

# **Schlussbericht vom 28.11.2024**

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 22557 BR

## **Thema**

Individuelle Funktionalisierung von Textilien durch Pulverbeschichtung mittels Laser-Fixierung

## **Berichtszeitraum**

01.09.2022 - 31.08.2024

## **Forschungsvereinigung**

Forschungskuratorium Textil e.V. - FKT

## **Forschungseinrichtungen**

FS 1: Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e.V.

FS 2: Ernst-Abbe-Hochschule Jena

## Zusammenfassung und Ausblick

Sensorische und aktuatorische Textilstrukturen sind zunehmend in nahezu allen textilen Märkten gefragt und gewinnen als textile Lösungen im stetig wachsenden smarten Systembereich weiter an Bedeutung. Dabei finden sie im technischen Bereich Anwendung unter anderem zur Messung von Feuchtigkeit oder Druck, zur Kommunikation mittels RFID-Chips oder zur Energieübertragung mittels Induktionsspulen. Voraussetzung dafür sind textilintegrierte leitfähige Strukturen mit hoher Designfreiheit. Jedoch erfüllen bestehende Systeme nicht vollständig die Anforderungen der Kunden vor allem hinsichtlich Widerstandsfähigkeit und notwendiger individueller Fertigung, um flexible Kleinstserienfertigung im industriellen Maßstab zu ermöglichen. [[1]] Besonders bei der textilen Integration von Leiter- und Datenbahnen, Sensorik und dem textilen Leuchten gibt es noch erhebliche Herausforderungen im Bereich der Zuverlässigkeit und Widerstandsfähigkeit der integrierten elektronischen Strukturen. [[2]]

Die am TITV Greiz entwickelte Technologie zur Beschichtung von textilen Substraten mittels Funktionspulver stellt einen neuen Ansatz zur Funktionalisierung textiler Oberflächen dar. Bei der Pulverbeschichtungstechnologie werden dabei Binder und Funktionspigment in Pulverform gemischt und anschließend auf das Textilsubstrat appliziert und fixiert und so hochfunktionalisierte Schichtstrukturen erzeugt. Umgesetzt wurden bereits leitfähige [[3]] magnetische [[4]] sowie nachleuchtende [[5]] textile Beschichtungen mit einem Funktionspigment von 60 bis 80 Masseprozent, die sehr flexibel und knickbruchbeständig sind sowie Wasch- und Reibechtheiten aufzeigen. Mit der bisher verfolgten Applikation mittels Rakel und Schablone ist eine Realisierung filigraner Strukturen und -breiten und individueller, schnell wechselnder Designs anhand digitaler Daten nicht möglich. Die bereits untersuchte flächige Pulverapplikation mit anschließender lokaler Laserfixierung bietet zwar erhöhte Designfreiheit, jedoch lassen sich überflüssige Pulverreste nur schwer bis gar nicht von der Textiloberfläche entfernen und bieten im Falle von leitfähigen Funktionspigmenten unter anderem die Gefahr von Kurzschlüssen. Inhalt dieses Projekts ist die Entwicklung einer Technologie zum lokalen Aufbringen von Funktionspulvermischungen mit anschließender Laserfixierung basierend auf den Ergebnissen des IGF-Projektes 20541 BR. Betrachtet werden dabei zwei Ansätze durch die beteiligten Forschungseinrichtungen. Das TITV Greiz untersucht das Applizieren mittels vibrationsgesteuerter Pulverdüse und einem getrennten Laserfixierschritts. Die EAH Jena hingegen analysiert einen einstufigen Prozess mit Hilfe einer Düse mit integriertem Laser. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt in der Erzeugung von filigranen Funktionsbeschichtungsstrukturen und der benötigten Parameter wie Verfahrensgeschwindigkeiten, Vibrationsfrequenz und Laserleistung.

Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer Technologie zur digitalen und reproduzierbaren Funktionalisierung textiler Oberflächen mittels Pulverbeschichtung mit hohen Funktionsgraden anhand digitaler Daten und deren Anpassung an textile Anforderungen (u. a. Waschbarkeit, Widerstandsfähigkeit) am Beispiel elektronischer Schaltungsstrukturen auf Textiloberflächen für die Anwendung im Bereich „Smart Textiles“. Der Fokus der Projektarbeit wird auf die Erzeugung von elektrisch leitfähigen, filigranen Bahnstrukturen gelegt, welche eine Breite kleiner 1.500 Mikrometer mit reproduzierbaren Widerständen gewährleisten sollen. Diese sind im darauffolgenden Schritt als elektronische Zuleitung, als Schaltungsträger für LEDs sowie für die Realisierung von Sensorstrukturen einsetzbar und es werden erste Demonstrationmuster in dieser Richtung erzeugt. Beide untersuchte Verfahren (zweistufig (TITV Greiz) und einstufig (EAH Jena)) zeigen gute Resultate in der Erzeugung der Leitungsstrukturen, wobei sie unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Beim Verfahren der EAH Jena wird direkt mit

dem Auftrag eine vorfixierte Schichtbildung erreicht, was perspektivisch eine Applikation auf 3D Formen ermöglichen kann. Zum jetzigen Entwicklungsstand findet zusätzlich eine ungewollte Verteilung von losen Pulverteilchen in naher Umgebung der Düse statt, welches das Druckbild und die Funktionalisierung beeinflusst, jedoch im Projektrahmen noch nicht gelöst werden konnte. Bei dem Technologieansatz des TITV Greiz wird das Pulver dahingehend viel gezielter aufgebracht. Durch den zweistufigen Prozess wird zur Erzeugung gleicher Strukturen aber mehr Zeit benötigt. Mit beiden Verfahren lassen sich homogene Bahnstrukturen erzeugen, wobei das spätere Anwendungsfeld die letztendliche Wahl der Technologie bestimmen wird. Aufbauend auf den Projektergebnissen lässt sich im Anschluss das Applizieren auf nicht planaren Substraten sowie die Erzeugung mehrlagiger Aufbauten untersuchen. Des Weiteren ist der Übertrag auf weitere Funktionalisierungen abseits von elektrisch leitfähig geplant.

**Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.**

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 22557 BR der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Reinhardtstraße 12-14, 10117 Berlin wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Wir danken den nachfolgend aufgeführten Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses (PA) für die fachliche Unterstützung und die Bereitstellung von Versuchsmaterial sowie allen weiteren Partnern, die uns in der Forschungsarbeit zu diesem Themenkreis unterstützten:

- Born GmbH
- Brillux GmbH & Co. KG Industrielack
- C.H. Müller GmbH
- Dr. Herrmann GmbH & Co.
- ECKART GmbH
- GTV Verschleißschutz GmbH
- IVOC-X GmbH
- Jahn GmbH & Co. KG
- JENOPTIK Automatisierungstechnik GmbH
- Lehmann & Voss & Co. KG
- Optris GmbH
- Orbit Sensorfusion GmbH (ehemals osyso Dr.-Ing. Jörg Weber)
- Songwon-ATG GmbH
- UVEX SARETY Textiles GmbH

## Inhaltsverzeichnis

1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	9
<b>1.1. Ausgangssituation</b> .....	9
<b>1.2. Stand der Forschung</b> .....	12
<b>1.2.1 Applikation von Pulverwerkstoffen/Funktionsschichten mit Hilfe von Pulverwerkstoffen</b> .....	12
<b>1.2.2. Smarte elektronische Textilien</b> .....	13
<b>1.2.3 Pulvermischungen und Dosierung</b> .....	15
2. Forschungsziel und Lösungsweg .....	16
<b>2.1. Zielsetzung</b> .....	16
3. Versuchsdurchführung und Ergebnisse.....	18
4. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	53
5. Wirtschaftlichkeit und Umsetzung der Ergebnisse in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU).....	54
<b>5.1. Voraussichtliche Nutzung der Forschungsergebnisse in KMU</b> .....	54
<b>5.2. Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit d. KMU</b> 55	
<b>5.3. Aussagen zur voraussichtlich industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse</b> ....	56
6. Verwendung der Zuwendung .....	57
<b>6.1. Personaleinsatz</b> .....	57
<b>6.2. Gerätebeschaffung</b> .....	57
<b>6.3. Leistungen Dritter</b> .....	57
<b>6.4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</b> .....	57
7. Literatur.....	58

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick zu Erzeugung von Textilsubstraten mit integrierten, leitfähigen Eigenschaften [[16]].....	10
Abbildung 2: Applizierte Pulverbahn mittels vibrationsgesteuerter Pulverdüse mit lokalen Fehlstellen aufgrund von Agglomerationen und zeitweisen Verstopfen der Pulverdüse [14].....	15
Abbildung 3: Schematische Darstellung der Lösungsansätze, a) zweistufiger Prozess des TITV Greiz, b) einstufiger Prozess der EAH Jena .....	17
Abbildung 4: Übersicht des im vorliegenden Projekts IndiPuLaFix verfolgten Lösungsweges ..	18
Abbildung 5: Rasterelektronische Abbildung der TPU-Materialien a) Luvosint, b) Rowalit .....	20
Abbildung 6: Rasterelektronische Abbildung der metallischen Materialien a) ES-4, b) eConduct Al202000, c) AGP.....	20
Abbildung 7: Partikelgrößenverteilung der Materialien AGP und eConductAl202000 .....	21
Abbildung 8: Konzept der Laserstrahlführung für den experimentellen Versuchsaufbau.....	22
Abbildung 9: Spannhalter für Vorversuche a) 3D-gedruckter Spannhalter, b) schematische Darstellung .....	23
Abbildung 10: Spannhalter für Versuchsstand, a) schematische Darstellung, b) Spannhalter aufgebaut .....	23
Abbildung 11: Experimenteller Versuchsaufbau der EAH Jena, a) Gesamtanlage, b) Teil des Strahlengangs .....	24
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Pulverförderlinie.....	25
Abbildung 13: a) Matrix zur Erzeugung der Mikrorauheit, b) Lichtmikroskopische Aufnahme eines laserbearbeiteten Textilbereichs .....	26
Abbildung 14: Schematische Darstellung der Laserstrahlführung für fokussierte und defokussierte Positionen .....	29
Abbildung 15: Förderinhomogenität in den Zuführungsscheiben, a) Luvosint, b) e-conduct .....	31
Abbildung 16: homogene Förderung in den Zuführungsscheiben nach Reinigung und Siebung, a) Luvosint, b) e-conduct .....	31
Abbildung 17: Lichtmikroskopische Aufnahme von der mittels Pulverdüse applizierten Funktionspulvermischung mit 70 Masseprozent silberbeschichteten Aluminiumpigments (links) bzw. 60 Masseprozent an Silberflakes (rechts) .....	32
Abbildung 18: Lichtmikroskopische Aufnahmen der geförderten Pulvermischungen bei verschiedenen Drehzahlen.....	32
Abbildung 19: Vorher- und Nachher-Bilder von Pulverbahnen, die auf eine Textiloberfläche aufgetragen wurden, vor der Laserfixierung. ....	34
Abbildung 20: Fehlangepasste Laserkontur in Relation zur Pulverkontur. ....	35
Abbildung 21: Laser-Fokustest zur Bestimmung der Wärmeeinflusszone auf Textilsubstraten: (a) EMMA-Gewebe 65 % PES, 35 % Baumwolle; (b) 100 % PES -7048. ....	36
Abbildung 22: Abhängigkeit der Linienabmessungen von der Laserleistung, a) Linienbreite, b) Linienhöhe.....	39
Abbildung 23: Abhängigkeit der Linienabmessungen von der Scangeschwindigkeit, a) Linienbreite, b) Linienhöhe .....	39
Abbildung 24: Abhängigkeit des Widerstandes von der Linienenergie a) bei konstanter Scangeschwindigkeit, b) bei konstanter Laserleistung.....	40
Abbildung 25: Linienförmige Leiterbahnen.....	40
Abbildung 26: Leitfähige Strukturen mit komplexer Geometrie, a) Meander, b) nested Struktur, Demonstratorstruktur.....	41
Abbildung 27: Leitfähige gewölbte Strukturen.....	41

Abbildung 28: Lichtmikroskopische Aufnahmen des laserbearbeiteten Textils, a) geringer Energieeintrag, b) hoher Energieeintrag .....	43
Abbildung 29: Lichtmikroskopische Aufnahmen einer Textiloberfläche mit unbearbeiteten und laserbearbeiteten Bereichen.....	44
Abbildung 30: Lichtmikroskopische Aufnahmen der erzeugten Proben von EAH Jena und TITV Greiz mit unterschiedlichen Funktionspigmenten bzw. Substraten .....	45
Abbildung 31: Lichtmikroskopische Aufnahmen einer Leiterbahn (x200), a) Bahn mit homogener Pulververteilung, b) Leiterbahn mit Messlinien, c) Leiterbahn mit Loch.....	46
Abbildung 32: Bild aus einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme, a) vor dem Pulverauftrag, b) während des Pulverauftrags .....	46
Abbildung 33: Mäander-Endpunkte, wenn die „Join“-Option bei importierten .dxf-Dateien nicht angewendet wird. ....	50
Abbildung 34: Demonstatoren der EAH Jena (links) und des TITV Greiz (rechts) bestehend aus zwei parallel, leitfähigen Bahnen erzeugt mittels Pulverbeschichtung und Laserfixierung und darauf aufgebracht LEDs, welche durch die Kontaktierung einer Stromzuführung zum leuchten angeregt werden .....	51
Abbildung 35: Komplexe Strukturen, die durch das TITV Greiz erzeugt wurden: a) Mäander mit geraden Linien, b) Interdigitalstruktur .....	52
Abbildung 36: Komplexe Strukturen, die durch EAH Jena erzeugt wurden: a) Mäander mit geraden Linien, b) Interdigitalstruktur. ....	52

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Charakterisierungsergebnisse der Funktionspulvermischungen hinsichtlich Rieserverhalten, Dichte und Feuchtegehalt .....	19
Tabelle 2: Zusammenfassung der Schüttdichte und Partikelgröße .....	19
Tabelle 3: Parameter für die Untersuchungen zur Mikrorauheit .....	27
Tabelle 4: Übersicht zu den Alkalisierungsversuchen .....	27
Tabelle 5: Kennwerte für das ermittelte Prozessfenster .....	29
Tabelle 6: Ausgangsparameter zur Pulverförderung .....	30
Tabelle 7: Ermittelte Förderraten für das Pulvermaterial e-conduct. ....	30
Tabelle 8: Mittlere Linienkennwerte für $\delta$ Z Variationen mit verschiedenen Achsenrichtungen. ....	38
Tabelle 9: Übersicht zu den Ergebnissen der vergleichenden Charakterisierung zwischen unvorbehandelter Probe und nasschemisch bzw. laserbasierter Vorbehandlung mit manuell applizierter Pulverschichten (streifenförmiges Layout) für das Substrat 100% Polyester Gewirke .....	47
Tabelle 10: Messergebnisse des elektrischen Widerstands vor und nach Scheuerbelastung (DIN EN ISO 12947 (9 kPa, Schaumstoff) der am TITV Greiz mittels Pulverdüse und Laserfixierung erstellten Proben .....	48
Tabelle 11: Messergebnisse des elektrischen Widerstands vor und nach Prüfung der Waschbeständigkeit (nach DIN 6330, 40 °C, Normwaschmittel) der am TITV Greiz mittels Pulverdüse und Laserfixierung erstellten Proben.....	48
Tabelle 12: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit.....	53
Tabelle 13: Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens .....	54
Tabelle 14: Zusammenstellung des Personaleinsatzes im Realisierungszeitraum des TITV Greiz .....	57
Tabelle 15: Zusammenstellung des Personaleinsatzes im Realisierungszeitraum der EAH Jena .....	57

# **1. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung**

## **1.1. Ausgangssituation**

Sensorische und aktuatorische Textilstrukturen sind zunehmend in nahezu allen textilen Märkten gefragt und gewinnen als textile Lösungen im stetig wachsenden smarten Systembereich weiter an Bedeutung. Dabei finden sie im technischen Bereich Anwendung zur Messung von Feuchtigkeit oder Druck, zur Kommunikation mittels RFID-Chips oder zur Energieübertragung mittels Induktionsspulen. Voraussetzung dafür sind textilintegrierte leitfähige Strukturen mit hoher Designfreiheit. Jedoch erfüllen bestehende Systeme nicht vollständig die Anforderungen der Kunden vor allem hinsichtlich Widerstandsfähigkeit und notwendiger individueller Fertigung, um flexible Kleinstserienfertigung im industriellen Maßstab zu ermöglichen. [1] Mit bestehenden Technologien lassen sich keine Produkte anfertigen, welche sowohl eine hohe Flexibilität aufweisen sowie an das textile Anforderungsprofil v. a. in Bezug auf Waschbarkeit, Abrieb- und Knickbruchbeständigkeit angepasst sind und trotzdem hohe und homogene leitfähige Eigenschaften garantieren.

Ein aktueller Überblick im Bereich der Smart Textiles Produkte und Entwicklungen ist in [[6], [7], [8]] einzusehen. Die leitfähigen Textilstrukturen werden durch die Integration leitfähiger Garne, Drähte und Litzen realisiert. Nach wie vor mangelt es den Strukturen an Knickbruchbeständigkeit und zuverlässigen Kontaktstellen innerhalb der textiltechnologisch erzeugten Strukturen. Der Einsatz von leitfähigen Polymeren und Tinten, die digital appliziert werden können, (vgl. [[9]] und [[10]] erhält die textile Haptik, scheitert jedoch meist an der geforderten Leitfähigkeit.

In der Studie vom Forschungskuratorium Textil e. V. [[1]] wird davon ausgegangen, dass in der ersten Hälfte der 2020er Jahre zahlreiche wearable Electronic und Smart Textiles Produkte marktfähig werden, jedoch die Aufnahmebereitschaft des Marktes für solche Applikationen und damit verbunden der wirtschaftliche Erfolg nur dann steigen werden, wenn die Akzeptanz dieser Smart Textiles erhöht wird. [[11]] Zurzeit sind nur wenige Produkte auf dem Markt verfügbar, die den Spagat zwischen alltäglicher Kundenanforderung und textilintegrierter Funktionalität in ausreichendem Umfang erfüllen, wobei diese vor allem im Bereich der Heiztextilien zu finden sind. [[12]] Beispiele entsprechender Produkte sind: beheizbare Unterwäsche (warmX GmbH [[13]], Infrarot-Heizelement der Digel Sticktech GmbH & Co. KG [[14]], sensorierte Betteinlage der TEXIBLE GmbH [[15]].

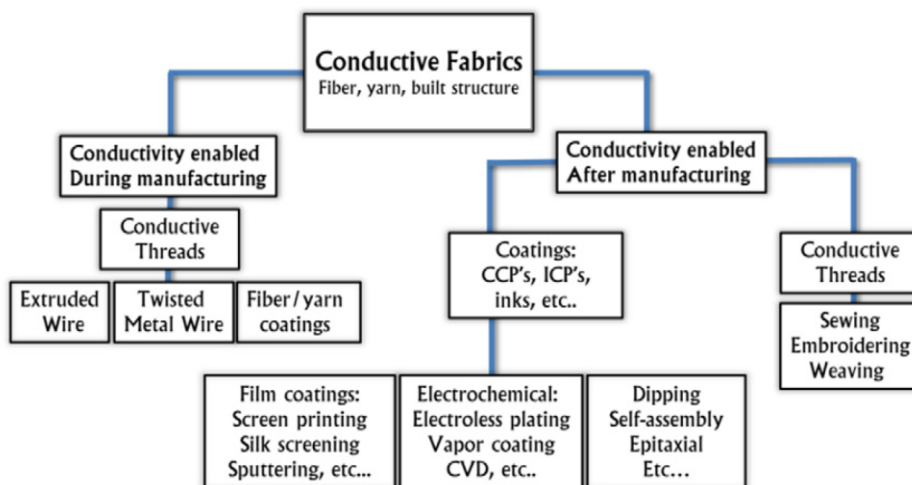


Abbildung 1: Überblick zu Erzeugung von Textilsubstraten mit integrierten, leitfähigen Eigenschaften [[16]]

Es mangelt insgesamt an einer notwendigen breiten Akzeptanz smarterer textiler Produkte. Viele Entwicklungen schaffen es nicht über den Prototypenstatus hinwegzukommen, da es an einer zuverlässigen Erfüllung der Kundenanforderungen fehlt. [8] Besonders bei der textilen Integration von Leiter- und Datenbahnen in Textilien, Sensorik und dem textilen Leuchten gibt es noch erhebliche Herausforderungen im Bereich der Zuverlässigkeit und Widerstandsfähigkeit der integrierten elektronischen Strukturen. [[2]]

Die am TITV Greiz entwickelte Technologie zur Beschichtung von textilen Substraten mittels Funktionspulver stellt einen neuen Ansatz zur Funktionalisierung textiler Oberflächen dar. Dieses Beschichtungsverfahren verbindet Grundlagen aus der elektrostatischen Pulverbeschichtung und dem additiven Verfahren des Selektiven Lasersinterns von Polymeren, um gezielt Funktionsstrukturen zu erzeugen. Die **Pulverbeschichtungstechnologie** des TITV Greiz zeigt in bisherigen Arbeiten **vielversprechende Ergebnisse** zur Erzeugung hochfunktionalisierter (z. B. leitfähig [[3]], magnetisch [[4]], nachleuchtend [[5]], textiler Beschichtungen (Pigmentanteil 60 bis 80 Masseprozent), die sehr flexibel und knickbruchbeständig sind sowie Wasch- und Reibechtheiten aufzeigen. Die **bisher verwendete, manuelle Pulverapplikation mittels Rakel und Schablone mit flächiger Fixierung ist zeit- und kostenintensiv und für die Industrie wenig relevant**. Die Designfreiheit ist durch Herstellung der Schablonen eingeschränkt und somit keine individualisierte Fertigung möglich. Auch die lokale Pulverfixierung mittels Laserfixierung nach flächigem Pulverauftrag bietet keine akzeptable Lösung. Die Pulverpartikel verhaken sich in der rauen Textiloberfläche und eine vollständige Entfernung des Restpulvers ist bisher nicht möglich. Dies kann zu Einschränkungen und Verlust der gewünschten Funktion führen. Der Anteil an Restpulver ist groß im Vergleich zu den fixierten Strukturen und kann nicht wiederverwendet werden. Dies ist weder kosten- noch nutzeffizient für eine angestrebte industrielle Umsetzung, besonders da entsprechende Funktionspigmente preisintensiv sind und in Hinblick auf eine umweltschonende Produktion von den KMU sowie den Anwendern nicht akzeptiert werden würde.

Die bisher erzielten Ergebnisse zeigen das Potential der Pulverbeschichtung bei der wasch- und knickbruchbeständigen Funktionalisierung von Textilien. Die Entwicklung eines digitalen

Auftrags- und Fixierverfahrens wird eine reproduzierbare Fertigung und den Einsatz in der Industrie ermöglichen. Die Pulvertechnologie garantiert Individualität und Nachhaltigkeit der Funktionsbeschichtung, da der Pulverauftrag nur partiell, d. h. gezielt gemäß dem vorgegebenen Design erfolgt. Um dieses technologische Know-How bereitzustellen und mit dem vorhandenen Wissen zur Pulverbeschichtung am TITV Greiz zu kombinieren, wird die Ernst-Abbe Hochschule (EAH) Jena mit der Arbeitsgruppe Fertigungstechnik und -automatisierung von Prof. Bliedtner eingebunden. Insbesondere beim pulverbasierten Laserauftragschweißen (LAS) konnte innerhalb der letzten Jahre über Drittmitteilprojekte und Dienstleistungen Prozessverständnis bei Metallpulvern sowie in der Charakterisierung und dem Handling verschiedener Pulvergemische aufgebaut werden. [[17], [18], [19], [20]] Zu nennen ist dahingehend das Projekt ProLaIn (ZIM ZF4039609FH7 [21], bei welchem die Entwicklung einer angepassten, automatisierten Prozesskette zum laserbasierten Instandsetzen von Aluminiumgusserzeugnissen im Fokus stand. Die Verknüpfung der Kompetenzen der EAH Jena und des TITV führt zu Synergie-Effekten und ermöglicht eine erfolgreiche Technologie-Entwicklung zur reproduzierbaren Applikation von partiell fixierten Pulverbeschichtungsstrukturen mit hoher Auflösung.

Im Forschungsvorhaben IGF 20541 BR [3] erfolgte am TITV Greiz die Anschaffung einer Vibrationspulverdüse zum gezielten Aufbringen filigraner leitfähiger Pulverstrukturen, um einer effizienten Technologie der lokalen Pulverapplikation gerecht zu werden. Dort zeigen sich neue Herausforderungen, die bei der Verwendung dieser Applikationstechnologie noch gelöst werden müssen, um zukünftig eine reproduzierbare und zuverlässige Funktionalisierung mit filigranen Strukturen zu gewährleisten. Die Pulverapplikation und erzeugbare Auflösung entsprechender Strukturen mittels Düse unterliegen derzeit großen Schwankungen. Besonders bei Pulvermischungen (Funktionspartikel + Binderkomponente), bei denen sich die einzelnen Komponenten stark in ihren Eigenschaften (v. a. Partikelform, Dichte, Oberflächeneigenschaften) unterscheiden, ist ein reproduzierbarer Pulverauftrag mit On-/Off-Mechanismus noch nicht Stand der Technik. Bei Pulverförderung, -mischen und -verarbeitung mittels Pulverdüse treten Agglomeration, Entmischung und lokale Verfestigungen auf, welche ein Verstopfen der Düse und einen damit einhergehenden ungleichmäßigen Pulverfluss begünstigen. [[3], [22]] Es besteht daher ein erhöhtes technisches Risiko bei der Umsetzung und Entwicklung dieses Technologieansatzes. Besonders bei leitfähigen Strukturen schwanken die elektrischen Eigenschaften stark mit unterschiedlichen Schichtdicken und Auflösungsweiten der applizierten Pulverbahnen. In der Folge kann kein reproduzierbarer elektrischer Widerstand eingestellt werden. Untersuchungen zum Pulverhandling von entsprechenden, zweikomponentigen Funktionsmischungen sind unumgänglich, um eine reproduzierbare Funktionalisierung mit filigranen Pulverstrukturen zu ermöglichen.

Mit zunehmender Miniaturisierung im Bereich der elektronischen und sensorischen Komponenten, auch im Bereich von Smart Textiles, wächst die Anforderung an den zuverlässigen Funktionserhalt trotz immer kleiner werdender Strukturen und Abstände. [[22]] Dazu müssen ein Pulverauftrag bzw. eine Laserfixierung mit geringen Auflösungen sowie eine ausreichende Haftung gewährleistet werden. Die gilt insbesondere für filigrane Strukturen, da nur eine geringe Kontaktfläche zwischen Struktur und Textiloberfläche zur Verfügung steht und die Funktionsbahnen durch die ungleichmäßige, flexible Textiloberfläche vielfältigen Belastungsrichtungen ausgesetzt sind. Ziel des Projektes ist daher die Entwicklung einer Technologie zur digitalen und reproduzierbaren Funktionalisierung textiler Oberflächen mittels

Pulverbeschichtung mit hohen Funktionsgraden anhand digitaler Daten und deren Anpassung an textile Anforderungen (u. a. Waschbarkeit, Widerstandsfähigkeit) am Beispiel elektronischer Schaltungsstrukturen auf Textiloberflächen für die Anwendung im Bereich „Smart Textiles“. Dadurch wird den KMU eine verbesserte und zukunftsfähige Technologie zur Verfügung gestellt, mit der gezielt Funktionsbeschichtungen appliziert werden können

## 1.2. Stand der Forschung

### 1.2.1 Applikation von Pulverwerkstoffen/Funktionsschichten mit Hilfe von Pulverwerkstoffen

Die Beschichtung flächiger Materialien, u. a. textiler Substrate, mit Hilfe von Pulvern ist ein in der Textilindustrie bekanntes Verfahren. Es wird eingesetzt, um Papiere, Vliese, Gewebe oder Folien zu veredeln bzw. Oberflächen zu modifizieren oder zu behandeln. Als Pulver werden beispielsweise Thermoplaste eingesetzt sowie stark wasserabsorbierende Substanzen für die Herstellung von Hygieneartikeln. Das Pulver wird direkt aus einem Vorratsbehälter über eine Düse, für einen gleichmäßigeren Auftrag über eine Dosierwalze mit kombinierter Bürstwalze, appliziert oder mit Hilfe eines rotierenden Lochzylinders aufgebracht. Besonders letztere eignen sich v. a. zur flächigen Beschichtung, wobei es sich um kontinuierlich anwendbare Verfahren mit einstellbarer Bahnbreite (im Bereich 200-1.300 mm) handelt. Aufgrund der flächigen Beschichtung werden die resultierende Flexibilität und der textile Charakter deutlich beeinflusst. [[23]]

In aktuellen Entwicklungen wird diese bekannte Technologie zur gezielten Funktionalisierung unter der Verwendung von Polymerpulvern eingesetzt. Die RWTH Aachen beschäftigt sich beispielsweise mit der gezielten, lokalen Binderapplikation mittels Pulverdüse zur Herstellung von textilen Preformen mit dem Ziel zur Verringerung der zum Verformen benötigten Energie. [[24]] Das STFI und Fraunhofer ICT (IGF 19192 BG „VliesRTM“) untersuchten die Binder-Applikation mittels Pulverstreuer und Flachbettkaschieranlage im Zusammenhang mit der Verarbeitung von rCF-Vliesstoffen und erzielten erste Ergebnisse in dieser Richtung. Weiterführende Untersuchungen zum Auftrag von Funktionspulvermischungen sind dem TITV Greiz derzeit nicht bekannt.

Eine weitere Technologie in diesem Bereich stammt vom Bayrischen Laserzentrum GmbH (BLZ). Das BLZ beschäftigt sich mit der Dosierung von Kunststoffpulvern mittels Vibrationsdüsen und anschließender Fixierung im Sinne eines Anschmelzens der Ausgangsmaterialien, um eine Haftung zum Substrat zu erzeugen. [[25], [26], [27]] Dabei erfolgt die Anregung des Pulverflusses über entsprechende Vibrationen, wodurch ein selektiver Pulverauftrag erzielt wird. Die Auslegung der Düsen erfolgt in Abhängigkeit der Pulvereigenschaften (Partikelgrößenverteilung, Fließverhalten, etc.), um eine zuverlässige Kontrolle des Pulvermasseflusses mittels Vibration zu gewährleisten. [[22], [28]] Es wird ausschließlich eine Oberflächenstrukturierung bzw. der Aufbau von Schichtstrukturen ermöglicht, jedoch keine zusätzliche Funktionalisierung wie beispielsweise leitfähige, nachleuchtende oder magnetische Eigenschaften integriert.

Bekannt und weitverbreitet im Bezug zur Oberflächenfunktionalisierung ist die Pulverbeschichtung von metallischen Oberflächen, wobei der Pulverauftrag über einen elektrostatischen Aufladungsprozess erfolgt. Die Pulverlacksysteme werden zuerst fluidisiert und anschließend flächig mittels einer entsprechenden Pulverpistole appliziert. Danach werden

die aufgetragenen Pulverschichten mit Hilfe von Wärmestrahlung im Ofen ausgehärtet. Oberflächen können beispielsweise auch mit Korrosionsschutz, antistatischen und fluoreszierenden Eigenschaften versehen werden, wobei jedoch immer eine flächige Funktionalisierung erfolgt. [[29]] Die Pulverbeschichtung eines Objektes mit einer Mischung aus Polyamid und 0,1 – 0,3 Gewichtsprozent metallischen Pigments wird im Patent EP 2 531 568 B1 benannt. [[30]]

Das TITV Greiz erforscht basierend auf Grundlage oben stehender Technologien die Funktionalisierung textiler Oberflächen mittels Pulverbeschichtung. Mit Hilfe von Mischungen aus Funktionspigment (z. B. nachleuchtend, leitfähig) und Binder können textile Beschichtungen erzeugt werden, welche eine hohe Füllmenge (60 Ma% bis 80 Ma%) zulassen und dabei gute Knickbruchbeständigkeiten aufzeigen. [[3], [4], [5], [31], [32], [33]] Wichtig für die Herstellung dieser hochfunktionalisierten Schichten ist, dass die Funktionspigmente vorab nicht in das Binderpolymer eingebunden sind, sondern beide in einer losen Pulvermischung vorliegen. Nur so können die entsprechend hohen Funktionalisierungsgrade erreicht werden, wobei besonders bei leitfähigen Schichten der Kontakt zwischen einzelnen Funktionspartikeln innerhalb der fertigen Schicht ausschlaggebend für die erzielbaren Leitfähigkeiten der Schichten ist. [[35]] Erste Erkenntnisse hinsichtlich einer gezielten Applikation und Fixierung von Funktionsstrukturen mittels Pulverdüse wurden im IGF Vorhaben 20541 BR [[3]] erzielt. Bisher kann kein reproduzierbarer Pulverauftrag realisiert werden.

### **1.2.2. Smarte elektronische Textilien**

Textil- und Elektrotechnikindustrie haben gemeinsam verstärkt Lösungen entwickelt, bei denen leitfähige Litzen und später leitfähige Fadenmaterialien auf Polymerbasis in komplexe Textilstrukturen für den Aufbau textilbasierter Schaltungsträger eingearbeitet wurden. Erstmals vorgestellt wurden solche Strukturen im Oktober 1997 in Cambridge, Massachusetts. [[34]] Vorerst eroberten sich die leitfähigen Fadenmaterialien die Technologien Weben und Sticken. Innerhalb dieser Technologien finden sich einige Smart Textiles Produkte am Markt, z. B. Abschirmgewebe oder gestickte Elektroden. [[36]] Auch Smart Textiles auf Basis von Gestricken, z. B. elektronisch beheizbare Bekleidung [[13]], sind bereits am Markt etabliert. Alle drei Technologien zeigen jedoch Nachteile in der Funktionalisierung, wobei bei gewebten leitfähigen Strukturen nur eine begrenzte Designfreiheit besteht und es beim Sticken durch eine hohe mechanische Belastung zum Abrieb und so zur Beeinträchtigung der Leitfähigkeit kommt. [[37]]

Alternativ dazu existiert die Drucktechnik, mit welcher Designs freier Form auf das Substrat appliziert werden können. Weitreichende Innovationen in Bereich des leitfähigen Druckes wurden in den vergangenen Jahren vor allem auf Folien, Glas, Kunststoffen oder auch Papier erzielt. [[38], [39]] Die Inkjet Verfahren ist sehr flexibel hinsichtlich abbildbarer Strukturgeometrien und Layoutänderungen. [[40]] Die minimale Auflösung dieser Technologie liegt bei ca. 50 µm, wobei jedoch häufig Bahnbreiten zwischen 100 und 200 µm mit ähnlichen Abständen zueinander beschrieben werden. [[41]] Der Nachteil leitfähiger Drucktechnologien liegt darin, dass die verwendeten Tinten oft für starre Substrate ausgelegt und dadurch zumeist spröde und wenig flexibel sind. Bei digitalen Drucktechnologien wie beispielsweise dem Chromojet- oder Inkjet-Druckverfahren können aufgrund rheologischer Anforderungen an die Tinten nur begrenzt leitfähige Partikel eingebracht werden. Die Flächenwiderstände gedruckter Leiterbahnen auf Textilien liegen beim Inkjet-Druck im Kiloohmbereich (1 - 100 kΩ/sq.) und

beim Chromojet-Druck mit leitfähigen Polymerdispersionen im Ohmbereich ( $> 200 \Omega/\text{sq.}$ ). [[9]] Des Weiteren beeinflusst die Viskosität der Tinten die Druckgeschwindigkeit und damit die Produktivität des Druckprozesses. Für die Inkjet-Druckverfahren ist die Voraussetzung, dass stark leitende Precursoren (Metallteilchen) wie Ag, Cu, oder Au in einem Bindemittel enthalten sind. Bei den Druckverfahren wird jedoch durch das Ablegen von Tropfen (Tropfenvolumen 1-10 pl) auf der Oberfläche die Homogenität der entstehenden Schicht herabgesetzt. [[42], [43], [44], [45]] Nachteilig ist auch der sich anschließende erforderliche Sinterprozess zum Aushärten der Tinte. Die nötige Temperatur hängt dabei von den metallischen Inhaltsstoffen der Tinten ab (Gold  $\leq 380 \text{ }^\circ\text{C}$ , Silber  $\leq 180 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Dies schränkt die Auswahl des Substratmaterials deutlich ein (Schmelztemperatur verschiedener PA's [Nylon] 210-295  $^\circ\text{C}$  [[46]]). Eine Beschränkung der Produktivität erfährt diese Technologie auch durch eine geringe Schichtdicke (3-6  $\mu\text{m}$ ), die zum Erreichen nutzbarer Schichtdicke ein mehrfaches Überdrucken erfordert. Das BLZ beschäftigt sich darüber hinaus mit der Applikation leitfähiger Pasten mit anschließendem Lasersinterschritt und erzeugt damit leitfähige Strukturen mit elektrischen Widerständen um 0,3 - 0,4  $\Omega$ . [[47]] Weitere Vorgehensweisen zur Herstellung elektrisch leitfähiger Strukturen werden unter anderen in den Schutzrechtsanmeldungen DE 10 2007 043 576 A1 [[48]], DE 10 2020 116 683 A1 [[49]], DE000020019445U1 [[50]] beschrieben.

Das textile Kaltplasmaspritzen ist eine weitere, im TITV Greiz untersuchte Möglichkeit zur leitfähigen Funktionalisierung textiler Oberflächen. Bekannt ist das Verfahren durch die Erzeugung selektiv, leitfähiger Strukturen mit angepassten Schichtdicken auf Papier oder Glassubstraten oder vollflächig als Beschichtung auf metallischen Oberflächen. Im Projekt „Kaltplasmaspritzen“ [[51]] erforschte das TITV Greiz die Übertragung dieser Technologie auf textile Substrate. Es können Flächenwiderstände bis zu 0,1 – 0,2  $\Omega/\text{sq.}$  erzeugt werden. Jedoch werden Schablonen benötigt, um die Textilien partiell zu funktionalisieren. [[51]]

Bei der Pulverbeschichtungstechnologie des TITV Greiz können flächig oder partiell Designs realisiert werden. Die Pulverapplikation erfolgt vorrangig mittels Rakel und Schablone, wodurch eine gezielte Funktionalisierung erfolgt. Dabei sind mögliche Designstrukturen dadurch begrenzt, dass die mittels Schablonen erzielbaren Abmessungen und reproduzierbaren Abstände nur im Bereich  $> 3 \text{ mm}$  liegen. Entsprechend applizierte Pulverschichten werden mit Hilfe von Wärmestrahlung bzw. elektromagnetischer Strahlung fixiert. Zur Verbesserung der Haftung folgt eine Nachfixierung mittels Wärme und Druck. Ein weiterer Nachteil dieser Pulverauftragsmethode ist, dass es sich um einen manuellen Prozess handelt, der trotz der guten Resultate nicht relevant für die Industrie ist. In durch das TITV Greiz bearbeiteten Forschungsprojekten [[4],[5], [31], [32]] sind Pulverschichten bereits bezüglich ihrer Funktion, ihrer Flexibilität und der Haftung zum textilen Substrat untersucht worden. Die meist mit Hilfe von Schablonen applizierten Funktionsschichten erweisen sich als permanenter, zuverlässiger, knickbruchbeständiger in ihren physikalischen Funktionen als vergleichbare Siebdrucke. [[33]] In ersten Industrieprojekten konnte das TITV Greiz gezielt leitfähige Antennenstrukturen mittels der beschriebenen Pulverbeschichtung erzeugen. Diese überzeugten durch ihre Flexibilität und gute Leitfähigkeiten. Die elektronische Funktion der applizierten Schichten hängt vom Gehalt und der Größe der Funktionspigmente ab. In Versuchen für die Industrie konnten Flächenwiderstände  $< 0,1 \Omega/\text{sq.}$  erzielt werden.

Des Weiteren ist es möglich, mit den leitfähigen Pulverbeschichtungen direkte Kontaktstellen zu im Textilsubstrat eingearbeiteten leitfähigen Bahnen herzustellen. [[3]] Dabei erfolgt ein flächiger Pulverauftrag mittels Rakel und eine gezielte Fixierung gewünschter Bereiche mittels

Laserstrahlung und zusätzlichem Fixieren im Laminator. Wie bereits unter 2.1. beschrieben, lassen sich bei dieser Vorgehensweise filigranere Strukturen als mittels Schablonendesign erzeugen, jedoch ist die Entfernung überschüssigen Pulvers schwierig. Die gezielte Pulverapplikation mittels Pulverdüse war Bestandteil erster Untersuchungen des TITV Greiz im IGF Vorhaben 20541 BR. Derzeit lassen sich noch keine reproduzierbaren und durchgängigen Pulverbahnen erzeugen, wie beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt. Der Auftrag gleichmäßiger Pulvermengen (Ausdehnung z-Achse) entlang der Teststrukturen ist wichtig, da dies Einfluss auf den Fixierprozess hat. Es ist bereits bekannt, dass es am Ende einzelner Pulverbahnen zu deutlichen Anhäufungen kommen kann, die einen möglichen Abstand filigraner Strukturen deutlich beeinflussen. Das große Potential der lokalen, filigranen Pulverapplikation kann dadurch noch nicht genutzt werden.

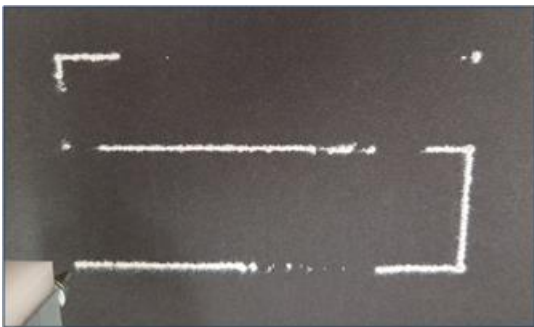


Abbildung 2: Applizierte Pulverbahn mittels vibrationsgesteuerter Pulverdüse mit lokalen Fehlstellen aufgrund von Agglomerationen und zeitweisen Verstopfen der Pulverdüse [14]

### 1.2.3 Pulvermischungen und Dosierung

Die Herstellung von Pulvermischungen ist in der Industrie in weiten Gebieten (z. B. Pharmaindustrie, Lebensmittelindustrie, Metallherstellung) weit verbreitet. Mischeinheiten beruhen auf den Mechanismen Diffusion, Konvektion, Scherung, wobei meist bei verfügbaren Mischern ein Mechanismus vorherrschend ist. [[52], [53] [54]] Bei der Mischung unterschiedlicher Pulverkomponenten beeinflussen die Eigenschaften jeder Komponente das Mischverhalten und damit die Erzeugung von homogenen Mischungen. [[52], [54]] Besonders bei feinen Partikeln (ca. 1 - 50  $\mu\text{m}$ ) treten vermehrt Molekular- sowie elektrostatische Kräfte zwischen den einzelnen Partikeln auf, wodurch es zu Agglomerationen in der Pulvermenge kommt. [[52]] Es ist daher üblich, die Mischungen mit geeigneten Hilfsstoffen zu versetzen. [[52], [55]] Für die Dosierung werden in der Pharmaindustrie v. a. Drehschieber, Vibrationsdosierer oder Dosierschnecken eingesetzt. Weitere Vorrichtungen sind beispielsweise benannt: zum Dosieren von Pulver in [[56], [57], [58]] bzw. von feinen Pulvern mittels Schwingungen/Vibrationen in [[59], [60], [61]].

Pulvermischungen aus Polymer und Metall wurden beispielsweise bereits für die Beschichtungsverfahren Thermalsprayverfahren [[62]] und Flammgespritzverfahren [[63]] benannt, wobei auf die Compoundierung der Komponenten verwiesen wird. Solche Mischungen werden außerdem beim Metallspritzguss eingesetzt. Dabei erfolgt jedoch ebenfalls ein Mischen und anschließendes Compoundieren, um eine gleichmäßige Verteilung ohne Schwankungen im gefertigten Bauteil zu realisieren. [[64]] Die Nutzung von Compounds wird für die angestrebte Entwicklung aufgrund der geringen Füllmenge an Funktionspigment nicht gesehen. Für die neuartige Technologie ist ein Kontakt der Funktionspigmente in der resultierenden Schicht wichtig für eine gute Leitfähigkeit.

In den letzten Jahren gab es ebenfalls Entwicklungen zur gezielten Applikation von losen Pulvermischungen unterschiedlicher Materialklassen beispielsweise beschrieben in [[22]]. Dort wird auf die Applikation von Pulvermischungen aus Polymer und Metall (bis 90 Ma%) unter Verwendung einer vibrationsgesteuerten Pulverdüse eingegangen, um Multimaterialbauteile im Pulverbettverfahren aufzubauen.

In [[35]] wird die Verarbeitung sphärischer und flake-förmiger Metallpartikel in Kombination mit Polymerpartikeln in einem pulverbettbasierten Lasersinterprozess dargestellt. Dabei birgt die Verarbeitung flake-förmiger Partikel deutlich mehr Schwierigkeiten aufgrund von Agglomerationen und lokalen Verfestigungen, induziert durch Verhaken der Partikel beim Pulverhandling. Jedoch sind die resultierenden Eigenschaften (im benannten Fall wärmeleitende Eigenschaften) der durch einen Lasersinterprozess erzeugten Schichten bei dieser Partikelform deutlich verbessert gegenüber den Schichten mit sphärischen Pigmenten.

## 2. Forschungsziel und Lösungsweg

### 2.1. Zielsetzung

Ziel des Projektes ist die Entwicklung einer Technologie zur digitalen und reproduzierbaren Funktionalisierung textiler Oberflächen mittels Pulverbeschichtung mit hohen Funktionsgraden anhand digitaler Daten und deren Anpassung an textile Anforderungen (u. a. Waschbarkeit, Widerstandsfähigkeit) am Beispiel elektronischer Schaltungsstrukturen auf Textiloberflächen für die Anwendung im Bereich „Smart Textiles“.

Es wird von der Hypothese ausgegangen, dass die gezielte und digital gesteuerte Applikation von Pulvermischungen die **Generierung filigraner und individualisierter Pulverbahnen reproduzierbar erlaubt** und somit **Funktionsstrukturen auf textilen Oberflächen erzeugt** werden können. Die **Pulverbahnen** werden mit einer Pulverdüse **ausschließlich in den durch das Strukturdesign definierten Bereichen** auf die Substratoberfläche aufgebracht und durch einen Energieeintrag mittels Laserstrahlung fixiert. Eine nachträgliche thermische Fixierung der Funktionsstrukturen führt zu einer Verbesserung der Anbindung zwischen Substrat und Funktionsschicht und gewährleistet eine für Anwendungen ausreichende Haftfestigkeit. Die erfolgreiche wissenschaftliche und technische Umsetzung dieser Verfahrensidee geht deutlich über den Stand der Technik hinaus. Zur Realisierung werden zwei Lösungsansätze verfolgt. Das TITV Greiz untersucht einen zweistufigen Prozess, bei dem ein Pulvergemisch auf das textile Substrat aufgebracht und anschließend mit Laserstrahlung fixiert wird. Vorteilhaft ist in diesem Fall, dass ein homogenes Pulvergemisch eingesetzt wird, welches als solches auch auf der Textiloberfläche appliziert werden kann. Die EAH Jena entwickelt einen einstufigen Prozess, bei dem die verwendeten Pulver erst in der Düse vereint werden. Die Fixierung des Pulvergemisches erfolgt simultan mit dem Auftrag. Der Vorteil dieser Prozessführung besteht zum einen in der Möglichkeit das Verhältnis der Pulver während des Prozesses zu variieren und zum anderen in einer erwarteten höheren Haftfestigkeit der Funktionsschicht. Abbildung 3 zeigt schematisch beide Prozessvarianten.

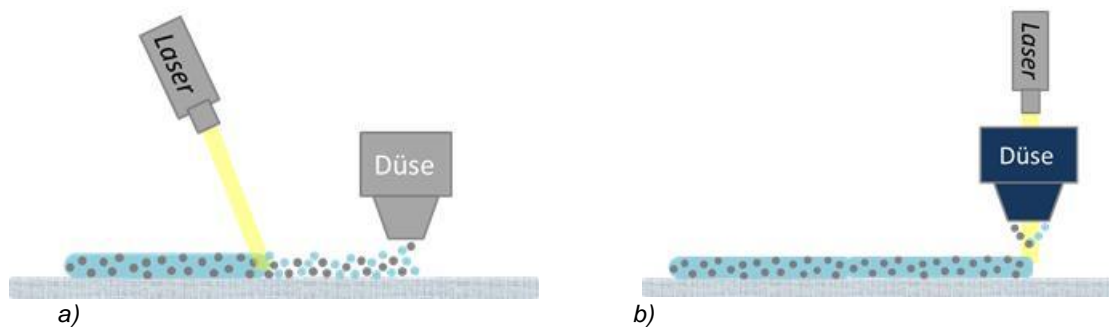


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Lösungsansätze, a) zweistufiger Prozess des TITV Greiz, b) einstufiger Prozess der EAH Jena

Die Entwicklung dieser neuen Technologie birgt ein hohes technisches Risiko, da die erforderlichen Prozesse wie Mischvorgang, Pulverförderung, -auftrag und -fixierung von zahlreichen Parametern beeinflusst werden.

Im Rahmen des Vorhabens werden folgende Forschungsergebnisse angestrebt:

- Entwicklung einer Technologie zum reproduzierbaren Aufbau zuverlässiger Pulverbeschichtungsstrukturen mit hohem Funktionsgrad (60 – 80 Ma% Funktionspigment) und geringem Flächenwiderstand ( $< 0,1 \Omega/\text{sq.}$ ), wobei sich die Komponenten der Pulvermischung stark hinsichtlich ihrer Eigenschaften (z. B. Partikelform, Dichte, Oberflächenbeschaffenheit) unterscheiden
- programmiertechnische Erzeugung von Layouts und digital gesteuerte Applikation von pulverbasierten Strukturen
- prozesstechnische Realisierung von flexibel gestaltbaren Funktionsmustern
- Generierung von Leiterbahnstrukturen mit Breiten und Abständen  $\leq 1500 \mu\text{m}$
- Verbesserung der Hafteigenschaften der aufgebauten Strukturen zur Steigerung der Widerstandsfähigkeit gemäß textilem Anforderungsprofil

Der innovative Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse besteht in:

- einer partiellen und reproduzierbaren Applikation/Fixierung von Pulvermischungen mit mindestens zwei Komponenten (Binder und Funktionspigment) mit sehr unterschiedlichen Partikeleigenschaften
- der Erzeugung filigraner pulverbasierter Beschichtungsstrukturen  $\leq 1500 \mu\text{m}$  in einem ein- bzw. zweistufigen Prozessschritt
- der hohen Flexibilität der erzielbaren Layouts der Funktionsstrukturen durch einen digital gesteuerten Applikationsprozess, welcher auch eine Einzelfertigung wirtschaftlich rentabel werden lässt
- der Verbesserung der Hafteigenschaften des Pulvers durch vorherige Aktivierung bzw. Strukturierung der textilen Materialien zur Optimierung der Widerstandsfähigkeit

Der Lösungsweg des Projektes ist in Abbildung 4 dargestellt.

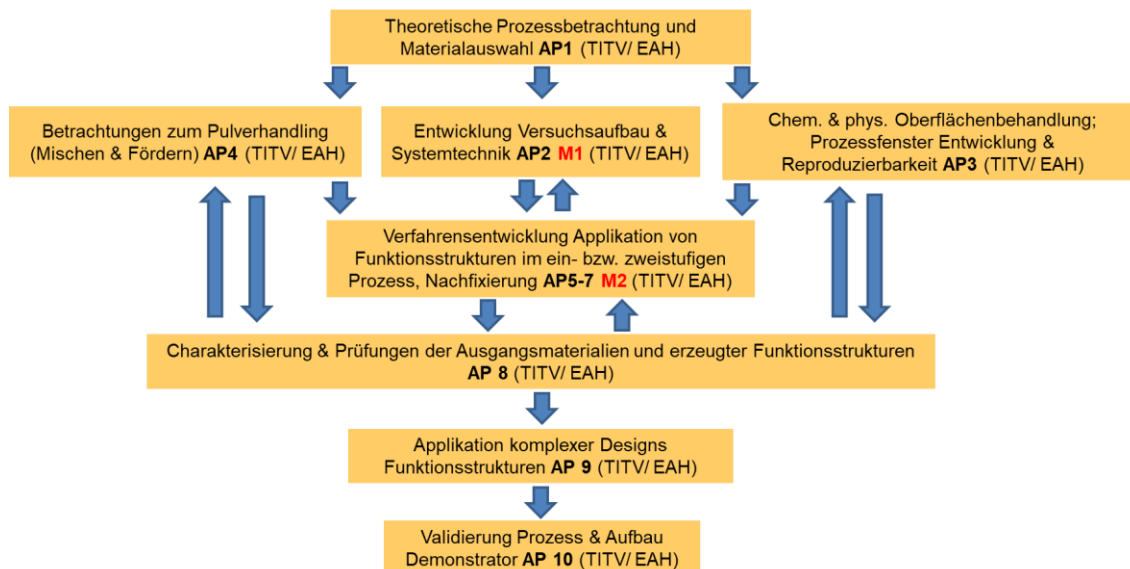


Abbildung 4: Übersicht des im vorliegenden Projekts IndiPuLaFix verfolgten Lösungsweges

### 3. Versuchsdurchführung und Ergebnisse

#### Arbeitspaket 1: Theoretische Prozessbetrachtung und Materialauswahl

##### Arbeitspaket 1.1: Auswahl geeigneter Textilsubstrate (TITV)

**TITV:** Es erfolgte die Auswahl eines reinen Polyestergewebes sowie eines Polyester-Baumwoll-Mischgewebes als Textilsubstrate für die nachfolgende Beschichtungsversuche durch das TITV Greiz in Zusammenarbeit mit den Firmen des projektbegleitenden Ausschusses.

Ausgewählte Textilsubstrate:

- PES/ CO (65/35) Mischgewebe, Fa. Melchior (215 g/m<sup>2</sup>), Körperbindung, „Emma“
- 100 % PES Gewebe, STG Smart Textiles GmbH (215 g/m<sup>2</sup>)
- 100 % PES Gewirke, (199 g/m<sup>2</sup>), Artikel 7048
- 100 % PES Vlies, Fa. Norafin, (40 g/m<sup>2</sup>), Artikel 00413.99

##### Arbeitspaket 1.2: Auswahl und Charakterisierung verschiedener Pulverbinder und Funktionspigmente (TITV, EAH)

**TITV:** Relevante Pulver und Pulvermischungen wurden in Zusammenarbeit mit dem projektbegleitenden Ausschuss und der EAH Jena identifiziert. Bei der Auswahl der leitfähigen Funktionspigmente wurden verschiedene Partikelformen berücksichtigt, um diese in die Applikationsuntersuchungen einfließen zu lassen. Ausgewählt wurden Silberflakes und agglomerierte Silberpartikel sowie silberbeschichtete Aluminiumpartikel.

Als Pulverbinder wurde thermoplastisches Polyurethan von zwei verschiedenen Anbietern ausgewählt, welche beide für das Selektive Lasersintern ausgelegt sind.

Es erfolgte eine Charakterisierung des Schmelzverhaltens des reinen TPU-Binders sowie einer Pulvermischung aus 50 Masseprozent Silberflakes und 50 Masseprozent Polymer. Bei der

Pulvermischung ist keine Änderung des Materialverhaltens beim Übergang von fest zu viskoelastisch festzustellen. Es ist davon auszugehen, dass dies aufgrund des hohen Feststoffgehaltes auftritt. Erfahrungsgemäß schmilzt der Polymerbinder jedoch während der Erwärmung auf.

Im Rahmen einer Drittleistung wurden für ausgewählte Pulvermischungen die Dichte und der Feuchtigkeitsgehalt ermittelt sowie eine Siebanalyse (gemäß DIN EN ISO 8130-1:20219-08) durchgeführt. Untersucht wurden dabei der reine TPU-Binder sowie Funktionspulvermischungen mit 60 bzw. 70 Masseprozent an Funktionspigment verschiedener Silber bzw. silberbeschichteten Partikeln. Eine Übersicht zu den Ergebnissen ist in der nachfolgenden Tabelle 1 einzusehen.

*Tabelle 1: Übersicht der Charakterisierungsergebnisse der Funktionspulvermischungen hinsichtlich Rieserverhalten, Dichte und Feuchtegehalt*

Probe	Rieserverhalten In Anlehnung an DIN EN ISO 56186 (Hausmethode)	Dichte [g/ cm <sup>3</sup> ] Gemäß DIN EN ISO 8130-3:2021-10	Feuchtegehalt [%]
60 Ma% Silberflake + 40 Ma% TPU- Binder	Stockungen [57,0 Sek]	2,541	0,04
70 Ma% silberschichtetes Aluminiumpigment + 30 Ma% TPU-Binder	Gut (30 Sek)	2,148	0,04
70 Ma% Silberpigment (agglomeriert) + 30 Ma% TPU Binder	Stockungen (48 Sek)	3,876	0,06
100 Ma% TPU- Binder	Stockungen (55 Sek)	1,275	0,04

#### **EAH:**

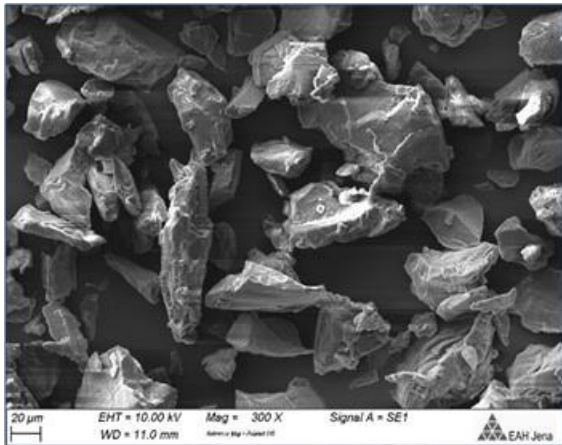
Zur Charakterisierung der ausgewählten Pulverwerkstoffe sind an DIN-angelehnte Eigenaufbauten (für Schüttdichte DIN EN ISO 60: 2000-01, Rieselfähigkeit DIN EN ISO 6186: 1998-08) und vorhandene (industrielle) Messtechnik (für Partikelgrößenverteilung Mastersizer von Malvern) der EAH Jena genutzt worden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2: Zusammenfassung der Schüttdichte und Partikelgröße zusammengefasst.

*Tabelle 2: Zusammenfassung der Schüttdichte und Partikelgröße*

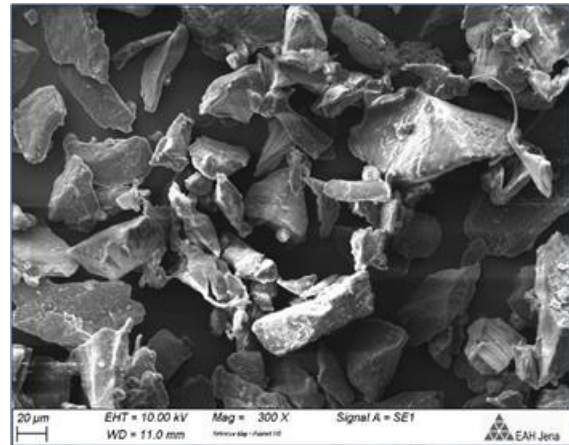
Hersteller	Kunststoffpulver (TPU)		Metallpulver (Ag)		
	ROWAK AG	Lehmann&Voss	Doduco GmbH	Eckart	Doduco GmbH
Bezeichnung	Rowalit	Luvosint	ES-4	eConduct AI 202000	AGP
Schüttdichte in g/cm <sup>3</sup> (gemessen)	0,440	0,517	2,719	1,445	2,921
D50 in µm	-	50	15-25	15-21	20-40

(Hersteller)				
--------------	--	--	--	--

Für eine phänomenologische Betrachtung wurden alle Pulver im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht. Die beiden TPU Pulver weisen einen ähnlichen spratzigen Habitus auf. Abbildung 5 a) zeigt diesen für das Material Luvosint. Allerdings ergeben sich für weitere Eigenschaften in Schüttdichte und Rieselfähigkeit größere Unterschiede. Die drei metallischen Pulver zeigen die vom Hersteller beschriebene Form, die auf die spezifischen Herstellungsmethode zurückzuführen ist (Abbildung 5 b).



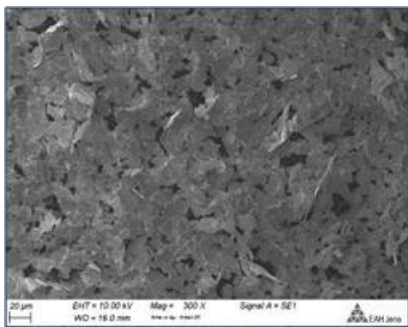
a)



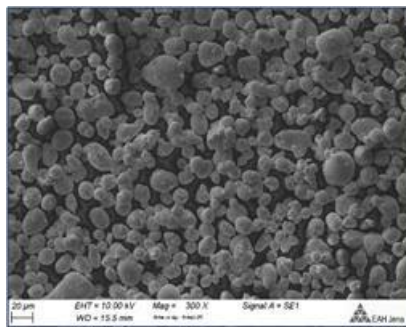
b)

Abbildung 5: Rasterelektronische Abbildung der TPU-Materialien a) Luvosint, b) Rowalit

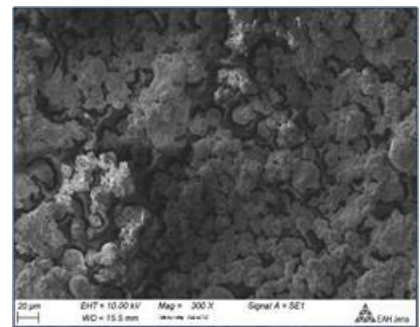
Während das Material ES-4 eine flakeförmige Struktur aufweist, zeigen die Pulver eConduct Al 202000 (Eckart GmbH und AGP (Doduco GmbH) eine sphärische Form, wobei diese beim letztgenannten Material weniger stark ausgeprägt ist (Abbildung 6). Beim Pulver AGP sind sehr deutliche Agglomerationen und auch metallische Korngrenzen zu beobachten. Dies wird auch in der Partikelgrößenverteilung dieses Materials deutlich, welche neben dem D50-Wert von ca. 30 µm Nebenmaxima bei größer 100 µm aufweist (Abbildung 7). Das flakeförmige ES-4 ist aufgrund von starken Agglomerationen mit der fluidischen Messmethode nicht messbar.



a)



b)



c)

Abbildung 6: Rasterelektronische Abbildung der metallischen Materialien a) ES-4, b) eConduct Al202000, c) AGP

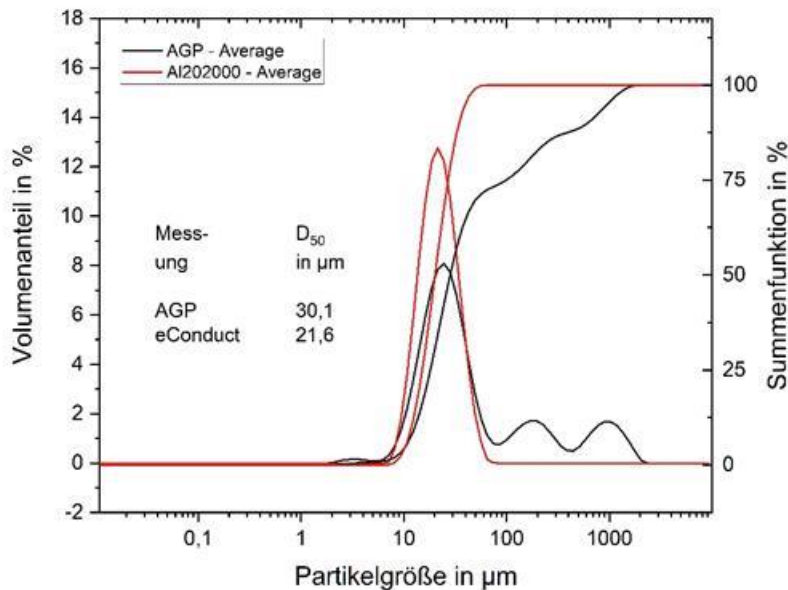


Abbildung 7: Partikelgrößenverteilung der Materialien AGP und eConductAl202000

Arbeitspaket 1.3: Definition der Randbedingungen zur Pulverförderung, Auslegung der Einzelkomponenten für Versuchsaufbauten und Simulation des Pulverauftragsprozesses (EAH)

Gemeinsam mit dem Partner GTV Verschleißschutz GmbH aus dem PBA sind alle genannten Pulver auf ihre Fördereigenschaften geprüft worden. Bis auf Rowalit sind alle Pulver förderbar. Gemeinsam mit dem Partner GTV sind neben den Fördereigenschaften die weiteren technisch relevanten Größen zu Pulverdüse, Fokussierung etc. besprochen und ausgelegt worden, die in das Versuchskonzept einfließen. Es wurde eine koaxiale 3-Strahlpulverdüse favorisiert. Mit den festgelegten Parametern kann der Auftragsprozess simuliert werden. Dabei werden die Partikelgröße und der Abstand der Düse zum Substrat variiert. Die Simulationsergebnisse zeigen in Abhängigkeit des Düsenabstands zum Substrat unterschiedliche Rückstreuwinkel und Geschwindigkeiten des Pulvers, die für die Auslegung des Versuchsstandes nun einbezogen wurden. Die simulierte Förderrate und der Düsenabstand werden zu Beginn der experimentellen Umsetzung aus den Simulationsergebnissen übernommen.

Arbeitspaket 1.4: Konzeption des Versuchsaufbaus und Auswahl passender Pulverauftragssysteme (TITV, EAH)

**TITV:** Für die ersten Versuche wurde eine bestehende Anlage einer vibrationsgesteuerten Pulverdüse verwendet, mit einem lokal getrennten Laborlaseraufbau für die anschließende thermische Fixierung. Im späteren Verlauf wurde ein Maschinenaufbau gewählt, bei dem Pulverdüse und Laser in einem Maschinenaufbau kombiniert sind.

Es wurden Konzepte erarbeitet, wie zusätzliche Komponenten wie Draht in den Düsenkopf integriert werden können, um einen homogeneren Pulverauftrag zu erzielen. Ergänzend wurden Zuführungsrinnen beschafft, welche zur Pulverzufuhr geeignet sind.

Zur reproduzierbaren Herstellung von Pulvermischungen wurde ein entsprechender Labormischer beschafft, welche eine dreidimensionale Schwenkbewegung durchführt.

## EAH:

Aufbauend auf den Voruntersuchungen und AP 1.3 wurden ein geeignetes Fördersystem ausgewählt und ein Versuchsaufbau zur Pulverapplikation konzipiert. Ein an der EAH Jena vorhandener CO<sub>2</sub>-Laserversuchsstand wurde modifiziert und ein Pulverfördersystem in das Gerätesystem integriert. Das Konzept zur Strahlführung beinhaltet neben einer CO<sub>2</sub>-Laserstrahlquelle, drei Umlenkspiegeln und einer ZnSe-Meniskuslinse zur Strahlfokussierung einen Laserbearbeitungskopf mit einer 3-Strahl-Koaxialdüse. Das Pulverfördersystem hat die Aufgabe die Pulver zu fördern, zu mischen und sie wieder in gleichmäßige Ströme aufzusplitten, damit sie über die Düse auf das Textil appliziert werden können. Der Laserstrahl wird so fokussiert, dass das Pulvergemisch beim Auftrag auf das textile Substrat aufgeschmolzen wird. Das entwickelte, konstruierte und aufgebaute Anlagensystem ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt.

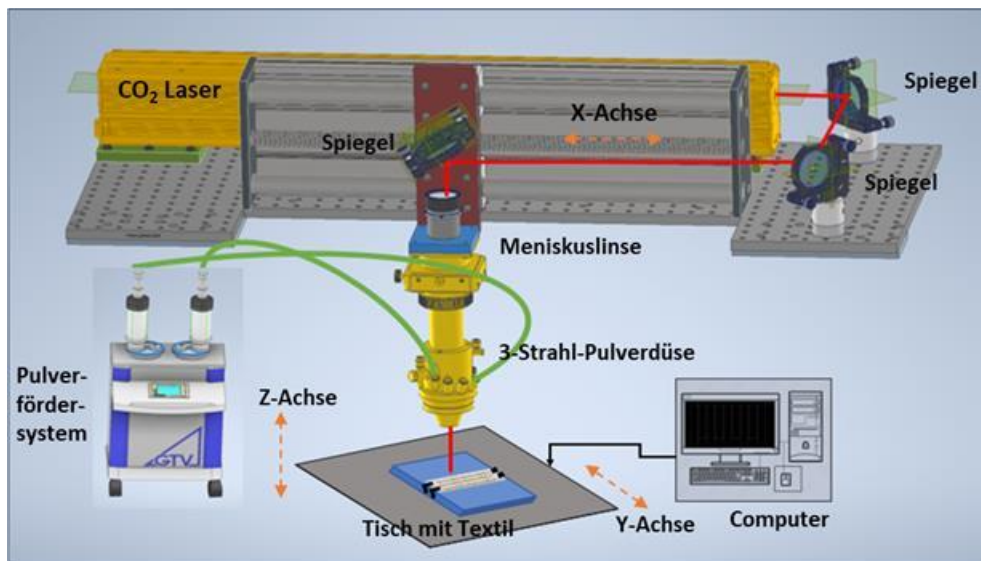


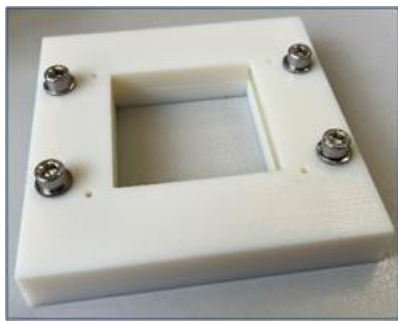
Abbildung 8: Konzept der Laserstrahlführung für den experimentellen Versuchsaufbau

Zur Förderung der Pulver stellt die GTV Verschleißschutz GmbH für die Projektlaufzeit den Pulverförderer MF 2/2 als vAW-Leistung zur Verfügung. Des Weiteren wurden 2 Pulvertürme und eine 3-Strahl-Koaxialdüse mit drei unterschiedlichen Injektionswinkeln seitens der EAH Jena beschafft und in das Anlagensystem integriert.

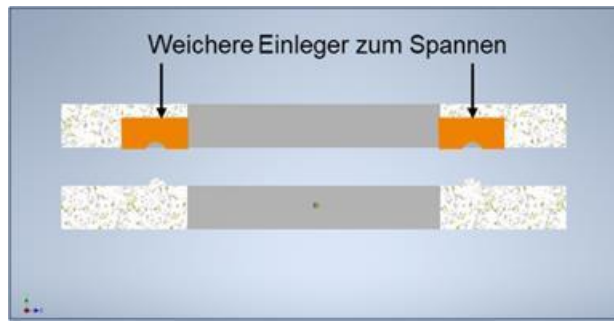
## Arbeitspaket 2: Entwicklung Versuchsaufbau und Systemtechnik

### Arbeitspaket 2.1: Spannkonzert für die Bearbeitung von textilen Substraten (EAH Jena)

Für die ersten Vorversuche bis zu Fertigstellung des Maschinenkonzepts wurde in mehreren Iterationsschritten ein Prototyp mittels 3D-Druck (Stratasys Objet) im Multimaterialdruck an der EAH Jena entwickelt und gefertigt. Das modulare Spannkonzert erlaubt das Testen verschiedener Spannbacken, die unterschiedliche Shore-Härtegradienten aufweisen und damit eine faltenfreie Textilverhaltung ermöglichen (Abbildung 9). Das Textil wird mit 4 Schrauben zwischen Ober- und Unterteil geklemmt. Einleger mit Härtegradienten an Oberseite ermöglichen ein faltenfreies Spannen des Textils.



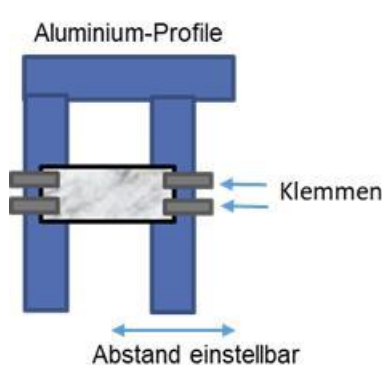
a)



b)

Abbildung 9: Spannhalter für Vorversuche a) 3D-gedruckter Spannhalter, b) schematische Darstellung

Für größere Strukturen sowie ein schnelles und unkompliziertes Handling ist dieser Lösungsvariante nicht ausreichend. Es wurde daher ein zweites Spannkonzzept erarbeitet, welches aus einer Konstruktion von Spannklemmen und Alu-Profilen aufgebaut ist. Diese ist deutlich robuster und die Größe des Spannbereiches ist flexibel anpassbar (Abbildung 10).



a)



b)

Abbildung 10: Spannhalter für Versuchsstand, a) schematische Darstellung, b) Spannhalter aufgebaut

Arbeitspaket 2.2: Aufbau und Inbetriebnahme der experimentellen Versuchsstände mit Pulverför-dereinheit und Pulverdüse (TITV Greiz, EAH Jena)

Der Versuchsstand zur Pulverapplikation bzw. Laserfixierung wurde mit allen Bestandteilen aufgebaut und in Betrieb genommen. Ebenso der beschaffte Labormischer, mit welchem ein automatisierter Mischprozess mit definierten Kräften, Schwenkrichtungen und – geschwindigkeiten sowie unterbrechungsfreien Agitationen möglich ist.

Es erfolgte die Inbetriebnahme der beschafften vibrationsgesteuerten Zuteilungsrinnen, mit der die Dosierung verschiedener Pulver möglich wird. Versuche zur Förderung der Pulver bei unterschiedlichen Anregungsfrequenzen zur Förderung wurden durchgeführt und die geförderte Pulvermenge nach 20 s, 40 s und 60 s bestimmt. Es zeigten sich deutliche Unterschiede in der Fördermenge, wobei es bei 100 % Vibration zu starker Staubentwicklung bei den reinen Binderkomponenten kam. Anhand der Ergebnisse lässt sich eine automatisierte Anfertigung von Pulvermischungen realisieren.

**EAH:**

Der Versuchsstand der EAH Jena wurde vollständig aufgebaut und justiert. Die Anlage ist in Abbildung 11 dargestellt.

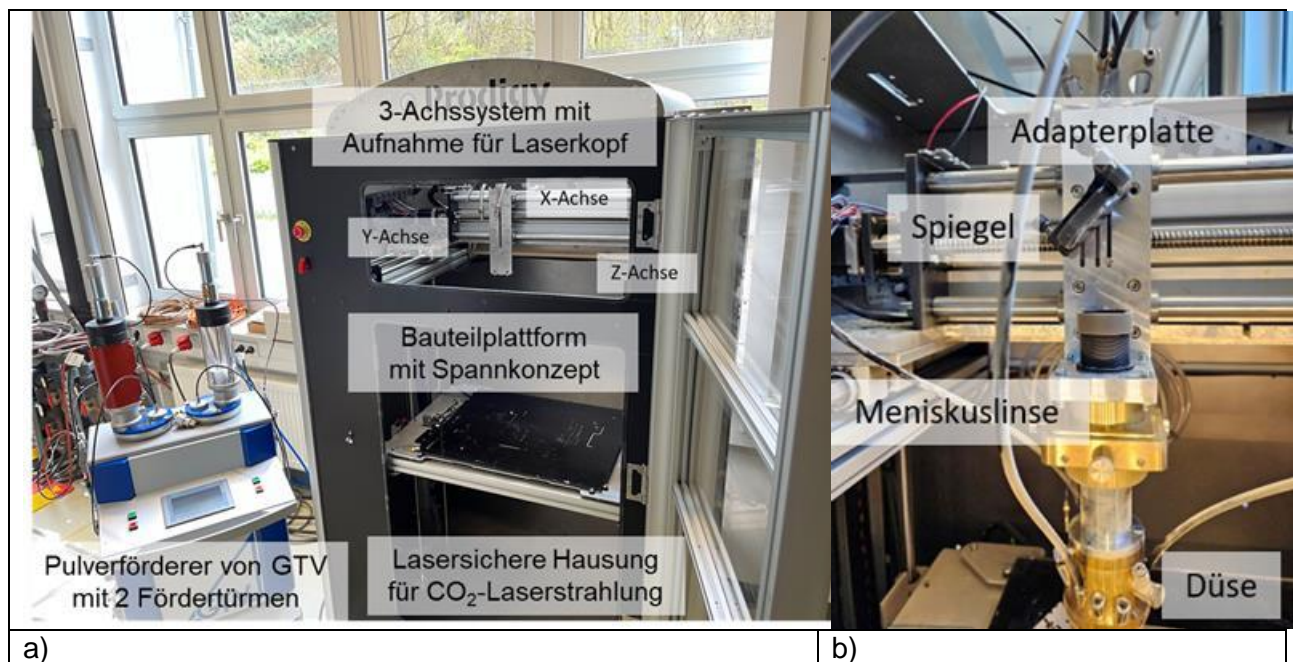


Abbildung 11: Experimenteller Versuchsaufbau der EAH Jena, a) Gesamtanlage, b) Teil des Strahlengangs

Die Anlage ist mit einer 30 W Synrad CO<sub>2</sub>-Laserquelle ausgestattet. Der Laser arbeitet in einem Wellenlängenbereich von 10,57-10,63 μm mit einem Strahldurchmesser von 3,5 mm. Der Laserstrahl wird über eine Reihe von Spiegeln gelenkt und mit Hilfe einer ZnSe-Meniskuslinse (Brennweite 300 mm) fokussiert. Der fokussierte Strahl wird durch eine an einer Adapterplatte befestigte Koaxialdüse geführt (Abbildung 11). Der Versuchsaufbau verfügt des Weiteren über zwei spindelgeführte Achsen (X, Y, Z), die eine genaue Positionierung des Laserstrahls auf dem Textil ermöglichen. Des Weiteren erfolgte die Integration der Steuerung für die Einzelkomponenten wie Achsen, Laser und Pulverförderer und die Einbindung in eine gemeinsame Softwareoberfläche. Die Pulverförderlinie beinhaltet den Pulverförderer MF 2/2, der die Einzelpulver mit einstellbaren Förderraten zu einem Mischer transportiert. Die Pulvermischung wird weitergefördert zu einem Verteiler der diese in gleichmäßige Ströme aufteilt, die der Düse zugeführt werden und durch diese in verschiedenen Winkeln auf das Textil aufgetragen werden. Die Pulverförderlinie ist schematisch in (Abbildung 12) dargestellt.

Nach Inbetriebnahme wurde die Funktion der Einzelkomponenten erfolgreich getestet und Strahlprofil, Laserleistung und Förderraten ermittelt.

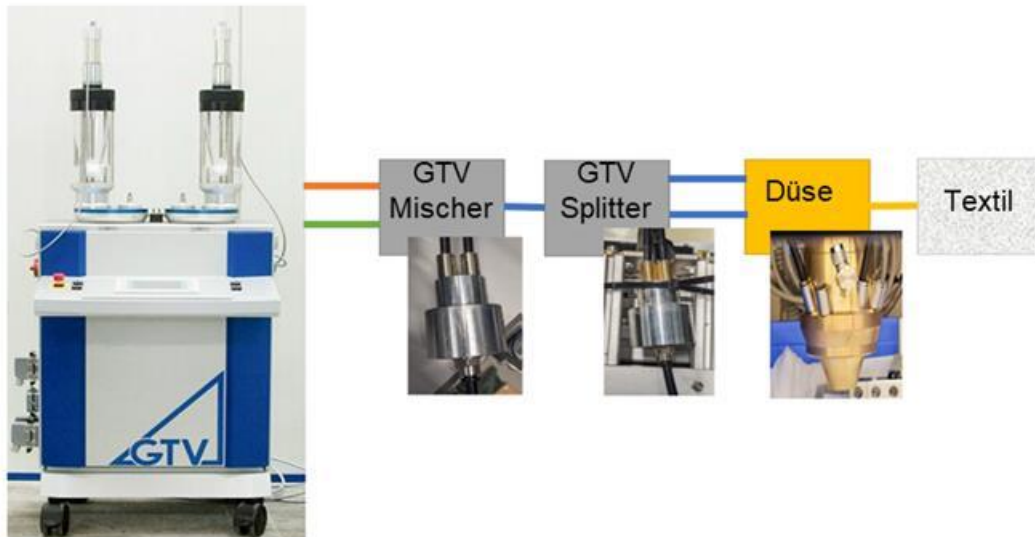


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Pulverförderlinie

### Arbeitspaket 2.3: Analyse der vorgegebenen Software und Bildverarbeitung sowie Ableitung notwendiger Schnittstellen (TITV)

Die bestehenden Steuer- und Softwareeinheiten an den Pulverdüseneinheiten am TITV Greiz wurden analysiert und Schnittstellen evaluiert. Zu Beginn des Projektes konnten nur einfache Linienkombinationen an die Steuereinheit der Pulverdüseneinheit übergeben werden. Es erfolgte die Einarbeitung in die Quellcodes der .svg Dateien, welche standardmäßig zur Übergabe von Beschichtungsdesigns genutzt werden. Es zeigen sich unterschiedliche quelltechnische Beschreibungen unterschiedlicher grafischer Elemente (z. B. Linien, Rechteck, Kreis). An der reinen Pulverdüseneinheit sind Verfahrenswege nur senkrecht oder im 45° Winkel möglich. Gekrümmte Geometrien werden durch eine Aufspaltung der Formen in einzelne Linienabschnitte verbunden mit einer quelltechnischen Umsetzung möglich.

An der kombinierten Anlage bestehend aus Laser und Pulverdüse ist eine grafische Gestaltung der Beschichtungsdesigns direkt in der Software der Anlage mit einfachen Gestaltungselementen vorgesehen und hat für die Arbeiten im Projektverlauf ausgereicht. Für spätere Arbeiten mit komplexeren Beschichtungslayouts wird ein .dxf-Dokument als Übergabeformat benötigt. Eine erste Einarbeitung in dieses Dateiformat wurde gegen Ende des Projektes im Rahmen der Erstellung der Demonstratoren begonnen. Eine tiefgründigere Betrachtung war im Rahmen der Projektarbeit aufgrund des Arbeitsumfangs nicht möglich, wird aber im Anschluss des Projektes gesehen, da es die Verwendung/Akzeptanz im industriellen Rahmen steigern wird.

### Arbeitspaket 2.4: Entwicklung der Schnittstellen zur praxisgerechten Überführung von Bilddateien und programmiertechnische Erzeugung von Applikationsstrukturen (TITV Greiz)

Im Projektverlauf wurde ein Programm entwickelt und optimiert, welches die Übergabe komplexer Designstrukturen aus dem .svg-Dateiformat an die Steuereinheit der Pulverdüseneinheit im benötigten Datenformat (.hcsv – Format) ermöglicht. Im Zusammenhang mit den praktischen Arbeiten des Projektes erfolgten mehrere Iterationsschritte, um eine möglichst reibungslose Bedienung der Maschine zu gewährleisten und so die Basis für reproduzierbare Beschichtungsergebnisse zu legen. Ein Fokus lag auf der Integration der

Bézier-Funktionen, welche die Basis vieler grafischer Gestaltungselemente bildeten. Es erfolgte insbesondere die mathematische Einbindung der kubischen Bézierkurven in den Quellcode des Umwandelprogrammes. Im Ergebnis ist eine Übergabe von Applikationsstrukturen aus Linien, Rechtecken sowie gekrümmten Geometrien möglich. Zusätzlich erfolgte eine Abstimmung mit dem Steuermodalitäten an der kombinierten Laser-Pulver-Anlage anhand der entwickelten Software für die reine Pulvereinheit.

Im späteren Verlauf des Projektes wurden Betrachtungen zur Einbeziehung von DXF Funktionen als Übergabeformate insbesondere für die kombinierte Anlagentechnik aus Laser und Pulverdüse, vorgenommen, um weitere Möglichkeiten für den praktischen Einsatz in der Industrie zu schaffen. So wird die Erstellung von Beschichtungslayouts neben grafischen Programmen auch mit Software technischer Zeichnungen ermöglicht werden. Der Grundstein dazu wurde im Rahmen der Projektarbeit gegen Ende der Projektlaufzeit gelegt, und bedarf aber weiterer Arbeiten im Anschluss.

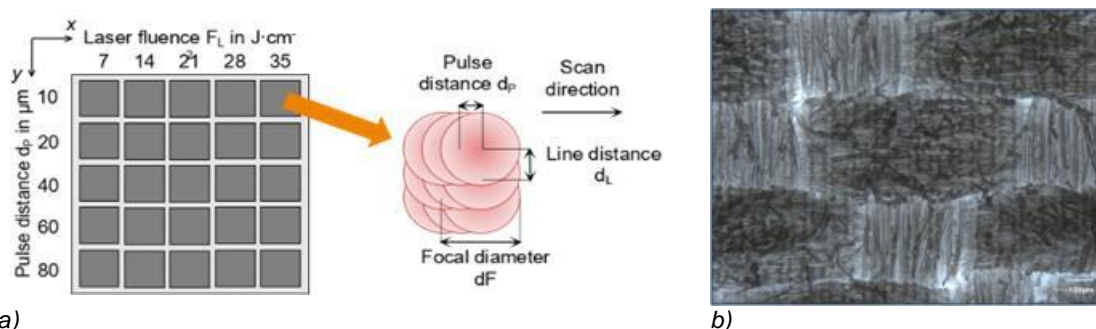
Für die Laserfixierung muss eine Abstimmung zwischen gepulverten Bahnen und Laserfahrweg angelegt werden. Bei der getrennten Pulveranlage kann der Arbeitstisch entnommen werden und in den Laborlaseraufbau eingesetzt werden. Quelltechnisch wurde eine Umrechnung zwischen Koordinatensystem des Bearbeitungsbereiches auf der Pulveranlage und dem Laserbearbeitungsfeld getroffen. Anhand der Versuche in den nachfolgenden Arbeitspaketen wurde diese Schnittstelle optimiert.

In der kombinierten Laser-Pulver-Anlage fällt dieser manuelle Prozessschritt weg, jedoch wird ebenso eine quelltechnische Umsetzung notwendig, da der Laser neben und nicht direkt über der Pulverdüseneinheit liegt. Für die Optimierung wurde auf die Erfahrungswerte aus dem Vorgehen bei der getrennten Anlage zurückgegriffen.

### Arbeitspaket 3: Prozessfenster Entwicklung und Reproduzierbarkeit

#### Arbeitspaket 3.1: Experimentelle Untersuchungen zur physikalischen Erzeugung der Mikrorauheit auf textilen Oberflächen (EAH Jena)

Die Erzeugung von Mikrorauheiten und damit einer vergrößerten Oberfläche hatte vor allem das Ziel die Anhaftung der im weiteren Verlauf erzeugten Schichten zu verbessern. Dafür wurde das Substrat mit infraroter kurzgepulster Laserstrahlung bei 7 ps strukturiert.



a) *Abbildung 13: a) Matrix zur Erzeugung der Mikrorauheit, b) Lichtmikroskopische Aufnahme eines laserbearbeiteten Textilbereichs*

In Abhängigkeit der Laserfluenz und der Scanparameter wurde ein Versuchsplan erstellt und umgesetzt. Zur Charakterisierung wurden mikroskopische Durchlichtaufnahmen angefertigt. Anhand der erzeugten Strukturen wurden drei Parameter ausgewählt, die zur Verbesserung der

Anhaftung nachfolgend untersucht wurden (Tabelle 3). Mit diesen Parametern wurden Proben mit Layouts von 25 mm x 45 mm und 25 mm x 125 mm laserbearbeiteter Flächen gefertigt.

Tabelle 3: Parameter für die Untersuchungen zur Mikrorauheit

Parameter	Linienabstand dL (µm)	Laserfluenz F (J/cm <sup>2</sup> )	Scangeschwindigkeit (mm/s)
USP 1	10	7	1500
USP 2	10	14	2000
USP 3	40	35	2000

Die Charakterisierung der physikalischen Vorbehandlung erfolgte in AP8 durch das TITV analog der nasschemischen Behandlung (vgl. AP 3.2)

Die Ergebnisse konnten dieses Jahr auf der Konferenz LANE [65] vorgestellt werden.

Arbeitspaket 3.2: Aktivierung der Textiloberfläche mittels nasschemischer Verfahren (TITV Greiz)

Es erfolgte eine experimentelle Untersuchung zur Alkalisierung der PES-Substrate. Durch die Alkalisierung der Polyesterfaser erfolgt ein gezielter Abbau der Faser, welche zu einer Vergrößerung der Faseroberfläche und damit zu einer verbesserten Haftung für nachfolgende Beschichtungen, führt. Umgangssprachlich spricht man von einem „Abschälen“ bzw. „Aufrauen“ der Faseroberfläche. Um die Gewebefestigkeit nicht zu gefährden, wurde ein maximaler Gewichtsverlust von 20% als Obergrenze festgelegt. Für die Versuche sind die Materialien PES-Gewirke, PES-Vlies und das PES-CO Mischgewebe „Emma“ ausgewählt worden. Der Alkalisierungsprozess ist nach der HT-Baum Technologie unter Verwendung von Ätznatron bei einer Temperatur von 98 °C, durchgeführt worden. Die Behandlungsdauer beträgt 40 min mit einem anschließenden Spülvorgang bei 60 °C, 40 °C und 20 °C für jeweils 10 min. Das Ergebnis der Behandlung ist in Tabelle 4 Tabelle 10 dargestellt

Tabelle 4: Übersicht zu den Alkalisierungsversuchen

Material	Gewicht vor Alkalisierung in g	Gewicht nach Alkalisierung in g	Gewichtsverlust / Abbau PES Faser in %
PES Gewirke	72,1	59,3	17,75
PES Vlies	21,5	17,7	17,67
Mischgewebe	76,1	68,2	10,38

Die vorbehandelten Substrate wurden im Rahmen Arbeitspaket 8 charakterisiert. Es folgten Beschichtungstest mit leitfähigen Pulvern. Mittels Rakel und Schablone wurden Streifenformige Designs erzeugt und diese thermisch und unter Druck fixiert, um die Haftung zwischen Substrat und Beschichtung zu bewerten.

Beschichtungen auf Proben, welche vorab alkaliert wurden, zeigten eine verbesserte Haftung im Vergleich zur unbehandelten Ware. Jedoch wurde eine Verschlechterung der elektrischen Leitfähigkeitswerte im Vergleich zu den Strukturen auf der Ausgangsware festgestellt. Die nasschemische Vorbehandlung raut die Textiloberfläche an, welche die Beschichtung durch die

gewählten Auftragsformen mittels Pulver abbildet. Das Pulver verteilt sich in den Vertiefungen, wodurch die mechanische Haftungsverbesserung hervorgerufen wird. Jedoch wird dadurch der elektrische Leiterbahnenquerschnitt, welcher durchgängig über die Struktur verläuft verkleinert und dadurch der Widerstand erhöht.

Dieser Effekt ist beim reinen PES Substraten stärker zu beobachten als bei Mischgeweben, da die Alkalisierung insbesondere die Polyesterstrukturen anraut.

### Arbeitspaket 3.3: Ermittlung des Prozessfensters in Abhängigkeit der Laser- und Förderparameter (EAH Jena)

Es wurden umfangreiche Experimente durchgeführt, um die Auswirkungen der Laserleistung auf die Bildung von Leiterbahnen zu untersuchen. Die Laserleistung wurde zwischen 20 % und 40 % variiert, was einem Bereich von 7 bis 15 Watt entspricht.

Dieser Bereich wurde auf der Grundlage von Vorversuchen ausgewählt. Unter 7 Watt reichte die Laserleistung nicht aus, um das Pulvergemisch effektiv zu schmelzen, was zu kaum sichtbaren Leiterbahnen führte. Bei mehr als 15 Watt verursachte die erhöhte Laserleistung einen übermäßigen Materialabtrag, der zu Einschnitten in der Textilstruktur führte. Während dieser Versuche wurden die anderen Parameter konstant gehalten.

Die Achsgeschwindigkeit wurde zwischen 10 mm/s und 50 mm/s variiert. Dieser Bereich wurde auf der Grundlage von Vorversuchen ausgewählt. Bei der unteren Grenze mit 10 mm/s wurde beobachtet, dass die Laser-Material-Wechselwirkungszeit übermäßig lang wurde. Dies führte möglicherweise zu einer Überhitzung des Substrats und einem übermäßigen Schmelzen des Pulvers. Bei der oberen Grenze mit 50 mm/s wurde festgestellt, dass die Zeit für das Schmelzen des Pulvers nicht ausreichte. Es wurden diskontinuierliche Spuren beobachtet.

Die Linienenergie spielt eine wichtige Rolle bei der Optimierung der Wechselwirkungen zwischen Laser und Material, da sie den Wärmeeintrag und das anschließende Materialverhalten beeinflusst. Durch die Anpassung der Linienenergie lassen sich die gewünschten Materialeigenschaften erzielen und konsistente Ergebnisse unter verschiedenen Versuchsbedingungen gewährleisten. Unter Berücksichtigung von Leistung und Geschwindigkeit ergaben sich ein Prozessfenster für die Linienenergie von 0,23-1,06 J/mm.

Bei der Versuchsanordnung sind die Einstellungen der Z-Achse entscheidend für das Erreichen des gewünschten Laserfokus. Die Ausgangsposition des Tisches ist  $Z=0$ , was als Referenzpunkt festgelegt. Mit Hilfe der Laserstrahldiagnose-Software und dem Strahlanalysegerät FM120 wurde die Fokusebene bei 136,471 mm von dieser Ausgangsposition der Z-Achse aus gemessen. Diese Messung ermöglichte es, die Maschine auf diese Fokusposition zurückzusetzen, um sicherzustellen, dass der Laserfokus bei jedem Start der Maschine auf dem Arbeitstisch liegt.

Wie in Abbildung 14 dargestellt, beträgt der Abstand zwischen der Düsen Spitze und dem Tisch bei  $Z=0$  nun 75,4 mm, was als  $Z_n$  bezeichnet wird. Der Pulverfokus der Düse, der für die Versuche auf 18 mm eingestellt wurde, wird als  $Z_p$  bezeichnet. Dies bedeutet, dass der bewegliche Tisch auf 57,4 mm bewegt wird, um den Pulverfokus zu erreichen. Während des Prozesses wurden defokussierte Laserpositionen ( $\delta Z$ ) bei 67,4 mm, 77,4 mm und 87,4 mm untersucht. Die schematische Darstellung veranschaulicht die Konfiguration dieses Aufbaus.

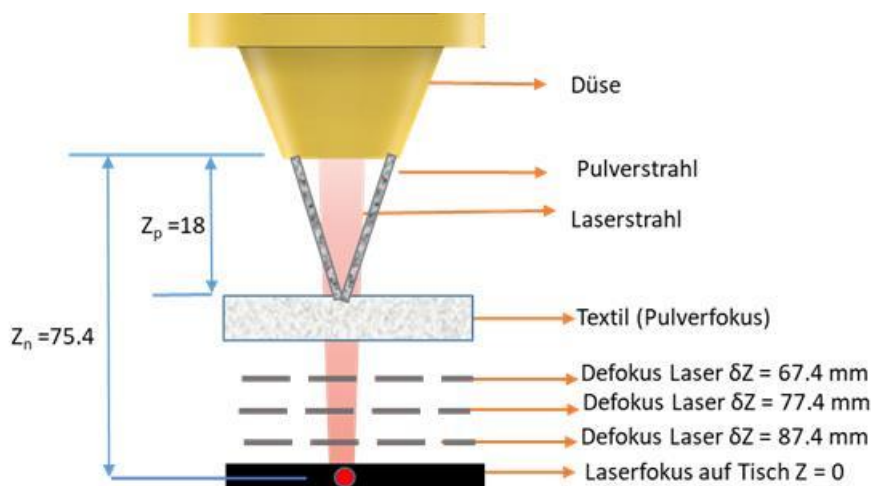


Abbildung 14: Schematische Darstellung der Laserstrahlführung für fokussierte und defokussierte Positionen

Bei der Versuchsanordnung sind die Parameter für die Pulverzufuhr entscheidende Parameter für eine gleichmäßige Pulverabscheidung. Die Zuführungsrate, gemessen in Gramm/Minute, wird durch die Rotationsgeschwindigkeit des Pulverförderers bestimmt. In den Versuchen wurde als geeignete Drehzahl 1,3 U/min für e-conduct ermittelt, was der Hälfte der typischen 2,5 U/min entspricht, die in den Vorversuchen verwendet wurden. Für Luvosint wurde eine geeignete Drehzahl von 2,0 U/min bestimmt. Diese Anpassung war notwendig, da erste Tests eine unzureichende Abscheidung bei Verwendung einer Mischung aus e-conduct- und Luvosint-Pulvern zeigten. Durch die Verringerung der Drehzahl wurde ein optimales Förderergebnis erreicht, das eine homogene Abscheidung auf der Textiloberfläche ermöglicht. Die berechnete Zuführungsrate beträgt etwa 4,4 g/min.

In Tabelle 11Tabelle 5 sind die Kennwerte für das ermittelte Prozessfenster in Abhängigkeit der Laser- und Förderparameter dargestellt.

Tabelle 5: Kennwerte für das ermittelte Prozessfenster

Laserleistung (W)	7 -15
Scangeschwindigkeit (mm/sec)	10 -50
Position Laserstrahlfokus (mm)	67 – 87
Luvosint: Förderrate (g/min)	2.0
e-Conduct: Förderrate (g/min)	1.3

#### Arbeitspaket 4: Pulverhandlung

##### Arbeitspaket 4.1: Entwicklung und Analyse des vorgelagerten Mischvorgangs zur homogenen Verteilung der Einzelkomponenten (TITV Greiz)

Ausgangspunkt war das Mischen der abgewogenen Pulvermengen gemeinsam in einem entsprechend dem Volumen angepassten Laborgefäß. Dieses wurde manuell durchgeführt, wobei das Gefäß in alle 3 Raumrichtungen geschwenkt wurde. Das Vorgehen war stark abhängig von der ausführenden Person und es traten große Unterschiede in der Homogenität und dem Vorhandensein von Agglomerationen auf. Nach einer Mischzeit von 10 min konnte eine größere Reproduzierbarkeit erreicht werden.

Der beschaffte Labormischer ermöglicht das Mischen von mehreren Chargen gleichzeitig. Die Mischzeit von 10 min liefert auch beim automatisierten Verfahren gute Ergebnisse und wurde in den Versuchsablauf übernommen.

Bei Betrachtung unter dem Lichtmikroskop zeigte sich eine gleichmäßige Verteilung zwischen den Pulverkomponenten im Gesamteindruck. Lokal gibt es kleinere Anhäufungen einzelner Partikelarten, jedoch kann dies aufgrund von interpartikulären Anziehungskräften nur unter erhöhten Aufwand aufgelöst werden. Da diese lokalen Konzentrationsunterschiede sich nicht deutlich auf das Pulverergebnis auswirken, wurden vorerst keine weitere Untersuchungen dazu vorgenommen, auch um einen industrierelevanten Verfahrensablauf zu generieren.

#### Arbeitspaket 4.2: Untersuchungen zum Fördermechanismus zur gezielten Mischung der Einzelkomponenten (EAH Jena)

In Absprache mit dem Projektpartner GTV wurden berechnete Ausgangsparameter zur Pulverförderung besprochen.

*Tabelle 6: Ausgangsparameter zur Pulverförderung*

<b>Pulver-kategorie</b>	<b>Bezeichnung</b>	<b>Drehzahl (U/min)</b>	<b>Rührer (%)</b>	<b>Trägergas (l/min)</b>	<b>Förderrate (g/min)</b>	<b>Förderung</b>
TPU	Rowalit	2.0	80	8.0	1.9	nicht homogen
TPU	Luvosint	2.0	30	5.0	2.0	homogen
Metall	e-conduct	2.5	30	5.0	8.7	homogen
Metall	ES-4	1.7	80	5.0	8.5	nicht homogen
Metall	AGP	2.5	30	5.0	8.3	nicht homogen

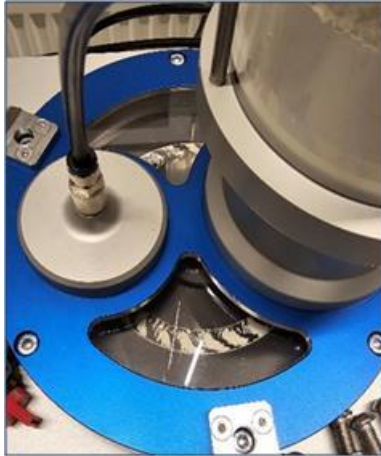
Homogen förderbar waren von den verschiedenen Pulvern die Materialien Luvosint und e-Conduct (Tabelle 6). Diese Pulver sind für weitere Untersuchungen ausgewählt und die Parameter weiter optimiert wurden. Dabei wurden die Förderraten meist wöchentlich neu ermittelt und angepasst. Tabelle 7 zeigt dies am Beispiel des Pulvers e-conduct.

*Tabelle 7: Ermittelte Förderraten für das Pulvermaterial e-conduct.*

<b>Tag</b>	<b>Drehzahl U/min</b>	<b>Dauer min</b>	<b>Förderrate g/min</b>
1	1,3	1,0	4,33
2	1,3	1,0	4,33
3	1,3	1,0	4,23
4	1,3	1,0	4,23
5	1,3	1,0	4,30

Die optimierten Förderraten sind über den dargestellten Zeitraum sehr konstant. Gleiches gilt für das Material Luvosint. Das heißt, dass die Pulvermischungen bei konstanten Förderparametern ein gleichbleibendes Mischungsverhältnis zeigen.

Die GTV-Pulvertürme, in denen die beiden Pulver Luvosint und e-conduct unter kontrollierten Bedingungen effektiv verarbeitet werden konnten, wiesen während des Prozesses ein gewisses Problem auf. Es kam zu Inhomogenität auf beiden Seiten der Zuführungsscheibe, was zur Beeinträchtigung der Absaugung des Pulvers zur Düse führt, insbesondere wenn die Pulver zwei Tage lang in den Türmen verblieben (Abbildung 15).



a)



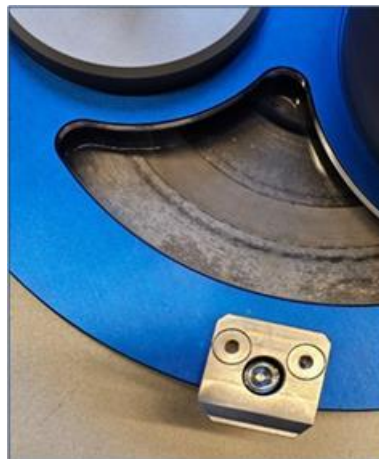
b)

Abbildung 15: Förderinhomogenität in den Zuführungsscheiben, a) Luvosint, b) e-conduct

Vermieden werden kann dies durch eine Entnahme der Pulver, Reinigung der Anlage und einer anschließenden Siebprozedur im Intervall von zwei Tagen (Abbildung 16).



a)



b)

Abbildung 16: homogene Förderung in den Zuführungsscheiben nach Reinigung und Siebung, a) Luvosint, b) e-conduct

Die Homogenität des Pulvers ist sehr wichtig für die Gesamteffizienz des laserbasierten Pulverbeschichtungsprozesses. Wird das Pulver nicht gleichmäßig gefördert führt dies zu einer inhomogenen Pulverspur beim Auftragen. Zum anderen kann es passieren, dass der Laserstrahl direkt auf das Textilsubstrat einwirkt, anstatt das Pulver zu schmelzen, was zur Beschädigung des Textilsubstrates führen kann und auch den gesamten einstufigen Laserabscheidungsprozess verändert.

Diese Probleme verdeutlichen, wie wichtig die korrekte Handhabung des Pulvers und die kontinuierliche Überwachung der Pulverqualität, einschließlich der Auswirkungen aller anderen Prozessparameter, sind.

Arbeitspaket 4.3: Vergleichende Untersuchung der Mischungsverhältnisse bei Mischung vor (TITV) und während (EAH) der Pulverapplikation mittels Düse (TITV Greiz, EAH Jena)

Es erfolgt die lichtmikroskopische Analyse der Partikelverteilung zwischen Funktionspigment und Binder in den mittels Pulverdüse aufgetragenen Schichten.

**TITV:**

Untersucht wurden am TITV Greiz Schichten nach Applikation der Pulvermischung jedoch noch vor der Laserfixierung. Dies lässt eine bessere Bewertung der Verteilung zwischen den einzelnen Komponenten zu. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind Pulverbahnen mit zwei unterschiedlichen leitfähigen Funktionspartikeln zu sehen. Insbesondere für die silberbeschichteten Aluminiumpigmente lässt sich eine gute und gleichmäßige Verteilung der kleinen Partikel rund um die etwas größeren Binderpartikel erkennen. Geringere lokale Unterschiede in der Konzentration lassen sich weiterhin wie auch schon nach dem vorgelagerten Mischprozess erkennen.

Es lassen sich keine Rückschlüsse auf eine Entmischung durch den vibrationsgesteuerten Applikationsprozess erkennen.

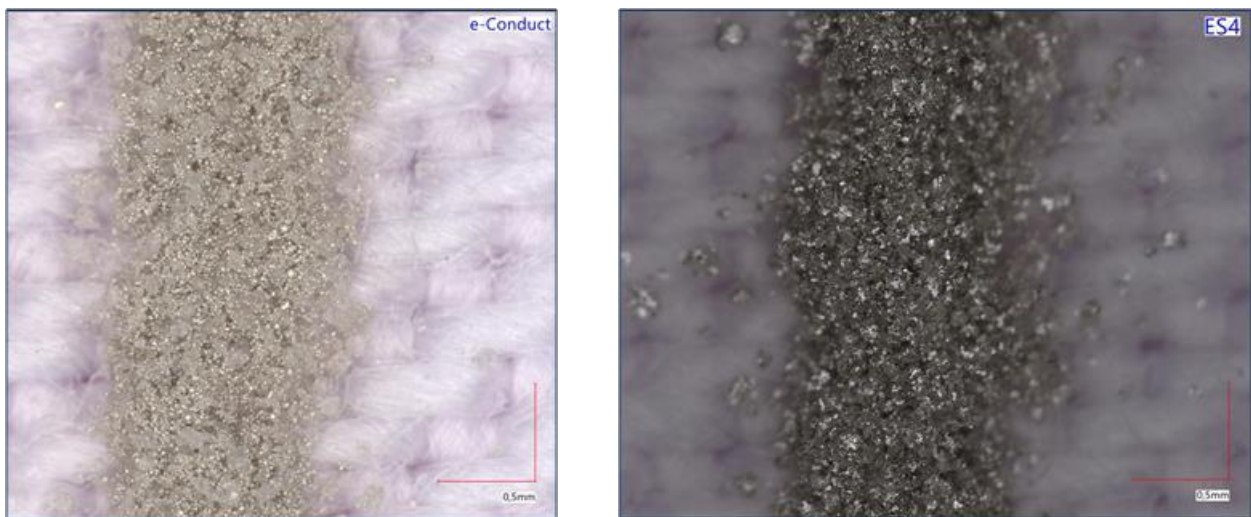


Abbildung 17: Lichtmikroskopische Aufnahme von der mittels Pulverdüse applizierten Funktionspulvermischung mit 70 Masseprozent silberbeschichteten Aluminiumpigments (links) bzw. 60 Masseprozent an Silberflakes (rechts)

**EAH:**

Für die Untersuchung der Mischungsverhältnisse wurden für unterschiedliche Förderraten Proben des Pulvergemisches unterhalb der Düse aufgefangen und bewertet. Es zeigte sich, dass das Verhältnis der Pulver zueinander in Abhängigkeit der Förderrate unterschiedlich ist. Abbildung 18 zeigt die Pulvergemische bei verschiedenen Drehzahlen.

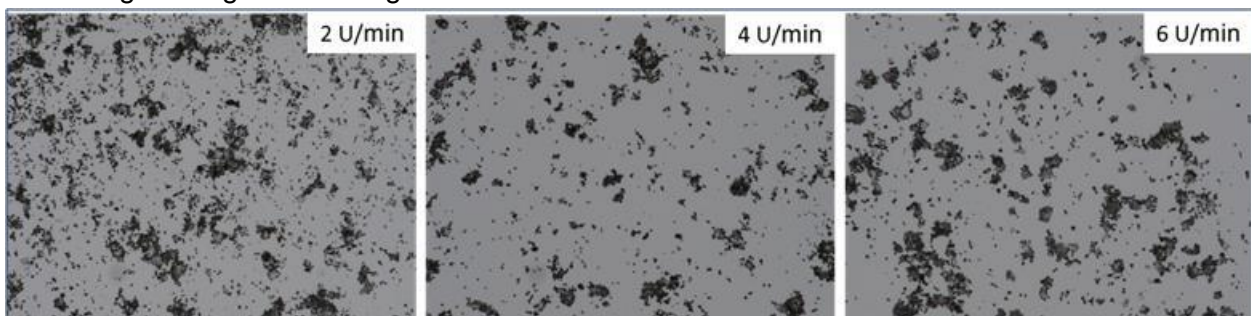


Abbildung 18: Lichtmikroskopische Aufnahmen der geförderten Pulvermischungen bei verschiedenen Drehzahlen

Es zeigt sich, dass bei Drehzahlen über 2 U/min keine homogene Förderung der Pulver erfolgt. Insbesondere der Anteil am Material e-conduct nimmt in der Pulvermischung mit steigender Drehzahl ab, da die Förderung sehr inhomogen wird.

Der Versuch die Pulveranteile im Gemisch über eine Floatingmethode basierend auf den sehr unterschiedlichen Dichten zu bestimmen waren nicht erfolgreich. Auch eine gravimetrische Bestimmung durch Ausbrennen des TPU-Pulvers aus dem Gemisch ergab keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Es wurde statt dem theoretischen Masseverhältnis Luvosint/e-conduct von 26/74 Ma % nur ein Verhältnis von 36/64 Ma % ermittelt. Die experimentellen Bedingungen müssen noch weiter optimiert werden.

### **Arbeitspaket 5: Verfahrensentwicklung Pulverapplikation und Fixierung (serieller 2-stufiger Prozess)**

#### Arbeitspaket 5.1: Untersuchung des Auftragsverhaltens der vorab gemischten Materialien mittels vibrationsgesteuerter Düse (TITV Greiz)

Mit der reinen Pulverapplikationseinheit konnten softwaretechnisch nur Strukturen umgesetzt werden, welche aus Einzellinien bestanden (vgl. AP 2.3 ). Während des Abfahrens der Linien wurde jeweils eine Beschleunigungskurve durchlaufen, wodurch zum Erreichen des Endpunktes ein Bremsvorgang vorhanden war. Dieser verbunden damit, dass die Vibration erst nach Erreichen des Endpunktes softwaretechnisch mit einer deutlichen Verzögerung abgeschaltet werden kann, führt zu einer Anhäufung von Pulver an den jeweiligen Endpunkten.

Es ist zu beobachten, dass verstärkte Vibrationen der Achsenbewegungen sich auf den Pulverauftrag auswirken und einen Pulverfluss auslösen können. Es wurden Untersuchungen zu verschiedenen Verfahrensgeschwindigkeiten zwischen 5 bis 80 mm/s untersucht. Bei manchen Anwendungsfällen lohnt sich eine unterschiedliche Geschwindigkeitseinstellung für reine Bewegungsfahrten und solche die mit Pulveraustrag verbunden sind. Die applizierte Pulvermenge ist von der Verfahrensgeschwindigkeit abhängig, wobei bei schnelleren Verfahren weniger Pulver abgelegt wird. Dies wirkt sich positiv auf schmale Konturbreiten aus, jedoch negativ auf Schichtdicken und damit verbunden den Funktionalisierungsgrad.

Bei der kombinierten Anlage aus Pulverdüse und Lasereinheit ist dies bei der Gestaltung der Achsenbewegung einbezogen worden. Die Anhäufung an Endpunkten ist weiterhin gegeben, konnte aber durch eine entsprechende softwaretechnische Anpassung deutlich verringert werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, durch eine Kombinationen von Einzelstrukturlinien die Anzahl an Endpunkten und somit Anhäufungen zu verringern.

Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, war die Pulverablagerung vor der Anpassung der Pulverfrequenz unregelmäßig. Die Linien erschienen verschwommen und es kam sogar zu unerwünschten Pulverablagerungen zwischen den Linien, wenn die Düse von einer Linie zur nächsten wechselte. Nach der Anpassung der Düsenfrequenz auf 500-600 Hz für ES4- und e-Conduct-Pulver sind die Ablagerungen präziser und gleichmäßiger. Die Linien sind schärfer und kontinuierlicher und die Anpassung ermöglicht eine bessere Kontrolle, sodass das Pulver beim Überqueren von Linien nicht unkontrolliert auf das Substrat fällt. Auch die Pulveransammlungen am Ende der Linien wurden deutlich reduziert.

Um es genauer zu erläutern: Verschiedene Pulver haben je nach Form, Partikelgröße und Kohäsionseigenschaften unterschiedliche Reibungseigenschaften auf der Oberfläche. Diese Eigenschaften beeinflussen, wie präzise das Pulver entlang des geplanten Pfads abgelagert wird. Beispielsweise neigen kugelförmigere Partikel dazu, gleichmäßiger zu fließen und aufgrund der geringeren Reibung glattere Linien bei einer definierten Ablagerungsgeschwindigkeit zu erzeugen. Im Gegensatz dazu führen unregelmäßig geformte Partikel, wie das plättchenförmige ES4, zu einer höheren Oberflächenreibung, was zu einer unregelmäßigen Ablagerung führen kann. Wie in Abbildung 19 zu sehen ist, konnte dieses Problem bereits in der ersten Entwicklungsphase durch eine Optimierung der Düsenfrequenz sowie gezielte softwareseitige Anpassungen der Abscheidegeschwindigkeit deutlich gemildert werden.

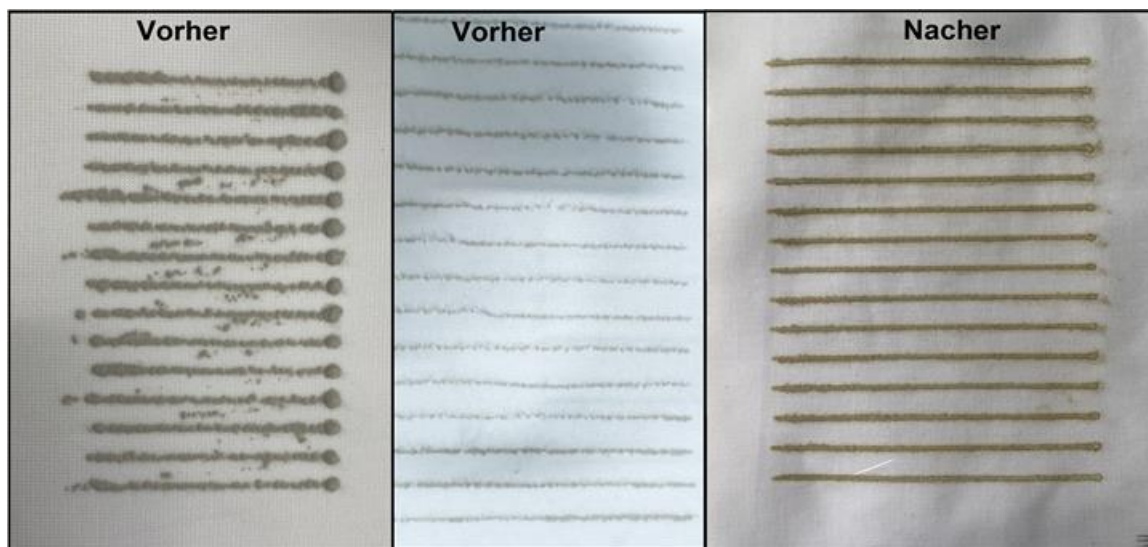


Abbildung 19: Vorher- und Nachher-Bilder von Pulverbahnen, die auf eine Textiloberfläche aufgetragen wurden, vor der Laserfixierung.

Angesichts des Frequenzbereichs wurden alle Pulverproben mit einem Signalgenerator auf die Fähigkeit getestet, Sinuswellen über das Piezoelement zu erzeugen, um Linien abzuschneiden. Die Verwendung unterschiedlicher Wellenformen zur Verbesserung der Pulverabscheidungseffizienz bleibt jedoch ein weiterer Bereich, der für zukünftige Projekte detaillierter untersucht werden muss und Potenzial für weitere Forschung bietet.

Es wird empfohlen, das Pulver vorsichtig in die Düse zu einzufüllen, um Verdichtungen zu vermeiden, die anschließend den Pulveraustrag negativ beeinflussen oder sogar verhindern. Dazu können die vibrationsgesteuerten Zuführungsrinnen verwendet werden, um ein besonders sanftes Einrieseln zu gewährleisten.

#### Arbeitspaket 5.2: Untersuchung zur LASER-basierten Fixierung der Pulvergemische (TITV Greiz)

Wichtig ist eine genaue Positionierung der Laserfixierung in Relation zur gepulverten Bahnstruktur. Bei getrennten Pulveranlage (Pulverapplikationseinheit separat von Lasereinheit) wird die Bearbeitungsfläche entnommen und in der Laborlaseranlage manuell eingesetzt. Abhängig vom Bediener kommt es hierbei zu minimalen Abweichungen, die eine optimale

Fixierung verhindern. Bei Linienbreiten von wenigen Millimetern kann eine Abweichung von Hundertstelmmillimetern bereits einen deutlichen Einfluss auf das Fixierergebnis haben.

In der kombinierten Laser-Pulveranlage ist dieser manuelle Arbeitsschritt nicht mehr vorhanden, jedoch wird eine Abstimmung zwischen Laser- und Pulverdüsenverfahrweg trotzdem notwendig (vgl. AP 2.3).

Die Laserbestrahlung des aufgetragenen Pulvers führt zu einem Sintern der Binderpartikel und somit zu einer ersten Schichtbildung. Eine Substrateizung kann das Ergebniss verbessern, ist jedoch abhängig von Temperatur, Substratdicke und Polymerpulver und muss entsprechend angepasst werden.

Zusätzlich zur diskontinuierlichen Pulverablage und zur Häufchenbildung am Ende jeder Linie waren der Laserfokus, die Wärmeeinflusszone und die Positionierung des Lasers in Bezug auf die Pulverkotnr zunächst nicht korrekt ausgerichtet, wie in Abbildung 20 gezeigt. Diese Fehlanpassung beeinflusste die Wärmeeinflusszone und hinterließ oft bräunliche Brandspuren auf Substraten insbesondere bei dem Mischgewebe „Emma“ mit Baumwollanteil. In einigen Fällen wurden lokale Verbrennungen oder die Bildung von Löchern auch bei den Polyestersubstraten beobachtet (Abbildung 20). Eine geringfügige Anpassung der Konturposition im xy-Koordinatensystem sorgte für Resonanz in der Wärmeeinflusszone und stellte sicher, dass die Laserenergie vollständig vom Pulvergemisch absorbiert wurde, um das Sintern zu ermöglichen, anstatt vom Substrat aufgenommen zu werden.

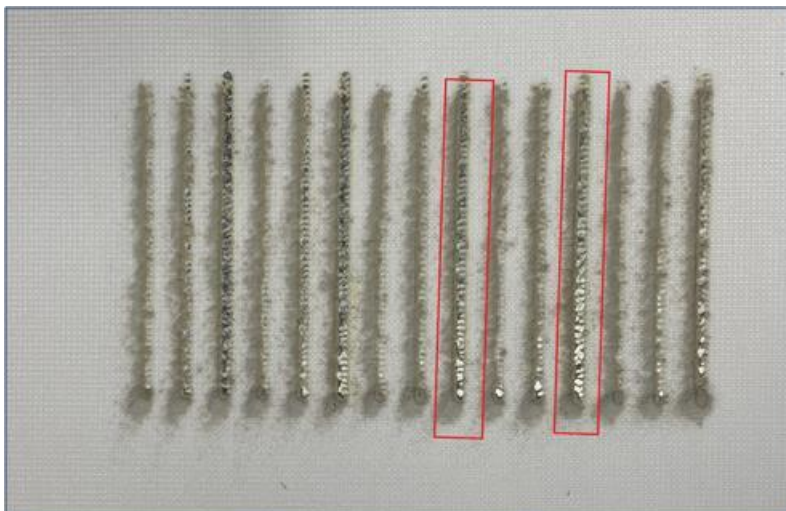


Abbildung 20: Fehlangepasste Laserkontur in Relation zur Pulverkotnr.

Diese Notwendigkeit zur Konturanpassung wurde zusätzlich durch den Laser-Fokustest unterstützt, der die optimale Fokushöhe des Lasers in der Maschine und die eingestellte Laserenergie auf dem Substrat untersuchte, um die Wärmeeinflusszone zu bestimmen. Diese Tests ermöglichten es, die erforderliche Laserfokussierung für verschiedene Substrate zu ermitteln. Die Diagramme in Abbildung 21 zeigen den Bereich des Laserfokus von 20 bis 50 mm auf der Mikrometerschraube für verschiedene Laserleistungen und Lasergeschwindigkeiten. Da das Projektziel Linien mit einer Breite von weniger als 1,5 mm vorgab, wurden die Parameter, die eine Wärmeeinflusszone mit  $\pm 10\%$  der 1,5 mm Breite ergaben, grün markiert. Unter diesen optimalen Bereichen wurde eine geeignete Kombination aus Laserfokus und Laserenergie ausgewählt.

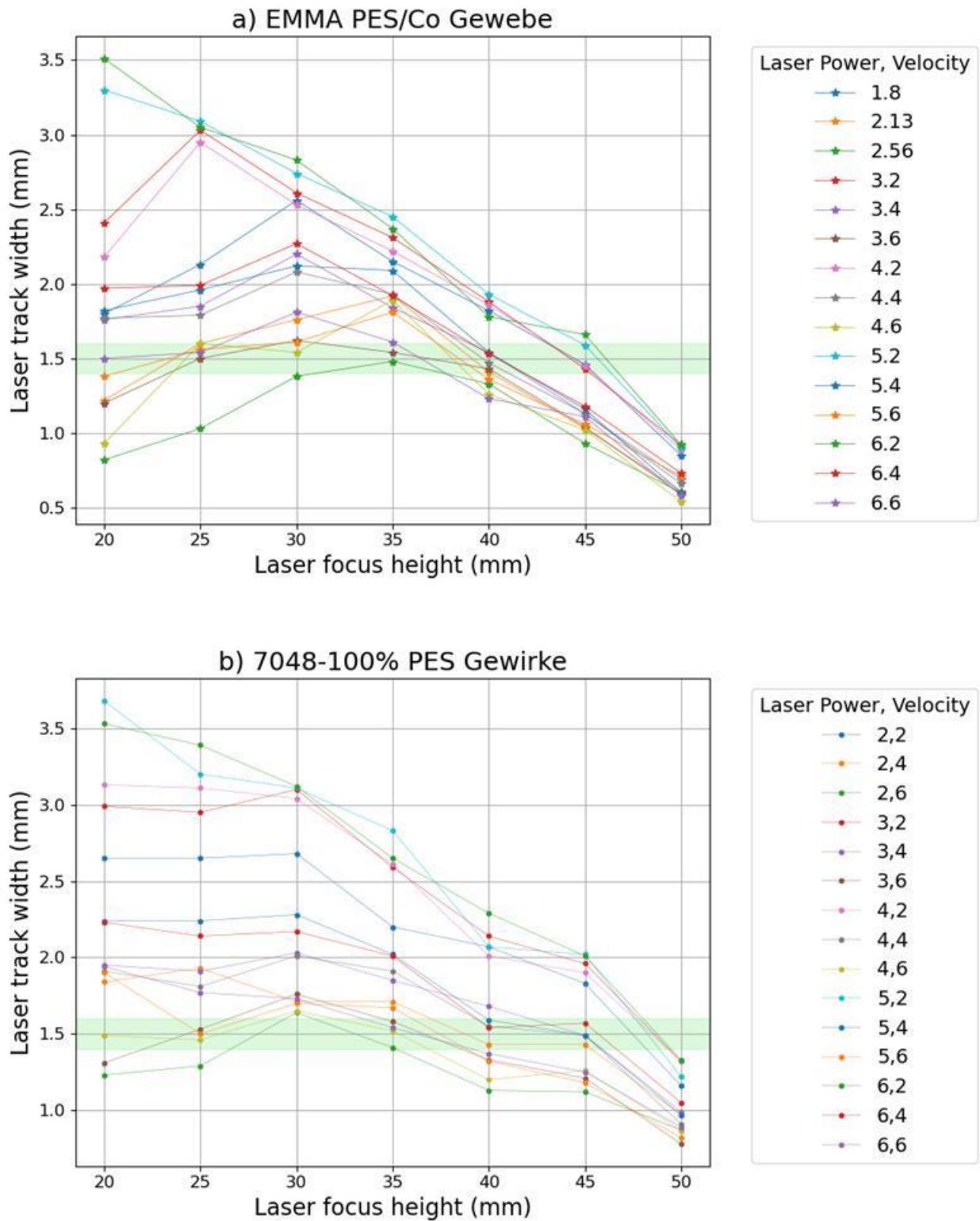


Abbildung 21: Laser-Fokustest zur Bestimmung der Wärmeeinflusszone auf Textilsubstraten: (a) EMMA-Gewebe 65 % PES, 35 % Baumwolle; (b) 100 % PES -7048.

Diese Untersuchung hat zudem die Anpassung der Lasereinstellungen ermöglicht, um die gewünschte Konturbreite zu erzielen, sodass sowohl breitere als auch schmalere Pulverbahnen im Vergleich zur Zielbreite von 1,5 mm erzeugt werden können. Damit wird ein breiteres Spektrum an Anwendungen möglich, von größeren Heizpads bis hin zu feineren leitfähigen

Linien. Darüber hinaus bildet dieses Verständnis die Basis für zukünftige Forschungen, um eine empirische Formel zu entwickeln, die in Software implementiert werden kann. Diese Formel die Festlegung der Laserparameter durch die Eingabe von Substratdicke und thermischen Absorptionskoeffizienten und gewährleistet so eine präzise Energiezufuhr für optimales Sintern. Dadurch wird eine übermäßige Absorption der Laserenergie durch das Substrat, eine unzureichende Pulversinterung oder eine Verkohlung der Pulverpartikel durch zu hohe Energie vermieden.

Für dünne Pulverbahnen einfach bis dreifach gepulvert, spielt eine Vorwärmung der Pulverstruktur vor der Laserfixierung keine signifikante Rolle für das Schichtbildungsergebnis. Wichtig wird dies, sobald auf bereits fixierte Pulverstrukturen weitere Funktionslayer aufgebracht werden sollen. Um dann nicht nur eine Schichtbildung in der losen Schicht, sondern auch eine Verbindung mit der darunterliegenden Schicht zu erzeugen, wird ein Vorwärmen empfohlen um gute Haftungsergebnisse zu erreichen, wie aus dem reinen Selektiven Laserprozess (SLS) bekannt sind.

#### Arbeitspaket 5.3: Entwicklung eines Verfahrens zur in-Line Fixierung des Pulvers mittels LASER (TITV Greiz)

Basierend auf den Ergebnissen der vorangegangenen Arbeitspakete wurde ein Verfahren zur in-Line Laserfixierung der applizierten Pulverstrukturen entwickelt.

Die im Labor angefertigte Pulvermischung wurde vorsichtig in die Düse eingefüllt. Für größere Mengen können die vibrationsgesteuerten Zuführungsrinnen verwendet werden.

Anschließend erfolgt die Applikation der Pulvermischungen mittels vibrationsgesteuerter Düse. In Anlehnung an die Eigenfrequenz der Pulvermischung wird eine geeignete Applikationsfrequenz gewählt. Anschließend erfolgt die Laserfixierung der applizierten Schichten, wobei eine genaue Abstimmung zwischen Koordinatensystem der Düse sowie des Lasers unabdingbar ist. Schon kleinste Abweichungen führen zu einer Verschlechterung der Schichtbildung sowie zur möglichen Schädigung des Textilsubstrates.

Neben den Laserparametern müssen zusätzlich auch weitere Verfahrensparameter beachtet werden. Bei der Verwendung von hygroskopischen Pulvern muss die Luftfeuchte einbezogen und dokumentiert werden. Es wird eine Luftfeuchte unter 60 % empfohlen, wobei dies immer vom verwendeten Pulver abhängig ist und vorab bestimmt werden muss.

#### **Arbeitspaket 6: Verfahrensentwicklung Pulverapplikation und Fixierung (1-stufiger Prozess)**

##### Arbeitspaket 6.1: Untersuchung des Auftragsverhaltens der im Prozess gemischten Pulverkomponenten mittels Düse und simultaner LASER-basierter Anschmelzung (EAH Jena)

Für die Entwicklung des Verfahrens und zum Vergleich der Zielgrößen haben sich das TITV und die EAH auf 100 mm lange Linien als Pulverstrukturen festgelegt. Für diese Geometrie wurden Breiten, Höhen, elektr. Widerstände und Prozessunsicherheiten aufgenommen und gegenübergestellt.

In Vorversuchen wurden verschiedene  $\delta Z$ -Variationen verwendet und zwei optimale  $\delta Z$ -Werte (67,4 mm und 77,4 mm) für weitere Experimente ermittelt. Diese Werte wurden aufgrund ihrer

Fähigkeit, gleichmäßige Spuren auf Textilien zu erzeugen, ausgewählt. Die Hauptversuche wurden mit Bewegungen in der X- und Y-Achse durchgeführt, wie in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Mittlere Linienkennwerte für  $\delta Z$  Variationen mit verschiedenen Achsenrichtungen.

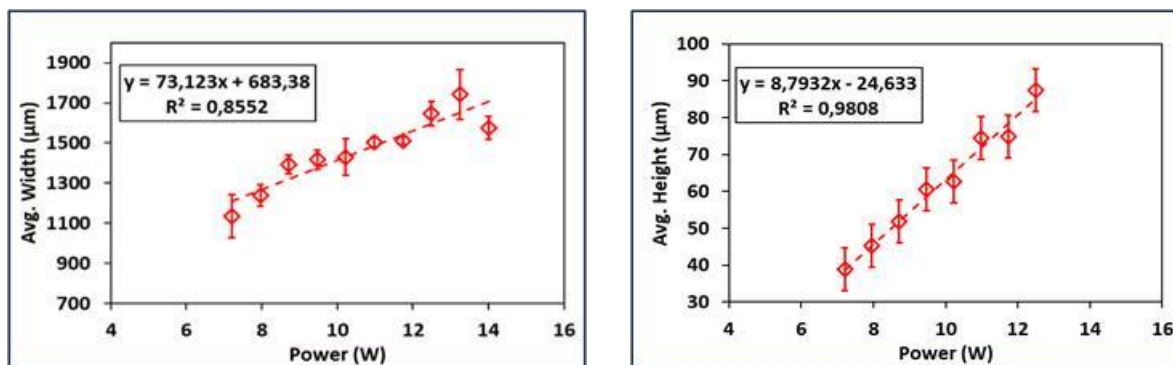
Laserleistung (W)	Geschwindigkeit (mm/sec)	$\delta Z$ (mm)	Achsrichtung	Linienbreite ( $\mu\text{m}$ )	Linienhöhe ( $\mu\text{m}$ )	Widerstand (Ohm)
10.60	15.60	77.4	100 mm Y-axis	0.0	682.6	0.0
10.60	31.20	77.4	100 mm Y-axis	1525.6	104.4	71.7
10.60	46.90	77.4	100 mm Y-axis	1235.4	49.2	2785.7
10.60	15.60	77.4	100 mm X-axis	3436.6	325.2	68.4
10.60	31.20	77.4	100 mm X-axis	2230.6	127	107.0
10.60	46.90	77.4	100 mm X-axis	1576.0	65.8	661.7
10.60	15.60	67.4	100 mm Y-axis	1712.6	423	1675.7
10.60	31.20	67.4	100 mm Y-axis	1481.4	55.8	340.3
10.60	46.90	67.4	100 mm Y-axis	1246.4	37.6	6448.7
10.60	15.60	67.4	100 mm X-axis	1873.8	381.6	1734.3
10.60	31.20	67.4	100 mm X-axis	1831.2	81.4	216.0
10.60	46.90	67.4	100 mm X-axis	1575.8	57.4	0.0

Bei  $\delta Z$  von 77,4 mm führte die Bewegung in der Y-Achse zu breiteren Spuren, was auf eine bessere Materialverteilung hindeutet. Bei der Bewegung in Y-Richtung wurden die niedrigsten Widerstandswerte erreicht, was auf eine optimale Leitfähigkeit schließen lässt. Alle diese Versuche wurden bei konstanter Leistung mit drei verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt.

Bei  $\delta Z$  von 67,4 mm wurden in der X-Achse gleichmäßige Spuren mit einer definierten Breite und Höhe erzeugt. In der Y-Achse waren die Ergebnisse ähnlich wie in der X-Achse mit leicht verbesserten Widerstandswerten.

Beim elektrischen Widerstand waren die Durchschnittswerte für die mit einem  $\delta Z$  von 77,4 mm hergestellten Bahnen niedriger, insbesondere bei der Bewegung der Y-Achse, was auf bessere Leiteigenschaften hindeutet, wie in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt.

Die Experimente zur Untersuchung des Einflusses der Laserleistung ergaben signifikante Schwankungen der Spurabmessungen und des elektrischen Widerstands. Bei der durchschnittlichen Breite nahmen die Abmessungen der Spur im Allgemeinen mit der Laserleistung zu und erreichten ein Maximum von 13,25 W bei einer Breite von 1742  $\mu\text{m}$  (Abb. 18 a). Jenseits dieses Punktes nahm die Breite deutlich ab, was auf ein mögliches Überschmelzen mit Schnitten oder Löchern im Textil hinweist. Auch die Linienhöhe steigt mit zunehmender Laserleistung.



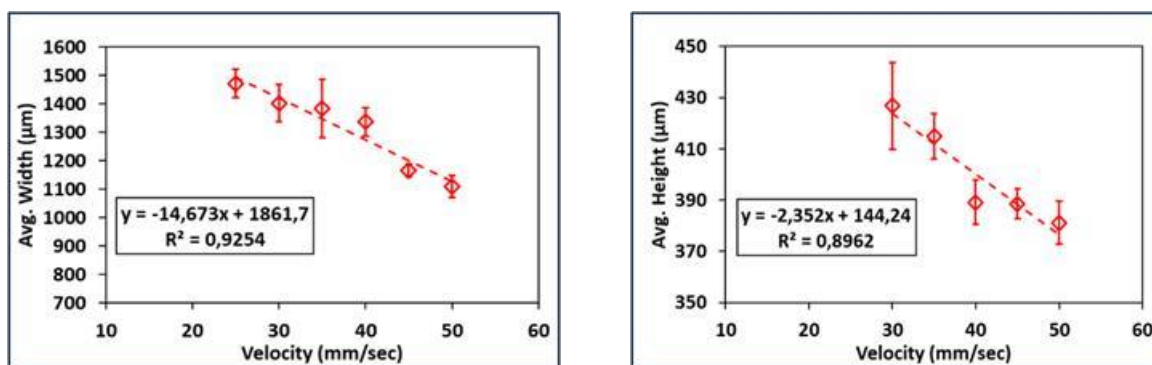
a) b)  
Abbildung 22: Abhängigkeit der Linienabmessungen von der Laserleistung, a) Linienbreite, b) Linienhöhe

Die Widerstandswerte waren an den Enden des Leistungsbereichs (7,20 W und 14,76 W) am niedrigsten, wo sich kein leitender Pfad ausbildete. Die optimale Leitfähigkeit wurde in den mittleren Leistungsbereichen (10,22 W bis 12,49 W) mit Widerstandswerten von nur 78 Ohm beobachtet.

Die Untersuchung der Auswirkung der Geschwindigkeit auf die Bildung von Leiterbahnen ergaben Variationen bei den Abmessungen der Leiterbahnen und dem elektrischen Widerstand. Die Geschwindigkeit wurde von 10 mm/s bis 50 mm/s variiert.

Wie aus Abbildung 23 hervorgeht, nimmt die durchschnittliche Breite der Spur mit zunehmender Geschwindigkeit generell ab. Dies ist auf die geringere Wechselwirkung zwischen Laser und Material zurückzuführen, was zu schmalere Spuren führt. Die Spurbreite zeigt einen ähnlichen Trend, wobei bei höheren Geschwindigkeiten geringere Höhen beobachtet wurden.

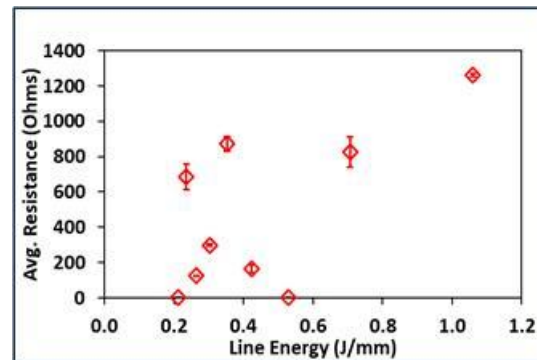
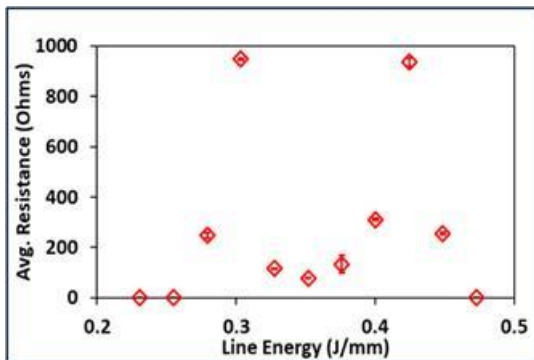
Bei niedrigeren Geschwindigkeiten ermöglichte die längere Wechselwirkungszeit ein besseres Schmelzen und Verbinden des Pulvers, was zu niedrigeren Widerstandswerten führte. Höhere Geschwindigkeiten führten zu einem höheren Widerstand, was auf eine weniger effektive Abscheidung und Bindung hinweist. Die optimalen Werte wurden in einem Bereich von 30 mm/sec bis 45 mm/sec mit einem niedrigsten Widerstandswert von 124,7 Ohm gefunden.



a) b)  
Abbildung 23: Abhängigkeit der Linienabmessungen von der Scangeschwindigkeit, a) Linienbreite, b) Linienhöhe

Diese Ergebnisse zeigen, wie wichtig es ist, die Geschwindigkeit zu optimieren, um leitfähige Leiterbahnen mit den gewünschten Eigenschaften zu erhalten. Der optimale Geschwindigkeitsbereich stellt ein Gleichgewicht zwischen ausreichender Energiezufuhr für das Schmelzen und effizienter Verarbeitungsgeschwindigkeit her.

In Abbildung 24 sind die mittleren Widerstände in Abhängigkeit der Linienenergie bei konstanter Geschwindigkeit und bei konstanter Leistung dargestellt.



a)

b)

Abbildung 24: Abhängigkeit des Widerstandes von der Linienenergie a) bei konstanter Scangeschwindigkeit, b) bei konstanter Laserleistung

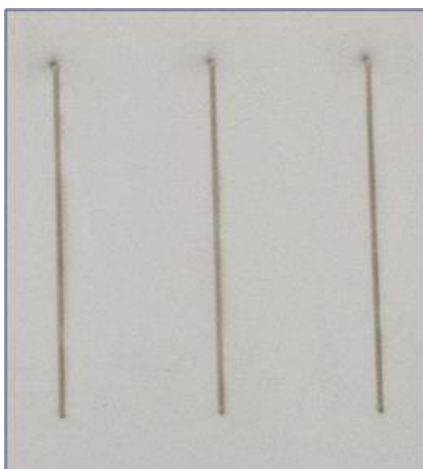


Abbildung 25: Linienförmige Leiterbahnen

Es wird deutlich, dass leitfähige Leiterbahnen bei konstanter Scangeschwindigkeit ab einer Linienenergie größer 0,26 J/mm bis kleiner 0,47 J/mm erzielt werden können. Bei konstanter Laserleistung ist dieser Bereich etwas größer und reicht von 0,21 J/mm bis 1,06 J/mm.

Es wurde festgestellt, dass eine Leistung von 10,6 W, eine Geschwindigkeit von 23,6 mm/s, eine Linienenergie von 0,45 J/mm und  $\delta Z$  von 77,4 mm bei einer Bewegung der Y-Achse die besten Ergebnisse mit einem maximalen Leitfähigkeitswert von 37,04 S/cm erzielen. Dieser Wert liegt im Bereich der FDM-Techniken.

Arbeitspaket 6.2: Entwicklung eines Verfahrens zum Aufbringen von flexiblen Pulverstrukturen im ein-stufigen Prozess (EAH Jena)

Die Erkenntnisse und Prozessparameter aus den Linienuntersuchungen wurden auf komplexere Geometrien übertragen. Dazu haben sich beide Partner auf drei grundlegende Layouts geeinigt, die mit beiden Verfahren gegenübergestellt werden.

Es handelt sich um eine Meander-, eine nested Struktur und zwei 100 mm lange Linien mit Kontaktfuß.

Für diese Strukturen wurden die optimierten Laserparameter verwendet, d.h. mit einer Laserleistung von 10,6 W und einer Vorschubgeschwindigkeit von 31,0 mm/s.

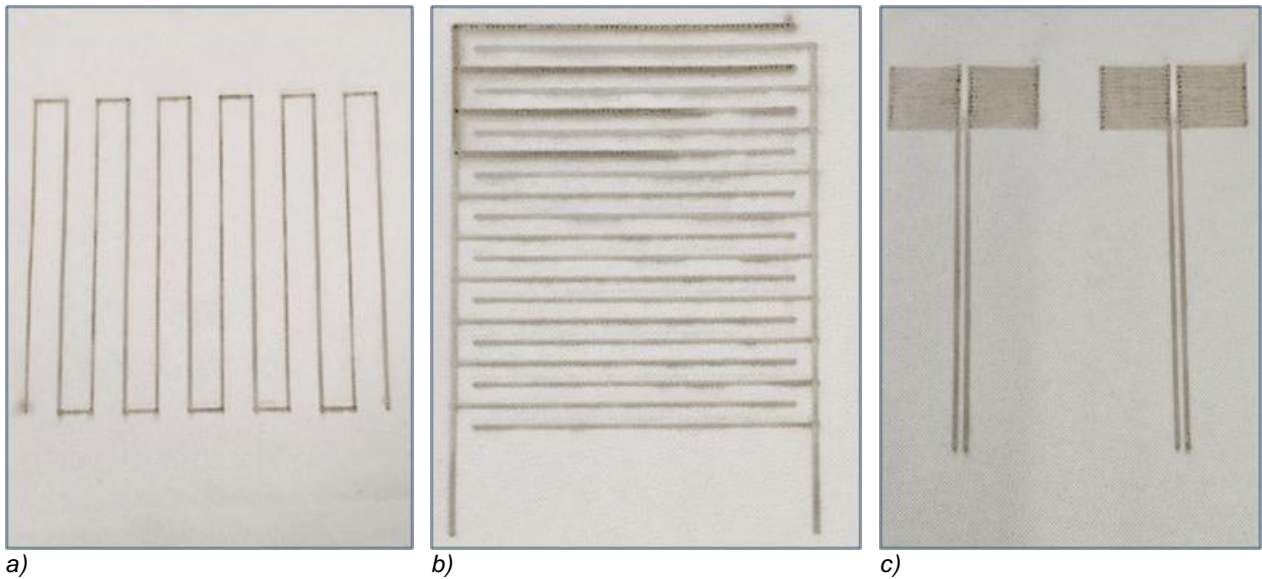


Abbildung 26: Leitfähige Strukturen mit komplexer Geometrie, a) Meander, b) nested Struktur, Demonstratorstruktur

Weiterhin wurden an der EAH Kurvengeometrien programmiert und erfolgreich getestet (Abbildung 27).

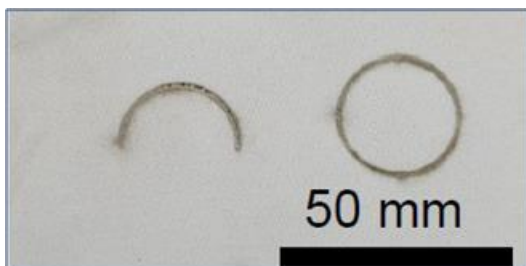


Abbildung 27: Leitfähige gewölbte Strukturen

## Arbeitspaket 7: Nachfixierung

### Arbeitspaket 7.1: Experimentelle Untersuchungen zu anwendungsorientierten Nachfixierverfahren (Pressen, Erhitzen, Heißpressen) (TITV Greiz, EAH Jena)

Um eine ausreichende Nachfixierung der Pulverspuren zu erreichen, wurde die Breite der losen Pulverspur optimiert, um eine konstante Spurbreite von weniger als 1,5 mm sicherzustellen. Anpassungen an der Wärmeeinflusszone des Lasers wurden vorgenommen, sodass der Laser nur die Pulverspur beeinflusste. Wiederholte Messungen bestätigten, dass sowohl die lose als auch die lasergesinterte Pulverspur diese Zielbreite beibehielten. Nach der Laserbehandlung wurde eine Bügelpresse angewendet, und die endgültige Spurbreite wurde unter einem Mikroskop gemessen, um sicherzustellen, dass Änderungen minimal waren und die beabsichtigte Breite von weniger als 1,5 mm beibehalten wurde.

Um eine stabile Haftung bei der Nachfixierung zu gewährleisten, wurden drei Druckstufen beim Heißpressen getestet: A = 115 g/cm<sup>2</sup> (1,1 N/cm<sup>2</sup>), B = 230 g/cm<sup>2</sup> (2,3 N/cm<sup>2</sup>) und C = 350 g/cm<sup>2</sup> (3,4 N/cm<sup>2</sup>). Nur die höchste Druckstufe (C) sorgte für eine zufriedenstellende Haftung, während niedrigere Drücke unzureichend waren. Dieser Nachfixierungsprozess bestätigte eine

stabile Haftung der Funktionsstrukturen am Substrat, wobei die Strukturen manuellen Abriebstest standhielten. Eine genauere Betrachtung erfolgte im Rahmen von Arbeitspaket 8.

#### Arbeitspaket 7.2: Analyse der Haftkräfte der per LASER fixierten Strukturen (TITV Greiz, EAH Jena)

Die mit Laserstrahlung fixierten Schichten wiesen sowohl bei den Proben des TITV Greiz als auch bei denen der EAH Jena eine netzartige Bildung der Funktionsschicht auf. Diese Strukturen hielten einem vorsichtigen manuellen Abriebstest stand, bei dem der Finger sanft über die Beschichtung gestrichen wurde. Die Haftung war ausreichend, sodass die Proben im laserfixierten Zustand transportiert werden konnten, ohne dass sich die Schicht vom Substrat löste. Allerdings boten sie keine zufriedenstellende Haftung bei stärkeren Kräften, was darauf hindeutete, dass eine zusätzliche Nachfixierung erforderlich war.

Während der Nachfixierung wurde der bedruckte Stoff nahe dem Schmelzpunkt des Bindematerials erhitzt, und Druck wurde angewendet. Nach etwa einer Minute, als das Bindemittel zu kühlen begann, sorgte der angewandte Druck dafür, dass die Pulverzusammensetzung fest am Textil haftete. Von den in AP 7.1 getesteten Einstellungen sorgte nur die höchste Druckstufe ( $C = 350 \text{ g/cm}^2$ ) für eine zufriedenstellende Haftung, während niedrigere Druckstufen und das Fehlen der Heißpressung bei manuellem Abrieb durch Fingerdruck unzureichend waren. Dieser Prozess stabilisierte die Funktionsstrukturen effektiv und stellte sicher, dass sie die Abriebfestigkeitsstandards gemäß DIN EN ISO 12947-4 (Martindale-Verfahren) erfüllten, wie in AP 8.3 angegeben.

#### Arbeitspaket 7.3: Entwicklung eines in-Line Prozesses zur Nachfixierung der gepulverten und LASER-vorfixierten Strukturen (TITV Greiz)

Auf der Basis, dass die laserfixierten Strukturen eine ausreichende Haftung am Substrat für einen Transport zeigen, kann eine Nachfixierung räumlich getrennt anliegend an der Pulver-/ Laser-Pulver-Einheit eingerichtet werden. So wird auch ein einfacher Übertrag in die Industrie gewährleistet, da bestehende Heizpressvorrichtungen verwendet werden können.

An der Laser-Pulver-Einheit des TITV Greiz konnten konstruktiv entsprechende Öffnungen an der Anlage integriert werden. Dadurch wird eine Übergabe aus der Maschine auf eine bestehende Kaschierereinheit mit Heiz- und Kühlfeld ermöglicht. Dies bildet die Grundlage, um zukünftig in eine in der Textilindustrie bekannte Arbeitsweise von Rolle zur Rolle überzugehen.

Ein vergleichbares Konzept kann ebenso für die Verfahrenstechnologie der EAH angewendet werden. Dabei gibt es nur minimale Abweichungen in der Umsetzung zwischen den Verfahren der beiden Institute. Das zweistufige Verfahren des TITV Greiz benötigt für die Schichterzeugung mehr Zeit, da die Strukturen zweifach abgefahren werden müssen. Dadurch ist das EAH-Verfahren etwas besser für einen Inline-Nachfixierungsprozess geeignet, insbesondere im Arbeitsrhythmus Rolle zu Rolle. Das Verfahren des TITV Greiz bietet den Vorteil, dass eine bessere Übertragung über die lokale Pulverapplikation besteht. Dadurch lassen sich lokal auftretende Höhenunterschiede, beispielsweise aufgrund der Textilstruktur selbst, besser ausgleichen, was insbesondere für Funktionspulvermischungen relevant ist.

### **Arbeitspaket 8: Charakterisierung und Analyse der Proben**

#### Arbeitspaket 8.1: Auswertung der aufgerauten Oberflächen (EAH Jena)

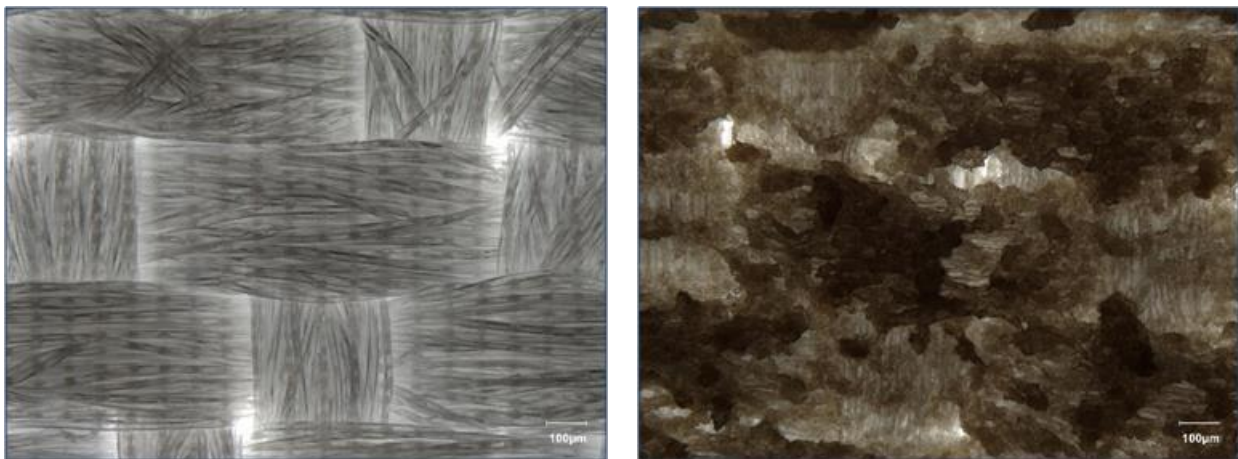
Für die Voruntersuchungen zur Erzeugung einer Mikrorauheit auf der Textiloberfläche wurde mit Fluenzen von 7 bis 35 J/cm<sup>2</sup> und Pulsabständen von 10 bis 80 µm bei 2 konstanten Hatchings (Linienabstand 10 µm und 40 µm) gearbeitet. Höhenunterschiede der Kett- und Schussfäden können über die Rayleighlänge der Laserstrahlung ausgeglichen werden.

In Abhängigkeit der eingebrachten Laserintensität wurden eine Verfärbung des Textils beobachtet (hell bis dunkles Braun). Dies resultiert aus der Modifikation der laserbearbeiteten Textiloberfläche. Wird mit geringer Fluenz sowie großen Puls- und Linienabständen gearbeitet, so wird die Oberfläche aufgrund des niedrigen Energieeintrags nur moderat beeinflusst. Dies ist an den einzelnen dunklen Punkten in Abbildung 28 a zu erkennen, welche die Einwirkung der Einzelpulse erkennen lässt. Wird der Energieeintrag erhöht so kommt es zu einer immer stärkeren Modifikation der Oberfläche bis hin zum Schmelzen des Materials (Abbildung 28 b). Für die Hauptversuche wurden daher drei unterschiedliche Parametersätze ausgewählt, die eine deutlich Veränderung der Textiloberfläche generieren, diese jedoch nicht zu stark beschädigen.

Ein weiterer Vorteil ist die scharfe Konturbegrenzung der laserbearbeiteten Strukturen, (siehe Abbildung 29).

Die in den Experimenten mittels Laserstrahlung aufgerauten Proben zeigen im Vergleich zu den konventionell mit Nassätzen behandelten Textiloberflächen eine deutlich bessere Scheuer- Knick- und Waschbeständigkeit. Es ist jedoch wichtig, die Parameter so zu wählen, dass eine Aufrauung der Oberfläche und damit eine bessere Pulverhaftung ermöglicht wird, ohne andere essentielle Eigenschaften des Textils z. B. die Festigkeit signifikant zu verschlechtern.

Die Ergebnisse konnten dieses Jahr auf der Konferenz LANE (<https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.114>) vorgestellt werden.



a)

b)

Abbildung 28: Lichtmikroskopische Aufnahmen des laserbearbeiteten Textils, a) geringer Energieeintrag, b) hoher Energieeintrag

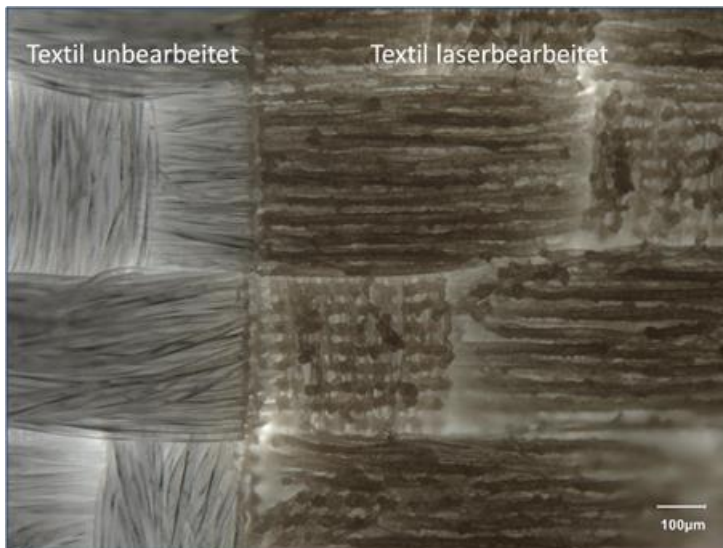
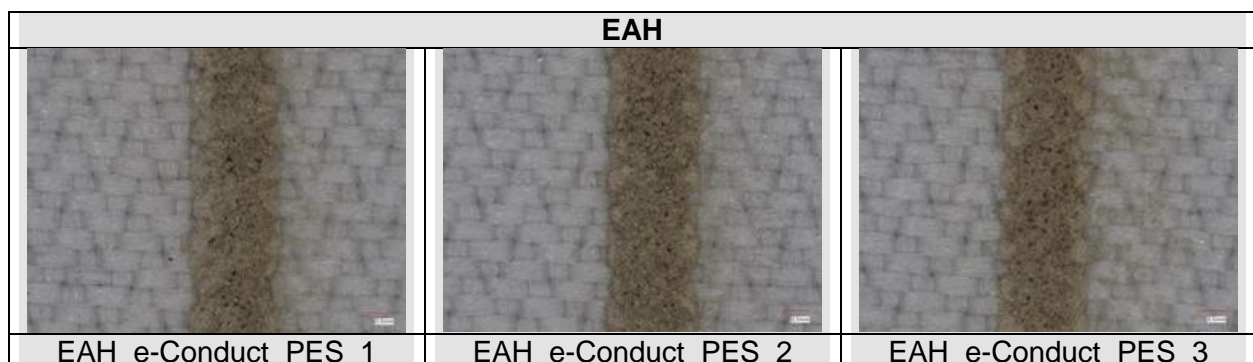


Abbildung 29: Lichtmikroskopische Aufnahmen einer Textiloberfläche mit unbearbeiteten und laserbearbeiteten Bereichen

### Arbeitspaket 8.2: Charakterisierung applizierter Funktionsstrukturen (TITV Greiz, EAH Jena)

Eine weitere Auswertung wurde durchgeführt, um die Breite und den Querschnitt der Pulverspuren zu charakterisieren, indem das Pulver aufgetragen und gerade Linien von 100 mm fixiert wurden. Verschiedene Pulverzusammensetzungen, wie z. B. E-Conduct mit TPU und ES4 mit TPU, wurden auf Polyester 7048-Substrat und PES/CO EMMA-Substrat aufgebracht, lasergesintert und heißgepresst. Die Proben wurden unter einem Lichtmikroskop bei 100-facher Vergrößerung beobachtet, wobei alle Bilder unten eine 0,5-mm-Skala zeigten. In Abbildung 30 ist die erzielte Produktionskonsistenz dargestellt. Bei den TITV-Proben mit einem PES-Substrat erstreckte sich die wärmebeeinflusste Zone über die Pulverspuren hinaus. Obwohl keine umfassende mechanische Analyse durchgeführt wurde, wurde das Erscheinungsbild des Gewebes im Makromaßstab als akzeptabel erachtet, wobei nur geringfügige Verbrennungen beobachtet wurden. Insbesondere bei baumwollhaltigen Textilien werden entsprechende optische Unterschiede (Braunfärbung) jedoch als ein brauner Makel angesehen. Um dies zu beheben, wurde die Fehlausrichtung in der XY-Koordinatenpositionierung optimiert, um sicherzustellen, dass Laserspuren nicht mehr direkt auf das Textilsubstrat einwirken. Die Pulverspuren erschienen homogen, kontinuierlich und nahezu scharf und wiesen eine gleichbleibende Durchschnittsbreite mit geringer Standardabweichung auf.



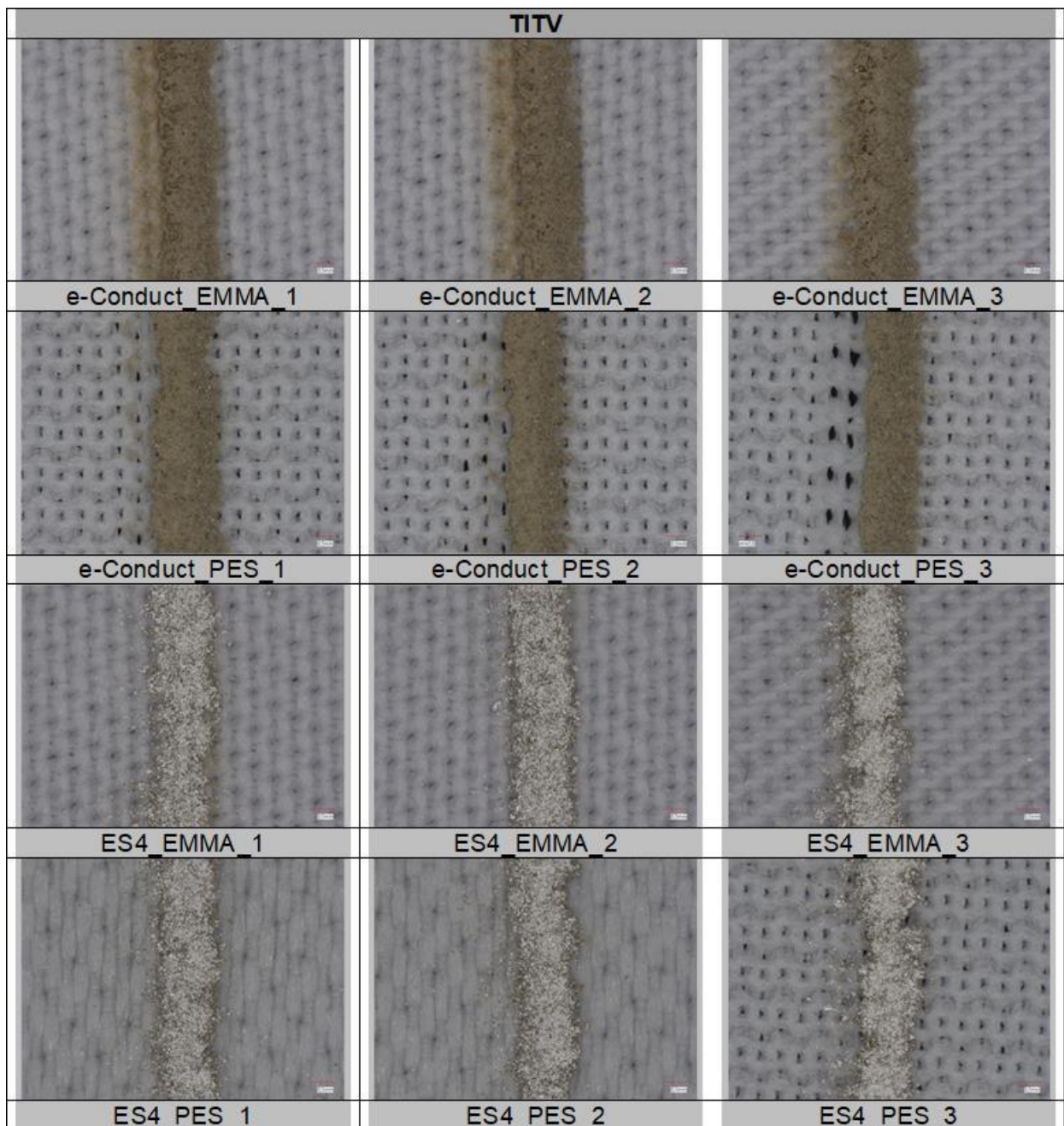


Abbildung 30: Lichtmikroskopische Aufnahmen der erzeugten Proben von EAH Jena und TITV Greiz mit unterschiedlichen Funktionspigmenten bzw. Substraten

## EAH

Zur Charakterisierung der laserbeschichteten Leiterbahnen auf PES-Gewebe wurden die Abmessungen und elektrischen Eigenschaften bestimmt. Die optische Mikroskopie (Digitalmikroskop VHX-7000) wurde eingesetzt, um die Breite der Leiterbahnen zu messen und Defekte zu erkennen, die mit dem bloßen Auge nicht sichtbar sind (Abbildung 31).

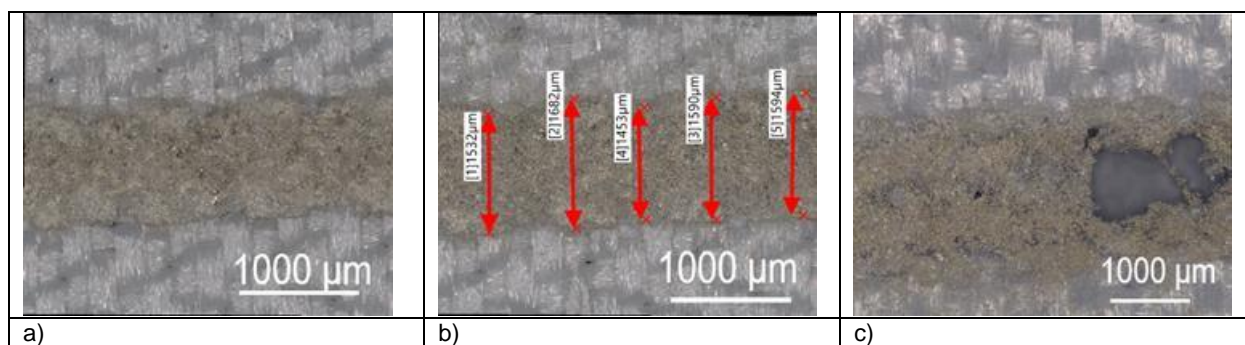


Abbildung 31: Lichtmikroskopische Aufnahmen einer Leiterbahn (x200), a) Bahn mit homogener Pulververteilung, b) Leiterbahn mit Messlinien, c) Leiterbahn mit Loch

Für Höhenmessungen der Leiterbahnen auf Textilien wurde eine digitale Messuhr von Mahr verwendet, die eine Dimensionsanalyse ermöglichte.

Elektrische Widerstandsmessungen wurden mit einem Keithley-Multimeter 2001 unter Verwendung einer Zweipunktsondenmethode mit Endpunktkontakten durchgeführt. Es wurden zwar keine formalen Haftungstests durchgeführt, aber sie wurden visuell bewertet. Der Pulverauftragsprozess wurde zusätzlich durch Hochgeschwindigkeits-Videografie mit dem System der FAST CAM NOVA S16-Serie überprüft (Abbildung 32).

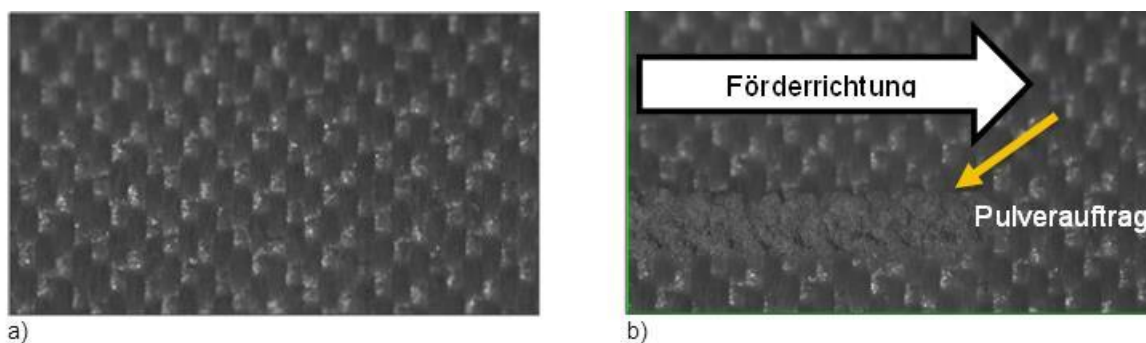


Abbildung 32: Bild aus einer Hochgeschwindigkeitsaufnahme, a) vor dem Pulverauftrag, b) während des Pulverauftrags

Die Ergebnisse der Charakterisierung der Funktionsstrukturen sind in Arbeitspaket 6 detailliert dargestellt.

### Arbeitspaket 8.3: Textilphysikalische und Smart Textiles Prüfungen (TITV)

Zur Charakterisierung der im Rahmen von AP 1 ausgewählten Textilsubstrate wurden die Dicke (DIN EN ISO 5084, Stempeldruck 10 cN/cm<sup>2</sup>) sowie Auflagerungen und Begleitstoffe (DIN 54278-1) bestimmt und ein Tropfentest mit Wasser zur Bewertung der Oberflächeneigenschaften durchgeführt.

Es wurden Waschversuche an pulverbeschichteten Proben durchgeführt. Verglichen wurden Beschichtungen auf einem unvorbehandelten Substrat, einem nasschemische und einem mittels Laserbestrahlung vorbehandeltem Textil. Geprüft wurde die Waschbeständigkeit nach DIN 6330, bei 40 °C unter Verwendung von Normwaschmittel. Nach jedem Waschzyklus erfolgte eine Bewertung der Proben und eine Bestimmung des elektrischen Widerstands der Beschichtung. Nur ein geringer Anteil hielt keine 5 Waschzyklen durch. Dabei zeigten dünne Bahnstrukturen (< 2mm) eine höhere Anfälligkeit zum Ausfall. Dies wird durch die geringere Kontaktfläche zum Substrat begründet. Bei allen Proben gab es einen Anstieg im elektrischen

Widerstand mit den Waschzyklen. Anhand der Waschuntersuchungen lässt sich auf keine eindeutige Bevorzugung eines Vorbehandlungsverfahrens schließen. Die Waschbeständigkeit der laservorbehandelten Substrate scheinen gegenüber der nasschemischen Vorbehandlung etwas besser zu sein. Ein wichtiger Faktor in dieser Betrachtung ist das Textilsubstrat und dessen Ausgangszustand, was bei Auswahl des Vorbehandlungsverfahrens einbezogen werden muss.

Kleine Tests zeigten, dass ein zusätzlicher Heizfixierungsschritt nach dem Waschzyklus den elektrischen Widerstand wieder verbessern, teilweise zurück zum Ausgangswert vor der Wäsche bringen kann. Dies soll bei weiteren Untersuchungen im Nachgang des Projektes weiter betrachtet werden.

Es erfolgte zusätzlich ein Vergleich der Vorbehandlungen mittels pulverbeschichteten Proben (Rakel und Schablonenauftrag) hinsichtlich Scheuerbeständigkeit (DIN EN ISO 12947 (9 kPa, Schaumstoff)) und Biegestabilität mittels Flexomatprüfung (Hausverfahren). Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 9 dargestellt. Nach 50.000 Belastungszyklen im Flexometerverfahren zeigen die Prüflinge nur einen geringen Unterschied im elektrischen Widerstand, wobei bei den alkalisch vorbehandelten Proben der größte Unterschied auftritt. Es lässt sich auf keine eindeutige Bevorzugung eines Vorbehandlungsverfahrens schließen, jedoch zeigt die Laservorbehandlung 3 ((dL40, F35, v2000) auch bei Scheuerbeständigkeit und Flexomat eine gute Performance. (vgl. Tabelle 9)

*Tabelle 9: Übersicht zu den Ergebnissen der vergleichenden Charakterisierung zwischen unvorbehandelter Probe und nasschemisch bzw. laserbasierter Vorbehandlung mit manuell applizierter Pulverschichten (streifenförmiges Layout) für das Substrat 100% Polyester Gewirke*

	Scheuerbeständigkeit		Flexomat		Waschen	
	Ausgangszustand	Nach 50.000 Touren	Ausgangszustand	Nach 50.000 Zyklen	Ausgangszustand	Nach 5. Wäsche
	unvorbehandelt		unvorbehandelt		unvorbehandelt	
<b>Gemessener Widerstand in Ohm [Ω]</b>	0,6	Ausfall	1,5	1,71	0,0064	0,409
	alkalisiert		alkalisiert		alkalisiert	
<b>Gemessener Widerstand in Ohm [Ω]</b>	0,35	Ausfall	32	54	0,0084	2,283
	Laservorbehandelt 1 (dL10, F7, v1500)		Laservorbehandelt 1 (dL10, F7, v1500)		Laservorbehandelt 1 (dL10, F7, v1500)	
<b>Gemessener Widerstand in Ohm [Ω]</b>	0,1	Ausfall	1,36	1,27	0,0081	0,262
	Laservorbehandelt 2 (dL10, F14, v2000)		Laservorbehandelt 2 (dL10, F14, v2000)		Laservorbehandelt 2 (dL10, F14, v2000)	
<b>Gemessener Widerstand in Ohm [Ω]</b>	0,2	11,7	2,77	2,62	0,007	0,108
	Laservorbehandelt 3 (dL40, F35, v2000)		Laservorbehandelt 3 (dL40, F35, v2000)		Laservorbehandelt 3 (dL40, F35, v2000)	
<b>Gemessener Widerstand in Ohm [Ω]</b>	0,25	2,23	1,19	1,18	0,0033	0,048

Tabelle 10: Messergebnisse des elektrischen Widerstands vor und nach Scheuerbelastung (DIN EN ISO 12947 (9 kPa, Schaumstoff) der am TITV Greiz mittels Pulverdüse und Laserfixierung erstellten Proben

Widerstand vor und nach der Scheuerprüfung (Ohm)		
	Widerstand Ausgangszustand	Widerstand nach Scheuerprüfung DIN EN ISO 12947
	0 Touren	50000 Touren
e-conduct/TPU		
EMMA-65%PES/35%Co	25,63	Ausfall
PES -7048	71,04	Ausfall
ES-4/TPU		
EMMA-65%PES/35%Co	1,62	2521,38
PES -7048	2,28	22076,85

Tabelle 11: Messergebnisse des elektrischen Widerstands vor und nach Prüfung der Waschbeständigkeit (nach DIN 6330, 40 °C, Normwaschmittel) der am TITV Greiz mittels Pulverdüse und Laserfixierung erstellten Proben

Widerstand vor und nach der Prüfung der Waschbeständigkeit (Ohm)												
	Widerstand original	Widerstand nach Prüfung Waschbeständigkeit (nach DIN 6330, 40 °C, Normwaschmittel)										
		1. Wäsche	1. Wäsche	2. Wäsche	2. Wäsche	3. Wäsche	3. Wäsche	4. Wäsche	4. Wäsche	5. Wäsche	5. Wäsche	
	Vor Wäsche	Zustand nach Wäsche	Nachfixierung	Zustand nach Wäsche	Nachfixierung	Zustand nach Wäsche	Nachfixierung	Zustand nach Wäsche	Nachfixierung	Zustand nach Wäsche	Nachfixierung	
e-conduct/TPU												
EMMA-65%PES/35%Co	45.81	0	61.91	0	280.57	0	79.67	0	1347	0	2469.77	
PES -7048	61.98	0	40.17	0	98.79	0	65.32	0	183.8	0	100.33	
ES-4/TPU												
EMMA-65%PES/35%Co	11.31	1371	71.21	6000	421.61	8333.33	80.13	205.33	22.3	900	2825.6	
PES -7048	10.92	0	40.16	96.67	19.98	34.67	242.93	37.67	30.03	36.3	95.4	

Für die digital hergestellten Proben, die nach dem Nachfixierungsschritt mit der Bügelpresse elektrischen Widerstandsmessungen unterzogen wurden, wurden drei Proben jedes Pulververbundstofftyps (e-conduct/TPU und ES4/TPU) und jedes Substrattyps (EMMA-65%PES/35%Co und PES-7048) für Abrieb- und Waschtests hergestellt. Für die e-conduct-Proben konnte nach einer Scheuerbelastung von nach 50.000 Zyklen keine Leitfähigkeit mehr bestimmt werden, wie in Tabelle 11 gezeigt. Im Gegensatz dazu behielten die ES4-Proben eine geringe Leitfähigkeit; diese hohen Widerstandswerte (von 20 - 25 kOhm) sind jedoch für praktische Anwendungen nicht akzeptabel. Die manuell hergestellten Proben zeigten ähnliche Ergebnisse für die unbehandelten Substrate. Daher sollte sich die zukünftige Arbeit auf die Verwendung einer Oberflächenaktivierung mit Ultrakurzpulslasern zur Vorbehandlung konzentrieren, um eine bessere Oberflächenhaftung und Abriebfestigkeit zu erzielen. Die Messungen wurden in verschiedenen Stadien durchgeführt, darunter nach 100, 500, 1000, 5000, 10.000, 20.000, 30.000, 40.000 und 50.000 Zyklen, wobei der Einfachheit halber hier nur die Ergebnisse nach 50.000 Zyklen dargestellt werden.

Beim Waschtest wurden die Proben nach jedem Zyklus mit denselben Temperatureinstellungen wie beim Nachfixierungsschritt heißgepresst. Trotz sehr hoher Widerstandswerte oder vollständigem Verlust der Leitfähigkeit nach jedem Waschzyklus wurde die elektrische Leitfähigkeit der Proben nach der Heißpressbehandlung weitestgehend wiederhergestellt. Dies zeigt, dass mit dem vorgeschlagenen Pulverbeschichtungsverfahren hergestellte Textilien ihre Funktionalität auch nach dem Waschen wiederherstellen können. Bei jedem Waschzyklus kann der Benutzer die Funktionalität des Textils durch Wärmeanwendung wiederherstellen. Darüber hinaus wurden als Waschbedingungen standardmäßige Haushaltswaschzyklen mit häufig verwendeten Waschmitteln verwendet, was die Praktikabilität unserer gedruckten Proben unter typischen Nutzungsbedingungen weiter unterstützt. Die Waschtestbedingungen waren mit denen der manuell hergestellten Proben vergleichbar und die Ergebnisse waren nahezu identisch.

Ähnlich wie beim Waschtest und beim Bügeln des Tests nach jedem Test wird erwartet, dass sich die Spuren durch Abrieb nach jeweils 500 oder 1000 Zyklen wiederherstellen lassen.

### **Arbeitspaket 9: Applikation und Fixierung komplexer Strukturen**

#### Arbeitspaket 9.1 Applikation von komplexen und anwendungsorientierten Funktionsstrukturen auf Textiloberflächen (TITV Greiz, EAH Jena)

Konturen mit kombinierten Geometrien aus Linien und Bögen werden nun als komplexe Strukturen definiert. Eine durchgängige Geometrie aus Bögen, die gerade Linien verbindet, wurde zur Testung entworfen. Das allgemeine Layout und die Funktionalität des Demonstrators wurden festgelegt. Erste Drucktests für Konturen, die sowohl gerade Linien als auch Bögen enthalten, wurden durchgeführt. Zur schnellen und effizienten Erstellung der Strukturen können .dxf-Dateien aus 2D- oder 3D-Geometrien der Software SolidWorks generiert werden. Alternativ kann auch die Software der Maschine am TITV Greiz verwendet werden, um Linien und Kurven zu erzeugen, die an Endpunkten verbunden sind.

Es wurden Strukturen wie ineinander verschachtelte Linien, Mäanderstrukturen mit geraden Linien und Mäanderstrukturen, bei denen die geraden Linien durch Halbkreise verbunden sind, erstellt. Dabei wurden Linien von 100 mm Länge mit einem Abstand von 10 mm zwischen den Mäanderstrukturen erstellt. Beim Importieren von .dxf-Dateien aus SolidWorks oder anderen Programmen muss die Software einen zusätzlichen Schritt hinzufügen, um Linien und Kurven mit der Funktion „Join“ zu verbinden. Dadurch entfällt die manuelle Angabe der Start- und Endpunkte der Linien und die numerische Steuerung (NC) erkennt die Konturen automatisch. Pulverdüse und Lasermodul folgen dann präzise und kontinuierlich den Konturen, ohne dass die Reihenfolge der Abscheidung und Sinterung unterbrochen wird. Andernfalls entstehen unregelmäßige Start- und Endpunkte und es entstehen deutlich sichtbare Übergänge ohne fließende Verbindung, wie in Abbildung 33 dargestellt. Solche unverbundenen Linien in komplexen Konturen können dazu führen, dass leitfähige Pulverbahnen an den Verbindungsstellen unterbrochen werden, da die Software ohne die Funktion „Join“ die Verbindung der Linien nicht korrekt an die Maschine kommuniziert.

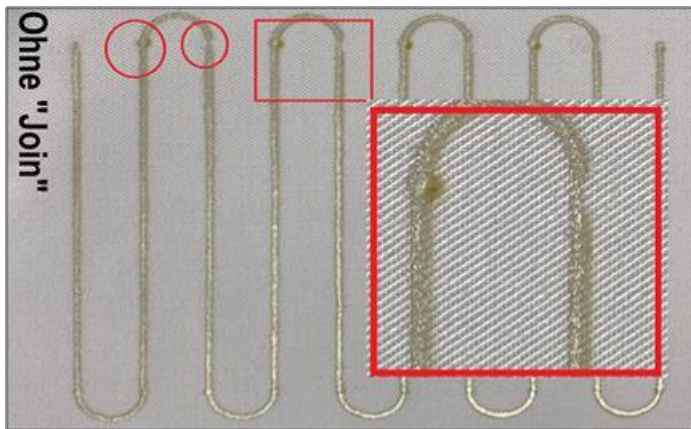


Abbildung 33: Mäander-Endpunkte, wenn die „Join“-Option bei importierten .dxf-Dateien nicht angewendet wird.

### Arbeitspaket 9.2: Erarbeitung von Arbeitsabläufen und Routinen zur konturenscharfen Erstellung komplexer Strukturen (TITV Greiz)

In Abhängigkeit der Substrathöhe muss der Abstand der Düsenöffnung zu Substratoberfläche angepasst werden, da dieser einen großen Einfluss auf die Applikationsbreite der Bahn sowie die Kantenschärfe aus. Je höher der Abstand, desto breiter streut das Pulver und erzeugt undefiniertere Kantenstrukturen. Ist die Düsenöffnung zu nah an der Textiloberfläche kann es passieren, dass der Pulverfluss durch bereits aufgebrachte Pulvermengen beeinflusst wird.

Im Arbeitsablauf muss vor der Beschichtungsapplikation daher eine Messung der Substratdicke in den Prozessablauf aufgenommen werden, soweit diese nicht bereits bekannt ist.

Einen deutlichen Einfluss hat ebenfalls die Verfahrensgeschwindigkeit der Düse insbesondere auf die applizierte Pulvermenge. Um homogene Schichtdicken zu erzielen, bietet es sich an, die Strukturen zweimal abzufahren und Pulver zu applizieren. Sollten mehrere Einzelfiguren im Design enthalten sein, kann eine Optimierung der Fahrwege zur Zeitoptimierung beitragen.

Die Software der Maschine am TITV Greiz ermöglicht eine getrennte Steuerung der Parameter für die Pulverauftragung und das Lasermodul. So kann die Pulverauftragungsgeschwindigkeit, je nach Fließigenschaften des Pulvers (wie in AP 5.1 beschrieben), zwischen 0,01 m/min und 6 m/min variieren, während der Laser mit höherer Geschwindigkeit und minimalem Energieverbrauch betrieben werden kann. In diesem Fall wurde der Laser auf eine Leistung von 2 % und eine optimale Geschwindigkeit von entweder 4 m/min oder 6 m/min eingestellt, wie in Abbildung 21 empfohlen. Aufgrund der höheren Oberflächenreibung von ES4-Pulver wurde eine langsamere Auftragsrate verwendet, während für e-conduct eine etwas schnellere Auftragsrate gewählt wurde. Diese Funktion bietet auch Potenzial für zukünftige Arbeiten, da sie eine selektive Pulverkonzentration ermöglicht, was für die Herstellung komplexerer Strukturen verwendet werden kann.

### **Arbeitspaket 10: Validierung der Applikations- und Fixierprozesse sowie Aufbau/ Test Demonstrator**

Sowohl mit dem zweistufigen Prozess am TITV Greiz als auch der einstufigen Technologie an der EAH Jena könnten filigrane, leitfähige Strukturen erzeugt werden. Für beide Verfahren konnte eine grundlegende Prozessabfolge entwickelt werden, wobei weitere Optimierungen im Nachgang an das Projekt nicht ausgeschlossen sind. Am TITV Greiz wurden sowohl Silberflakes als auch die silberbeschichteten Aluminiumpigmente im Beschichtungsprozess eingebracht, wobei die EAH Jena sich im Projekt auf die Applikation der letzteren fokussiert

hatte. Alle erzeugten Bahnstrukturen zeigen aber gute bis sehr gute elektrisch Leitfähigkeitswerte und mit guter Homogenität und Reproduzierbarkeit anzufertigen.

Aus den Gesprächen mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurden Strukturen für elektronische Schaltungen sowie Sensoraufbauten am industrierelevantesten erachtet. Als Demonstratoren wurde daher unter anderem ein paralleler Linienaufbau gewählt, an welchen LEDs aufgebracht werden können. 100 mm lange Linien mit einer Breite von < 1,5 mm und einem Abstand von ebenfalls 1,5 mm wurden mit e-conduct/TPU und Silberflakes/TPU-Pulverzusammensetzungen auf verschiedenen Substraten wie STG-PES, 7048 PES und EMMA 65PES/35Co gedruckt. Ein Vergleich des STG-PES-Textils als Substrat und der e-conduct/TPU-Pulverzusammensetzung ist in Abbildung 34 dargestellt. Hier leuchten die SMD-LEDs und zeigen damit sinnbildlich das Projektziel, leitfähige Bahnen für oberflächenmontierte Geräte wie Sensoren und Aktoren zu schaffen.

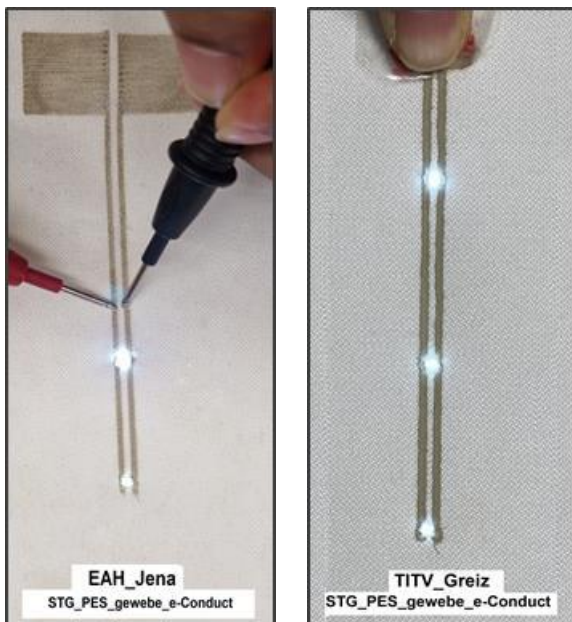


Abbildung 34: Demonstratoren der EAH Jena (links) und des TITV Greiz (rechts) bestehend aus zwei parallel, leitfähigen Bahnen erzeugt mittels Pulverbeschichtung und Laserfixierung und darauf aufgebrachten LEDs, welche durch die Kontaktierung einer Stromzuführung zum leuchten angeregt werden

Andererseits wurde eine Interdigitalstruktur zum Aufbau eines Feuchtesensors sowohl vom TITV Greiz als auch der EAH Jena realisiert.

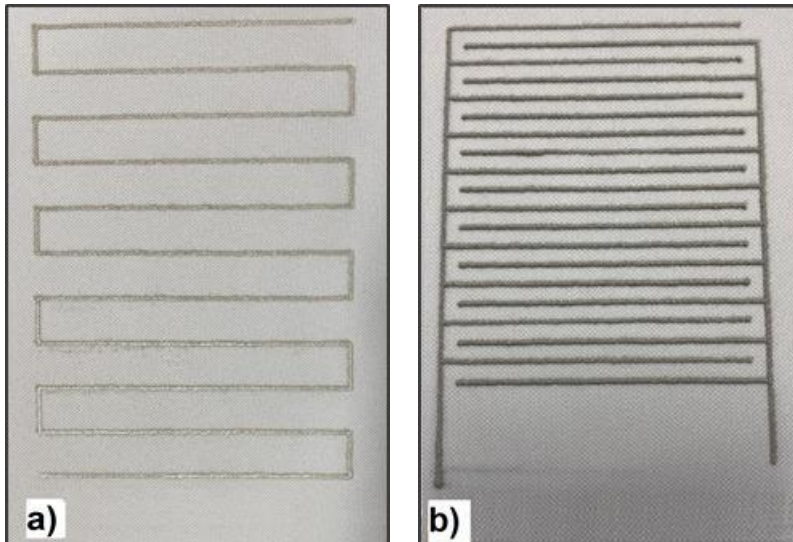


Abbildung 35: Komplexe Strukturen, die durch das TITV Greiz erzeugt wurden: a) Mäander mit geraden Linien, b) Interdigitalstruktur

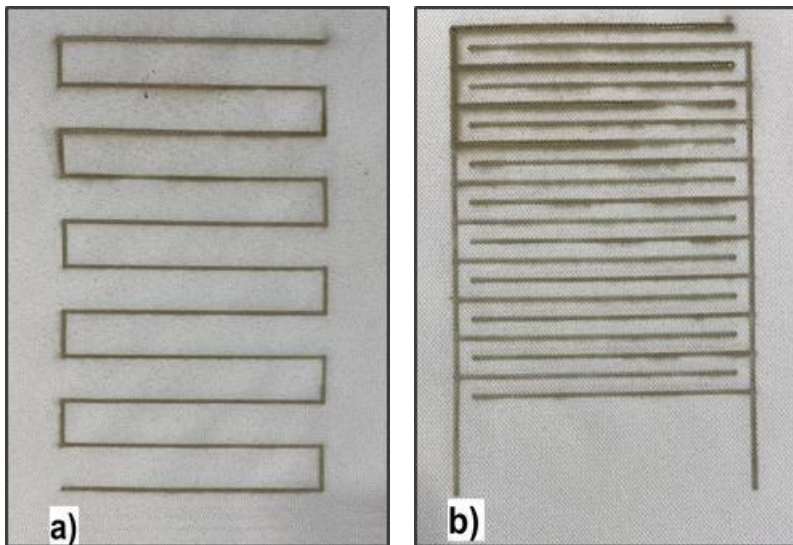


Abbildung 36: Komplexe Strukturen, die durch EAH Jena erzeugt wurden: a) Mäander mit geraden Linien, b) Interdigitalstruktur.

### **Arbeitspaket 11: Aufbereitung der Versuchsergebnisse, Betrachtung der wirtschaftlichen Verwertung, Berichtslegung**

Mit Abschluss der Untersuchungen sind eine Systematisierung der Ergebnisse, eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und die Erstellung des Abschlussberichtes erfolgt. Es wurde eine Präsentation mit der Ergebnisübersicht erstellt und den Firmen des projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt. Die Projektergebnisse bieten den KMU eine Grundlage für die Umsetzung in eigene technische Entwicklungen.

## 4. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Die Projektbearbeitung wurde in enger Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses (PA) durchgeführt. Mitglieder des PA waren:

- Michael Schneider - Born GmbH
- Georg Josef Dropalla - Brillux GmbH & Co. KG Industrielack
- Anja Flach - C.H. Müller GmbH
- Dr. Thomas Herrmann - Dr. Herrmann GmbH & Co.
- Johannes Hirschmann - ECKART GmbH
- Michael Weiss - GTV Verschleißschutz GmbH
- Dr. Thomas Krech - IVOC-X GmbH
- Thorsten Jahn - Jahn GmbH & Co. KG
- Jan Langebach - JENOPTIK Automatisierungstechnik GmbH
- Dr. Marcus Rechberger - Lehmann & Voss & Co. KG
- Maik Lippe - Optris GmbH
- Dr. Jörg Weber - Orbit Sensorfusion GmbH (ehemals osyso Dr.-Ing. Jörg Weber)
- Ramona Wich - Songwon-ATG GmbH
- Dr. Jakob Alexander - UVEX SARETY Textiles GmbH

Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens und nach dessen Abschluss sind die in Tabelle 12 bzw. Tabelle 13 aufgeführten Maßnahmen für den Transfer der Forschungsergebnisse durchgeführt worden/geplant. Änderungen zur Antragsstellung sind in fetter Schrift kenntlich gemacht.

Tabelle 12: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

<b>Zeitraum</b>	<b>Maßnahme</b>	<b>Ort/ Rahmen</b>	<b>Ziel/ Bemerkung</b>
TITV Greiz Homepage	Verbreitung Forschungsthema	Vorstellung des Projektes	Projektmonat 3-5; Veröffentlichung zur ersten PA Sitzung auf dem LinkedIn Profil des TITV Greiz Bekanntmachung zum Projekt auf der Homepage der AG Bliedner (EAH Jena)
4 Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses (PBA)	Ergebnistransfer, Diskussion der Ergebnisse	TITV Greiz & EAH Jena	Sitzung 1: 08.11.2022 Sitzung 2: 18.04.2023 Sitzung 3: 21.11.2023 Sitzung 4: 08.05.2024
entspr. AP 10 Aufbau von Funktionsmustern zur Darstellung der Projektergebnisse an konkreten Beispielen	Information und Akquirierung weiterer industrieller Anwender, Nutzung für Präsentationen	TITV Greiz, EAH Jena	erfolgt
Abschlussbericht	Zusammenstellung der Forschungsergebnisse	TITV Greiz & EAH Jena	erfolgt
Präsentation Ergebnisse auf nationaler Konferenz	Information industrieller Anwender	13.Mittweidaer Lasertagung	8. und 9. November 2023
Präsentation Ergebnisse auf internationaler Konferenz	Information industrieller Anwender	LOPEC München	LOPEC: 01.03.2023

Tabelle 13: Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

<b>Zeitraum</b>	<b>Maßnahme</b>	<b>Ort/ Rahmen</b>	<b>Ziel/ Bemerkung</b>
Präsentation Ergebnisse bei „TITV Innovationen“	Information industrieller Anwender	TITV Greiz	18.09.2024
Präsentation Ergebnisse auf nationalen/ internationaler Konferenz	Information industrieller Anwender	-LANE -Konferenz Laser in Manufacturing -Symposium Additive Fertigung (AF) -IPF Dresden -Anwenderforum Smart Textiles	LANE: 17.09.2024  Symposium AF: 26.09.2024  IPF Dresden-29.NDVaK: 06.11.2024
Publikation der Ergebnisse	Information industrieller Anwender	Fachzeitschriften, wie Coating International, Laser in Manufacturing -Lane Conference-2024	-Procedia CIRP, Vol. 124, 2024
Publikation der Ergebnisse	Information industrieller Anwender	TITV Webseite, Hochschulzeitschrift Facetten (EAH Jena)	geplant für 1. Jahreshälfte 2025
Berücksichtigung der Projektergebnisse bei der Erarbeitung von Prüfvorschriften und bei der Normung von Smart Textiles	Übernahme der Normentwürfe	DIN und EU- Gremien	laufend
Unterstützung von Unternehmen der Textil- bzw. Beschichtungs-industrie und Veredelungen zur Technologieumsetzung	Industrielle Umsetzung der Projekt-ergebnisse in Industrieunternehmen durch Unterstützung bei; Integration der Technologie in eine Produktionsanlage gemeinsamen ZIM Projekten; Gezielter Schulung von Mitarbeitern zur Technologie	Unternehmen der Textil- bzw. Beschichtungsindustrie und Veredelungen	laufend
Übernahme der FuE Ergebnisse in die Aus- und Weiterbildung	Qualifikation, Weiterbildung und Lehre	Seminare des TITV Greiz, Vorlesung und Workshop der Additiven Fertigung (EAH Jena)	Folgejahre nach Projektende

## **5. Wirtschaftlichkeit und Umsetzung der Ergebnisse in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU)**

### **5.1. Voraussichtliche Nutzung der Forschungsergebnisse in KMU**

In erster Linie werden Textilbeschichter von der entwickelten Technologie profitieren können. Mit den im Projekt untersuchten Verfahren zur partiellen, funktionalen Beschichtung von flexiblen Substraten haben sie ein neues Handwerkszeug, um auf filigrane und individuelle Kundenwünsche zu reagieren, insbesondere solche, welche mit etablierten Verfahren nicht

zuverlässig umgesetzt werden können. Durch die bereits in der Projektlaufzeit entwickelten Konzepte zur in-Line Fertigung wird der Übertrag in industrielle Szenarien deutlich beschleunigt. Mit der entwickelten Technologie lässt sich zuverlässig die textile Welt mit der Elektronikindustrie verbinden.

Für Smarte Textilien wird in Prognosen mit einem jährlichen Wachstumsraten von 30 % gerechnet, welche unter anderem durch die Trend wie Individualisierung und digitale Transformation aber auch neue Mobilität getrieben werden. Allein in Deutschland wird für 2030 von einem Marktvolumen von Smart Textiles von 4.191 Mio Euro ausgegangen. [66]

Die in diesem Projekt untersuchten Applikations- bzw. Funktionalisierungsverfahren bilden eine wichtige Grundlage für die Entwicklung und Herstellung neuartiger und zuverlässiger Produkte, insbesondere im Bereich von textilbasierten Leitungs- und Heizstrukturen.

Die Hersteller von Pulverwerkstoffen, insbesondere von polymeren Binderwerkstoffen, aber auch die Hersteller von Funktionspigmenten jeglicher Art profitieren von der entwickelten Technologie. Werden ihre Produkte mit dem Verfahren eingesetzt, so können sie neue Märkte und Kunden erschließen. Neben dem Einsatz von leitfähigen Pigmenten können ebenso andere Funktionspartikel eingesetzt werden und erweitern zusätzlich das Einsatzspektrum.

Die im Forschungsgebiet entstandenen Ergebnisse zur partiellen Applikation und Fixierung von leitfähigen, pulverbasierten Strukturen auf Textilien können wie folgt zugeordnet werden:

In den Fachgebieten:

- Mess- und Regulierungstechnik, Sensorik, Mikrosystemtechnik, auch Automatisierungstechnik
- Elektrotechnik, Elektronik, Elektroniksysteme
- Gesundheits- und Medizintechnik
- Sicherheitstechnik, zivile Sicherheit

In den Wirtschaftszweigen:

- Herstellung von Textilien
- Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen
- Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen
- Luftfahrt

Die Anwender möglicher Endprodukte kommen aus den Bereichen der Smart Textiles, der PSA (Persönliche Schutzausrüstung), der Medizintechnik, der Automobilindustrie und der Elektronikindustrie sowie aus dem Designbereich.

## **5.2. Möglicher Beitrag zur Steigerung der Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit d. KMU**

Die entwickelten Verfahren zur Applikations- und Fixierungsverfahren von lokalen und widerstandsfähigen Funktionsstrukturen auf textilen Oberflächen bilden die Basis für zuverlässige Produkte, wodurch neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Es lassen sich filigrane, leitfähige Funktionsbahnen reproduzierbar auftragen, welche sich mit konventionellen

bzw. digitalen Druckverfahren nicht erzeugen lassen. Insbesondere der hohe Funktionalisierungsgrad der applizierten Schichten hebt sich hier von Konkurrenzverfahren ab. Des Weiteren bieten die entwickelten Technologien große Vorteile hinsichtlich Designfreiheit, da der Auftrag anhand von digitalen Daten an beliebigen Stellen des Substrates erfolgen kann. Dies ermöglicht es, gezielt auf individuelle Kundenwünsche, insbesondere auch in der Fertigung von Individualmustern und Kleinserien, gezielt eingehen zu können. Zuverlässige Muster steigern die Kundenzufriedenheit und damit auch die Marktstellungen im entsprechenden Anwendungsgebiet. Es werden keine Kosten und Zeit für die Anfertigung von Schablonen benötigt, wodurch eine schnelle Reaktion auf Kundenaufträge zur Verfügung steht. Die Technologie lässt sich neben leitfähigen Funktionsbahnen auf andere Funktionalisierungen wie leitfähig oder thermochrom übertragen.

Durch die Übertragung in den industriellen Maßstab wird den Herstellern eine Technologie zur Verfügung gestellt, welche vielfältige Anwendungsgebiete bedienen und somit für die Anfertigung eines breiten Produktspektrums genutzt werden kann.

Den überwiegend kleinen und mittelständigen deutschen Textilveredelungs- und Textildruckbetrieben sowie des Textilmaschinenbaus werden mit dem Projekt Möglichkeiten zur Erweiterung ihrer Produktionspalette und der Sicherung der Marktchancen insbesondere im Bereich der Technischen sowie Smarten Textilien geboten.

### **5.3. Aussagen zur voraussichtlich industriellen Umsetzung der FuE-Ergebnisse**

Das abgeschlossene Forschungsvorhaben liefert wichtige Voraussetzungen zur reproduzierbaren Fertigung von leitfähigen und widerstandsfähigen Funktionsstrukturen auf textilen Substraten, welche sowohl zur Herstellung von Sensorik und elektronischen Schaltungen als auch zur Erzeugung von Heizstrukturen Verwendung finden. Den Unternehmen wird so ein neues Verfahren zur Realisierung elektronischer Funktionalisierung zur Verfügung gestellt, wobei diese flexibler und zuverlässiger auf textilem Trägermaterial integriert wird. Des Weiteren kann die Technologie mit bestehenden Verfahren wie der textiltechnologischen Integration (u. A. Weben, Sticken) von leitfähigen Fäden oder Drähten verbunden werden. Beispielsweise lassen sich individualisierter Kontaktierungspunkte zu setzen, die zur Integration von elektronischen Bauteilen wie LEDs oder Zuleitungen dienen können. Damit stehen den Unternehmen Grundlagen zur Verfügung, die Produktion von Smart Textiles neu aufzubauen oder bestehende Produktionsverfahren zu ergänzen und so verbesserte, innovative Produkte zu erzeugen.

Die industrielle Umsetzung der Forschungsergebnisse erfordert eine enge branchenübergreifende Zusammenarbeit von Herstellern der Elektronikindustrie, Textilindustrie, des Textilmaschinenbaus, des Textildruckes und den Produzenten von Smart Textiles sowie von Pulverherstellern. Das TITV Greiz wird interessierte Unternehmen bei der Umsetzung der FuE-Ergebnisse unterstützen.

Auf Basis der hier erzielten FuE-Ergebnisse erschließen geförderte Projekte mit KMU spezielle Anwendungsfelder und geben den Unternehmen die Möglichkeit, maßgeschneiderte Lösungen und individualisierte Produkte voranzubringen.

## 6. Verwendung der Zuwendung

### 6.1. Personaleinsatz

In Tabelle 14 und Tabelle 15 wird der Personaleinsatz im Realisierungszeitraum des Projektes dargestellt.

Tabelle 14: Zusammenstellung des Personaleinsatzes im Realisierungszeitraum des TITV Greiz

Jahr	HPA-A	HPA-B	HPA-C	HPA-D
2022	4,4	1,65	1,6	0,95
2023	9,45	4,64	4,1	2,54
2024	8,625	5,115	1,4	0
<b>Gesamt</b>	<b>22,475</b>	<b>11,405</b>	<b>7,1</b>	<b>3,49</b>

Tabelle 15: Zusammenstellung des Personaleinsatzes im Realisierungszeitraum der EAH Jena

Jahr	HPA-A	HPA-B	HPA-C	HPA-D	HPA-E
2022	4				
2023	12				
2024	8				
<b>Gesamt</b>	<b>24</b>				

### 6.2. Gerätebeschaffung

Das TITV Greiz beschaffte im Jahr 2023 einen Labormischer. Aufgrund von Preiserhöhungen wurde der eingeplante Betrag um ca. 867,00 € überzogen, wobei diese Restsumme in Rücksprache mit dem Forschungskuratorium aus der Pauschale finanziert wurde. Des Weiteren wurden 2023 Vibrations-Zuteilrinnen durch das TITV Greiz gekauft. Für beide Geräte zusammen wurden dafür 22.064,03 € eingesetzt.

Die EAH Jena beschaffte 2022 zwei Pulvertöpfe für die Pulverförderanlage in einem Gesamtwert von 10.933,96 Euro. Für den Pulverauftrag wurde außerdem eine 3-Strahl-Koaxialdüse mit unterschiedlichen Injektionswinkeln in Höhe von 4.777,85 Euro angeschafft.

### 6.3. Leistungen Dritter

Im Rahmen der Projektarbeit hat das TITV Greiz eine Drittleistung an die Dr. Herrmann GmbH & Co. KG vergeben durch ein beschränkte Ausschreibungsverfahren ohne Teilnahmewettbewerb nach § 11 UVgO. Die Drittleistung in Höhe von 3.375,00 € (netto) wurde im März 2023 vergeben und der Leistungszeitraum lag im März – April 2023. Inhalt der Drittleistung waren verschiedene Pulvercharakterisierungsleistungen. Die Ergebnisse wurden vom Drittleister abschließend als Bericht dem TITV Greiz zur Verfügung gestellt.

Die EAH Jena hat keine Leistung an Dritte vergeben.

### 6.4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleisteten Arbeiten waren notwendig und angemessen.

## 7. Literatur

- [1]Forschungskuratorium Textil e. V., „Perspektiven 2035“, März 2020.
- [2]E-Textiles 2021-2031: Technologien, Märkte und Akteure. 2021. Zugegriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.idtechex.com/de/research-report/e-textiles-2021-2031-technologien-m-rkte-und-akteure/828>
- [3]„IGF 20541 BR - Gewebt-gedruckte Strukturen“, 2021 2019, Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e.V.
- [4]„InnoKom 49VF190010 "PerMagTex“, 2021 2019, Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e. V.
- [5]„InnoKom MF 160194 „Pulver-DL-Fix“, 2019 2017, Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e. V.
- [6]I. Gehrke, Smart Textiles Production. Overview of Materials, Sensor and Production Technologies for Industrial Smart Textiles. Switzerland, 2019.
- [7]T. Dias, „Electronic Textiles: Smart Fabrics and Wearable Technology“, Elsevier Science, 2015.
- [8]T. Kirstein, Multidisciplinary know-how for smart-textiles developers. 2013.
- [9]D. Y. Zimmermann, „Digital erzeugte Leiterbahnen auf Textilien“, Leuze Verlag. Zugegriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.leuze-verlag.de/aufsaetze/digital-erzeugte-leiterbahnen-auf-textilien>
- [10]„Entwicklung von Textilien mit elektrolumineszierenden Eigenschaften“, 2010, Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF).
- [11]R. Peters, T. Gerdes, und B. Sedlmayr, „IMPULSPAPIER: SMART TEXTILES Cross-sektorale Potenziale nutzen – Smart Textiles von der Forschung in die Praxis bringen“, Oktober 2020, AFBW – Allianz Faserbasierte Werkstoffe Baden-Württemberg e.V.
- [12]B. Wepner, W. Rhomberg, D. Schartinger, und G. Zahradnik, „Smart Textiles Studie“, 2020, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie Deutsch. [Online]. Verfügbar unter: <https://produktionderzukunft.at/de/publikationen/smart-textiles-studie.php>
- [13]„Beheizbare Unterwäsche als Alltagslösung von - » warmx.de“. Zugegriffen: 16. August 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.warmx.de/>
- [14]„Datenblatt Textilheizung“, DIGEL HEAT Infrarotheizungen. Zugegriffen: 27. August 2021.

[Online]. Verfügbar unter: <https://www.digel-heat.de/seite-nicht-gefunden.php>

[15]„TEXIBLE - Realise your next innovation with Smart Textiles“, TEXIBLE. Zugegriffen: 27. August 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.texible.at/shop/texible-wisbi-betteinlage/>

[16]L. M. Castano und A. B. Flatau, „Smart fabric sensors and e-textile technologies: a review“, *Smart Mater. Struct.*, Bd. 23, Nr. 5, S. 053001, Mai 2014, doi: 10.1088/0964-1726/23/5/053001.

[17]M. Güpner, J. Bliedtner, und H. Zeidler, „Process characterization in laser metal deposition of hot work tool steel“, gehalten auf der Proc. of 11th CIRP Conference on Photonic Technologies (LANE2020), 2020.

[18]M. Güpner, A. Patschger, und J. Bliedtner, „Influence of Process Parameters on the Process Efficiency in Laser Metal Deposition Welding“, *Physics Procedia*, Bd. 83, S. 657–666, 2016, doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.068.

[19]M. Guepner, S. Rietzke, R. Paetzold, J. Bliedtner, und J. P. Bergman, „Process characterization of powder based laser metal deposition on thin substrates“, *Journal of Laser Applications*, Bd. 30, Nr. 3, S. 032506, Aug. 2018, doi: 10.2351/1.5040630.

[20]M. Guepner, T. Drawert, und J. Bliedtner, „Process characterization in laser metal deposition of EN AC-43000“, *Journal of Laser Applications*, Bd. 31, Nr. 2, S. 022315, Mai 2019, doi: 10.2351/1.5096114.

[21]„ProLaln - Entwicklung einer angepassten, automatisierten Prozesskette zum laserbasierten Instandsetzen von Aluminiumgusserzeugnissen“, Ernst-Abbe-Hochschule (EAH) Jena.

[22]Y.-H. Chueh, X. Zhang, C. Wei, Z. Sun, und L. Li, „Additive Manufacturing of Polymer-Metal/Ceramic Functionally Graded Composite Components via Multiple Material Laser Powder Bed Fusion“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Bd. 142, Nr. 5, S. 051003, Mai 2020, doi: 10.1115/1.4046594.

[23]E. Reinhold, S. G. A. Heinz, und H. Georg, „Verfahren zur Pulverbeschichtung“, DE000003916793A1

[24]F. Brillowski, H. Zhang, J. Orlik, und T. Gries, „Anwendung evolutionärer Algorithmen bei Drapierprozessen“, *Lightweight Des*, Bd. 10, Nr. 6, S. 68–73, 2017, doi: 10.1007/s35725-017-0057-9.

[25]T. Laumer, T. Stichel, P. Amend, und S. Roth, „Neue Prozessstrategien zur Herstellung von Multi-Material-Bauteilen und Gradientenwerkstoffen“, in Conference: 1. Industriekolloquium des Sonderforschungsbereichs 814 – Additive Fertigung At: Nuremberg, Nürnberg, 2012.

[26]T. Stichel, T. Laumer, M. Raths, und S. Roth, „Strategien zur Erzeugung von dreidimensionalen Multi-Material-Bauteilen“, in Conference: 4. Industriekolloquium des SFB 814, Nürnberg, 2015.

[27]„Multi-Material Deposition of Polymer Powders with Vibrating Nozzles for a New Approach of Laser Sintering“, JLMN, Bd. 13, Nr. 2, 2018, doi: 10.2961/jlmn.2018.02.0002.

[28]S. Lee und J. Park, „Discrete Element Method of the Dynamic Behavior of Flaky Particles Using the Rigid Plate Model“, Multiscale Sci. Eng., Bd. 2, Nr. 1, S. 63–68, 2020, doi: 10.1007/s42493-020-00036-3.

[29]„Intensivschulung zum Qualitätsmanagement in der Pulverbeschichtung“, 11.-6.11 2020, Dr. Herrmann GmbH Dresden.

[30]K. Huraux und J.-C. Durand, „Poudre a base de polyamide et procede de revetement d'objet par fusion de ladite poudre“, EP2531568A1, 12. Dezember 2012 Zugegriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/EP2531568A1/en?q=EP+2531568>

[31]„LaserschutzTex“, 2022 2020, Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e. V.

[32]„Digi-EL-Text“, 2021 2019, Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e. V.

[33]A. Dr. Neudeck, A. Modes, J. Weise, und H.-J. Weiß, „Verfahren und Vorrichtung zum Applizieren einer Funktionsstruktur auf einem textilen Substrat“, DE 10 2015 218 900

[34]M. Ghahremani Honarvar und M. Latifi, „Overview of wearable electronics and smart textiles“, The Journal of The Textile Institute, Bd. 108, Nr. 4, S. 631–652, Apr. 2017, doi: 10.1080/00405000.2016.1177870.

[35]L. Lanzl, K. Wudy, S. Greiner, und D. Drummer, „Selective laser sintering of copper filled polyamide 12: Characterization of powder properties and process behavior“, Polymer Composites, Bd. 40, Nr. 5, S. 1801–1809, 2019, doi: 10.1002/pc.24940.

[36]„<http://www.banntex.de/produkte.html>“. Zugegriffen: 11. November 2024. [Online]

[37]„Entwicklung von sicheren leitfähigen Textilien mit hoher Stromtragfähigkeit und immanentem Schmelzsicherungseffekt - Textilprotektor“, 2014 2012, Textilforschungsinstitut Thüringen-Vogtland e. V.

[38]I. Artem, P. Fabian, S. Gerhard, und W. Richard, „Kleidung mit integrierten gedruckten Displays im Feldtest“, in Tagungsband 2. Symposium Elektronik und Systemintegration ESI 2020: "Intelligente Systeme und ihre Komponenten: Forschung und industrielle Anwendung, Landshut, 2020.

[39]R. Treutlein und J. Hilburger, „Verfahren zur Herstellung von partiell metallisierten Trägersubstraten“, EP1818425A1, 15. August 2007 Zugegriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/EP1818425A1/en?q=EP+1818425>

[40]M. Stoppa und A. Chiolerio, „Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review“, Sensors, Bd. 14, Nr. 7, S. 11957–11992, Juli 2014, doi: 10.3390/s140711957.

- [41]E. Starke, A. Turke, M. Krause, und W.-J. Fischer, „International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems“, in International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, Beijing, Juni 2011, S. 1152–1155.
- [42]R. Parashkov, E. Becker, T. Riedl, H.-H. Johannes, und W. Kowalsky, „Large Area Electronics Using Printing Methods“, in Proc. IEEE 93, 2005, S. 1321–1329.
- [43]S. Stassi u. a., „Nanosized Gold and Silver Spherical, Spiky, and Multi-branched Particles“, in Handbook of Nanomaterials Properties, B. Bhushan, D. Luo, S. R. Schrickler, W. Sigmund, und S. Zauscher, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, S. 199. doi: 10.1007/978-3-642-31107-9\_33.
- [44]P. Tiberto u. a., „Magnetic properties of jet-printer inks containing dispersed magnetite nanoparticles“, Eur. Phys. J. B, Bd. 86, Nr. 4, S. 86, 2013, doi: 10.1140/epjb/e2013-30983-8.
- [45]H.-H. Lee, K.-S. Chou, und K.-C. Huang, „Inkjet printing of nanosized silver colloids“, Nanotechnology, Bd. 16, Nr. 10, S. 2436–2441, Okt. 2005, doi: 10.1088/0957-4484/16/10/074.
- [46]C. Bonten, Kunststofftechnik: Einführung und Grundlagen, 2nd Edition. München: Hanser, 2016.
- [47]N. Bernd, S. Thomas, U. Philipp, R. Stephan, und S. Michael, „Manufacturing of conductive circuits for embedding stereolithography by means of conductive adhesive and laser sintering“, in 8th International Conference on Photonic Technologies LANE 2014, 2014.
- [48]R. D. Schneider, M. Funkler, und S. Frick, „Textile Flächen mit elektrisch leitfähigen Mustern und Verfahren zu deren Herstellung“, DE102007043576A1, 2. April 2009 Zugegriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/DE102007043576A1/en?q=DE102007043576>
- [49]D. C. Craig und E. R. Flores, „System, vorrichtung und verfahren zur herstellung gedruckter elektrisch leitfähiger leitungen“, DE102020116683A1, 21. Januar 2021 Zugegriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/DE102020116683A1/en?q=DE102020116683>
- [50]„Transparent substrate with a pattern of electrically conductive tracks“, DE20019445U1, 23. August 2001 Zugegriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/DE20019445U1/en>
- [51]„Kaltplasmaspritzen“, Textilforschungsinstitut Thüringe-Vogtland e.V.
- [52]H. Mollet und A. Grubenmann, Formulierungstechnik: Emulsionen, Suspensionen, feste Formen. Weinheim: Wiley-VCH, 2000.
- [53]E. Spyrou, Powder Coatings Chemistry and Technology. in European Coatings TECH FILES. online: Vincentz Network, 2014.

[54]J. Y. Zheng und R. L. Ternik, „Development of Low- Dose Solid Oral Tablets Using Direct Compression“, in Formulation and Analytical Development for Low- Dose Oral Drug Products, 1. Aufl., J. Zheng, Hrsg., Wiley, 2009, S. 159–204. doi: 10.1002/9780470386361.ch7.

[55]„Internetseite Chemietechnik“, Zugriffen: 18. August 2024. [Online]  
<https://www.chemietechnik.de/anlagentechnik/foerdertechnik/die-dosis-praezise-einhalten.html>.

[56]J. Koopmann, „Multimaterialdruck von integrierten elektrischen Strukturen mittels selektivem Laserschmelzen“, 2019, doi: 10.19211/KUP9783737608138.

[57]P. D. Bona und G. COCCOLO, „Dosing plant for powder products“, EP3488917B1, 27. Januar 2021 Zugriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter:  
[https://patents.google.com/patent/EP3488917B1/de?q=\(DOSIERANLAGE+F%C3%9CR+PULVERPRODUKTE\)&oq=DOSIERANLAGE+F%C3%9CR+PULVERPRODUKTE](https://patents.google.com/patent/EP3488917B1/de?q=(DOSIERANLAGE+F%C3%9CR+PULVERPRODUKTE)&oq=DOSIERANLAGE+F%C3%9CR+PULVERPRODUKTE)

[58]„Vorrichtung zur Dosierung von pulverförmigem oder granulatartigem Schüttgut“, DE9110949U1, 14. November 1991 Zugriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter:  
[https://patents.google.com/patent/DE9110949U1/de?q=\(Vorrichtung+zur+Dosierung+von+pulverf%C3%B6rmigem+oder+granulatartigem+Sch%C3%BCttgut\)&oq=Vorrichtung+zur+Dosierung+von+pulverf%C3%B6rmigem+oder+granulatartigem+Sch%C3%BCttgut](https://patents.google.com/patent/DE9110949U1/de?q=(Vorrichtung+zur+Dosierung+von+pulverf%C3%B6rmigem+oder+granulatartigem+Sch%C3%BCttgut)&oq=Vorrichtung+zur+Dosierung+von+pulverf%C3%B6rmigem+oder+granulatartigem+Sch%C3%BCttgut)

[59]D. T. Kollmann, „Schwingungsinduziertes Fließen feinstkörniger, kohäsiver Pulver“, Magdeburg, 1967.

[60]W. Speth, „Vorrichtung und Verfahren zur Zuführung und Dosierung von feinem Pulver“, DE102013114384A1, 18. Juni 2015 Zugriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter:  
[https://patents.google.com/patent/DE102013114384A1/de?q=\(Vorrichtung+und+Verfahren+zur+Zuf%C3%BChrung+und+Dosierung+von+feinem+Pulver\)&oq=Vorrichtung+und+Verfahren+zur+Zuf%C3%BChrung+und+Dosierung+von+feinem+Pulver](https://patents.google.com/patent/DE102013114384A1/de?q=(Vorrichtung+und+Verfahren+zur+Zuf%C3%BChrung+und+Dosierung+von+feinem+Pulver)&oq=Vorrichtung+und+Verfahren+zur+Zuf%C3%BChrung+und+Dosierung+von+feinem+Pulver)

[61]R. Riemensperger und E. Flade, „Vorrichtung zur förderung und dosierung von pulver und vorrichtung zur herstellung einer schichtstruktur auf einem oberflächenbereich eines bauelements“, DE102018204429A1, 26. September 2019 Zugriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter:  
[https://patents.google.com/patent/DE102018204429A1/de?q=\(VORRICHTUNG+ZUR+F%C3%96RDERUNG+UND+DOSIERUNG+VON+PULVER+UND+VORRICHTUNG+ZUR+HERSTELLUNG+EINER+SCHICHTSTRUKTUR+AUF+EINEM+OBERFL%C3%84CHENBEREICH+EINES+BAUELEMENTS\)&oq=VORRICHTUNG+ZUR+F%C3%96RDERUNG+UND+DOSIERUNG+VON+PULVER+UND+VORRICHTUNG+ZUR+HERSTELLUNG+EINER+SCHICHTSTRUKTUR+AUF+EINEM+OBERFL%C3%84CHENBEREICH+EINES+BAUELEMENTS](https://patents.google.com/patent/DE102018204429A1/de?q=(VORRICHTUNG+ZUR+F%C3%96RDERUNG+UND+DOSIERUNG+VON+PULVER+UND+VORRICHTUNG+ZUR+HERSTELLUNG+EINER+SCHICHTSTRUKTUR+AUF+EINEM+OBERFL%C3%84CHENBEREICH+EINES+BAUELEMENTS)&oq=VORRICHTUNG+ZUR+F%C3%96RDERUNG+UND+DOSIERUNG+VON+PULVER+UND+VORRICHTUNG+ZUR+HERSTELLUNG+EINER+SCHICHTSTRUKTUR+AUF+EINEM+OBERFL%C3%84CHENBEREICH+EINES+BAUELEMENTS)

[62]F. Longo und G. Durmann, „Mixed metal and high-temperature plastic flame spray powder and method of flame spraying same“, US3723165A, 27. März 1973 Zugriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/US3723165/en>

[63]F. N. Longo, R. A. Miller, und J. D. Reardon, „Coating plastic substrates with minerals“,

EP0066782B1, 7. Januar 1987 Zugegriffen: 11. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/EP0066782B1/en>

[64]P. Beiss, Pulvermetallurgische Fertigungstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-32032-3.

[65]Y. Shivakumar, J. Ullrich, M. Seiler, und J. Bliedtner, „Individual functionalization of textiles by powder coating using laser fixation“, Procedia CIRP, Bd. 124, S. 265–268, 2024, doi: 10.1016/j.procir.2024.08.114.

66]„AFBW-Zahlen, Daten, Fakten Smart Textiles“. Zugegriffen: 15. November 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.afbw.eu/smartex-bw/infothek/zahlen-daten-fakten/>