionen beurteilt worden. Genau wie während des Schärprozesses in AP 4 ist auf der Maschine sowie in deren Arbeitsumfeld Abrieb in Form metallischer bzw. kohlenstoffhaltiger Beschichtung festgestellt worden. Die Abrieberscheinungen sind aufgrund der im Projekt noch zu geringen Lauflängen vernachlässigbar und nicht gravimetrisch messbar gewesen.







Während in Arbeitspaket 4 (Punkt 2.5) der tribologische Effekt auf die unbehandelten leitfähigen Fadenmaterialien durch die verschiedenen Einbindungen (Layouts) untersucht worden ist, hat der Fokus in diesem Arbeitspaket vielmehr auf dem Vergleich der modifizierten Fadenmaterialien selbst gelegen. Für die Gewährleistung einer Vergleichbarkeit sind die Wirkversuche nach dem gleichen Versuchsprinzip wie in AP 4 durchgeführt (Tab. 18) worden. Auch hier wird festgestellt, dass das Layout der Franse (offen), genau wie in Arbeitspaket 4, den quantitativ stärksten Abrieb bei allen untersuchten Fadenvarianten erzeugt hat. Dies wird nicht nur durch den Abrieb an der Maschine, sondern auch in den mikroskopischen Aufnahmen der doppelseitigen Klebestreifen verdeutlicht. Bei allen getesteten Layouts der Varianten M9A (hiTEX) und M2 (Shieldex®) wird im Vergleich zu den anderen Modifikationen und auch den unbehandelten Ausgangsmaterialien signifikant weniger Abrieb festgestellt.



Abb. 37: Wirkversuche AP 6

Tab. 32: Bewertung des Abriebs bei partiell leitfähiger Textilstrukturen in Korrelation zur Fadenmodifikation

Layout/ leit. Faden	Offene Franse	Schuss	Geschlossenes Tuch
Abrieb hiTEX (Ausgangsmaterial M8)			
Abrieb hiTEX + Silwa® S280 (M9)			
Abrieb hiTEX + Silwa® S280 (M9A)			

Abrieb Shieldex® (Ausgangs- material M1)			
Abrieb Shieldex® + Silwa® S280 (M2)			
Abrieb Shieldex® + Durazane® 1500 (M15)			

Gemäß Antragstellung ist vorgesehen worden, die in Arbeitspaket 5.2 (Punkt 3.5.2) modifizierten Wirkwerkzeuge hinsichtlich eines potentiell reibungsminimierenden Effektes auf die leitfähigen Fadenmaterialien zu bewerten. Da die im Arbeitspaket entwickelten Wirkwerkzeuge durch die Modifikation in ihrer Funktionalität eingeschränkt sind und möglicherweise im Vergleich zu den unbehandelten Wirkwerkzeugen einen weitaus größeren tribologischen Effekt auf die leitfähigen Fadenmaterialien ausüben würden, ist von weiterführenden Untersuchungen an der Wirkmaschine abgesehen worden. Die Wirkversuche in diesem Arbeitspaket sind, genau wie in Arbeitspaket 4, mit unbehandelten Wirkwerkzeugen fortgeführt worden. Es ergibt sich hieraus der Vorteil einer besseren Vergleichbarkeit hinsichtlich des tribologischen Effektes der modifizierten Fadenmaterialien auf das Wirkwerkzeug. Genau wie in Arbeitspaket 4 sind bei allen untersuchten Lochnadelbleien Partikel an der Nadeloberfläche und im Nadelkopf festgestellt worden, jedoch keine reibungsbedingte Beschädigung, die durch das Einschleifen des Fadens hervorgerufen wurde. Durch die Untersuchung der Wirkwerkzeuge muss jedoch zumindest der optische Eindruck relativiert werden, der durch die Untersuchungen des Abriebs an der Maschine entstanden ist. Besonders bei den Layouts mit den Fadenvarianten M9A (hiTEX) und M2 (Shieldex®), bei denen nur

geringfügig Abrieb an der Maschine festgestellt worden ist, ist eine größere Menge Abrieb an der Nadeloberfläche und im Nadelkopf verblieben (Abb.38 und Abb.39).



Abb. 38: Lochnadelblei 8 (Tuch) mit modifizierter Shieldex®-Variante M2 vor der Reinigung

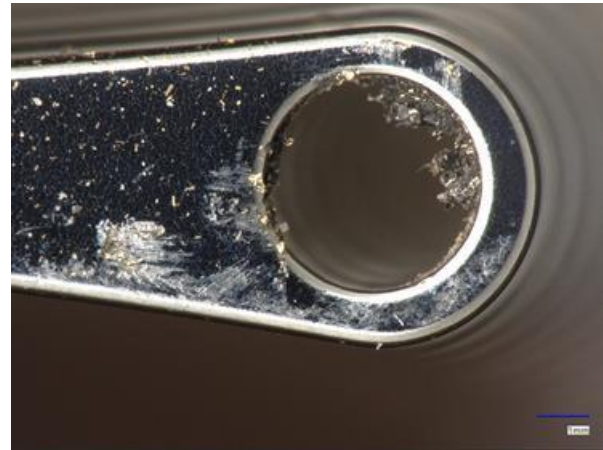


Abb. 39: Lochnadelblei 9 (Franse) mit modifizierter hiTEX-Variante M9A vor der Reinigung

Um vergleichbare Ergebnisse erzielen zu können, sind die in AP 4 eruierten Veredelungsparameter, trotz der sich negativ auf die Silberauflage auswirkenden Dimensionsänderung, beibehalten worden. Die gemessenen Flächenwiderstände der Wirkversuche mit den modifizierten Fadenmaterialien sind gemessen und den Werten aus AP 4 gegenübergestellt worden (Tab. 19 bis Tab. 22).

Tab. 33: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Franse aller Shieldex®- Garne vor und nach der thermischen Behandlung

Proben	Material	Fadenwiderstand in Ohm/m	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square vor	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square nach	Veränderung in %
Franse	Shieldex® Ausgangsware	130-140	1,1	1,2	+9,09 %
Franse	Shieldex® + Silwa® S280	140-143	1,1	1,2	+9,09 %
Franse	Shieldex® + Durazane® 1500	131-132	0,9	1,1	+22,22 %

Tab. 34: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Tuch aller Shieldex®- Garne vor und nach der thermischen Behandlung

Probe	Material	Fadenwiderstand in Ohm/m	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square vor	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square nach	Veränderung in %
Tuch	Shieldex® Ausgangsware	130-140	3,9	6,0	+53,84 %
Tuch	Shieldex® + Silwa® S280	140-143	2,6	4,8	+84,61 %

Tuch	Shieldex® + Durazane® 1500	131-132	1,7	3,4	+100 %
------	----------------------------	---------	-----	-----	--------

Tab. 21: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Franse aller hiTEX-Garne vor und nach der thermischen Behandlung

Proben	Material	Fadenwiderstand in kOhm/m	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square vor	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square nach	Veränderung in %
Franse	hiTEX-Standard	437.8	5,7	3,7	-35,08 %
Franse	hiTEX + Silwa® S280	383.6	80,6	92,0	+14,14 %
Franse	hiTEX + Silwa® Bond Tec + Silwa® S280	1027.8	18,8	28,8	+53,19 %

Tab. 35: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Tuch aller hiTEX-Garne vor und nach der thermischen Behandlung

Proben	Material	Fadenwiderstand in kOhm/m	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square vor	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square nach	Veränderung in %
Tuch	hiTEX-Standard	437.8	3,7	2,4	-35,13 %
Tuch	hiTEX + Silwa® S280	383.6	25,1	30,9	+23,11 %
Tuch	hiTEX + Silwa® Bond Tec + Silwa® S280	1027.8	4,9	4,6	-12,24 %

Wie in AP 4 ist zunächst davon ausgegangen worden, dass sich die Flächenwiderstände der untersuchten Layouts durch die schrumpfbedingte Flächenänderung verringern werden, vor allem nach der Modifikation der Fadenmaterialien. Dies wird jedoch nur bei den bereits in AP 4 genannten Layouts sowie bei dem Layout Tuch (geschlossen) mit der zweifachen Beschichtung mit Silwa® Bond Tec und Silwa® S280 festgestellt. Bei allen anderen Versuchen ist eine Erhöhung des Flächenwiderstandes festgestellt worden. Hierbei kann jedoch nur zum Teil nachvollzogen werden, ob diese durch die tribologischen Effekte bei der Einbindung in das Textil (Layout), durch die Wirkwerkzeuge oder durch die Veredelung hervorgerufen worden sind. Bei den in grün dargestellten Ergebnisse werden jene Werte hervorgehoben, die das Projektteilziel der Veränderung des elektrischen Faden- bzw. Flächenwiderstandes um max. 25 % nach der Verarbeitung nicht überschreiten. Bei Varianten wie das Layout Franse mit dem modifizierten hiTex-Faden (Silwa® Bondtec und Silwa® S280) sowie dem Layout Tuch mit dem modifizierten Shieldex® – Faden (Silwa® S280) können Korrelationen zwischen dem Einfluss des tribologischen Abrieb-

Effekts durch die Wirkwerkzeuge gezogen werden. Dies ist durch die mikroskopischen Aufnahmen der Lochnadelbleie deutlich geworden (Abb. 38 und Abb. 39). Hinzu sich könnten sich die erhöhten elektrischen Widerständen der Veredlungsversuche, speziell bei der beschichteten hiTEX-Variante, in einer zu hohen Beschichtungsaufgabe, widerspiegeln. Die Fadenbeschichtungsvarianten M2 und M9A sind daraufhin noch einmal hinsichtlich ihrer Beschichtungsaufgabe optimiert worden (siehe Punkt 3.5). Im Anschluss an die Optimierungen der Beschichtungsaufgabe sind mit den beiden Fadenvarianten erneute Wirkversuche vorgenommen worden (Abb. 40 und Abb. 41).



Abb. 40: Wirkversuch (Tuch) bei optimierter Beschichtungsaufgabe bei Shieldex®-Variante M2

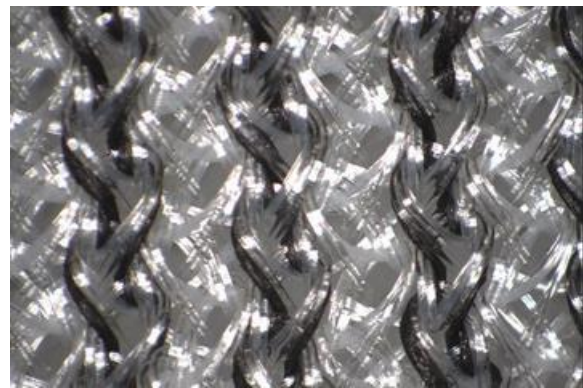


Abb. 41: Wirkversuch (Franse) mit optimierter Beschichtungsaufgabe bei hiTEX-Variante M9A

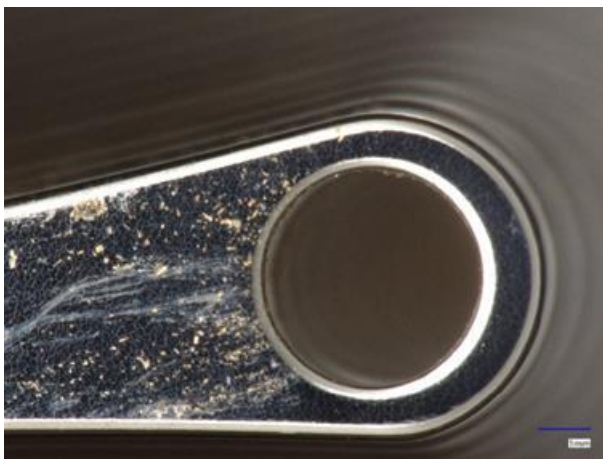


Abb. 42: Nadelblei Wirkversuch (Tuch) bei optimierter Beschichtungsaufgabe bei Shieldex®-Variante M2 vor der Reinigung

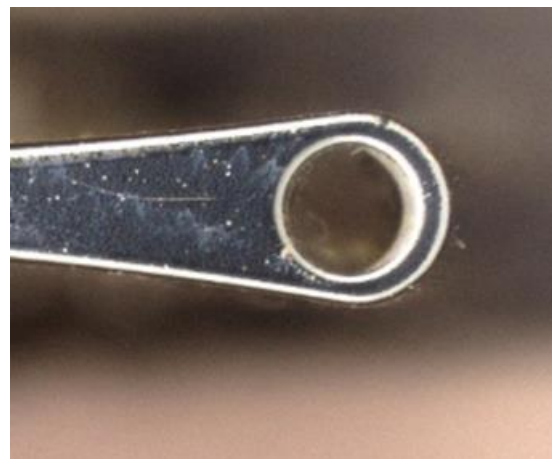


Abb. 43: Nadelblei Wirkversuch (Franse) mit optimierter Beschichtungsaufgabe bei hiTEX-Variante M9A vor der Reinigung

In den untersuchten Lochnadelbleien sind deutlich weniger Partikelrückstände des jeweiligen leitfähigen Materials an der Nadeloberfläche und im Nadelkopf festgestellt worden (Abb. 42 und Abb. 43), was sich auf die nachträgliche Optimierung der Beschichtungsaufgabe zurückführen lässt.

Tab. 36: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Tuch mit Shieldex[®]-Variante M2 vor und nach der thermischen Behandlung

Probe	Material	Fadenwiderstand in Ohm/m	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square vor	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square nach	Veränderung in %
Tuch	Shieldex [®] + Silwa [®] S280	140-143	2,6	4,8	+84,61 %
Tuch	Shieldex [®] + Silwa [®] S280 nach Optimierung	140-143	2,4	2,7	+12,5 %

Tab. 37: Gegenüberstellung der Flächenwiderstände Layout Franse mit Hitex-Variante M9A vor und nach der thermischen Behandlung

Proben	Material	Fadenwiderstand in kOhm/m	Ø Flächenwiderstand in kOhm/ square vor	Ø Flächenwiderstand in Ohm/ square nach	Veränderung in %
Franse	hiTEX + Silwa [®] Bond Tec + Silwa [®] S280	1027.8	18,8	28,8	+53,19 %
Franse	hiTEX + Silwa [®] Bond Tec + Silwa [®] S280 Nach Optimierung	1027.8	14,3	17,4	+11,1 %

Bei der nachträglichen Untersuchung wird eine Reduktion des Flächenwiderstandes bei M2 um das 7-fache% und bei M9A um das 4-fache gemessen (Tab. 23 und Tab 24).

Begleitend werden bei der Verarbeitung beschichteter, metallisierter Fadenmaterialien mit einem Staub-Probenahmegerät Gravikon VC 25 G von GSA Messungen zum Partikelgehalt der Arbeitsplatzumgebung analog dem Vorgehen in AP 4 durchgeführt. Es sind keine gesundheitsschädlichen Staubbelastungen im Technikum gemessen worden.

3.7 AP 8 - Herstellung von Funktionsmustern inklusive Veredelung

In diesem Arbeitspaket ist der Aufbau von Funktionsmustern zur Veranschaulichung der Projektergebnisse erfolgt. Da die geplanten Versuche auf der Karl Mayer SWD 6/2 auf Grund eines Platinendefekts, aus Kosten- und Verfügbarkeitsgründen (Ersatzteile aus Japan), nicht im Projektzeitraum realisierbar waren, sind zwei Heizstrukturen mit der jeweiligen modifizierten Vorzugsvariante der beschichteten leitfähigen Materialien entwickelt worden. In diesem Arbeitspaket sind vor allem die Ergebnisse aus Arbeitspaket 5 eingeflossen. Trotz zahlreicher Entdeckungen hinsichtlich tribologischer Effekte, die bereits bei der Konzeptionierung von Abstandsgewirken vermieden werden

können, können auf Basis der untersuchten Layouts nur bedingt funktionsfähige Muster erstellt werden. Für die beiden Heizstrukturen wurde auf zwei bestehenden Bindungen auf Basis der Schuss (Funktionsmuster 1) und Tuchbindung (Funktionsmuster 2) entwicklungstechnisch aufgebaut.

Funktionsmuster 1:

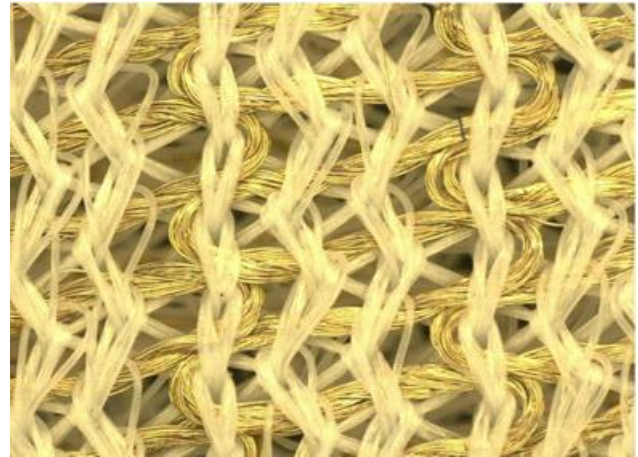
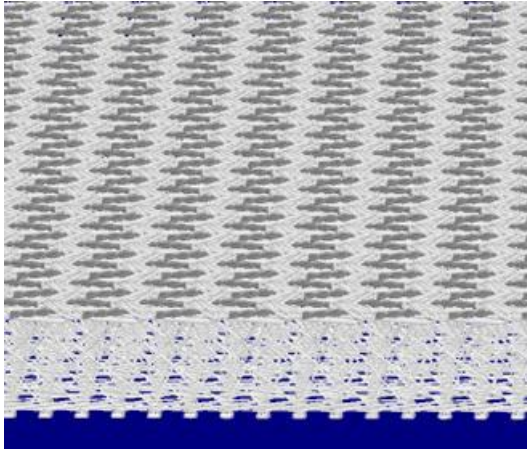


Abb. 44: Funktionsmuster 1 als Warpknit Simulation

Abb. 45: Funktionsmuster 1 mit Shieldex®

- Heizstruktur hergestellt als dreidimensionale Gewirkestruktur auf Karl Mayer Doppelraschelmaschine RD 7 DPLM 12-3
- Beschichtetes Fadenmaterial in L6: modifizierte Shieldex®-Variante M2 mit optimierter; Beschichtungsaufgabe (Vorzugsvariante aus AP 5)
- Einarbeitung des leitfähigen Fadens nur in einer Deckfläche L6 und L7: PES Multifil Tuchbindung +Shieldex®-Variante M2 1 voll / 2 leer Schusslegung

Funktionsmuster 2:

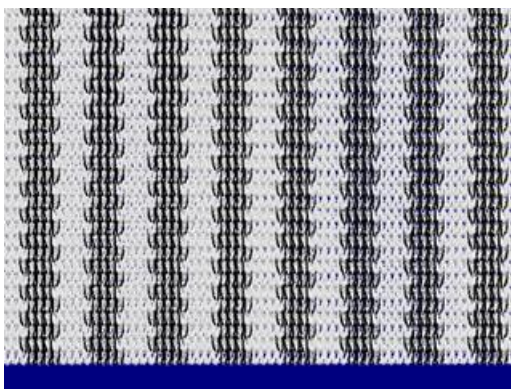


Abb. 46: Funktionsmuster 2 als Warpknit Simulation

Abb. 47: Funktionsmuster 2 mit hiTEX

- Heizstruktur hergestellt als dreidimensionale Gewirkestruktur auf Karl Mayer Doppelraschelmaschine RD 7 DPLM 12-3
- Beschichtetes Fadenmaterial in L7: modifizierte hiTEX-Variante M9A mit

optimierter Beschichtungsauflage (Vorzugsvariante aus AP 5)

- Einarbeitung des leitfähigen Fadens nur in einer Deckfläche : PES Multifil Tuchbindung + hiTEX -Variante M9A

3.8 AP 9 - Textilphysikalische und elektrotechnische Prüfung der einzelnen Materialien und Gewirke

In AP 9 sind projektübergreifend Prüfungen durchgeführt worden. Die Ergebnisse sind in den anderen Arbeitspaketen, auf die jeweiligen Untersuchungen bezogen, dargestellt worden.

3.9 AP 10 - Konzept zur technischen und industriellen Umsetzung

In Arbeitspaket 10 ist ein Konzept zur technischen und industriellen Umsetzung entwickelt worden, um unter Berücksichtigung der untersuchten tribologischen Effekte, abrasiven Verschleiß bei der Herstellung von Gewirken mit leitfähigen Fadenmaterialien vermeiden bzw. vermindern zu können. Hierzu sind die in den einzelnen Arbeitspaketen gewonnenen Erkenntnisse noch einmal aufgeführt, bewertet und in Korrelation zueinander gebracht worden. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass in allen untersuchten Prozessen (Wirkvorbereitung, Wirken und Veredlung) entlang der Prozesskette Abrieb festgestellt werden konnte. Selbst beim Auftrennen der als Gestrick angelieferten Fadenmaterialien (knit-de-knit-Verfahren) Shieldex[®] entsteht bereits eine mechanische Belastung, die sich negativ auf die Beschichtungsauflage auswirken kann.

Hinzu kommt, dass durch den strukturellen Aufbau von komplexen, textilen Flächengebilden wie den Abstandsgewirken schwierig ist, allgemeingültige Aussagen treffen zu können, die für jedes Produkt nutzbar sind. Häufig stehen Entwickler vor der Herausforderung, einzelne Konstruktionsparameter wie Puzzlestücke zu einem optimalen Produktergebnis zusammensetzen zu müssen. Dieser Leitfaden wird mit dem Anspruch erstellt, diese Komplexität, zumindest teilweise, in einfache Fragen herunterzubrechen, um eine bessere Anwendbarkeit gewährleisten zu können. In die Ausarbeitung dieser Ergebnisse ist der projektbegleitende Ausschuss involviert worden. Seine Zusammensetzung aus Innovationstreibern und -nutzern gewährleistet, dass die Ergebnisaufbereitung anwendungsnah und nutzbar erfolgt worden ist. Die Ergebnispräsentation erfolgt von daher unterteilt in Themenkomplexe .

Vermeidung/Verringerung tribologischer Effekte in der Wirkvorbereitung

(Schären und Spulen):

Beobachtungen und Handlungsempfehlungen: Der Schär- bzw. Spulprozess ist ein für die Wirkerei unerlässlicher Prozess. Modernen Direkt-Schäranlagen, wie beispielsweise bei der KSO-Textil GmbH, sind bis zu 55 m lang und 6 m breit /50/. Hier werden die nicht-leitfähigen und leitfähigen Materialien parallel auf den Kettbaum mit einer Spulgeschwindigkeit von bis zu 1000 m/min aufgewickelt. Das durch die Fadenführungselemente laufende, leitfähige Fadenmaterial wird durch die verschleißende Wirkung der Fadenführungen beschädigt. Auch während der Schär- und Spulprozesse ist an den untersuchten Stellen Abrieb in Form metallischer bzw. kohlenstoffhaltiger Beschichtung aufgetreten. Der Abrieb ist visuell nachweisbar, war für eine quantitative Analyse jedoch nicht ausreichend gewesen. Hierfür ist ein längerer Versuch mit deutlich mehr Material notwendig, der im erforderlichen Umfang nicht im Projekt durchgeführt werden konnte. Der entstehende Abrieb wird sich bei Produktionsmengen im industriellen Maßstab aufsummieren.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse kann derzeit keine klare Handlungsempfehlung zur Vermeidung/Verminderung abrasiven Verschleißes in der Wirkvorbereitung ausgesprochen werden. Möglichkeiten wie z. B. das zusätzliche Beschichten von Fadenführungselementen werden, Stand heute, entsprechend der Versuche in AP 5.2 (Punkt 3.5.2) als nicht zielführend erachtet. Möglicherweise würde dadurch im Vergleich zu den unbehandelten Führungselementen ein weitaus größerer tribologischer Effekt auf die leitfähigen Fadenmaterialien ausgeübt werden. t. Hierbei sollte aber auch darauf hingewiesen werden, dass im Rahmen der Projektbearbeitung nur eine Beschichtung mit Durazane[®] 1500 untersucht worden ist. Dieser und andere Ansätze, wie z. B. der Einfluss der Fadenlenkung vom Schärgatter zum Kettbaum, müssen in entsprechender Tiefe in einem weiteren Forschungsprojekt beleuchtet werden.

Vermeidung/Verringerung tribologischer Effekte bei der bindungstechnischen

Entwicklung leitfähiger Gewirke:

Beobachtungen und Handlungsempfehlungen: Generell ist davon auszugehen, dass der Wirkprozess die Beschichtung von leitfähigen Fadenmaterialien beschädigt. Die ist

durch Abriebsuntersuchungen und veränderte Fadenwiderstände nach dem Wirkprozess und bei Versuchen am TENS-O-MAT II festgestellt worden.

Grundsätzlich ist zunächst eine Handlungsempfehlung für das regelmäßige Reinigen der Maschine und der Maschinenumgebung auszusprechen, da durch die Ablage von leitfähigen Partikeln grundsätzlich das Risiko von elektrischen Kurzschlüssen in der Elektronik der Wirkmaschine steigt. Hinzu kommt das Risiko von Verunreinigungen auf der textilen Fläche, das nicht nur unästhetisch ist, sondern ebenfalls zu Fehlfunktionen am Produkt führen kann.

Doch nicht nur abrasiv wirkende Maschinenteile, sondern auch der Verlauf der leitfähigen Fadenmaterialien im textilen Flächengebilde (Bindung) kann über das tribologische Ausmaß der mechanischen Belastung für das leitfähige Fadenmaterial bestimmend sein. Von den untersuchten Ergebnissen wird bei der Schussbindung hinsichtlich des Abriebs die geringste tribologische Belastung auf das leitfähige Fadenmaterial festgestellt. Als Ursache hierfür ist die Tatsache zu nennen, dass der Faden weder mit sich selbst oder mit anderen Fäden mitvermascht wird, so dass auch keine Garn-Reibungspunkte entstehen können. Entgegen ursprünglicher Annahmen hat das Layout der Franse (offen) eine höhere tribologische Belastung als die Tuch-Bindung (geschlossen) bewirkt. In dem spezifischen Vergleichsfall der Layouts Franse (offen) und Tuch (geschlossen) lässt sich die Erhöhung des tribologischen Effekts der Franse nicht auf das Verhältnis von Garn-Reibungspunkten zur Versatzzahl zurückführen. Diese Ursache kann jedoch nicht grundlegend für alle Bindungsarten ausgeschlossen werden. Neben den Garn Reibungspunkten, die sowohl

- bei dem leitfähigen Fadens mit sich selbst,
- mit den leitfähigen Fäden der benachbarten Nadeln,
- als auch mit den abbindenden Fadensystemen der Legebarren (3, 5 und 6)

auftreten können, gibt es noch weitere Faktoren die berücksichtigt werden müssen, welche aber im Umfang des Projektes nicht beleuchtet werden konnten. Werden noch weitere Faktoren in die Betrachtung einbezogen, so müssen beispielsweise die Korrelationen zwischen der Versatzzahl der gewählten Bindung mit der Kinematik der Wirkwerkzeuge, der Fadeneinlauf, der Fadendichte und der eingesetzten Garnfeinheit untersucht werden. Dies ist, vor allem bei so komplexen textilen Gebilden wie den Abstandsgewirke, nur durch sukzessiven Wissensaufbau möglich.

Trotz zahlreicher Entdeckungen hinsichtlich tribologischer Effekte, die allein schon bei der Konzeptionierung von Abstandsgewirken vermieden werden können, kann derzeit keine klare Handlungsempfehlung für eine bestimmte Bindungsart ausgesprochen werden. Die Konzeptionierung und Entwicklung der Bindung ist maßgeblich mit der geplanten Produktaufgabe der textilen Fläche verbunden und nicht andersherum.

Vermeidung/Verringerung tribologischer Effekte bei der Veredelung leitfähiger Gewirke:

Beobachtungen und Handlungsempfehlungen: Genau wie das Schären ist der Prozess des Thermofixierens (auch: Veredeln) ein für die Wirkerei unerlässlicher Prozessschritt. Durch Hitzebeaufschlagung werden die durch das Verwirken verformten Garne relaxiert und Spannungen in der textilen Fläche beseitigt. Häufig wird das Textil hierbei zusätzlich in einem Spannrahmen befestigt und verstreckt. Um einen zusätzlichen tribologischen Einfluss des Verstreckens auf die leitfähigen Fadenmaterialien ausschließen zu können, ist bei den untersuchten Flächen der freie Schrumpfung bei Hitzebeaufschlagung von 160°C durchgeführt worden. Um einen tribologischen Effekt der Veredelung feststellen zu können, sind die Flächenwiderstände vor und nach dem Verwirken ermittelt worden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich die Flächenwiderstände der untersuchten Layouts resultierend aus der geometrischen Veränderung der textilen Prüflinge in Länge, Breite und Dicke (Heißluftschrumpf & erhöhte Maschendichte) verringern, sollte kein tribologischer Effekt auftreten. Am Beispiel von Bindungen mit dem silberbeschichteten Shieldex®-Faden wird jedoch festgestellt, dass die Veredelung durchaus einen zusätzlichen tribologischen Effekt auf das leitfähige Fadenmaterial ausübt. Hier wird nach dem freien Schrumpfung eine Erhöhung des Widerstandes festgestellt. Grund hierfür sind die hohen Schrumpfwerte von durchschnittlich 9-10% bei allen Veredelungsversuchen. Ausgehend von Erfahrungswerten liegt die maximale Dimensionsänderung, die bei einem silberbeschichteten Fadenmaterial vorgenommen werden kann, bei maximal 7 %. Wird dieser Wert überschritten, kann es zu einem Abplatzen der Silberauflage und so zu Verringerung der Leitfähigkeit kommen. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen eine Handlungsempfehlung zur Vermeidung oder Verringerung tribologischer Effekte bei der Veredelung leitfähiger Gewirke wäre das Berücksichtigen der maximalen Schrumpfung/-Dehnungseigenschaften der jeweiligen Beschichtungsaufgabe bei der Festlegung der Thermofixierparameter

Vermeidung/Verringerung gesundheitlicher Risiken bei der Verarbeitung

leitfähiger Gewirke:

Beobachtungen und Handlungsempfehlungen: Im Rahmen der bei den Wirkversuchen durchgeführten Staubmessungen sind Stäube durch Partikelabrieb gemessen, jedoch keine gesundheitsschädlichen Staubbelastungen im Technikum festgestellt worden. Weder die Grenzwerte für Feinstaub durch Kohlenstoff ($< 0,05 \text{ mg/m}^3$) noch die für Silberpartikel ($< 0,8 \text{ mg/m}^3$ bei 15 min) sind überschritten worden. Hierbei muss jedoch hinzugefügt werden, dass im Rahmen der verfügbaren Mittel lediglich die Staubmenge, nicht aber die Partikelgröße gemessen wurde. Hinzu kommt, dass die Untersuchungen im Technikumsmaßstab einen ersten Eindruck hinsichtlich der Feinstaubbelastung in der Produktion von leitfähigen Gewirken geben, jedoch nicht 1:1 in den Industriemaßstab übertragen werden können. Trotz entwarnender Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen ist es ratsam, dass Beschäftigte an den fadenführenden Maschinen bei der Verarbeitung von leitfähig beschichteten Fadenmaterialien eine Atemschutzmaske tragen, um keine akute oder chronische Schädigung der Gesundheit der Beschäftigten zu riskieren.

Vermeidung/Verringerung tribologischer Effekte von leitfähigen Fadenmaterialien auf die Wirkwerkzeuge:

Im Projekt sind die nicht modifizierten Lochnadeln auf dem Prüfstand am TENS-O-MAT II sowie nach der Verarbeitung der leitfähigen Fäden auf der Wirkmaschine mikroskopisch auf Beschädigungen untersucht worden. Beide Versuche haben unterschiedliche Ergebnisse aufgezeigt. Während bei den untersuchten Wirkwerkzeugen nach den Versuchen am TENS-O-MAT II Beschädigungen am und im Nadelkopf sichtbar waren, wird nach den Wirkversuchen an der Maschine kein Einschleifen oder Ähnliches festgestellt. In Folgeversuchen ist untersucht worden, in wie weit Modifikationen in Form einer zusätzlichen Beschichtung auf der Nadeloberfläche, Abriebeffekte an den Wirkwerkzeugen und somit auch der Beschichtungsaufgabe der leitfähigen Fadenmaterialien vermindern bzw. verhindern können. Abgesehen von genannten Effekten, würde sich der zeit- und ressourcenaufwändige Prozess der Wartung verringern. Die Versuche zu AP 5.2 haben sich als nicht zielführend erwiesen, da während der Funktionsversuche beobachtet worden ist, dass die zusätzliche Beschichtung die Funktionsfähigkeit der beschichteten Wirkwerkzeuge beeinträchtigt hat. Vor allem der Schließmechanismus der

Zungennadeln kann nicht mehr vollumfänglich ausgeführt werden. Zudem ist eine erhöhte Menge Abrieb durch die Polysilazan-Beschichtung beobachtet worden (Abb. 33 bis Abb. 36). Ein zusätzlicher tribologischer Effekt auf die leitfähigen Fadenmaterialien kann nicht ausgeschlossen werden. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse kann derzeit keine klare Handlungsempfehlung zur Vermeidung/Verminderung abrasiven Verschleißes durch die Verwendung modifizierter Wirkwerkzeuge ausgesprochen werden. Nichtsdestotrotz soll aber auch darauf hingewiesen werden, dass im Rahmen der Projektbearbeitung nur die Beschichtung mit Durazane® 1500 untersucht worden ist. Dieser Ansatz müsste in entsprechender Tiefe in einem weiteren Forschungsprojekt beleuchtet werden. Stand heute kann nur die regelmäßige Überprüfung und Austausch beschädigter fadenführender Wirkwerkzeuge empfohlen werden.

Vermeidung/Verringerung tribologischer Effekte beim Wirken durch den Einsatz modifizierter leitfähiger Garne:

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass fadenverarbeitende Prozesse entlang der textilen Kette zur Herstellung von Gewirken die Beschichtungsaufgabe von leitfähigen Fadenmaterialien potentiell beschädigen können. Im Projekt sind Polymerbeschichtungen zur Verbesserung des Reibverhaltens und zur Minimierung des Partikelabriebs erfolgreich auf verschiedene leitfähige Fadenmaterialien aufgetragen worden. Diese modifizierten Fadenmaterialien sind sowohl in Versuchen am TENS-O-MAT II Prüfstand als auch in mehreren Wirkdurchläufen getestet und erneut optimiert worden. Im Ergebnis sind zwei Vorzugsvarianten entstanden, sowohl für silberbasierte als auch für kohlenstoffbasierte Fadenmaterialien, welche weitgehend dem in AP 1 angestrebten Eigenschaftsprofil genügen (Tab. 25 und Tab. 26):

Tab. 38: Gegenüberstellung der Projektziele mit den erreichten Ergebnissen besilberte Fadenmaterialien

Forschungsziel	Vorzugsvariante Shieldex® M2 nach Optimierung Beschichtungsaufgabe
<ul style="list-style-type: none"> • max. 20 % Veränderung in der Höchstzugkraft in cN nach Aufbringen der Polymerbeschichtung 	Shieldex®-Standard: 1438,7 cN (siehe AP 3) Shieldex®-M2 mit Silwa® S280: 1408,6 cN (siehe AP 5) Verringerung um ca. 2,1 %
<ul style="list-style-type: none"> • Max. Beschichtungsaufgabe 5 % 	< 5 % nach Optimierung (siehe AP 5)
<ul style="list-style-type: none"> • max. 20 % Veränderung des elektrischen 	Shieldex®-Standard: Ø 127,3 Ω/Meter (siehe AP

Fadenwiderstands nach Aufbringen der Polymerbeschichtung	3) Shieldex®-M2 mit Silwa® S280: 146,8 Ω /Meter (siehe AP 5) Erhöhung um ca. 15 %
<ul style="list-style-type: none"> 25 % Verringerung der Reibungskräfte Friktion F in cN durch Aufbringen der reibungsminimierenden Schicht 	Shieldex®-Standard: 222 cN (siehe AP 5) Shieldex®-M2 mit Silwa® S280: 88 cN (siehe AP 5) Verringerung um ca. 60 %
<ul style="list-style-type: none"> eine um max. 25 % des elektrischen Flächenwiderstands in Ω/ m² nach dem Verwirken 	Tuch Layout Shieldex®-Standard vor dem Schrumpf: 3,9 Ω / m ² Tuch-Layout mit Shieldex®-M2 mit Silwa® S280 vor dem Schrumpf: S280: 2,4 Ω / m ² Verringerung um ca. 38 % (siehe AP 6)
<ul style="list-style-type: none"> Verringerung Gesundheitsrisiko durch Reduzierung Staubeentwicklung metallischer Partikel 	Es sind keine gesundheitsschädlichen Staubbelastungen während der Verarbeitung des modifizierten Fadens im Technikum gemessen worden

Tab. 26: Gegenüberstellung der Projektziele mit den erreichten Ergebnissen kohlenstoffbasierte Fadenmaterialien

Forschungsziel	Vorzugsvariante hiTEX® M9A mit + Silwa® Bond Tec + Silwa® S280 nach Optimierung Beschichtungsauflage
<ul style="list-style-type: none"> max. 20 % Veränderung in der Höchstzugkraft in cN nach Aufbringen der Polymerbeschichtung 	hiTEX-Standard: 413,6 cN (siehe AP 3) hiTEX-M9A: 421,5cN (siehe AP 5) Erhöhung um ca. 2 %
<ul style="list-style-type: none"> Max. Beschichtungsauflage 5 % 	>5 % nach Optimierung (siehe AP 5)
<ul style="list-style-type: none"> max. 20 % Veränderung des elektrischen Fadenwiderstands nach Aufbringen der Polymerbeschichtung 	hiTEX-Standard: 437,8 Ω /Meter (siehe AP 5 Charge 2023) hiTEX-M9A: 1027,8 Ω /Meter (siehe AP 5) Erhöhung: > 20%
<ul style="list-style-type: none"> 25 % Verringerung der Reibungskräfte Friktion F in cN durch Aufbringen der 	hiTEX-Standard: 173 cN (siehe AP 5) hiTEX-M9A: 64 cN

reibungsmindernden Schicht	(siehe AP 5) Verringerung um ca. 63 %
<ul style="list-style-type: none"> eine um max. 25 % des elektrischen Flächenwiderstands in Ohm/ m² nach dem Verwirken 	Franse Layout hiTEX-Standard vor dem Schrumpf: 5,7 Ω/ m ² Franse Layout hiTEX-M9A vor dem Schrumpf: 14,3 Ω/ m ² Erhöhung um ca. 150 % (siehe AP 6)
<ul style="list-style-type: none"> Verringerung Gesundheitsrisiko durch Reduzierung Staubentwicklung metallischer Partikel 	Es sind keine gesundheitsschädlichen Staubbelastungen während der Verarbeitung des modifizierten Fadens im Technikum gemessen worden

Bis auf die erhöhten Werten in Bezug auf die Beschichtungsaufgabe und der Widerstandserhöhungen bei der hiTEX-Varianten haben sich die Versuche hinsichtlich der Fadenmodifikationen als zielführende Methode erwiesen, um abrasiven Verschleiß zu reduzieren. Bei der Überführung der Versuche in größere Maßstäbe werden Friktionswerte der versilberten sowie kohlenstoffbeschichteten Fäden erreicht, die sich in einem ähnlichen Bereich wie nach den Laborversuchen bewegen. Der elektrische Widerstand bei den versilberten Garnen hat sich ebenfalls gegenüber dem für das Ausgangsmaterial nur unwesentlich verändert,

3.10 AP 11 - Dokumentation und Berichterstattung

Die Untersuchungsergebnisse und abgeleiteten Erkenntnisse werden gemäß den geltenden Richtlinien der AiF über den gesamten Bearbeitungszeitraum dokumentiert und zu den vorgegebenen Terminen in Zwischen- bzw. Schlussberichten zusammengefasst. Entsprechend dem Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft werden Transfermaßnahmen durchgeführt.

4. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung

Die in den Zwischenberichten aufgrund des rückwirkenden Projektstartes und der personellen Veränderungen aufgeführten geringen Verzögerungen im Zeitplan sind in der noch verbliebenen Projektlaufzeit in 2024 aufgeholt worden. Alle Arbeiten sind damit planmäßig abgeschlossen worden. Lediglich die Versuche auf der Maschine

SWD 6/2 Interlaced Raschel für die einflächigen Versuche konnten durch einen Platinendefekt, nicht durchgeführt werden. Stattdessen sind sämtliche Versuche, die für die SWD 6/2 Interlaced geplant worden sind, ebenfalls auf der Doppelraschelmaschine durchgeführt worden.

4.1 Angaben zur Finanzierung

Das wissenschaftliche Personal ist, wie im Antrag vorgesehen, eingesetzt worden. Für die Realisierung der Projektdurchführung wurden Mitarbeiter der Gruppe HPA A+B insgesamt 28,71 Personenmonate eingesetzt, davon 6,4 in HPA-A und 22,31 in HPA-B. Die Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplanes) in Höhe von 5.712,00 € (Schären von Fadenmaterial) sind in 2023 ausgegeben worden. Im Zeitraum vom 01.07.2023 bis 31.12.2023 sind Beschichtungsversuche im Wert von 11.781,00 € im Rahmen einer Drittleistung durchgeführt worden. Die Rechnung wurde im Januar 2024 beglichen.

4.2 Erläuterung der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projektantrag festgelegten Ziele für den Berichtszeitraum sind weitgehend erfüllt worden. Die durchgeführten Arbeiten entsprechen den im Berichtszeitraum geplanten Versuchen und Analysen, wie sie für die Realisierung der Gesamtzielstellung des Projektes notwendig sind. Die aufgetretenen Kosten sind Personalkosten. Die genannten Kosten sind im Projekt nahezu im geplanten Umfang zur Erreichung des Projektergebnisses verausgabt worden (siehe Ausführungen unter Punkt 4.1).

5 Wirtschaftlichkeit und Umsetzung der Ergebnisse in kleinen und mittelständigen Unternehmen

5.1 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Für die erfolgreiche Bearbeitung des Forschungsvorhabens ist die fachgebietsübergreifende, interdisziplinäre Zusammenarbeit der Forschungsstelle mit den im PBA agierenden Firmen unabdingbar. Dadurch ist der Transfer der Forschungsergebnisse in Industrie und Wirtschaft entlang der gesamten Wertschöpfungskette gesichert. Die Mitglieder des PBA waren (in alphabetischer Reihenfolge):

- ALTERFIL Nähfaden GmbH
- durXtreme GmbH
- Groz-Beckert
- Imbut GmbH
- Jahn GmbH & Co. KG
- Karl Mayer R&D GmbH & Co. KG
- Lefatex Deutschland GmbH
- Merck KGaA
- M. Zellner GmbH
- Penn Textile Solutions GmbH
- Suchy Textilmaschinenbau GmbH
- Textilausrüstung Pfand GmbH
- Thorey Gera Textilveredelung GmbH
- TITK e.V.
- warmX GmbH

In der Tabelle 27 sind bereits durchgeführte Maßnahmen sowie Änderungen gegenüber den zur Antragstellung geplanten Transfermaßnahmen mit fester Schrift kenntlich gemacht. Ebenso wichtig sind Präsentationen und Veröffentlichungen der Projektergebnisse (auch von Teilergebnissen) während der Projektlaufzeit sowie im Anschluss. Diesbezüglich sind bereits zum Zeitpunkt der Antragstellung sind entsprechende Transfermaßnahmen festgelegt worden (Tab. 28).

Tab. 39: Geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitpunkt
Sitzungen des PBA	Ergebnistransfer, Ergebnisdiskussion	TITV Greiz	1. Projektmonat 3 bzw. 4 → durchgeführt am 01.12.2022 2. Projektmonat 12/13 → durchgeführt am 29.08.2023 3. Projektmonat 18/20 → durchgeführt am 22.02.2024 4. Projektmonat 24 → durchgeführt am 16.04.2024
Entspr. AP 10 Aufbau von Funktionsmustern zur Darstellung der Projektergebnisse an konkreten Beispielen	Information und Akquirierung weiterer industrieller Anwender, Nutzung für Präsentation	TITV Greiz	Projektmonat 19-23
Abschlussbericht	Zusammenstellung der Forschungsergebnisse	TITV Greiz	Projektmonat 24

Tab. 28: Geplante spezifische Transfermaßnahme nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitpunkt
Präsentation Ergebnisse bei „TITV Innovationen“	Information industrieller Anwender	TITV Greiz	September 2025 nach Projektende
Präsentation Ergebnisse auf internationaler Konferenz	Information industrieller Anwender	Dornbirn GFC Anwenderforum Smart Textiles	September 2024 Februar 2025
Publikation der Ergebnisse	Information industrieller Anwender	Fachzeitschriften, wie z. B. Kettenwirkpraxis, Melliand	2024-2025
Publikation der Ergebnisse auf der Internetseite des TITV Greiz	Information industrieller Anwender	TITV Webseite	während und nach der Projektlaufzeit
Berücksichtigung der Projektergebnisse bei der Erarbeitung von Prüfvorschriften und bei der Normung von Smart Textiles	Übernahme der Normentwürfe	DIN und EU- Gremien	laufend
Beratung von Unternehmen der Textil- bzw. Beschichtungsindustrie und Veredelungen zur Technologieumsetzung	Industrielle Umsetzung der Projektergebnisse in Industrieunternehmen	Unternehmen der Textil- bzw. Beschichtungsindustrie und Veredelungen	laufend
Übernahme der FuE Ergebnisse in die Aus- und Weiterbildung	Qualifikation und Weiterbildung	Seminare des TITV Greiz	Folgejahre nach Projektende

5.2 Nutzen und wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU sowie voraussichtlicher Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU

Die Analyse der Funktionsbeeinträchtigung beim Verwirken polymerbasierter leitfähiger Fadenmaterialien und die quantitative und qualitative Untersuchung des auftretenden Abriebes bei der wirktechnischen Verarbeitung im Labor- sowie Technikumsmaßstab ermöglichen:

- die Anpassung in der Beschaffenheit der Wirknadeln und der leitfähigen Fadenmaterialien,
- eine Veränderung des elektrischen Faden- bzw. Flächenwiderstandes um max. 25 % nach der Verarbeitung □> Erhöhung der Funktionssicherheit gewirkter Smarter Textilien sowie eine
- Empfehlung arbeitsschutztechnischer Maßnahmen zur Reduzierung gesundheitlicher Risiken.

Das im Vorhaben erarbeitete Konzept bietet vor allem KMU aus der Textil- und Beschichtungsindustrie eine verbesserte technologische und wirtschaftliche Grundlage, um Smart Textiles mit Sensor-, Heiz- und Abschirmapplikationen auf Basis gewirkter Flächen mit polymerbasiertem leitfähigem Fadenmaterial bereitzustellen. Die in 1.1 genannten Markteintrittsbarrieren für gewirkte Flächen mit vermaschten leitfähigen Fäden werden beseitigt. Neben wachsendem Knowhow entstehen neue innovative Smarte Gewirke, welche die Marktposition sicherstellen und stärken sowie Arbeitsplätze sichern. Die Optimierung der leitfähigen Fadenmaterialien ermöglicht auch Herstellern aus verwandten Technologiegebieten einen höheren Absatzmarkt, vor allem, wenn durch die reibungsminimierenden und abriebreduzierenden Schichten auch in anderen textiltechnologischen Prozessen (Stricken, Weben, Sticken) eine Verbesserung der Funktionssicherheit von Smart Textiles erreicht wird.

Innovationspotenzial für einen oder mehrere Wirtschaftszweige

Das größte Potential des Forschungsthemas steckt in der Erhöhung der Produktzuverlässigkeit und dem sparsamen Einsatz von leitfähigem Fadenmaterial beim Herstellen von Smart Textiles Gewirken. In dem hart umkämpften Markt ist es zwingend erforderlich, dass die Funktionalität der "smarten" Gewirke zuverlässig und langlebig ist. Ziel muss deshalb zwingend sein, leitfähige Fadenmaterialien zuverlässig, ohne Schädigung und damit ohne Veränderung der Leitfähigkeit zu verarbeiten. Nur so ist gewährleistet, dass Gewirke mit ihren genannten positiven Eigenschaften auch in punkto Produktsicherheit und -standzeit Vorteile gegenüber gedruckter Sensorik auf Folie oder Textil bieten. Dieses Innovationspotential kann sowohl von KMU, der Textilindustrie als auch von Unternehmen aus den Anwendungsbereichen der Technischen Textilien/ Smart Textiles genutzt werden. Das Projektergebnis ist in folgenden Wirtschaftszweigen und Fachbereichen anwendbar und wirtschaftlich verwertbar:

Wirtschaftszweige: Herstellung von Textilien, Textil- und Bekleidungsgewerbe, Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von elektrischen Ausrüstungen, Maschinenbau, Herstellung von Kraftwagen, Sonstiger Fahrzeugbau

Fachgebiete: Sport- und Wellnessbereich, Gesundheits- und Medizintechnik, Ressourceneffizienz, Rohstoffe (außer Energie), Elektrotechnik, Elektronik, Elektroniksysteme, Mess-, Regelungs-, Sensorik, Mikrosystemtechnik, auch Automatisierungstechnik, Werkstoffe, Materialien, Produktionstechnologien,

Fertigungstechnik, Oberflächentechnik, Qualitätssicherung, Rationalisierung, Materialtechnik, Werkstofftechnik, Textile Flächenherstellung

Potenzieller Nutzerkreis vor dem Hintergrund der adressierten Zielgruppe (KMU)

Im Jahr 2021 wurden in Deutschland in ca. 539 Unternehmen im verarbeitenden Gewerbe Textilien hergestellt. Laut dem Statistischen Bundesamt arbeiten 83 937 Beschäftigte in diesen zu-meist klein- und mittelständischen Unternehmen /51/. Im Vergleich dazu waren es im Jahr 2019 ca. 380 Unternehmen und 53.000 Beschäftigte. /52/ Direkte Nutzer der Projektergebnisse sind Wirkwarenhersteller (33 in Dtl., Umsatz ca. 10,4 Mio. € in 2019 /53/), aber auch Fadenhersteller und Chemiefaserhersteller (Umsatz ca. 2 Mrd. € in Dtl. in 2017 /54/). Indirekte Nutzungsmöglichkeiten für die Forschungsergebnisse bieten textile Sensor- und Heizanwendungen in Sport- und Freizeitbekleidung, für textile Pflegehilfsmittel (u. a. Lagerungssystem für die Dekubitusprävention) und als Sicherheitsanwendung bei der Erfassung von Berührung, Kollision, Sitzbelegungserkennung, aber auch bei Schutzkleidung für Abschirmtextilien und Textilien mit dem Einsatzgebiet in Smart Home oder Gesundheit./16/

Beitrag zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der KMU

Die im Projekt angestrebte Minimierung der tribologischen Einflussgrößen zwischen Nadel und Faden und dem damit verringerten Abrieb bei der Verarbeitung polymerbasierter, leitfähiger Fadenmaterialien in der Wirkerei verbessert die reproduzierbare Produktzuverlässigkeit gewirkter Smart Textiles deutlich. Für die Innovationsverwerter wird damit eine solide Basis geschaffen, um zuverlässige Produkte im Wachstumsmarkt der Smart Textilien zu platzieren. In einem zehnmonatigen Projekt hat das Forschungskuratorium Textil e. V. 2019 mit Unterstützung zahlreicher Experten analysiert, wie sich die Textilbranche bis zum Jahr 2035 in Deutschland und international entwickeln könnte. Dabei erwarten 85 % der befragten Experten bis zum Jahr 2030 endgültig den Durchbruch der Smart Textiles am Markt./55/ Gestützt wird dies von einer Prognose zum Wachstum von e-textiles, wonach deren globale Marktgröße im Prognosezeitraum 2021-2025 mit einer CAGR (Compound Annual Growth Rate) von fast schon 29 % wächst. Die YOY (year-over-year)-Wachstumsrate für 2021 wird auf 18 % bis Ende 2025 geschätzt./56/ Für diese Prognosen spricht, dass das Marktvolumen der Smarten Textiles seit Jahren stetig ansteigt./54/ Geht man davon aus, dass davon ca. 20% auf Wirkereien bzw. KMU entfallen, welche durch den Strukturwandel in der Textilindustrie in den letzten Jahren unter enormem Wettbewerbsdruck stehen, ist es zwingend erforderlich, sich stärker auf

technisch anspruchsvolle Textilien und innovative Produkte auszurichten. Das Projekt ebnet für die Innovationsnutzer den Weg, sich mit innovativen Produkten auf dem internationalen zu Markt etablieren und so globale Wachstumsmärkte zu bedienen.

Beitrag des Vorhabens zur Erfüllung gesetzlicher Auflagen

Mit dem Einsatz speziell modifizierter Wirknadeln/-werkzeuge und beschichteter leitfähiger Fadenmaterialien in der Wirkerei wird ein Beitrag zur Verringerung von Partikelabrieb und damit zur Einhaltung des geltenden AGW für Silber- und Kohlenstoffpartikel geleistet./13/ Die Vermeidung von Abrieb in der Wirkerei hat unmittelbar positiven Einfluss auf die Gesundheit der Arbeiter. Des Weiteren tragen die Projektziele dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) Rechnung, da durch eine sparsamere Verarbeitung polymerbasierter leitfähiger Fäden und die Minimierung von Verschleißerscheinungen an den Wirkwerkzeugen Ressourcen geschont, Energie gespart und Abfall vermieden werden.

5.3 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der FuE- Ergebnisse nach Projektende

Zum Abschluss des Projektes

- Anwendungspotential der modifizierten Garne wird der Industrie vorgestellt
- Integration der gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der Berücksichtigung tribologischer Effekte bei der Entwicklung von Smart Textiles
- Fortführung der über die Mitwirkung im Projektbegleitenden Ausschuss initiierten Kooperationsbeziehungen □> ggf. Anbahnung eines Folgeprojektes
Akquise für Neuentwicklungen auf Basis der Forschungsergebnisse

Zwei Jahre nach Projektabschluss

- Ausnutzung des Wissensvorsprungs und Überführung der Erkenntnisse in die Entwicklung bzw. Modifikation leitfähiger Fäden und Gewirke für verschiedene Anwendungen für Projekte und Produkte zunächst auf den Anlagen des TITV
- Umsetzung der Forschungsergebnisse in Produkten und Aufbau von entsprechendem Know-how bei interessierten Anwendern (Wissenstransfer)
- Weiterforschen an aus der Projektbearbeitung hervorgegangenen, offenen Fragestellungen im Rahmen von geförderten FuE-Projekten

3-5 Jahre nach Projektabschluss

- Integration leitfähiger, zuverlässiger Gewirke zur Herstellung von Smart Textiles (Wearables)

6 Durchführende Forschungsstelle(n)

Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e.V. (TITV Greiz)

Zeulenrodaer Str. 42

07973 Greiz

Tel.: 03661 611-0

Fax: 03661 611-222

E-Mail: mail@titv-greiz.de

Leiter der Forschungsstelle: Dr. Fabian Schreiber

7 Literaturverzeichnis

- /1/ Der elektrisch leitfähige Hybrid-Näh- und Stickfaden mit Silberanteil, Quelle: <https://www.amann.com/de/produkte/produkt/silver-tech/>, Stand: 02.08.2021
- /2/ Abschlussbericht INNO-Kom Ost MF 160147: „FadGa – Entwicklung einer Technologie zur wirtschaftlichen Fertigung eines leitfähigen Stickfadens mittels Fadengalvanik im Technikmaßstab“ (2017-2019)
- /3/ Abschlussbericht INNO-KOM Ost MF 120200: „ μ -Stick – Entwicklung eines leitfähigen Stickfadens für die Realisierung textiler elektronischer Schaltungen mit minimalen Leiterbahnabständen zur Bestückung mit Bauelementen“ (2013-2015)
- /4/ Quelle: <https://textile-network.de/de/Fashion/Sichtbarer-Schub-fuer-E-Textiles>
Autor: Hans-Werner Oertel Stand: 05.08.2019
- /5/ Quelle: <https://www.lead-innovation.com/blog/trends-bei-smart-textiles>, Stand: 05.02.2020
- /6/ Quelle: Shieldex Datenblatt, verfügbar auf <https://www.shieldex.de/products/shieldex-117-17/>, Stand: 04.08.2024
- /7/ Quelle: Datenblatt: ELITEX®-Fäden, verfügbar auf Anfrage bei imbut GmbH, Stand: 04.08.2024
- /8/ Quelle: <http://www.resistat.com/>, Stand: 28.02.2019
- /9/ Quelle: vorläufiges Datenblatt hiTEX, verfügbar auf Anfrage bei TITV; Stand: 02.08.2021
- /10/ CNT Coated Fiber “CNTEC”, Autor: Eiji Akiba, Quelle: http://endomoribu.shinshu-u.ac.jp/IWCTS/docs/abst/EAkiba_IWCTS.pdf, Stand: 28.02.2019
- /11/ Abschlussbericht INNO-KOM Ost VF 150041: „Hochohmiger Faden Entwicklung eines hochohmigen Fadens mit permanenten und gleichmäßigen elektrischen Eigenschaften auf Basis einer thermisch aktivierbaren Beschichtung“ (2016-2018)
- /12/ Abschlussbericht ZIM-KU 2064506CJ2: „TexPermasens- Entwicklung von neuartigen textilen Sensoren für die Abnahme von Körperfunktionen und zum Einsatz im technischen Bereich“ (2012-2014)
- /13/ Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) im Gemeinsamen Ministerialblatt (GMBL): „TRGS 900“, Fassung: 02.05.2018
- /14/ Abschlussbericht TAB 2008 FE 0055 und 0056: „Konzept und technologische Umsetzung zur Vermeidung von Silberstaub bei der Herstellung von galvanisch

behandelten, mehrkomponentigen Polyamidfäden und Recycling von Silber aus textilen Silberabfällen und Ablagerungen“, imbut GmbH, 2009-2011

/15/ Smart Textiles Studie, Endbericht zu Projekt 871418 im Rahmen der 28. Ausschreibung der Produktion der Zukunft, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Wien, 2020. Stand: 28. Februar 2020

/16/ ITA Informationen 2018, Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University, 2018

/17/ Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions, Autoren: Kenneth Holmberg, Ali Erdemir, Quelle: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40544-017-0183-5>, Stand: 02.08.2021

/18/ Abschlussbericht BMBF 03XP0385F: „AdaptStick - Produktionsnahe Fertigung von funktionalisierbaren, leitfähigen Fäden mit anwendungsorientiert adaptierbaren, permanenten Eigenschaften & optimalem Reibverhalten zur stick- und nähtechnischen Verarbeitung“ (2021-2023)

/19/ „Gewirke“, Quelle: <https://www.textilie.com/textilarten/fadensysteme/gewirke/>, Stand: 26.02.2020

/20/ „FashionTech- SmartTextiles“ Kurzexpertise im Auftrag des BMWi, Quelle: <https://ftp.zew.de/pub/zew-docs/gutachten/Kurzexpertise-FashionTech-ZEW2018.pdf> Autoren: J. Ohnemus, F. Rasel: Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung, Stand: 08.01.2018

/21/ AFBW Kompetenz-atlas Faser-basierte Werkstoffe, Quelle: <https://www.afbw-kompetenz.eu/de/companies/companies-details/eschler-textil-gmbh.html>, Stand: 26.02.2020

/22/ Patentnummer: EP 3141646 A1

/23/ Patentnummer: DE 10 2006 038 611 A1

/24/ Patentnummer: DE 10 2006 038612 A1

/25/ Quelle: <https://heiztextil.de/>, Stand 18.07.2021

/26/ XShield® von Kufner, <http://www.kufner-textil.com/kufner/index.php?StoryID=38>, Stand: 18.07.2021

/27/ Abschlussbericht ZIM-KU 4058801CJ5: „LeitStickPro- Entwicklung einer Fadenkonstruktion aus metallisierten/versilberten Fadenmaterialien mit definierter Leitfähigkeit für den prozesssicheren und reproduzierbaren Einsatz in der industriellen Stickereiindustrie“ (2015 - 2017)

/28/ H. Czichos, K.-H. Habig: Tribologie -Handbuch – Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. 3. Aufl., Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. – ISBN 978-3-8348-0017-6

- /29/ AiF-Forschungsprojekt Nr. 146 ZBR „Energie- und Informationsübertragung in Smart Textiles“ (2006)
- /30/ Smart Textiles mit leitfähigen Silberfäden in Technische Textilien 2, Autor K. Bertuleit, Statex Produktions- & Vertriebs GmbH, Bremen (2005), S. 10
- /31/ Statex Produktions- & Vertriebs GmbH, Bremen Quelle:
<http://www.statex.biz/index.php/de/unternehmen>, Stand Juni 2015
- /32/ Forschungsbericht BMWA 1131/03, „Entwicklung einer Technologie zur galvanischen und elektrochemischen Modifizierung von vorstrukturierten partiell leitfähigen textilen Flächen zur Integration von Mikrosystemtechnik in Textilien“ (2003-2005)
- /33/ „Metallic Yarn“,Quelle:
<http://www.swicofil.com/metallicyarn.html#Production%20process>, Stand Juni 2015/34/„Wearing a Wire" Becomes Obsolete in Real Life. Will Hollywood Be Next?“, Quelle: <http://news.softpedia.com/news/Wearing-a-Wire-Becomes-Obsolete-in-Real-Life-Will-Hollywood-Be-Next-55326.shtml>, Autor: Lucian Dorneanu, Stand Juni 2015
- /35/ Amber Strand, Quelle: www.AmberStrand.com, Stand Juni 2015
- /36/ X-Static Fiber, Quelle: www.x-staticfiber.com, Stand Juni 2015
- /37/ Caroline Silver, Quelle: www.carolina-silver.com, Stand Juni 2015
- /38/ „Lexikon Garne und Zwirne“ bei Deutscher Fachverlag GmbH, Autor: Anton Schenek im Jahr 2006
- /39/ Patentnummer US20030208851A1; DE 10 2017 113 884 A1
- /40/ „Produkte und Lösungen“, Quelle: <http://www.r-stat.fr/de/silberfasern.php>, Stand 24.03.2020
- /41/ Quelle: <https://www.shielday.com/silver-fiber-conductive-yarn-thread.html>, Stand: 28.02.2019
- /42/ Quelle: https://www.tibtech.com/fils_coutures.php, Stand:24.03.2020
- /43/ Leitende Garne, Quelle: <https://www.schoeller-wool.com/leitendegarne>, Stand:24.03.2020
- /44/ Polyurethan,Quelle:<http://www.maschinenbauwissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/81-polyurethan>, Stand: 12.02.2020
- /45/ PU-Beschichtung, Quelle: <https://www.bergfreunde.de/basislager/technik-pu-beschichtung/>, Stand: 21.01.2020

/46/ Polyethylen,Quelle:

<https://www.kunststoffe.de/themen/basics/standardthermoplaste/polyethylen-pe/artikel/polyethylen-pe-644757>, Stand: 21.01.2020

/47/ Durazane, Quelle: <https://www.merckgroup.com/de/stories/get-to-know-our-durazane.html>, Stand: 08.07.2021

/48/ Durazane, Quelle: <https://www.merckgroup.com/de/brands/pm/durazane.html>, Stand: 08.07.2021

/49/ Produkte: Quelle: <https://www.durxtreme.com/de/produkte/> | Stand 07.02.2024

/50/ Definition Schärerei, Quelle: <https://www.kso-textil.de/defintion-scharerei/>, Stand 14.08.202

/51/ Kennzahlen der Unternehmen (EU) des Verarbeitenden Gewerbes 2021, Quelle: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Tabellen/kennzahlen-verarbeitendes-gewerbe.html>, Stand: 10.06.2024

/52/ Quelle:

<https://www.genesis.destatis.de/genesis/online?sequenz=tabelleErgebnis&selectioname=42111-0004&sachmerkmal=WZ08X2&sachschluessel=WZ08-13,WZ08-14>, Stand: 24.02.2020

/53/ Veredlung Textilien und Bekleidung, Quelle:

<https://www.ibisworld.de/branchentrends/marktforschungsberichte/verarbeitendes-gewerbe/veredlung-textilien-bekleidung.html>, Stand: 24.02.2020

/54/ Zahlen 2017:, Quelle https://www.verband-textil-bekleidung.de/fileadmin/Daten/RundschreibenWirtschaft/RS-2017-Wirtschaftspolitik/zahlen2017_web.pdf, Stand: 2017

/55/ „Perspektiven 2035 - Ein Leitfaden für die textile Zukunft“, Autor: ForschungskuratoriumTextil e. V., Stand: 2020

/56/ Quelle: Global E-textile Market 2021-2025, SKU ID : TNV-18569654, Publishing Date: 27-May-2021