



**Thomas Mayer-Gall
Leonie Kamps
Yannik Leven
Torsten Textor
Jochen S. Gutmann**

**Bianca-Michaela Wölfling
Tatjana Haaf
Maria-Eleni Tsertsene**

**Weiterentwicklung einer Ausrüstung zur Verbesserung der
Schutzwirkung von Schweißerschutzkleidung gegen flüs-
sige Metallspritzer bei gleichzeitig verbessertem UV-Schutz**

DTNW-Mitteilung

DTNW-Mitteilung Nr. 126

erschienen im Eigenverlag

«Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West gGmbH»

Krefeld, Oktober 21

Thomas Mayer-Gall^{1,2}

Leonie Derksen¹

Yannik Leven¹

Torsten Textor³

Bianca-Michaela Wölfling⁴

Tatjana Haaf⁴

Maria-Eleni Tsertsene⁴

Jochen S. Gutmann^{1,2}

¹ Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West gGmbH, 47798 Krefeld

² Physikalische Chemie, Universität Duisburg-Essen, and Center for Nanointegration Duisburg-Essen, Universitätsstraße, 45117 Essen

³ Hochschule Reutlingen, Fakultät Textil & Design, Alteburgstr. 150, 72762 Reutlingen

⁴ Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH, Schlosssteige 1, 74357 Bönningheim

Weiterentwicklung einer Ausrüstung zur Verbesserung der Schutzwirkung von Schweißerschutzkleidung gegen flüssige Metallspritzer bei gleichzeitig verbessertem UV-Schutz

Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur nach vorheriger Genehmigung des Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West gGmbH

ISSN 1430 - 1954

Das Forschungsvorhaben IGF-Nr. 20143 N der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Reinhardtstraße 12-14, 10117 Berlin, wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der Schlussbericht ist erhältlich beim Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West gGmbH, Adlerstr. 1, 47798 Krefeld.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ZUSAMMENFASSUNG.....	1
1. EINLEITUNG	2
2. STAND DER TECHNIK.....	7
2.1. SCHWEIßERSCHUTZKLEIDUNG	7
2.2. WECHSELWIRKUNG EINES HEIßEN TROPFENS MIT EINER FESTSTOFFOBERFLÄCHE 10	
2.3. UV-SCHUTZ.....	12
2.4. BEKLEIDUNGSPHYSIOLOGISCHER KOMFORT	13
3. ZIELSETZUNG.....	17
3.1. WIRTSCHAFTLICHE ASPEKTE DER ZIELSETZUNG	19
4. EXPERIMENTELLES	22
4.1. CHEMIKALIEN	22
4.2. GEWEBE.....	24
4.3. METHODEN UND GERÄTE	26
4.3.1. <i>FT-IR-Spektroskopie</i>	26
4.3.2. <i>UV-VIS-Spektroskopie</i>	26
4.3.3. <i>Rasterelektronenmikroskopie (REM)</i>	26
4.3.4. <i>Abweisung von flüssigen Metallspritzern</i>	26
4.3.5. <i>Bekleidungsphysiologische Kennzahlen</i>	27
4.3.6. <i>Spektroskopische Untersuchungen</i>	28
4.3.7. <i>Abriebversuche</i>	30
4.3.8. <i>Toxikologische Untersuchungen</i>	30
4.3.9. <i>Waschversuche</i>	30
4.4. AUSRÜSTUNG VON TEXTILIEN	31
5. ERGEBNISSE	32
5.1. STATISTISCHE VERSUCHSPLANUNG ZUR ERMITTLUNG DER OPTIMALEN, THERMISCH LEITFÄHIGEN BESCHICHTUNG FÜR SCHWEIßERSCHUTZKLEIDUNG	32

5.1.1.	<i>Screening</i>	32
	35
5.1.2.	<i>Optimierung</i>	36
5.2.	CHARAKTERISIERUNG DER THERMISCH LEITFÄHIGEN BESCHICHTUNGEN	41
5.2.1.	<i>Metallspritzer-Prüfung an den optimierten Mustern</i>	42
5.2.2.	<i>Bekleidungsphysiologische Prüfungen an optimierten Mustern</i>	43
5.2.3.	<i>Spektroskopische Untersuchungen an optimierten Mustern</i>	46
5.2.4.	<i>Waschversuche an optimierten Mustern</i>	49
5.2.5.	<i>Toxikologische Untersuchungen an optimierten Mustern</i>	50
5.2.6.	<i>Untersuchung der Abriebbeständigkeit der optimierten Muster</i>	50
5.3.	CHARAKTERISIERUNG DER STRUKTURIERENDEN AUSRÜSTUNGEN	52
5.3.1.	<i>Ergebnisse der CO und MAC-Gewebes</i>	53
5.4.	CHARAKTERISIERUNG DER KOMBINIERTEN EFFEKTE.....	72
5.5.	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG	74
6.	WERTENDE ZUSAMMENFASSUNG	76
7.	DANKSAGUNG	79
8.	DURCHFÜHRENDE FORSCHUNGSSTELLE	80
9.	LITERATUR	81

Zusammenfassung

Ziel des Projekts ist es die Schutzwirkung von Schweißerschutzkleidung zu verbessern. Der Fokus lag dabei auf den Fragestellungen, kann man durch eine Ausrüstung die Beständigkeit der Textilien gegen Tropfen von flüssigem Metall erhöhen und gleichzeitig einen besseren UV-Schutz erhalten. Diese Schutzfaktoren von Schweißerschutzkleidung hängen stark vom Flächengewicht des verwendeten Textils ab, je höher das Flächengewicht desto beständiger ist die Kleidung gegenüber Metallspritzern und desto weniger UV wird durch die Kleidung hindurch gelassen. Jedoch gilt, je höher das Flächengewicht, desto schlechter ist der Tragekomfort, da ein hohes Flächengewicht u.a. das Schwitzen fördert. Schweißerschutzkleidung wird nach zwei Klassen unterteilt. Im Fall von Kleidung der Klasse 1 darf ein Temperaturanstieg von 40 K auf der Rückseite des Textils erst nach dem 15. aufgetroffenen Tropfen flüssigen Eisens auftreten. Im Fall der Klasse 2 darf der Temperaturanstieg erst nach 25 Tropfen auftreten.

Als Ausgang für dieses Projekt wurden Gewebe ausgewählt, welche die Klasse 1 erfüllen. Es wurde versucht diese Gewebe durch die Ausrüstung entweder mit wärmeleitfähigen Kompositen oder durch eine Nanostrukturierung („Lotuseffekt“) entsprechend auszurüsten, so dass die Anforderungen für Klasse 2 erfüllt werden.

Wärmeleitfähige Komposite sollten für die Ausrüstung ein schnelles Ableiten und Verteilen der Wärme der Metalltropfen auf der Oberfläche garantieren, wodurch sichergestellt werden sollte, dass die Erwärmung der Rückseite des Gewebes deutlich verlangsamt wird. Mit dieser Ausrüstung konnte die Klasse 2 nicht erreicht werden, sie führte jedoch zu keiner Verschlechterung des Tragekomfort des leichteren Gewebes und die Transmission von schädlicher UV-Strahlung wurde verringert.

Durch eine Nanostrukturierung sollte ein „Lotuseffekt“ für kleine Metalltropfen erzielt werden. Durch die Nanostrukturierung trifft der Metalltropfen zuerst auf die Oberfläche der Nanopartikel auf, wobei isolierende Luft zwischen Metalltropfen und Gewebeoberfläche eingeschlossen wird und so das Gewebe vor dem Tropfen selbst schützt. Dieser Ansatz lässt vermuten, dass sich der Effekt gut über die aufgetragene Menge Nanopartikel / Binder einstellen lässt. Im Fall von Binderkonzentrationen zwischen 1,25 und 2,5 % wird die Flexibilität nur geringfügig beeinträchtigt, wobei mit unterschiedlichen Partikeln (SiO_2 , ZnO , AlOx und TiO_2) die Schweißerschutzklasse 2 erreicht werden kann. Der Tragekomfort der Gewebe wird nicht beeinflusst. Das Verfahren bietet KMU aus dem Bereich der Textilveredlung neue innovative Produkte für den Arbeitsschutzsektor. Die Verwendung von leichter Kleidung im Bereich der PSA (Persönliche Schutzausrüstung) erhöht die Akzeptanz dieser, da der Tragekomfort im Vergleich zu Schweißerschutzkleidung der Klasse 2 durch das im Projekt entwickelte Verfahren der Nanostrukturierung von Kleidung der Schweißerschutzklasse 1 einen deutlich verbesserten Tragekomfort mit sich bringt. Dadurch können von KMU, welche sich auf den Sektor PSA spezialisiert haben, neue und auch internationale Absatzmärkte eröffnet werden.

Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden erreicht.

1. Einleitung

Die Anzahl der Schweißer in der BRD lag 2011 lt. einer Statistik der Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH (GSI) bei 150.000. Schätzungen gehen weltweit von mehr als 5 Mio. Schweißern aus. Schweißarbeiten werden in der gesamten metallverarbeitenden Industrie durchgeführt, z.B. im Stahl- und Metallbau, in der Versorgungstechnik, in Schlossereien und auf Baustellen. Die Tätigkeiten reichen dabei vom gelegentlichen Schweißen mehrmals in der Woche bis zum permanenten Schweißen mehrmals am Tag. In Betrieben mit intensiver Schweißaktivität beträgt die Lebenszeit von Schweißerschutzkleidung 6-8 Wochen. Der Bedarf nach entsprechend verbesserten Produkten ist wie u.a. von der GSI bestätigt groß. Von diesem Bedarf können bis zu 30 Unternehmen aus der Bekleidungsindustrie profitieren, die sich mit der Herstellung von Schweißerschutzbekleidung beschäftigen und einen Umsatz von 478 Mio. € erwirtschaften (Stand 2015).¹

Beim Schweißen von metallischen Werkstoffen bilden sich naturgemäß metallische Spritzer und Tropfen. Diese bestehen aus schmelzflüssigem Schweißgut, das aus dem bearbeiteten Bereich herausspritzt. Die Tropfen haben je nach Material Initialtemperaturen oberhalb von 1500 °C, der Schmelzpunkt von Eisen liegt bspw. bei 1538 °C. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt, dass die sich bildenden Metalltropfen relativ weit fliegen, sodass der Schweißer getroffen wird. Die Temperatur eines solchen Tropfens beträgt noch 1000 °C, daher führt ein direktes Auftreffen auf die Haut zu Verbrennungen. Neben dem Risiko von Verbrennungen durch Metallspritzer ist UV-Strahlung ein inhärentes Risiko der Schweißtechnik und heller Hautkrebs ist seit 2015 als Berufskrankheit anerkannt. Entsprechend besteht ein konkreter Bedarf nach geeigneter Schutzkleidung. Die Anforderungen an Schutzkleidung gegen flüssige Metallspritzer werden in der Norm EN ISO 11611 („Schutzkleidung für Schweißen und verwandte Verfahren“) festgelegt. Die Norm definiert die zwei Schutzklassen 1 und 2, die für den Einsatz von Schweißtechniken mit geringer bzw. erheblicher Bildung an Schweißspritzern beschrieben werden. Die kommende Änderung dieser Norm sieht drei UV-Schutzklassen für unterschiedliche Expositionsdauern vor.



Abbildung 1: Schweißer bei der Arbeit (Fotografie: <http://de.wikipedia.org/wiki/Schweißer>)

Schweißerschutzkleidung wird in den meisten Fällen aus schweren, dicht gewebten Baumwollgeweben hergestellt. Die schweren Qualitäten versprechen einen effektiven Schutz, sind aber gleichzeitig problembehaftet: In einem Newsletter der GSI (03/2008) wird z.B. auf die Problematik hingewiesen, die sich bei Geweben mit einem Flächengewicht zwischen 450 und 900 g/m² hinsichtlich der bekleidungsphysiologischen Aspekte der Berufskleidung ergibt. Die verwendeten Gewebe haben eine niedrige Atmungsaktivität und eine hohe isolierende Wirkung. Gleichzeitig herrschen hohe Temperaturen im Arbeitsumfeld, was zu starkem Schwitzen des Schweißers führt. Durch das entstehende feuchte Mikroklima in der Kleidung wird beim Träger ein Unbehagen ausgelöst.²

Physiologische Funktion und Tragekomfort sind heute zentrale Kaufargumente und spielen im Gebrauch eine ebenso wichtige Rolle, wie die eigentliche Schutzfunktion.^{3,4} Als Binsenweisheit gilt: „Nur eine getragene Schutzkleidung ist eine gute Schutzkleidung“.⁵ Nur aufgrund des geringen Komforts lassen z.B. viele Polizisten ihre im Ernstfall lebensrettende kugelsichere Weste im Spind. Wenngleich die Bedrohungslage natürlich nicht vergleichbar ist, so ist die Problematik als solche die gleiche.

Die Verwendung eines schweren Baumwollgewebes bringt für die Schutzwirkung drei Vorteile. Treffen heiße Metalltropfen auf das Gewebe, so können lokal einzelne Fäden verkohlen. Mit der Zeit werden die Gewebe infolge der steigenden Anzahl der auftreffenden Tropfen zunehmend geschädigt und es kommt zwangsläufig zu einem Verlust der Schutzwirkung. Der erste Vorteil des schwereren Gewebes liegt darin, dass das Ausmaß der Schädigungen weniger schnell zu einem Verlust der Schutzwirkung führt. „Die Standzeiten steigen proportional mit dem Warengewicht.“⁶ Der zweite Vorteil liegt in der stärker isolierenden Wirkung. Wenn das heiße Schmelzgut auf ein dickeres Gewebe tropft, steigt die Temperatur der Rückseite des Textils – also der Seite, die Kontakt mit der Haut des Trägers hat – weniger schnell an als bei einem dünneren Gewebe. Der dritte Vorteil ist die geringe Durchlässigkeit gegen UV-Strahlung, je schwerer ein Gewebe ist.

Die wissenschaftlich-technische Problemstellung des vorliegenden Forschungsprojektes zielt ausgehend von den dargestellten Anforderungen der Industrie auf die Verbesserung der Schutzwirkung von Schweißerschutzkleidung gegen Metallspritzer und einen verbesserten UV-Schutz ab. Dieses soll über einen nasschemischen Ausrüstungsschritt erzielt werden. Die Ausrüstungen sollen es ermöglichen, die Schutzklasse bei gegebener Gewebequalität zu erhöhen und gleichzeitig einen Wechsel auf leichtere und damit komfortablere Gewebe zuzulassen, ohne dass Einbußen in der Schutzwirkung hingenommen werden müssen.

Bereits das Anfang 2015 abgeschlossene IGF-Projekt Nr. 17680⁷ der beiden beantragenden Forschungsstellen zielte darauf ab, die Schutzwirkung von textilen Flächengebilden gegenüber heißen Metallspritzern, wie sie beim Schweißen entstehen, zu steigern. Das dabei zugrundeliegende Prinzip bestand darin, eine Schutzschicht aufzubauen, welche die Faser vor der Hitze des Metalltropfens schützt. Diese sollte zum einen durch eine thermisch isolierende Schicht (HIT), zum anderen durch eine thermisch beständige und niederenergetische Schutzschicht (DTNW), welche ein rasches Abrollen des Tropfens ermöglicht, realisiert werden. Vom HIT wurden dazu Materialien mit einer niedrigen Wärmeleitfähigkeit, wie z.B. Mikroglasshohlkugeln, auf Textilien aufgebracht. Hierdurch sollte die Hitzeübertragung auf das Gewebe so stark minimiert werden, dass keine Schädigung mehr stattfindet. Der Ansatz des DTNW bestand darin, eine hochtemperaturbeständige, glatte anorganische/keramische und ggf. niedrig energetische Schutzschicht aus Siliziumoxid, Aluminiumoxid oder Zirkonoxid auf Textilien aufzubringen. Die hochtemperaturbeständige keramische Schicht ($T_s > 1500 \text{ °C}$) sollte als kurzzeitige Schutzschicht gegen die Zerstörung des Fasermaterials fungieren. Durch zusätzliche Fluorcarbon-Komponenten sollte eine niedrige energetische Oberfläche erhalten werden, welche ein rasches und effektives Abrollen der Metalltropfen von der Oberfläche ermöglicht. Beide Ansätze zeigten eine Verbesserung der Schutzwirkung, ohne die bekleidungsphysiologischen Parameter signifikant zu verschlechtern, jedoch waren diese nicht ausreichend.

Aus den Projektergebnissen wurden perspektivisch zwei alternative Lösungsstrategien entwickelt. Da gezeigt wurde, dass Fluorcarbon-Ausrüstungen auf oxidischen Schichten die Schutzwirkung verbessern, wurde zum einen versucht durch Siliciumoxidnanopartikel eine nanostrukturierte Oberfläche zu generieren, welche ähnlich dem Lotuseffekt das Abrollverhalten verbessert. Gleichzeitig wird so auch die Kontaktfläche vom heißen

Metalltropfen zur Oberfläche minimiert und so die Hitzeübertragung verringert. Zum anderen stellte sich die Frage, ob durch eine gegenteilige, also gut wärmeleitende Beschichtung aus Carbonfasermehl eine Verbesserung der Wärmeableitung erzielt werden kann. Ziel war es, die thermische Energie des Tropfens schnell auf eine große Fläche zu verteilen, so dass diese als Kühlkörper fungieren kann und die lokale Wärmemenge so gering wird, dass keine Faserschädigung erfolgt. Orientierende Versuche zum Ende des IGF-Projektes Nr. 17680 deuteten an, dass beide Methoden zu deutlicher Verbesserung des Schutzeffektes geeignet sind. Jedoch wurden keine Untersuchungen zur Optimierung dieser Ansätze durchgeführt.

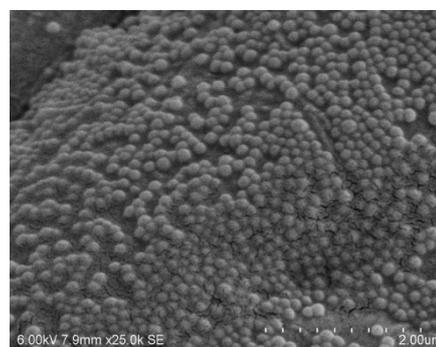


Abbildung 2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen unterschiedlicher Vergrößerung der Oberfläche eines Gewebes, das mit Stöberpartikeln (SiO_2) modifiziert wurde (aus dem Abschlussbericht des Forschungsprojektes IGF-Nr. 17680).

Vor diesem Hintergrund ist die Aufgabenstellung des beantragten Projektes, die Mechanismen und Einflüsse der verschiedenen Parameter der beiden Ansätze systematisch und vergleichend im Interesse einer optimalen Lösung für eine wirkungsvolle und physiologisch optimierte Schutzkleidung zu untersuchen. Konkret stellen sich folgende Fragen nach:

- Einfluss von Art und Größe der Nanopartikel
 - Variation der Topographie
- Einfluss von Art und Füllgrad der Wärmeleiter (Carbonfasermehl, Metallpigmente, Siliciumcarbid)
- Einfluss der Kombination von Wärmeleiter und nano/mikrostrukturierter Oberfläche
- Einfluss auf den UV-Schutz,

Der Aspekt des UV-Schutzes berücksichtigt die kommende Änderung der EN ISO 11611, welche UV-Schutzklassen für Schweißerschutzkleidung vorsieht. Durch Zinkoxid-

Nanopartikel-Ausrüstungen konnte am DTNW bei einfacher Baumwolle bereits ein UPF-Schutzwert von 50+ realisiert werden.⁸ Ziel des Projektes ist eine verbesserte Schutzkleidung bei gleichzeitig erhöhtem Komfort; dabei soll mit der Ausrüstung auch für Schutzkleidung der Klasse 2 Warengewichte im Bereich von maximal 350 g/m² und eine UV-Strahlungsexpositionsdauer von idealerweise mehr als 6 h realisiert werden. Als bekleidungsphysiologische Parameter werden für die Wärmeisolation und den Wasserdampfdurchgangswiderstand („Atmungsaktivität“) der Gewebe typische Werte-Bereiche einlagiger Arbeitsbekleidung angestrebt ($R_{ct} \approx 0,01 - 0,02 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$, $R_{et} < 10 \text{ m}^2 \text{ Pa W}^{-1}$).

2. Stand der Technik

2.1. Schweißerschutzkleidung

Schweißerschutzkleidung soll den Träger vor Beeinträchtigungen durch den direkten oder indirekten Kontakt mit flüssigen, heißen Metallspritzern, wie sie beim Schweißen von Metallen entstehen, schützen. Das Textil fungiert damit zunächst einmal sehr trivial als Isolation und Barriere zwischen der menschlichen Haut und den auftreffenden Metalltropfen.

Unmittelbar bei ihrer Entstehung haben die Tropfen eine Temperatur jenseits der Schmelztemperatur des Metalls, bei Eisen bspw. $>1538\text{ °C}$. Bis zum Auftreffen auf die Kleidung des Schweißers wird diese Temperatur allenfalls geringfügig gesunken sein, in der Regel schlagen die Tropfen noch flüssig ein. Trifft der flüssige Metallspritzer auf die Oberfläche eines Textils und verweilt dort ausreichend lange, kommt es zwangsläufig zur Degeneration des Faserpolymers und somit zur Zerstörung von Fasern. Abgesehen von keramischen Fasern wird keine der im Bereich Textil verwendeten Fasermaterialien der thermischen Belastung standhalten. Häufig im Textilbereich verwendete Synthefasern auf Basis von Polyester (PET) und Polyamid (PA) besitzen den Nachteil, dass sie beim Verbrennen schmelzen, was zu starken Verletzungen der Haut des Trägers führen kann. Polyacrylnitril schmilzt zwar nicht, ist aber temperaturempfindlich und setzt beim Zersetzung Blausäure frei. Zur Herstellung von Schweißerschutzkleidung werden daher primär cellulosische Fasern, also entweder Baumwolle oder Regeneratfasern (z.B. Modal) eingesetzt, da diese bei der Zersetzung weder schmelzen noch hochgradig toxische Stoffe freisetzen.

Die eingesetzten Gewebe haben zumeist ein für Bekleidungstextilien sehr hohes Flächengewicht. Dies erfolgt aus zwei Gründen: Zum einen erzielt man bei höheren Warengewichten eine höhere Isolationswirkung, d.h. wenn die Textiloberfläche Kontakt zu einem heißen Gut bekommt, steigt die Temperatur auf der Rückseite, welche der Haut eines Trägers zugewandt ist, langsamer an und je nach Abkühlverhalten wird die Temperatur auch absolut niedriger bleiben. Zum anderen gilt, dass das Textil mehr oder weniger zwangsläufig durch die auftreffenden Metallspritzer zerstört wird — die thermische Zersetzung von Cellulose setzt bei ca. 300 °C ein.⁹ Beginnend an der Oberfläche werden

Fasern durch den hohen Energieeintrag zerstört, mit der Häufigkeit der Tropfeneinschläge kommt es dadurch zu einer immer stärkeren Zerstörung des Gewebes und zur Ausbildung von Löchern, wodurch das Textil seine Schutzwirkung verliert und unbrauchbar wird. Im Fall von Schweißerschutzkleidung von Werftarbeitern beträgt die durchschnittliche Standzeit von zwei Sätzen Schweißerschutzkleidung 6-8 Wochen, danach bietet die Kleidung keinen ausreichend Schutz mehr.

Um die Beständigkeit der Textilien zu erhöhen, werden primär zwei Ansätze verfolgt. Durch Imprägnierungen mit Metallsalzen, wie sie auch im Bereich Flammenschutz Verwendung finden, wird die Flammfestigkeit verbessert und gleichzeitig die Wärmeentwicklung verringert. Hierbei nutzt man aus, dass diese Salze, z.B. Aluminiumhydroxid, die thermische Energie durch eine endotherme Reaktion mit den heißen Metalltropfen abfangen und dabei Wasser freisetzen. Dieses verdampft, was weitere Energie verbraucht, sodass es so zu einem schnelleren Abkühlen des Metalls auf der Textiloberfläche kommt. Metallsalzausrüstungen besitzen den Nachteil, dass sie eine schlechte Waschbeständigkeit haben. Außerdem sind sehr hohe Auflagen erforderlich, um gleichzeitig einen flamm-schützenden Effekt zu erhalten. Ähnliche Ansätze wurden durch die Verwendung von wasserrückhaltenden Polymerbeschichtungen erzielt.^{10,11,12} Alternativ dazu bietet die sogenannte Proban®-Ausrüstung, welche eine exzellente Waschbeständigkeit besitzt, eine höhere Beständigkeit. Diese primäre Flammschutz-ausrüstung führt bei Kontakt mit flüssigem Metall zum Versintern des Gewebes, wobei eine punktuelle Schädigung auftritt. Die Proban®-Ausrüstung basiert auf einer Ausrüstung mit einer Phosphoniumverbindung und Harnstoff, die anschließend mit gasförmigem Ammoniak und dann Wasserstoffperoxid nachbehandelt werden muss. Damit ist der Prozess auch apparativ sehr aufwändig, was dazu führt, dass diese Ausrüstung nicht vom Textilveredler sondern nur von Spezialunternehmen im Ausland durchgeführt werden kann. Die Proban®-Ausrüstung steht jedoch wegen des Risikos der Formaldehydfreisetzung in der Kritik.¹³ Ähnlich zur Proban®-Ausrüstung realisierten Hand et al. eine wirksame Ausrüstung auf Basis von Fluorcarbon und Phosphoniumverbindungen.¹⁴

Neben auf Cellulose basierender Schweißerschutzkleidung wird immer mehr auf alternative Fasermaterialien oder nichttextile Materialien ausgewichen. Eine exzellente Alternative wäre Wolle, da Flächengebilde aus diesem Material eine sehr gute isolieren Wirkung

zeigen und keine problematischen Zersetzungsprodukte auftreten. Jedoch eignen sich diese Produkte nicht für eine gewerbliche Wäsche, woran ein Einsatz scheitert.

Bei den Hochleistungsfasern gibt es verschiedene Kandidaten, die als Alternative zu den cellulosischen Fasern in Frage kommen. Meta-Aramid (Nomex[®], Teijinconex[®]) hat als aromatisches Polyamid eine etwa 70 °C höhere Zersetzungstemperatur als Cellulose und schmilzt ebenfalls nicht, bevor es zersetzt. Das para-Aramid (Kevlar[®], Twaron[®]) zeigt eine noch höhere Zersetzungstemperatur (550 °C) als das meta-Aramid. Noch höher temperaturbeständig ist Poly(*p*-phenylen-2,6-benzobisoxazol) (PBO, Zylon[®]), dieses ist aber wie para-Aramid extrem empfindlich gegen UV-Strahlung, die vom Lichtbogen beim Schweißen in hohen Dosen ausgesandt wird. Von Toyobo existiert ein Patent zur Verwendung von PBO-Vliesen für Schweißerschutzkleidung.¹⁵ Neben der Verwendung der genannten Hochleistungsfasern gibt es Ansätze, Mischungen dieser mit flammfesten Cellulosefasern einzusetzen, wie in einem 2010 angemeldeten Patent beschrieben.¹⁶ Hier werden Mischgarne aus meta- und para-Aramid mit flammgeschützter Viskose zur Herstellung von Geweben für Schutzkleidung beschrieben. Toray Textiles Europe meldeten 2011 ein doppellagiges Gewebe mit einer Oberseite basierend auf einem Fluorpolymer und darunter einer Lage eines Aramids¹⁷ zum Patent an. In diesem Zusammenhang gab es eine Untersuchung vom STFI und der TTI Technische Textilien International GmbH zur Verwendung leichter Gewebe, dabei ist TTI auf Gewebe aus Kevlar und PanOx spezialisiert.¹⁸ Systeme auf Carbonfaserbasis wurden von Watanabe¹⁹ und Pryne²⁰ patentiert. Des Weiteren gab es zwei Projekte des STFI zur verbesserten Schutzkleidung nach der DIN EN ISO 11612 „Schutzkleidung - Kleidung zum Schutz gegen Hitze und Flammen“, welche Schutzkleidung für Schweißer explizit ausklammerten, da in dieser Norm die Wirkung von 100-300 g flüssigen Metalls auf das Textil untersucht wird.^{21,22} Aus den Ergebnissen des STFI konnte geschlussfolgert werden, dass eine Fluorcarbonausrüstung zu einer Verbesserung des Hitzeschutzes führt, diese Erkenntnis wurde auch schon im ersten Projekt berücksichtigt.

Es gibt auch weitere Hochleistungspolymere, die aufgrund ihrer Eigenschaften — d.h. hohe Zersetzungstemperaturen und/oder kein Schmelzen — grundsätzlich in Frage kommen (Polyimide, Polyetherimide, PEEK). Letzten Endes gilt aber, dass flüssige Metalle eine Temperatur aufweisen, die weit oberhalb der Zersetzungstemperaturen der Polymere liegen, sodass eine Schädigung durch die heißen Metallspritzer bei all diesen

Polymeren eintritt. Daraus resultiert, dass cellulosische Fasern für die breite Anwendung bevorzugt werden, da sie weitaus preisgünstiger sind. BMW hat im Jahr 2005 ein Patent auf Schutzkleidung gegen Schweißtropfen angemeldet, die auf einer nicht näher benannten, gegenüber Schweißtropfen unempfindlichen Beschichtung basiert mit einem Gewebe aus Chrom-Molybdän-Stahl²³ — ein System, das vom Papier her einen guten Schutz erwarten lässt. Hier ergeben sich aber Fragen der Aufbereitung, des Komforts und nicht zuletzt der Produktkosten.

2.2. Wechselwirkung eines heißen Tropfens mit einer Feststoffoberfläche

Generell gilt, dass für die Abweisung von Flüssigkeiten von glatten Oberflächen u.a. die Unterschiede in den Oberflächenenergien von Feststoff und Flüssigkeit entscheidend sind. Je niedriger die Oberflächenenergie des Feststoffes im Vergleich zur Grenzflächenspannung der Flüssigkeit, umso höher die Abweisung. Hydrophobe Ausrüstungen haben in der Regel Oberflächenenergien im Bereich <30 mN/m, die Oberflächenspannung von Wasser liegt bei 72 mN/m. Die Oberflächenenergie einer idealen, hochabweisenden, oleophoben Oberfläche, die nur aus CF_3 -Gruppen besteht, liegt bei etwa 6-8 mN/m.²⁴ Metalle haben im Vergleich zu Flüssigkeiten wie Wasser enorm hohe Oberflächenenergien — so liegt die von Quecksilber bei Raumtemperatur bei 484 mN/m, die von Eisen bei 1450 °C bei 2.300 mN/m. Die Oberfläche einer Cellulose hat eine kritische Grenzflächenspannung im Bereich 42 mN/m,²⁵ Polyester hat eine Grenzflächenspannung von 41,3 mN/m,³⁰ und extreme Erniedrigungen der Oberflächenenergien im Rahmen von hydrophobierenden Ausrüstungen senken diese auf Werte im Bereich 18 mN/m. Bei Betrachtung der Größenordnungen liegt es nahe, dass einfache Hydrophobierungen/Oleophobierungen nur begrenzt eine Verbesserung der Abweisung von flüssigen Metallen realisieren können. Die Unterschiede in den Grenzflächenenergien eines flüssigen Metalls und einer textilen Oberfläche sind bereits ohne Hydrophobierung enorm groß.

Nach dem Modell von Cassie und Baxter²⁶ benetzt ein Flüssigkeitstropfen, der auf eine geeignet strukturierte und ausreichend niedrig-energetische Oberfläche aufgebracht wird, die Oberfläche des Feststoffes nicht komplett. Vielmehr sitzt der Tropfen auf der hydrophoben und strukturierten Oberfläche auf und es bilden sich Lufttaschen aus. Hieraus erklärt sich die Ausbildung eines sehr großen Kontaktwinkels bzw. die geringe Benetzung im Vergleich zur nicht-strukturierten Oberfläche — ein Effekt, den man auch bei

der Benetzung der Blätter von Lotuspflanzen beobachten kann. Unter entsprechenden Bedingungen läuft ein Tropfen gut von der Oberfläche ab — eine hohe Abweisung wird daher als grundsätzlich gut für das Erzielen eines hohen Schweißerschutzes angesehen. Bei der Normprüfung (ISO 9150) für den Schweißerschutz wird die Anzahl der Tropfen des flüssigen Metalls gezählt, die erforderlich ist, um die Temperatur der Rückseite des Textils um 40 K ansteigen zu lassen. Wenn die Tropfen möglichst schnell/vollständig ablaufen, wird dies den Wärmeübergang reduzieren. Wie z.B. Barthlott et al.²⁷ zeigen, kann je nach Struktur und Oberflächenenergie der Anteil der Kontaktfläche zwischen Feststoff und Tropfen in Relation zur projizierten Kontaktfläche des Tropfens stark sinken. Für einen Wassertropfen auf einem Lotusblatt bestimmt er einen Anteil von ca. 2% — das bedeutet, dass der Tropfen in diesem Bereich zu 98% eine Grenzfläche zur Luft ausbildet. Für den heißen Metalltropfen auf dem Textil kann das bedeuten, dass die Wärmeübertragung bei einer Abweisung durch eine geeignet strukturierte Oberfläche verlangsamt wird. Die Wärmeleitfähigkeit der eingeschlossenen Luft ist bedeutend niedriger als die des Feststoffes. Außerdem erfolgt die Wärmeübertragung im Bereich des Kontaktes zum Feststoff über Konduktion, im Bereich der Lufttaschen über Konvektion und Wärmestrahlung.

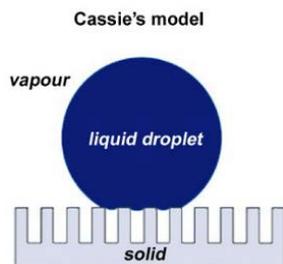


Abbildung 3: Cassie-Modell für einen Tropfen auf einer abweisenden, strukturierten Oberfläche. (Bildquelle: intechopen.com)

Um ein Aufheizen des Textils beim Auftreffen des heißen Metalltropfens zu verhindern, sollte die übertragene Wärme möglichst schnell über eine große Fläche verteilt und an die Umgebung abgegeben werden. Dieses Prinzip zur effektiven Wärmeabfuhr wird auch in der Technik angewandt. Im Bereich der Elektronik beispielsweise führt die zunehmende Miniaturisierung und Leistungssteigerung zu einer verstärkten Wärmeproduktion, die oft zu einer Schädigung der verwendeten Bauteile und Isoliermaterialien führt. Dieses Problem wird versucht zu umgehen, indem Kühlkörper eingesetzt werden. Ein guter

Kühlkörper hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit und eine möglichst große Oberfläche, die beispielsweise über eine entsprechend große Anzahl an Stegen/Rippen erreicht wird.^{28,29} Für Entwärmungsaufgaben in der Technik kommen neben Metallen oft wärmeleitfähige Compounds zum Einsatz.³⁰ Dabei werden in die isolierende Kunststoffmatrix thermisch leitfähige Füllstoffe eingebracht, die eine effektive Abfuhr der entstehenden Wärme ermöglichen. Als wärmeleitfähige Füllstoffe dienen hierfür z.B. organische, metallische oder keramische Materialien. Ein Füllstoff mit, im Vergleich zu einem Textil auf Cellulosebasis, hoher Wärmeleitfähigkeit ist Kohlefasermehl, das beim Wiederaufbereitungsprozess von Abfällen aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen (CFK) erhalten wird.³¹ Bei der Verwertung von CFK-Abfällen fallen Kohlefasern an, die zerkleinert und zu Kohlefasermehl verarbeitet werden können. Abnehmer von Kohlefasermehl sind Firmen der kunststoffverarbeitenden Industrie, welche das Produkt in verschiedene Kunststoffe einbauen, um die elektrische oder thermische Leitfähigkeit oder die mechanischen Eigenschaften von Verbundwerkstoffen zu verbessern. Durch die Verwertung von recyceltem Kohlefaserabfall in Form von Kohlefasermehl kann ein attraktiver Werkstoff wieder in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden. Bei der stark gestiegenen Nachfrage nach Carbonfasern in vielen Bereichen der Industrie und der somit wachsenden Menge an entsprechenden Abfallprodukten ist das Recycling und Wiederaufbereiten ein wichtiger Schritt zur Verbesserung der Nachhaltigkeit.

Überträgt man diese Ansätze auf den Bereich Schweißerschutz, so könnte die Applikation von wärmeleitfähigen Komposit-Beschichtungen bewirken, dass die von den Metallspritzern übertragende Wärme effektiv über die gesamte Textiloberfläche abgegeben wird. Durch eine schnellere und verbesserte Wärmeabgabe vom Textil an die Umgebung kann die partielle Zerstörung des Textils und der Wärmeübergang an die Haut reduziert werden.

2.3. UV-Schutz

In aktuellen Review-Artikeln von Hoffmann et al.,³² Das³³ und Saravanan³⁴ zum Thema UV-Schutz durch Bekleidungstextilien werden auf der Ausrüstungsseite die Einflüsse des Färbens bzw. des Farbstoffes und die Möglichkeiten von Antioxidantien, UV-Absorbern bzw. optischen Aufhellern wie z.B. Benzophenon-, Triazin- oder Triazolderivaten zur Realisierung eines UV-Schutzes beschrieben. Die Verwendung von TiO₂ und ZnO als

Füllstoff für Fasern wird diskutiert, während die Ausrüstung von Textilien mit diesen Oxiden als weitere Möglichkeit erwähnt, jedoch nicht eingehender diskutiert wird.

Veröffentlichungen, die sich mit dem UV-Schutz durch ZnO oder TiO₂-Ausrüstungen beschäftigen berichten, dass man mit nanopartikulären Oxiden in Bindersystemen sehr gute Ergebnisse dafür erzielen kann. Shateri-Khalilabad et al.³⁵ und Wang et al.³⁶ verwenden eine effektive, jedoch für die Industrie irrelevante, in-situ-Synthese, bei der ZnO-Nanopartikel auf Textilien aufwachsen und erzielen exzellente UPF-Werte, allerdings ohne Waschbeständigkeit. Auf analoge Weise wurden von Daoud et al.³⁷ und Perelshtein et al.³⁸ in-situ-Synthesen mit Titandioxid beschreiben, wobei Produkte mit hohem UPF-Wert erhalten werden. Farouk⁸ hat bereits 2011 am DTNW gezeigt, dass ex-situ synthetisierte ZnO-Partikel über einen Sol-Gel-basierten Binder in einem Foulardierprozess applizierbar sind, wobei hohe UPF-Werte und antimikrobielle Eigenschaften erreicht werden. Auf der kommerziellen Seite existieren auch TiO₂- oder ZnO-basierte Ausrüstungen wie z.B. iSys SUN[®], der CHT R. Beitlich GmbH oder Belfasun[®], von Pulcra Chemicals. Von Ventex wird das Produkt Dry-Zone R506 auf TiO₂/Silber-Basis vertrieben. Alle Produkte erzielen lt. Hersteller einen UPF-Wert von 50+.

2.4. Bekleidungsphysiologischer Komfort

Für die Verbesserung des Komforts von Schweißerschutzkleidung ist unabhängig vom verwendeten Material eine Bewertung der thermophysiologischen Eigenschaften des Textils unter den gegebenen Bedingungen notwendig. Hohe Temperaturen beim Schweißen und die starke körperliche Belastung führen zum Erhitzen des Körpers. Um die Wärme effektiv abzuführen und den Körper vor Überhitzung zu schützen, gibt es verschiedene Mechanismen.³⁹ Der Wärmetransport vom Körperkern über das Blut erfolgt konvektiv, d.h. die im Kern erzeugte Wärme wird über die Durchblutung der Haut abgeführt. Der Wärmetransport über die Haut an die Umgebung erfolgt zusätzlich über Strahlung und Evaporation. Beim Erhitzen des Körpers — z.B. bei erhöhter Umgebungstemperatur, starker körperlicher Belastung und/oder ungeeigneter Kleidung — kommt es zu einer Erweiterung der Blutgefäße und einer verbesserten Durchblutung der Haut, sodass sich der Körper gleichmäßig erwärmt. Durch die erhöhte Hauttemperatur wird der Temperaturgradient zur Umgebung vergrößert und die Wärmeabgabe an die Umgebung gesteigert.⁴⁰ Die Körpertemperatur kann zudem über das Schwitzen reguliert werden. Beim Verdampfen von Schweiß wird Energie benötigt, die dem Körper in Form von Wärme

entzogen wird. Hier wird eine effektive Kühlung allerdings nur dann erreicht, wenn der Schweiß direkt auf der Haut verdunstet.

Für die Quantifizierung bekleidungsphysiologischer Eigenschaften sind Messmethoden entwickelt worden, die eine Bestimmung charakteristischer Kenngrößen und eine Charakterisierung des Komforts von Bekleidungsstücken ermöglichen. Die Wärmeisolation konfektionierter Kleidungsstücke kann mithilfe thermischer Gliederpuppen nach ISO 15831⁴¹ und ISO 9920⁴² untersucht werden. Für diese Modelle lässt sich die Wärmeproduktion in verschiedenen Körpersektionen unabhängig voneinander steuern, wobei auch Ventilationseffekte durch Bewegung berücksichtigt werden. Ein Schwitzen lässt sich nicht simulieren, jedoch kann nach Bestimmung der Wärmeisolation und Atmungsaktivität des Materials die effektive Atmungsaktivität des Kleidungssystem berechnet werden. Hierfür kann das Hohensteiner Hautmodell nach DIN EN ISO 11092⁴³ eingesetzt werden, das die Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe der Haut simuliert. Das Modell beruht auf einer auf Hauttemperatur einstellbaren porösen Sintermetallplatte, die sich in einer Klimakammer befindet und der Wasser zugeführt werden kann. In der Kammer können Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftbewegung kontrolliert werden, sodass sich unterschiedliche Umgebungsbedingungen sowie verschiedene Wärme- und Schweißabgaben des Körpers simulieren lassen. Über die Messungen werden spezifische Kenngrößen erhalten, die Informationen über die thermophysiological Funktion der Textilien liefern. Folgende Parameter werden für nicht konfektionierte Einzelstücke bei den unterschiedlichen Bedingungen bestimmt:

Eine normale Tragesituation bei geringer körperlicher Belastung und kühlem bis gemäßigtem Klima entspricht einer geringen physiologischen Belastung, bei der mit insensibler Perspiration zu rechnen ist. Diese wird über stationäre Messungen des Hautmodells beschrieben. Hier werden als Kenngrößen Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} , Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} , Wasserdampfdurchgangsindex i_{mt} und Wasserdampfaufnahmefähigkeit F_i ermittelt. Der Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} charakterisiert die Wärmeisolationseigenschaften der Bekleidung. Der Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} gibt an, wie leicht Wasserdampf durch das Textil in die Umgebung diffundieren kann, beschreibt also die sogenannte „Atmungsaktivität“. Der Wasserdampfdurchgangsindex i_{mt} beschreibt das relative Wasserdampftransportvermögen, welches berücksichtigt, dass dickere Materialien bei gleicher Konstruktion einen entsprechend höheren

Wasserdampfdurchgangswiderstand aufweisen als dünne. Im Fall einer erhöhten physiologischen Belastung, d.h. bei warm-gemäßigten Klimabedingungen und verstärkter körperlicher Belastung, kann von einer mäßig-sensiblen Perspiration ausgegangen werden, was über das Pufferverhalten gegenüber dampfförmigem Schweiß F_d beschrieben wird. Bei starker körperlicher Anstrengung bzw. warm-heißem Klima besteht eine hohe körperliche Belastung und starke Perspiration. Diese Situation kann über instationäre Messungen mit dem Hautmodell dargestellt werden, wobei als charakteristische Kennzahlen die Pufferzahl gegenüber flüssigem Schweiß K_f und die Wärmeisolation bei feuchtem Textil R_{ct}^* bestimmt werden. Die Fähigkeit eines Textils nach stark-sensibler Perspiration zu trocknen wird durch die Trocknungszeit ΔT beschrieben. Für die thermophysiologicalen Eigenschaften des Textils wird anhand der bestimmten Kenngrößen eine Gesamtnote vergeben, welche die Eigenschaften quantifizieren soll.

Die Schutzfunktion von Schweißerschutzkleidung und deren physiologischen Eigenschaften wurden bereits in vorhergehenden Projekten intensiv untersucht: Ein Projekt der GSI GmbH und den Hohenstein Instituten zeigte überraschenderweise, dass im Fall der untersuchten Produkte kein direkter Zusammenhang zwischen Gewebegewicht und Schutzfunktion zu finden ist. Vielmehr spielte hier die Haarigkeit der Proben eine wichtige Rolle, wobei Metallspritzer verstärkt auf Proben mit starker Haarigkeit anhaften. Textilien mit hydrophoben Beschichtungen hingegen führten zu einer tendenziell besseren Abweisung der Metalltropfen, was auf die niedrige Oberflächenenergie des Gewebes und die infolge der Ausrüstung oft reduzierte Haarigkeit zurückzuführen ist.

Im bereits erwähnten, 2015 abgeschlossenen IGF-Projekt Nr. 17680 haben sich die Forschungsstellen mit verschiedenen Ansätzen beschäftigt, die darauf abzielten, die Schutzwirkung von Geweben für Schweißerschutzkleidung zu verbessern. Seitens des DTNW wurden Gewebe mit anorganischen hochschmelzenden Dünnschichten, die eine hohe thermische Beständigkeit oberhalb der möglichen Tropfentemperaturen besitzen, ausgerüstet. Grundsätzlich gelang es zwar, die Schutzwirkung von technischen Geweben zu verbessern, eine Verbesserung in der Schutzklasse nach EN ISO 11611/ISO 9150 wurde aber nicht erreicht. Die besten Ergebnisse wurden dabei mit hydrophobierenden/oleophobierenden Alkoxysilanen erzielt. Von HIT wurden im genannten Projekt alternativ hierzu temperaturbeständige organische Polymere (Fluorcarbone, Silikone), die mit thermisch isolierenden Additiven gefüllt wurden, untersucht. Dieses Komposit sollte eine so

starke thermisch isolierende Wirkung aufweisen, sodass das Fasermaterial bei Auftreffen der Metallspritzer vor der Hitze geschützt wird und die Wärmeleitung zum Träger reduziert bzw. unterbunden wird. Auch nach diesem Ansatz wurde eine Verbesserung in der Schutzklasse nach EN ISO 11611/ISO 9150 nicht erreicht.

3. Zielsetzung

Die Ergebnisse des abgeschlossenen Forschungsvorhabens IGF-Nr. 17680 zeigen, dass sich durch hydro-/oleophobe glatte anorganische Dünnschichten und durch isolierende Komposites eine Verbesserung der Schutzwirkung für die Schweißerschutzkleidung realisieren lässt, jedoch ist diese nicht ausreichend zum Erreichen einer höheren Schutzklasse nach DIN EN ISO 11611. Aus der Beobachtung, dass eine niedrig-energetische Oberfläche eine Verbesserung erzielt, wurde die Hypothese abgeleitet, dass durch nano/mikrostrukturierte Faseroberflächen, ähnlich dem Lotuseffekt, eine weitere Verbesserung erzielt werden kann. Als weitere Hypothese wurde die Antithese zum Isolationsansatz aufgestellt. Zu beiden Hypothesen wurden orientierende Untersuchungen beim Abschluss des IGF-Projektes gemacht, welche die Hypothesen untermauern.

Eine systematische Untersuchung der verschiedenen Einflussparameter erfolgte nicht, sodass weitere grundlegende Forschungsarbeiten notwendig sind, um das Potential dieser Lösungsansätze zu analysieren und eine Umsetzung in die Praxis zu realisieren.

Im ersten Ansatz soll im Rahmen des Projekts untersucht werden, ob sich ein Lotuseffekt für heiße Metalltropfen durch Oberflächenstrukturierung von Dünnschichten, welche mit Submikro- ($<1 \mu\text{m}$) und/oder Nanopartikeln idealerweise aus TiO_2 oder ZnO ($<100 \text{ nm}$) dotiert sind, erreicht werden kann. Diese baut auf den Ergebnissen einer orientierenden Untersuchung im Vorläuferprojekt auf, welche gezeigt hat, dass eine Nanostrukturierung (s. Abb. 2 S. 4) zu einer deutlichen Verbesserung führt. Durch diese Strukturierung auf dem Textil sollen Metalltropfen auf dieser Oberfläche entsprechend dem Cassie-Model benetzen. Durch die Variation von hierarchischen Strukturen (Mikrostruktur: Textiloberfläche, Submikrostruktur: Submikropartikel, ggf. zusätzlich eine Nanostruktur: Nanopartikel) sollen systematisch die Oberflächen von Fasern strukturiert werden. Neben der Strukturierung soll auch der Einfluss der Oberflächenenergie untersucht werden, eine Möglichkeit stellen Fluorcarbonverbindungen dar, jedoch soll auf diese aus Umweltschutzgesichtspunkten (PFT Problematik, toxische Zersetzungsprodukte) verzichtet werden. Daher soll die Oberflächenenergie primär durch Hydrophobierungsmittel variiert werden. Wie sich Strukturierung und Oberflächenenergie auf die Benetzung, die Abweisung und das Abrollverhalten von heißen Metalltopfen auswirken soll untersucht und optimiert werden. Da sich Kontaktwinkel und Abrollverhalten schlecht messen lassen, sollen

im Rahmen des Projektes der Messstand nach ISO 9150 um eine Hochgeschwindigkeitskamera ergänzt werden, mit welcher das Verhalten der Metalltropfen auf der Oberfläche visualisiert werden kann. Ein schnelleres Abfließen verkürzt die Kontaktzeit, in der ein Wärmeübertrag stattfinden kann; ein vergrößerter Kontaktwinkel verringert die projizierte Kontaktfläche, die Ausbildung der Lufttaschen (entsprechend dem Modell von Cassie und Baxter) verkleinert die Kontaktfläche flüssig-fest zusätzlich. Die verkleinerte Kontaktfläche, welche die Übertragung der Wärmemengen reduzieren, die Lufttaschen als gute Wärmeisolatoren und das schnellere Abfließen, verlangsamen die Wärmeübertragung des heißen Tropfens in das Textil. Die verschiedenen Effekte sorgen für eine verringerte Wärmeübertragung, dadurch wird zum einen die Faserschädigung verringert und gleichzeitig erfolgt eine schwächere Aufheizung der Rückseite von Schweißerschutzkleidung bei Beaufschlagung mit Metallspritzern.

Der zweite Ansatz zielt auf eine Ableitung der übertragenen Wärme auf eine möglichst große Oberfläche, sodass das Textil als Kühlkörper fungieren kann. Dazu sollen im Rahmen der Projektarbeit Komposite mit möglichst hoher thermischer Leitfähigkeit hergestellt werden, indem konventionelle Beschichtungspolymere mit thermisch leitfähigen Füllstoffen wie Kohlefasern oder Graphit-basierten Füllstoffen, Siliciumcarbid oder Metallpigmenten additiviert werden. Diese haben eine im Vergleich zu den Faserpolymeren hohe Wärmeleitfähigkeit und können die durch die heißen Metallspritzer zugeführte Wärme effektiv über die Fläche ableiten. Dadurch wird eine lokale Überhitzung und Zerstörung der Fasermaterialien verhindert. Entscheidend für die Schutzwirkung der Schweißerschutzkleidung ist auch, dass die Temperaturerhöhung des Textils auf der Rückseite, bzw. der Haut zugewandten Seite möglichst niedrig bleibt. Bei Kontakt eines flüssigen Metalltropfens wird ein Teil seiner Wärmeenergie auf das Textil übertragen, was auch zur Erwärmung der Rückseite führt. Durch einen verbesserten Wärmetranssport sollte diese Energie möglichst schnell auf eine große Fläche verteilt werden, woraus zwangsläufig auf der Rückseite des Textils, wie angestrebt, nur ein kleinerer Temperaturanstieg auftreten sollte. Durch die Ableitung der Wärmeenergie auf eine große Fläche kann diese auch wieder schneller an die Umgebung abgegeben werden, wodurch das Textil dann als Kühlkörper für die Metallspritzer fungiert.

Die beiden den beschriebenen Ansätzen zugrunde liegenden Effekte sollten sich auch ergänzen, weshalb eine Kombination aus beiden eine zusätzliche Verbesserung der

angestrebten Eigenschaften verspricht. Die Ausstattung der Oberfläche des Textils mit hierarchisch strukturierten Oberflächen verringert die Übertragung der Wärme auf das textile Flächengebilde. Die thermisch leitfähigen Komposite verteilen die dennoch übertragene Energie auf der Fläche. Die über die Mikro-/Nanostrukturierung vergrößerte Oberfläche verspricht dabei eine äußerst effektive Wärmeabfuhr an die Umgebung. Es ist denkbar, dies über einen Zweischichtaufbau zu realisieren, wobei aber ein Komposit angestrebt ist, das die strukturgebenden und die thermisch leitfähigen Komponenten vereint.

Gleichzeitig bieten beide Ansätze auch in situ die Möglichkeit den UV-Schutz von Textilien zu verbessern, um so das Hautkrebsrisiko von Schweißern zu reduzieren. TiO_2 und ZnO , welche zur Mikro- und Nanostrukturierung eingesetzt werden sollen, sind klassische UV-Absorber und auch die Materialien wie Siliciumcarbid oder Kohlefaser bzw. Graphit absorbieren im UV-Bereich. Daher wird im Rahmen des Projektes auch der Einfluss der Beschichtungen auf die UV-Transmission der Gewebe untersucht.

Inwieweit die Ansätze die bekleidungsphysiologischen Parameter verbessern, soll durch den Vergleich der Ausrüstungen auf leichten Geweben mit gängigen schweren Geweben untersucht werden. Gleichzeitig wird auch die **Bioverfügbarkeit der Ausrüstung auf den Textilien untersucht, um eine Zytotoxizität und ein allergenes Potential auszuschließen, welche die Anwendbarkeit der Ausrüstung ausschließen würden.**

3.1. Wirtschaftliche Aspekte der Zielsetzung

Die angestrebten Forschungsergebnisse zielen auf eine Produktinnovation im Bereich der Schutzkleidung und da speziell von Schweißerschutzkleidung ab. In der EN ISO 11611 werden bislang keine Anforderungen an die bekleidungsphysiologischen Eigenschaften der Schutzkleidung gestellt. Die einfache Formel lautet: besserer Schutz durch schwerere Gewebe — dies bedingt aber immer eine Verschlechterung der bekleidungsphysiologischen Eigenschaften. Die heute am Markt etablierten Produkte genügen zwar den Schutzanforderungen, schränken aber in der Regel den Komfort des Trägers und damit ihre Akzeptanz stark ein.

Ziel des Projektes ist es, durch eine innovative Ausrüstung eine Reduzierung des Warengewichtes auf 350 g/m^2 zu erlauben und so bei gleicher Schutzwirkung den bekleidungsphysiologischen Komfort von Schweißerschutzkleidung zu erhöhen. Um einen

guten Transfer in die Industrie zu gewährleisten, soll dieses auf Basis einer wässrigen Ausrüstung erfolgen, welche durch Foulardieren applizierbar ist. Mit Realisierung einer entsprechenden Ausrüstung steht ein innovatives Produkt für die ca. 100 Unternehmen der klein- und mittelständischen Textilveredlungsindustrie zur Verfügung, wobei viele auch als Subunternehmen für die Hersteller der Schutzbekleidung arbeiten. Artikel aus dem Bereich Hitze- und Flammenschutz machen stückmäßig etwa 45 % der PSA auf dem deutschen Markt aus. 25-30 % der in Deutschland vertriebenen PSA besteht aus Geweben, sowohl klassische Schweißerschutzgewebe als auch multifunktionelle Gewebe, wodurch sich ein Großteil dieser Schutzkleidungssysteme für Schweißarbeiten eignet. Die in Unternehmen eingesetzte PSA wird inzwischen primär durch Textilserviceunternehmen auf Leasingbasis betreut. In diesem Bereich gibt es ca. 2.300 KMU mit einem Jahresumsatz von 3,2 Mrd. €, auf den Sektor PSA entfällt dabei mit 44 % der größte Anteil. Der deutsche Markt für PSA hatte im Jahr 2012 ein Umsatzvolumen von ca. 1,7 Mrd. €. ⁴⁴ Diese Marktzahlen machen das hohe Marktvolumen und den großen potentiellen Nutzerkreis und Bedarf für Schweißerschutzkleidung deutlich.

Durch den angestrebten Technologiesprung könnten die bestehenden Märkte der KMU gesichert und ausgeweitet werden, da der Komfort von Schutzkleidung ein entscheidendes Kaufargument darstellt. Diese Technologie muss sich mit leichten Mischgeweben (250-350 g/m²) mit Aramid oder PanOx Anteilen messen, wie es sie z.B. von Ten Cate oder TTI Technische Textilien gibt, wobei die Preise solcher Gewebe in Abhängigkeit des Hochleistungsfaseranteiles zwischen 15-22 €/m² liegen. Gewebe auf Cellulosebasis, die infolge ihrer FlammSchutzrüstung eine gleichwertige Schutzklasse aufweisen, haben Warengewichte von 400-600 g/m² und liegen bei einem Preis von 7-10 €/m². Aus den Eckdaten vergleichbarer Ausrüstungen, wie die hier untersuchte, und der verringerten Grammatik lässt sich abschätzen, dass die Preise auf gleichem Niveau wie gängige Gewebe bleiben werden, wobei diese neuen Gewebe sich aufgrund einer verbesserten Standzeit und eines verbesserten Tragkomforts deutlich besser vermarkten lassen und so auch den Aramid- und PanOx-haltigen Geweben Konkurrenz machen können. Aus dem hohen Bedarf, der großen Zahl der Anwender und der Tatsache, dass die Lebenszyklen von Schweißerschutzkleidung vergleichsweise kurz sind, lässt sich ableiten, dass ein verbessertes Produkt auch klein- und mittelständisch agierenden Textilveredlern helfen kann, ihre Märkte zu sichern und, bei entsprechendem Wettbewerbsvorteil,

auszubauen. Die Vermarktung von hochwertiger PSA, die sowohl Schutz vor Metallspritzern und UV-Strahlung als auch Tragekomfort bietet, gibt deutschen Herstellern die Möglichkeit, sich von anderen Wettbewerbern auf dem PSA-Markt abzuheben und auch internationale Märkte zu erschließen. Auch Berufsgenossenschaften wie die BG ETEM (Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse) fordern, dass zum einen bei der Auswahl von Schutzkleidung die Forderungen nach bestmöglichem Schutz **und** nach Tragekomfort abzuwägen sind und zum anderen, dass die Mitarbeiter bei der Auswahl der Schutzkleidung einzubeziehen sind.⁴⁵ Wie erwähnt, liegt lt. der GSI alleine in Deutschland die Zahl der Schweißer bei 150.000 und weltweit oberhalb von 5.000.000.

Neben der Sicherung bzw. Erweiterung der Märkte für die Hersteller von Schweißerschutzkleidung kann die angestrebte Innovation auch einen weiteren, volkswirtschaftlich betrachtet wichtigen Beitrag zur Erreichung gesellschaftlicher Ziele leisten. Eine Erhöhung des Komforts einer Schutzkleidung wird immer auch zu einer Erhöhung ihrer Akzeptanz führen. Je höher der Komfort, desto selbstverständlicher wird eine Schutzkleidung getragen werden, was zwangsläufig zu einer Erhöhung der Arbeitssicherheit führt. Gleichzeitig hat die Erhöhung des Komforts noch einen zweiten, mindestens ebenso wichtigen Effekt. Die Belastung eines Schweißers beim Arbeiten ist mitunter extrem hoch, da es sich um eine körperlich schwere Arbeit bei lokal hohen Temperaturen handelt. Die thermische Belastung hat vielfältige negative Konsequenzen wie Unbehagen, Müdigkeit sowie herabgesetzte mentale und physische Leistungsfähigkeit. Ein verbesserter Komfort wird helfen, sowohl die Produktivität als auch die Arbeitssicherheit zu erhöhen, da die mentale wie physische Leistungsfähigkeit länger auf einem hohen Niveau verbleiben kann. Gerade im Bereich Schweißen und Brennschneiden entstehen für die metallverarbeitende Industrie erhebliche Einbußen durch Arbeitsausfälle – durchschnittlich fehlt ein Schweißer bzw. Brennschneider 22 Krankheitstage pro Jahr.⁴⁶ Eine Verbesserung des Tragekomforts kann zu einer Erhöhung der Arbeitssicherheit und zu einer Reduktion der Arbeitsausfälle beitragen. Neben der wirtschaftlichen Bedeutung der angestrebten Innovation leistet die Entwicklung somit auch einen positiven Beitrag für die Gesundheit und Sicherheit von Arbeitnehmern.

4. Experimentelles

4.1. Chemikalien

In Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. sind die im Rahmen des Forschungsprojektes verwendeten Chemikalien, eingesetzte Funktionspartikel und Textilhilfsmittel aufgeführt.

Tabelle 1: Chemikalien

Chemikalie	Abkürzung	Firma	Beschreibung
Hohenstein			
Carbonfasermehl	1	-	Feststoffgehalt: 100 % Farbe: schwarz Mittlere Faserlänge. 300 µm Faserdichte: 1,75 g/cm ³ Wärmeleitfähigkeit: abhängig von der Temperatur, 30 – 90 W/mK
Graphenoxid	2	IoLiTec	Feststoffgehalt: 47,5 % Farbe: grayish black Wärmeleitfähigkeit: ~ 5000 W/mK Schmelzpunkt: ~3700 °C
Aluminiumnitrid	3	IoLiTec	Feststoffgehalt: 100 % Farbe: off-white Partikeldurchmesser. 50 nm Faserdichte: 3,26 g/cm ³ Wärmeleitfähigkeit: 230 W/mK Schmelzpunkt: 2230 °C
Siliciumcarbid	4	IoLiTec	Feststoffgehalt: 100 % Farbe: grayish white Partikeldurchmesser. 50-60 nm Faserdichte: 3,216 g/cm ³ Wärmeleitfähigkeit: 250 W/mK Schmelzpunkt: 2700 °C
Alpha-Aluminiumoxid	5	IoLiTec	Feststoffgehalt: 99 % Farbe: white Partikeldurchmesser. 80 nm Faserdichte: 3,7 g/cm ³
Gamma-Aluminiumoxid	6	IoLiTec	Feststoffgehalt: 99,9 % Farbe: white Partikeldurchmesser. < 50 nm Faserdichte: 3,7 g/cm ³
Tubicoat A 36	Tubicoat A 36	CHT Germany GmbH	Textilbinder Wässrige Kunststoffdispersion; selbstvernetzendes Copolymerisat auf Acrylat/Styrol-Basis Ionogenität: anionisch Feststoffgehalt: 47 %

Chemikalie	Abkürzung	Firma	Beschreibung
Tubicoat PUS	Tubicoat PUS	CHT Germany GmbH	Textilbinder Aliphatische Polyesterpolyurethan-Dispersion Ionogenität: anionisch Feststoffgehalt: 50 %
Tubicoat MEA	Tubicoat MEA	CHT Germany GmbH	Textilbinder Paste zur Beschichtung von Schutzkleidung; Compound auf Polyurethanbasis Ionogenität: anionisch Feststoffgehalt: ~35 %
Tubicoat Fixierer HT	Tubicoat Fixierer HT	CHT Germany GmbH	Hilfsmittel zur Steigerung des Vernetzungsgrades von hitzereaktiven Kunststoffdispersionen; Formaldehydarmes Melaminharz Ionogenität: nicht ionisch Feststoffgehalt: 65 %
Verdicker LP	Verdicker LP	CHT Germany GmbH	Synthetisches Verdickungsmittel für Beschichtungspasten; Polyacrylsäure Ionogenität: anionisch Feststoffgehalt: 45 %
DTNW			
Ethanol		CHEMSO-LUTE	Reinheit: 99,8 % Vergällt mit MEK, IPA, BITREX® Form: Flüssig Farbe: Farblos
Ammoniaklösung		Roth	ROTIPURAN® 30 %, p.a., ACS Form: Flüssig Farbe: Farblos
Salzsäure		Roth	Reinheit: 32 %, reinst Form: Flüssig Farbe: Farblos - hellgelb
Tetraethoxysilane		abcr	Reinheit: 99 % Form: Flüssig Farbe: Farblos
(3-Glycidyoxypropyl)trimethoxysilane		Aldrich	Reinheit: ≥99 % (GC) Form: Flüssig Farbe: Farblos
1-Methylimidazol		Aldrich	Reinheit: ≥98 % Form: Flüssig Farbe: Farblos
Aeroxide Alu C	AluOx	Evonik Industries	Al ₂ O ₃ -Gehalt: ≥99,8 %

Chemikalie	Abkürzung	Firma	Beschreibung
			Form: Pulver, fest Farbe: weiß Stampfdichte: 50 g/L
Aeroxide TiO ₂ P25	TiO ₂ , P25	Evonik Industries	TiO ₂ -Gehalt: ≥99,5 % Form: Pulver, fest Farbe: weiß Stampfdichte: 130 g/L
Apyral 200 SM	ATH, Aluminium hydroxide	Nabaltec	Al(OH) ₃ -Gehalt: 99,3 % Form: Pulver, fest Farbe: weiß Partikelgröße: 400 nm
Zinc Oxide	ZnO	GRILLO	ZnO-Gehalt: 99,0 % Form: Pulver, fest Farbe: weiß

4.2. Gewebe

Verwendete Textilien

Unterschiedliche Gewebe wurden von den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses zur Verfügung gestellt (s. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.).

Tabelle 2: Verwendete Gewebe.

Material	Ausrüstung	Abkürzung	Hersteller	Flächengewicht	Dicke	Dichte
				g/m ²	cm	FD/cm
Hohenstein						
98% Baumwolle 2% Carbonleitfäden	Schümer SECAN® SECURO- Ausrüstung, antistatisch, spez. gekr.	A	Schümer Textil GmbH	310	-	-
55 % Modacryl 43 % Baumwolle 2 % Carbonfaser	keine	B	Rofa Bekleidungs- werk	348	0,23	Kette: 38 Schuss: 18

Material	Ausrüstung	Abkürzung	Hersteller	Flächengewicht	Dicke	Dichte
				g/m ²	cm	FD/cm
			GmbH & Co. KG			
100 % Baumwolle	Schümer SECAN® PLUS Ausrüstung	C	Schümer Textil GmbH	357	0,14	Kette: 39 Schuss: 21
89 % Baumwolle 10 % Polyamid 1 % Carbonleitfäden	Schümer SECAN® SECURO Ausrüstung, antistatisch	D	Schümer Textil GmbH	352	0,09	Kette: 40 Schuss: 22
59,5 % Aramid inkl. Antistatik 40,5 % Viskose	keine	E	IBENA Textilwerke GmbH	333	0,13	Kette: 36 Schuss: 23
DTNW						
BW-Zwirn	keine	CO	-	370	-	Doppelpilot
55 % Modacryl 43 % Baumwolle 2 % Carbonfaser	keine	MAC	Rofa Bekleidungswerk GmbH & Co. KG	348	0,23	Kette: 38 Schuss: 18

4.3. Methoden und Geräte

4.3.1. FT-IR-Spektroskopie

Infrarotspektroskopische Untersuchungen wurden mit einem FT-Infrarotspektrometer IR Prestige 21 der Fa. Shimadzu und mit einem FT/IR-430 der Firma JASCO durchgeführt.

4.3.2. UV-VIS-Spektroskopie

Die Absorption wurde im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich ($\lambda = 200 - 700 \text{ nm}$) wurden mit einem Perkin Elmer Lambda 950s bestimmt.

4.3.3. Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Die Oberflächenmorphologie der unbehandelten, behandelten und der verbrannten Textilien wurde mit einem Rasterelektronenmikroskop SEM S-3400 N II, Hitachi High-Technologies Europe GmbH mit 1.500-facher Vergrößerung der Proben und einer Einstellung von 20 kV analysiert. Die Proben wurden mit einem Sputter-coater (Emitech K500X, Ashford Kent, UK) beschichtet.

4.3.4. Abweisung von flüssigen Metallspritzern

Die Prüfung der „Abweisung von flüssigen Metallspritzern“ wurde nach ISO 9150 „Protective clothing — Determination of behaviour of materials on impact of small splashes of molten metal“ (Schutzkleidung; Bestimmung des Verhaltens von Werkstoffen gegenüber der Einwirkung von Metallspritzern) durchgeführt. Hierzu wurde der Schweißperlentest der Firma WAZAU verwendet. Das Schweißverfahren ist ein Autogen-schweißverfahren bzw. Gasschmelzschweißverfahren, bei welchem ein Gasgemisch aus Sauerstoff und Acetylen verwendet wird. Das Gasgemisch wird mit Hilfe eines Feuerzeuges entzündet, wobei eine Flamme mit Temperaturen von bis zu 3200 °C entsteht, die den Eisenstab zum Schmelzen bringen.

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt den Schweißperlentester der Firma WAZAU. Der Metallstab wird oberhalb des Brenners zwischen zwei Rädern eingeklemmt und mit Hilfe eines Motors mit einer definiert eingestellten Drehzahl vorwärtsbewegt (1). Das Ende des Metallstabes wird bei der Prüfung durch den fest angebrachten Autogenschweißbrenner geschmolzen (2). Die geschmolzenen Metalltropfen

werden durch einen Trichter (3) punktuell auf eine vertikal ausgerichtete Probe gelenkt, die vor einem Temperatursensor (4) gespannt ist. Der Sensor, verbunden mit dem Messgerät, dient zur Messung und Aufzeichnung der Temperatur und Tropfenanzahl (5). Die Tropfenanzahl wird visuell erfasst und per Knopfdruck werden die gezählten Metalltropfen an das Messgerät weitergeleitet (6).

Bei der Prüfung wird die Anzahl der geschmolzenen Metalltropfen gemessen, um einen Temperaturanstieg von 40 K zu verursachen. Das Ergebnis der Prüfung ergibt sich aus dem Mittelwert von zehn Messungen.



Abbildung 4: Schweißperlentest der Firma WAZAU

4.3.5. Bekleidungsphysiologische Kennzahlen

Die bekleidungsphysiologischen Kennzahlen Wärmedurchgangswiderstand (Wärmeisolation, R_{ct}) und Wasserdampfdurchgangswiderstand (Atmungsaktivität, R_{et}) wurden mit dem Hohensteiner Hautmodell nach DIN EN ISO 11092 (Physiologische Wirkungen – Messung des Wärme- und Wasserdampfdurchgangswiderstands unter stationären Bedingungen, Ausgabe 2014) bestimmt.

Die Muster wurden für 24 h beim jeweiligen Prüfklima vorklimatisiert und anschließend mit dem Hautmodell vermessen:

- Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} : 20 °C, 65% r. L.
- Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} : 35 °C, 40% r. L.

4.3.6. Spektroskopische Untersuchungen

Zur Bestimmung des UVC-Schutzes der Schweißerschutzkleidung gegen künstliche UV-Strahlung ($\lambda = 200-400$ nm, UV-A, UV-B, UV-C) wurden spektroskopische Untersuchungen durchgeführt. Ermittelt wurden hierbei die maximale Einsatzdauer und die effektive Belastungsstärke. Sie ist ein Maß für die Intensität an Strahlung, welche auf die Haut einwirkt.

Fünf Proben wurden für 24 Stunden bei 20°C, 65% r. L. vorklimatisiert. Die spektralen Transmissionswerte wurden je Probe in 0°, 45°- und 90°-Ausrichtung gemäß SOP-QM 11.S.03.007:2021 in Hohenstein gemessen und die resultierenden Transmissionswerte als Mittelwert angegeben.

Diese Vorschrift ist eine hausinterne Norm von Hohenstein. Diese Norm ist nicht öffentlich zugänglich. Insbesondere die Werte für $E_e(\lambda)$ für die spektrale Bestrahlungsstärke, welche für die Berechnung von E_{eff} für die Schweißverfahren essentiell sind, sind nicht öffentlich zugänglich, wodurch diese Berechnungen nicht verifiziert werden können.

Die Messbedingungen sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** angegeben.

Tabelle 3: Messbedingungen der spektroskopischen Untersuchungen

UV/VIS/NIR-Spektrophotometer:	Cary 5000 von Agilent mit Integrationskugelnzusatz 150 mm (nach CIE)
Messbereich:	200 - 400 nm
Spektrale Bandbreite:	5 nm
Scan-Geschwindigkeit:	300 nm/min
Datenintervall:	1,0 nm
Glättungszeit:	0,2 s
Referenzstrahlabschwächer:	1,5 Abs
Prüfklima:	20 °C, 65 % rel. Feuchte

Die Berechnung der effektiven Bestrahlungsstärke (E_{eff} in W/m^2) erfolgte nach der EU-Richtlinie 2006/25/EG⁴⁷ vom 05.04.2006 „über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)“ (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

Formel 1: Berechnung der effektiven Bestrahlungsstärke

$$E_{eff} = \sum_{\lambda=200nm}^{\lambda=400nm} E_e(\lambda) \cdot S_{eff}(\lambda) \cdot \tau(\lambda)$$

E_{eff} effektive Bestrahlungsstärke (UV-Bereich): berechnete Bestrahlungsstärke im UV-Wellenlängenbereich von 200 bis 400 nm, spektral gewichtet mit $S(\lambda)$, ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter [W/m^2]

$E_e(\lambda)$ spektrale Bestrahlungsstärke oder spektrale Leistungsdichte des Schweißprozesses, die auf eine Fläche einfallende Strahlungsleistung je Flächeneinheit, ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter pro Nanometer [$W/m^2 \text{ nm}$]

$S_{eff}(\lambda)$ spektrale Gewichtung unter Berücksichtigung der Wellenlängenabhängigkeit der gesundheitlichen Auswirkungen von UV-Strahlung auf Auge und Haut; dimensionslos [-]

$\tau(\lambda)$ Transmission des Textils

Aus der effektiven Bestrahlungsstärke wurde die maximale Einsatzdauer bis zum Erreichen des Tages-Expositionsgrenzwertes von 30 J/m^2 bestimmt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dieser Wert gibt den maximalen Wert an Strahlung an, welcher der Arbeiter bei einer Tagesarbeitszeit von 8 Stunden ausgesetzt werden darf.

Formel 2. Berechnung der maximalen Einsatzdauer

$$H_{eff} = E_{eff} \cdot \Delta t$$

H_{eff} effektive Bestrahlung: Bestrahlung, spektral gewichtet mit $S(\lambda)$, ausgedrückt in Joule pro Quadratmeter [J/m^2]

E_{eff} effektive Bestrahlungsstärke (UV-Bereich): berechnete Bestrahlungsstärke im UV-Wellenlängenbereich von 200 bis 400 nm, spektral gewichtet mit $S(\lambda)$, ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter [W/m^2]

Δt Dauer der Exposition, ausgedrückt in Sekunden [s]

Die spektrale Bestrahlungsstärke des Lichtbogens ist von Schweißverfahren zu Schweißverfahren unterschiedlich. Aus diesem Grund wurde für die Auswertung für die gängigen Schweißverfahren entschieden:

- Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)
- Metall-Inertgasschweißen (MIG)
- Metall-Aktivgasschweißen (MAG)
- Elektroden-Handschiweißen/Lichtbogenhandschiweißen (MMA)

4.3.7. *Abriebversuche*

Zur Beurteilung der Abriebfestigkeit der beschichteten Proben wurden Prüfungen in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 12947-1 (Bestimmung der Scheuerbeständigkeit von textilen Flächengebilden mit dem Martindale-Verfahren; Ausgabe 2007) durchgeführt. Hierzu wurden vier Proben im Martindale-Scheuerprüfgerät der Firma Karl Schröder KG eingespannt und mit 9 kPa belastet. Um die tatsächliche Gebrauchssituation zu simulieren, wurde kein Woll-Scheuergewebe verwendet, sondern dasselbe Gewebe wie die zu untersuchenden Proben. Gemäß den Hohensteiner Qualitätsanforderungen sind bei Schutzbekleidung 35.000 Touren erforderlich, bis es zum Versagen der Probe kommt. Überprüft wurde anfänglich im Intervall von 1000 Touren. Falls nach 5000 Touren keine Veränderungen zu sehen waren, wurde nach je 5000 Touren auf Versagen der Probe überprüft.

4.3.8. *Toxikologische Untersuchungen*

Nach DIN EN ISO 10993-5 (Biologische Beurteilung von Medizinprodukten - Teil 5: Prüfungen auf in vitro-Zytotoxizität; Ausgabe 2009-10) wurde die Hautverträglichkeit überprüft. Die Prüfung zielt darauf ab, eine mögliche zytotoxische Wirkung der Ausrüstung zu ermitteln. Für die Prüfung wurde aus den vorgelegten Proben ein Extrakt hergestellt. Über 24 Stunden wurden Hautzellen in diesem Extrakt bei 37 °C kultiviert. Ob das Prüfmaterial zelltoxisch wirkt, wurde über die Vitalität der Hautzellen bestimmt. Reduziert sich die Vitalität um mehr als 30 %, so wird das Material als zelltoxisch betrachtet.

4.3.9. *Waschversuche*

Um zu ermitteln, ob die Beschichtung auch praxistauglich ist, wurden Waschversuche im industriellen Rahmen durchgeführt. Das Waschen erfolgte im Rahmen der DIN EN ISO 15797 (Industrielle Wasch- und Finishverfahren zur Prüfung von Arbeitskleidung; Ausgabe 2018-05). Es wurden fünf Waschzyklen- und Trockenzyklen durchgeführt. Anschließend erfolgte eine visuelle Beurteilung der Beschichtung. Nach den fünf Wasch- und Trockenzyklen wurden die Textilien auf die Abweisung der Metallspritzer und die bekleidungsphysiologischen Eigenschaften untersucht. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Daten zum Wasch- und Trockenverfahren dargestellt.

Tabelle 4: eingesetztes Wasch- und Trocknungsverfahren

	Art der Waschmaschine	Waschschleudermaschine
Waschverfahren	Temperatur	75 °C
	Waschmittel	5,0 g Referenzwaschmittel ohne optischen Aufheller
	Zusatzmittel zum Spülen	0,3 ml 60 %-ige Essigsäure/l
	Beladung	14 kg (bestehend aus Ballast und den zu prüfenden Proben)
Trockenverfahren	Art des Trockners	Tumbler
	Temperatur	90 °C

4.4. Ausrüstung von Textilien

Die experimentelle Durchführung ist im Schlussbericht zu finden. Der Schlussbericht ist erhältlich beim Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West gGmbH, Adlerstraße 1, 47798 Krefeld.

5. Ergebnisse

5.1. Statistische Versuchsplanung zur Ermittlung der optimalen, thermisch leitfähigen Beschichtung für Schweißerschutzkleidung

5.1.1. Screening

Um den Zusammenhang zwischen der Vielzahl der Parameter (Textil, Binder, Partikel, Schichtdicke), die in allen Variationen als Beschichtung kombiniert werden können, zu erforschen wurde ein statistischer Versuchsplan erstellt. Hierzu wurde die Software Design of Experiments (DoE) eingesetzt. Es handelt sich um eine effiziente Methode, um aus einer Vielzahl von Parametern die relevanten Einflussfaktoren für einen Prozess oder ein Produkt zu ermitteln. Mit Hilfe eines Versuchsplans werden diese Faktoren weitgehend unabhängig voneinander variiert, um deren Effekte auf die Zielgrößen und damit ein Ursache-Wirkungs-Modell abzuleiten. Bei der Auswertung wird abgeschätzt, ob sich alle angestrebten Ziele erreichen lassen oder ob zum Beispiel bestimmte Zielvorgaben widersprüchlich sind. Die zielgerichtete visuelle Aufbereitung der Daten dient als Grundlage für die weitere Versuchsplanung im Rahmen des Projektes.

Für des Screening im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein Versuchsplan in der Software DoE erstellt unter der Berücksichtigung der Parameter Materialien (B und E), Binder (Tubicoat A36/PUS, Tubicoat MEA), Partikeln (Carbonfasermehl, Aluminiumnitrid und Siliciumcarbid) und Schichtdicke (120 µm, 200 µm, 500 µm). Die Zielgröße war dabei die Abweisung flüssiger Metallspritzer, die mit einem Fehlerfaktor von zwei Tropfen und einem signifikanten Unterschied ab fünf Tropfen festgelegt wurde. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt den bereits durch die Messergebnisse ergänzten statischen Versuchsplan. Die Durchführung der Ausrüstungen wie auch deren Charakterisierung erfolgte nach der Reihenfolge des statistischen Versuchsplan.

Tabelle 5: Screeningdesign zur Ermittlung von relevanten Parametern für thermische, leitfähige Beschichtungen

Run	Factor A: Schichtdicke [μm]	Factor B: Material	Factor C: Textilbinder	Factor D: Partikel	Response: Metallspritzer [n]
1	120	E	Mix	1	15,2
2	500	B	Mix	4	26
3	500	E	Mix	3	19,4
4	120	B	MEA	1	21,7
5	500	B	MEA	3	23,4
6	120	B	MEA	3	21,6
7	500	B	Mix	4	24,7
8	500	E	Mix	1	18,4
9	120	E	Mix	1	15,9
10	500	B	MEA	1	20,6
11	500	E	MEA	4	20
12	120	B	MEA	3	26
13	500	E	Mix	3	19,6
14	500	E	Mix	4	25,5
15	500	B	Mix	1	26
16	500	E	MEA	4	23,8

Mittels einer ANOVA-Analyse wurde in DoE ermittelt, ob es einen Zusammenhang zwischen den Parametern (Material, Binder, Partikel und Schichtdicke) gibt und welche Parameter signifikante Einflussfaktoren auf die Zielgröße Abweisung flüssiger Metallspritzer sind. Bei einem signifikanten Einflussfaktor liegt der p-Wert unter 0,05, dies ist bei Faktor B (Partikel) und D (Material) der Fall (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) d. h. der Textilbinder (Faktor C) und die Schichtdicke (Faktor A) haben keinen signifikanten Einfluss auf die Schutzwirkung gegen flüssige Metallspritzer.

Anhand der Auswertung mit DoE wurde festgestellt, dass das Material und die Partikel einen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße der Abweisung flüssiger Metallspritzer haben. Dies verdeutlicht die beispielhafte Vorhersage von Material „B“, Bindermischung Tubicoat A36/ PUS und Schichtdicke 310 μm in Abbildung 5. Die Beschichtungen mit Partikel 3 (Aluminiumnitrid) und Partikel 4 (Siliciumcarbid) würden gemäß den Vorhersagen die höchste Anzahl an abgewiesenen Metalltropfen und auch Schutzklasse 2 erreichen. Durch die Beschichtung mit Partikel 1 (Carbonfasermehl) würde Schutzklasse 2 nicht

erreicht werden. Der Verlauf des Diagrammes kann auf die anderen Parameter (Binder MEA und Material „E“) übertragen werden, dadurch würde sich keine Änderung der Steigung und des Verlaufes ergeben, lediglich die erwartende Anzahl an Metalltropfen würde sich verändern.

Tabelle 6: ANOVA-Analyse des Screeningdesigns

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-Value	p-Value	
Model	91.49	3	30.50	15.23	0.0002	significant
B-Partikel	21.35	2	10.68	5.33	0.0221	
D-Material	79.16	1	79.16	39.52	< 0.0001	
Residual	24.03	12	2.00			
Lack of Fit	8.54	7	1.22	0.3936	0.8719	not significant
Pure Error	15.50	5	3.10			
Cor Total	115.52	15				

Bei der Kombination der Parameter aus Schichtdicke 310 µm, Bindermischung Tubicoat A36/ PUS und Partikel 1 (Carbonfasermehl) ist die Abhängigkeit des Materials von der Zielgröße zu erkennen (Abbildung 6). Das bedeutet, dass das Material ein weiterer signifikanter Einflussfaktor ist und mit Material „B“ eine höhere Anzahl an abgewiesenen Metalltropfen erreicht werden kann, da die Werte von Material „E“ deutlich unter den Werten von Material „B“ liegen. Auch an diesem Beispiel können die anderen Parameter variiert werden, ohne den Verlauf und Steigung des Diagrammes zu ändern.

Bei den Parametern Binder und Schichtdicke liegt der p-Value (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) über 0,05, diese Parameter haben daher keinen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße. Der Unterschied der Werte liegt mit unter zwei Metalltropfen in der hinterlegten Fehlertoleranz, wodurch sich der Verlauf der Geraden in Abbildung 7 und Abbildung 8 ergibt.

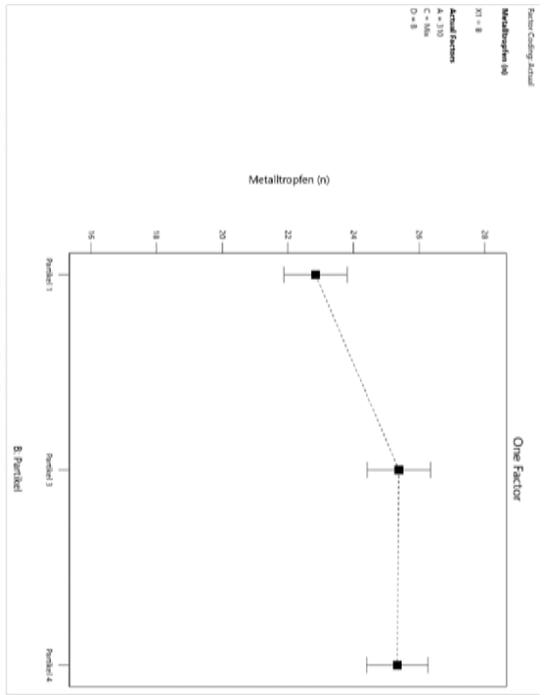


Abbildung 5: Auswertung Faktor B (Partikel)

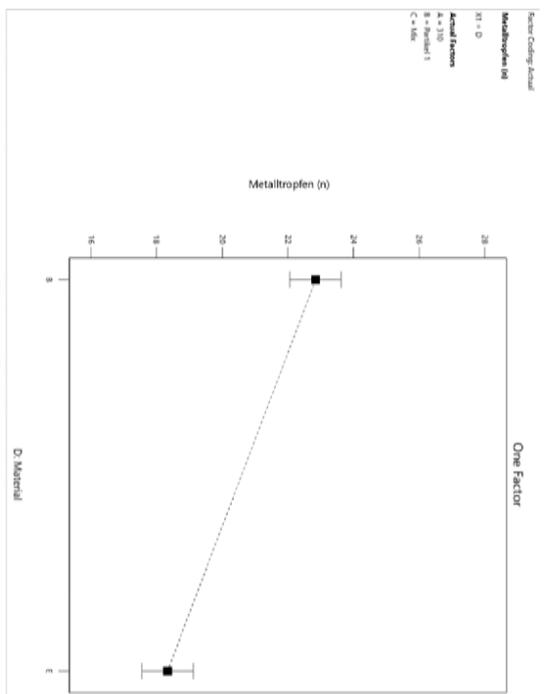


Abbildung 6: Auswertung Faktor D (Material)

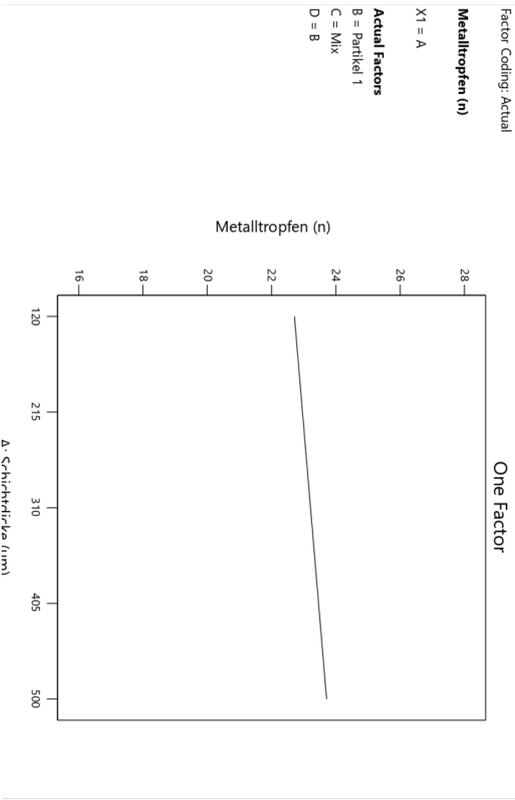


Abbildung 7: Auswertung Faktor A (Schichtdicke)

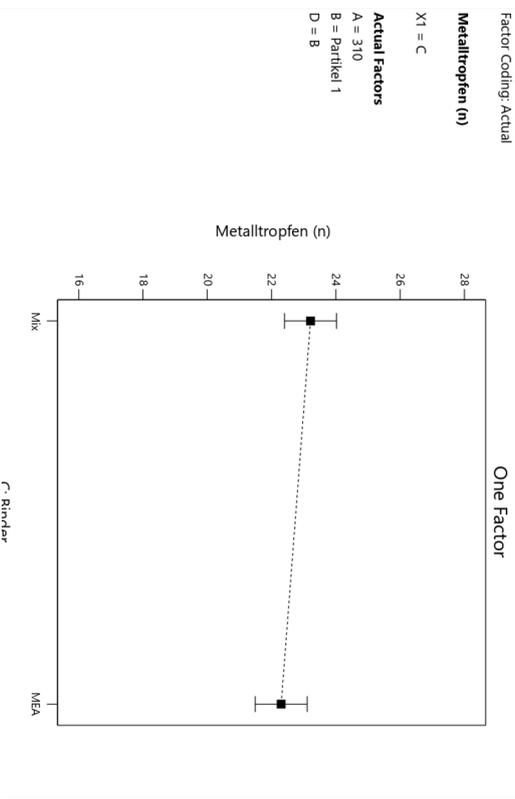


Abbildung 8: Auswertung Faktor C (Binder)

5.1.2. Optimierung

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Screening-Versuche (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) wurde ein Optimierungs-Versuchsplan mittels statistischer Versuchsplanung und der Software DoE erstellt, welcher in Abbildung 9 aufgeführt ist. Als Zielgröße wurde auch hier die Abweisung der flüssigen Metallspritzer (Anzahl Metallspritzer, Response 1) definiert. In dieser Versuchsreihe werden zudem Komforteigenschaften mitberücksichtigt und dadurch auch die Wärme- und Wasserdampfdurchgangswiderstände als Zielgrößen bestimmt (Response 2 und 3).

Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt die signifikanten Einflüsse auf die einzelnen Zielgrößen. Mit Hilfe des p-Werts lässt sich, wie bereits zuvor bei den Screeningversuchen, ein signifikanter Einfluss nachweisen. Hierzu sollte dieser möglichst gering sein, ab einem Wert $< 0,05$ ist davon auszugehen, dass der Parameter einen signifikanten Einfluss besitzt. Somit werden diese Parameter weiter bei der Auswertung in Design of Experiments berücksichtigt. Es zeigt sich, dass der einzige Einflussparameter auf die Anzahl abgewiesener Metallspritzer die Partikelart ist. Für den Wärmedurchgangswiderstand besteht eine Abhängigkeit zu Konzentration, Material und Partikel. Der p-Wert der Schichtdicke liegt über $0,05$, wurde allerdings als noch grenzwertig eingestuft und mit in der Auswertung berücksichtigt. Die Schichtdicke und das Material haben zudem einen signifikanten Einfluss auf den Wasserdampfdurchgangswiderstand.

Die Abbildung 11 gibt die Anzahl abgewiesener Metallspritzer in Abhängigkeit von der Partikelart wieder. Die angegebenen Faktoren sind eine Schichtdicke von $200\ \mu\text{m}$ und eine Partikelkonzentration von $5\ \%$. Da diese keinen Einfluss haben, können sie willkürlich gewählt werden. Auf der x-Achse des Schaubildes ist die Partikelart angezeigt. Bei Partikel 2 handelt es sich um das Graphenoxid, bei Partikel 3 um Aluminiumnitrid und bei Partikel 4 um Siliciumcarbid. Die y-Achse gibt die Anzahl an abgewiesenen Metallspritzern an. Es wird ersichtlich, dass zwischen Partikel 2 und 3 kein Unterschied in der Auswirkung auf die Abweisung von flüssigen Metallspritzern besteht, mit Partikel 4 aber eine leicht höhere Abweisung gegen flüssige Metallspritzer erreicht werden kann. Mit der Annahme, dass fünf Metalltropfen einen signifikanten Unterschied bedeuten, ist die Abweichung nicht signifikant.

Abbildung 9: Optimierungsdesign zur Ermittlung von relevanten Parametern für thermische, leitfähige Beschichtungen

Run	Factor 1 A:Schichtdicke	Factor 2 B:Konzentration	Factor 3 C:Material	Factor 4 D:Partikel	Response 1 Metalspritzer n	Response 2 Rct m ² K/W	Response 3 Ret m ² Pa/W
1	500	18,82	E	3	12	0,036	7,728
2	120	7,82	D	2	18	0,016	6,277
3	200	16,65	C	2	17	0,021	6,113
4	120	3,22	C	2	17	0,022	5,843
5	200	10,42	E	3	16	0,027	7,906
6	200	16,23	D	4	20	0,018	5,468
7	200	15,71	D	4	23	0,015	5,718
8	500	12,66	D	2	16	0,008	7,506
9	500	6,55	D	4	23	0,03	5,748
10	500	19,73	E	2	17	0,027	8,562
11	500	21,11	C	3	15	0,022	6,779
12	200	4,69	E	2	15	0,033	7,593
13	500	11	E	4	21	0,045	8,31
14	500	5,08	C	4	26	0,031	7,652
15	200	17,26	B	3	20	0,026	6,44
16	500	17,13	B	4	22	0,021	6,297
17	200	14,24	C	3	17	0,015	6,551
18	120	13,14	C	4	24	0,026	5,946
19	500	4,91	E	3	19	0,049	8,494
20	200	8,14	B	4	22	0,023	5,345
21	120	11,18	E	2	17	0,027	7,31
22	500	6,09	C	2	25	0,025	7,722
23	500	10,71	B	3	19	0,022	6,298
24	200	8,14	B	4	21	0,016	5,17
25	120	4,91	D	4	19	0,017	5,336
26	500	16,97	D	2	29	0,019	6,173
27	200	10,8	E	3	20	0,049	8,031
28	120	13,96	B	2	20	0,018	5,238
29	120	17,26	D	3	22	0,027	5,99
30	200	6,23	D	3	23	0,017	6,17
31	120	17,13	E	4	19	0,027	8,045
32	500	4,69	B	2	22	0,018	6,033
33	500	10,86	B	3	19	0,039	7,18
34	200	6,23	D	3	16	0,033	6,498
35	200	5,9	C	3	19	0,041	6,416
36	500	12,66	B	2	14	0,016	5,887
37	120	4,91	B	3	23	0,014	5,578

Response 1: Metallspritzer

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	74,45	2	37,23	3,28	0,0499	significant
D-Partikel	74,45	2	37,23	3,28	0,0499	
Residual	385,98	34	11,35			
Lack of Fit	360,98	32	11,28	0,9025	0,6575	not significant
Pure Error	25,00	2	12,50			
Cor Total	460,43	36				

Response 2: Rct

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	0,0022	7	0,0003	6,61	0,0001	significant
A-Schichtdicke	0,0002	1	0,0002	3,56	0,0694	
B-Konzentration	0,0002	1	0,0002	4,24	0,0487	
C-Material	0,0014	3	0,0005	9,72	0,0001	
D-Partikel	0,0005	2	0,0003	5,76	0,0078	
Residual	0,0014	29	0,0000			
Lack of Fit	0,0012	27	0,0000	0,5923	0,7963	not significant
Pure Error	0,0002	2	0,0001			
Cor Total	0,0036	36				

Response 3: Ret

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	29,55	4	7,39	33,77	< 0,0001	significant
A-Schichtdicke	5,11	1	5,11	23,38	< 0,0001	
C-Material	23,91	3	7,97	36,44	< 0,0001	
Residual	7,00	32	0,2188			
Lack of Fit	6,93	30	0,2310	6,69	0,1383	not significant
Pure Error	0,0691	2	0,0346			
Cor Total	36,55	36				

Abbildung 10: ANOVA Analyse Optimierungsdesign

Der Wärmedurchgangswiderstand ist abhängig von der Partikelart, dem Material und der Konzentration. Die Abhängigkeiten sind in Abbildung 12 bis Abbildung 14 dargestellt. Von der Schichtdicke ist in der Auswertung mit DoE kein Zusammenhang erkennbar. In Abbildung 12 ist die Partikelart auf der x-Achse und der Wärmedurchgangswiderstand (R_{ct}) auf der y-Achse dargestellt. Partikel 2 weist den geringsten Wärmedurchgangswiderstand (R_{ct}) auf. Partikel 3 und 4 weisen einen etwas höheren Wärmedurchgangswiderstand (R_{ct}) auf. Auch das Material hat einen Einfluss darauf, wie viel Wärme das Textil einschließt. In Abbildung 13 ist deutlich zu erkennen, dass das Material E den höchsten Wärmedurchgangswiderstand (R_{ct}) aufweist. Die anderen drei Materialien (B, C, D) liegen im vergleichbaren Rahmen. Wie bereits zuvor gezeigt wurde, hat die Art des Partikels einen Einfluss auf den Wärmedurchgangswiderstand (R_{ct}). In Abbildung 14 wird die

Konzentration der Partikel auf der x-Achse aufgetragen. Es ist eine leichte Tendenz zu erkennen, dass mit steigender Partikelkonzentration ein niedriger Wärmedurchgangswiderstand resultiert.

Abbildung 15 verdeutlicht den Einfluss des Materials auf den Wasserdampfdurchgangswiderstand. Material E weist den höchsten Wasserdampfdurchgangswiderstand auf und somit die geringste Atmungsaktivität. Die geringsten Werte bildet Material B gefolgt von Material D und C. Ein weiterer Einflussfaktor auf den Wasserdampfdurchgangswiderstand (R_{et}) ist die Schichtdicke. In Abbildung 16 ist zu sehen, dass der Wasserdampfdurchgangswiderstand (R_{et}) mit zunehmender Schichtdicke linear steigt. Das heißt, je höher die Auftragsdicke ist, umso weniger Wasserdampf wird durch das Textil gelassen.

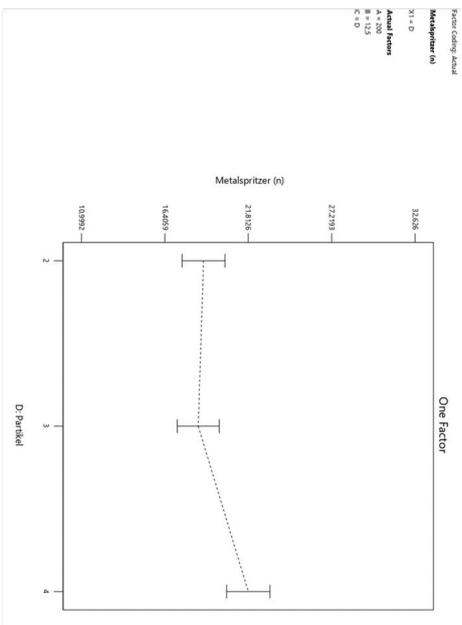


Abbildung 11: Einfluss der Partikelart auf die Anzahl abgewesener Metallspritzer

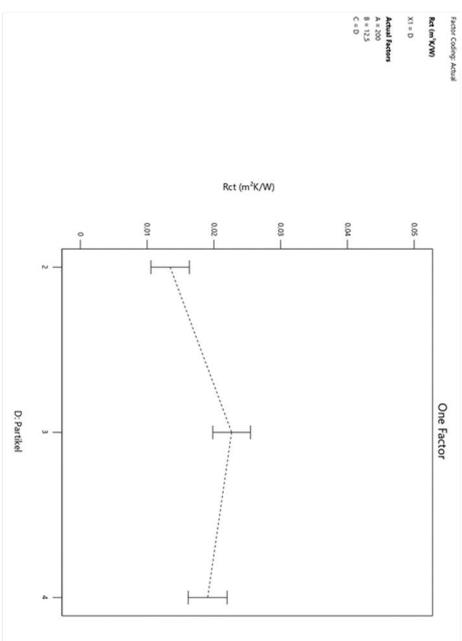


Abbildung 12: Einfluss der Partikelart auf den Wärmedurchgangswiderstand

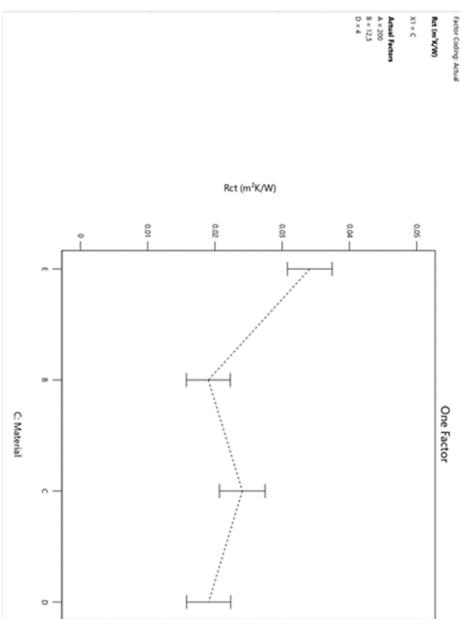


Abbildung 13: Einfluss des Materials auf den Wärmedurchgangswiderstand

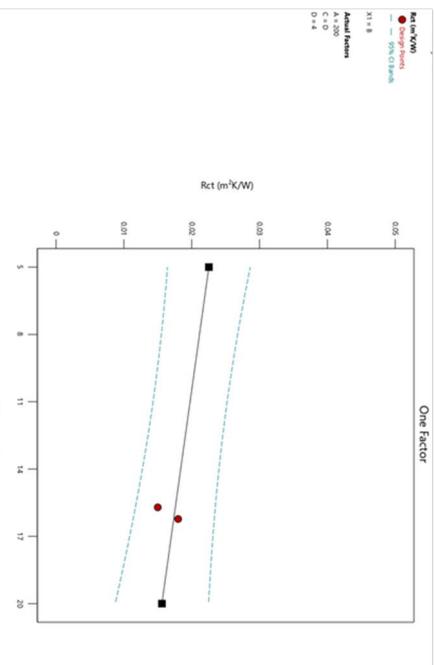


Abbildung 14: Einfluss der Partikelkonzentration auf den Wärmedurchgangswiderstand

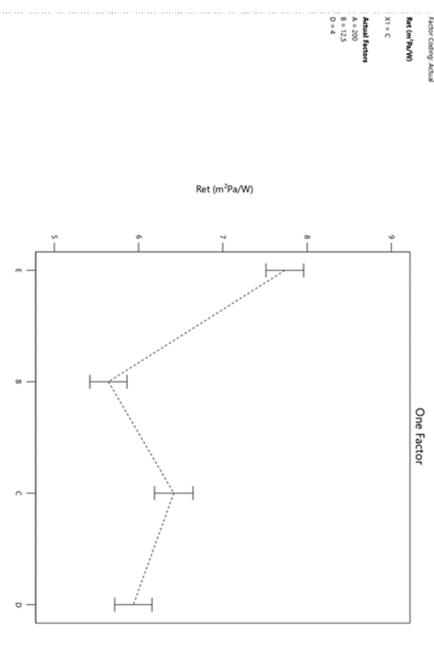


Abbildung 15: Einfluss des Materials auf den Wasserdampfdurchgangswiderstand

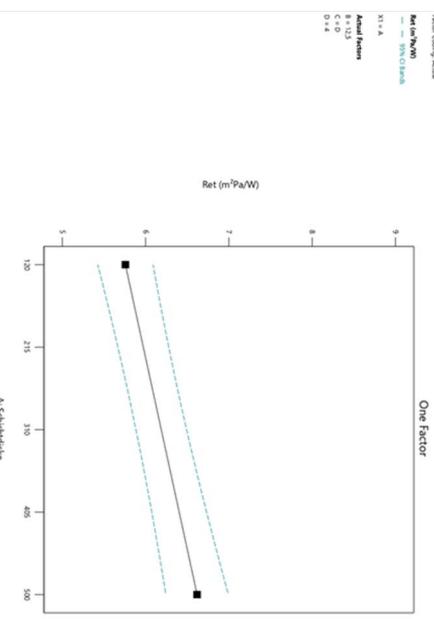


Abbildung 16: Einfluss der Schichtdicke auf den Wasserdampfdurchgangswiderstand

Zusammenfassend konnte somit gezeigt werden, dass Partikel 4 (Siliciumcarbid) die besten Ergebnisse hinsichtlich der Abweisung der Metallspritzer erreichte. In Bezug auf die Materialien zeigte Material E die schlechtesten Ergebnisse (hohe Wärmeisolation, hoher Wasserdampfdurchgangswiderstand).

Aus wirtschaftlichen Aspekten und im Sinne der Umwelt ist wünschenswert eine möglichst geringe Schichtdicke und eine möglichst geringe Partikelkonzentration einzusetzen, um so den Einsatz der Chemikalien auf ein Minimum zu reduzieren, ohne dabei große Nachteile für die Ausrüstung durch den Effekt zu erzielen. Mit Hilfe dieser Vorgaben wurden optimierte, thermisch leitfähige Beschichtungen mit der Software DoE ermittelt.

Die Vorschläge sind in Abbildung 17 aufgelistet, so wie die prognostizierten Werte für die Zielgrößen.

Number	Schichtdicke	Konzentration	Material	Partikel	Metallspritzer	Rct	Ret	Desirability	
1	120,000	5,000	B	4	21,818	0,021	5,462	0,760	Selecter
2	120,000	5,000	D	4	21,818	0,021	5,758	0,740	
3	120,000	5,000	C	4	21,818	0,026	6,237	0,703	
4	120,000	5,000	B	2	18,917	0,016	5,462	0,648	
5	120,000	5,000	B	3	18,571	0,025	5,462	0,633	
6	120,000	5,000	D	2	18,917	0,016	5,758	0,631	
7	120,000	5,000	D	3	18,571	0,025	5,758	0,616	
8	120,000	5,000	C	2	18,917	0,021	6,237	0,599	
9	120,000	5,000	C	3	18,571	0,030	6,237	0,586	
10	120,000	5,000	E	4	21,818	0,037	7,555	0,560	
11	120,000	5,000	E	2	18,917	0,031	7,555	0,477	
12	120,000	5,000	E	3	18,571	0,040	7,555	0,466	

Abbildung 17: Vorschläge der Software DoE für eine optimierte, thermisch leitfähige Beschichtung

5.2. Charakterisierung der thermisch leitfähigen Beschichtungen

Gemäß den Optimierungsvorschlägen wurden drei Beschichtungsrezepturen für die weitere Charakterisierung ausgewählt. Es wurde eine Partikelkonzentration von 5 % und eine Schichtdicke von 120 µm gewählt. Beschichtet wurde auf Material B, C und D.

Diese optimierte Beschichtung wurden auf die Abweisung der Metallspritzer und bekleidungsphysiologische Kennwerte untersucht. Zusätzlich wurden toxikologische Prüfungen, Waschversuche und Abriebversuche nach dem Martindale-Verfahren durchgeführt, um so Aufschluss über die Eignung der Beschichtung zu gewinnen.

Tabelle 7: Vergleich der prognostizierten Werte (DoE) und der gemessenen Werte zeigt einen Vergleich der durch das Programm DoE prognostizierten Werte mit dem in

Laborversuchen bestimmten Werten. Es ist zu sehen, dass die prozentuale Abweichung zu den prognostizierten Werten gering ist.

Tabelle 7: Vergleich der prognostizierten Werte (DoE) und der gemessenen Werte

Material	Prüfung	Prognose DoE	gemessene Werte	Abweichung [%]
B	Metallspritzer [Anzahl abgewiesene Tropfen]	21,8	24	9,2
C		21,8	23	5,2
D		21,8	22	0,9
B	Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} [m ² K/W]	0,021	0,022	4,5
C		0,026	0,028	7,1
D		0,021	0,022	4,5
B	Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} [m ² Pa/W]	5,46	5,01	9,1
C		6,24	5,56	11,6
D		5,76	6,06	5,0

5.2.1. Metallspritzer-Prüfung an den optimierten Mustern

Durch Prüfung der Abweisung gegen flüssige Metallspritzer nach ISO 9150 (Schutzkleidung; Bestimmung des Verhaltens von Werkstoffen gegenüber der Einwirkung von Metallspritzern; Ausgabe 1988) sollte die optimierte Beschichtung im Vergleich zur Rohware verbessert werden. Zusätzlich erfolgte ein Vergleich zu den gewaschenen Mustern (vgl. Kapitel 5.2.4).

Abbildung 18 zeigt für alle Materialien eine Verbesserung der Abweisung der Metallspritzer durch die optimierte Beschichtung. Bei Material B sind es +5 Tropfen, bei Material C +4 Tropfen und bei Material D +5 Tropfen im Vergleich zu den unbeschichteten Materialien. Die beschichteten Materialien erreichen somit, trotz erhöhter Abweisung von flüssigem Metallspritzern, lediglich die Schutzklasse 1 nach DIN EN ISO 11611 (Schutzkleidung für Schweißen und verwandte Verfahren; Ausgabe 2015).

Die Anzahl der abgewiesenen Tropfen der gewaschenen Proben entspricht der des Rohmaterials. Auch die optische Begutachtung am Digitalmikroskop bestätigte dies (siehe Kapitel 5.2.4).

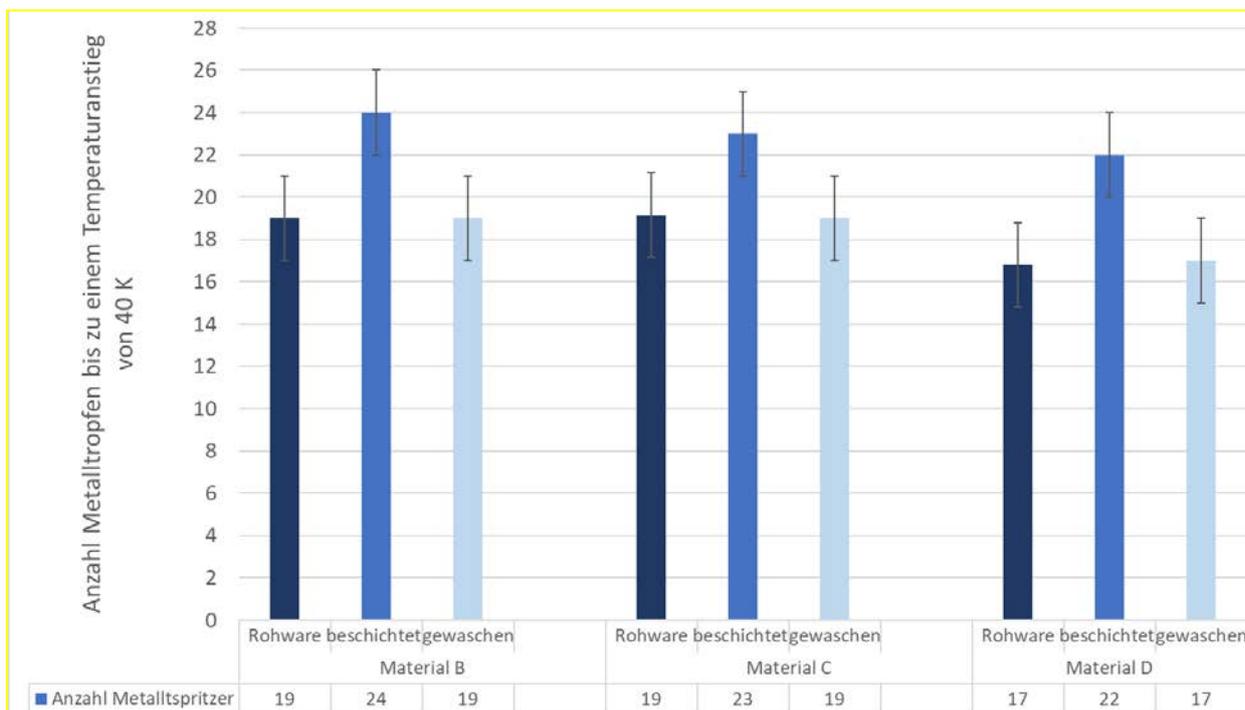


Abbildung 18: Abweisung von flüssigen Metallspritzern von optimierten Proben im Vergleich zur Rohware und nach Wäsche

5.2.2. Bekleidungsphysiologische Prüfungen an optimierten Mustern

Die bekleidungsphysiologischen Eigenschaften der optimierten Muster wurden bestimmt und ebenso mit der Rohware, wie auch den gewaschenen Mustern verglichen (Abbildung 19).

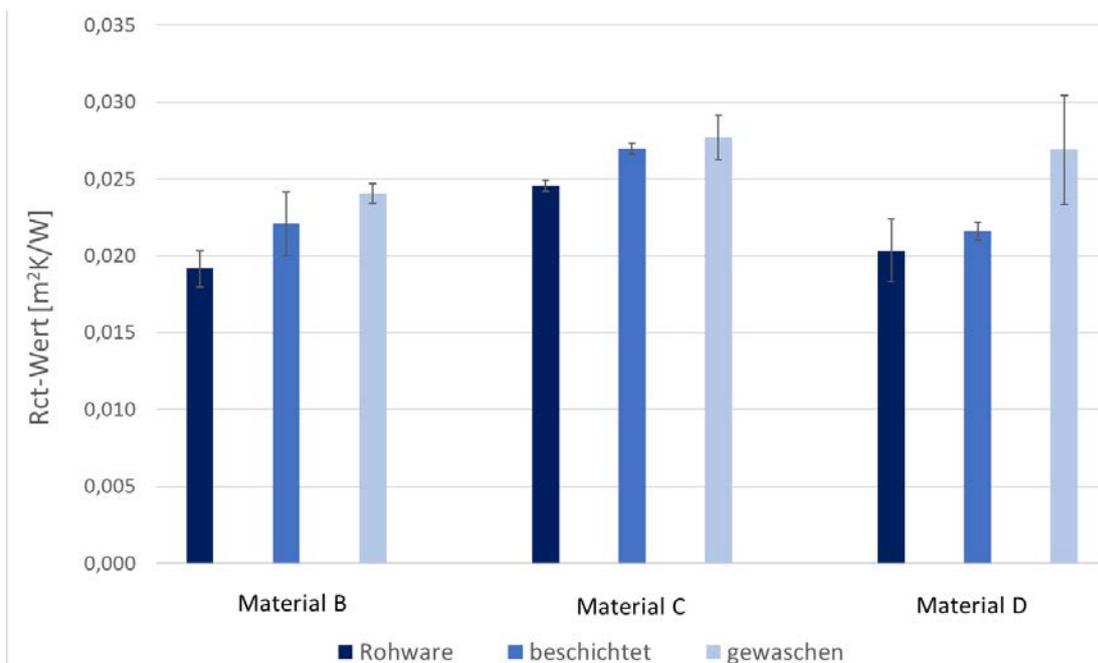


Abbildung 19: Wärmedurchgangswiderstand der optimierten Proben im Vergleich zur Rohware und nach Wäsche

Die Messung des Wärmedurchgangswiderstandes R_{ct} zeigen, dass die beschichteten Proben eine höhere Wärmeisolation aufweisen als die Rohware. Nach dem Waschen steigt diese erneut leicht an. Dies kann bei allen drei der verwendeten Materialien beobachtet werden. Mit der Annahme, dass eine prozentuale Abweichung von über 15 % einen signifikanten Unterschied in den Werten bedeutet, kann bei Material B und D ein signifikanter Unterschied zwischen der Rohware und dem gewaschenen Muster festgestellt werden. Bei Material C ist keine signifikante Abweichung zwischen den Werten zu erkennen.

Einfluss der Partikelart

Partikel 2 weist den geringsten R_{ct} -Wert auf. Die Wärme scheint somit besser abgeleitet zu werden, als es bei Partikel 3 und 4 der Fall ist. Um diese These zu bestätigen können die Wärmeleitfähigkeiten der einzelnen Partikel betrachtet werden (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Dort ist zu erkennen, dass Graphenoxid eine höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist als Partikel 3 und 4, welche vergleichbare Werte besitzen. Der Grund für die geringere Wärmeisolation könnte demnach daran liegen, dass Partikel 2 Wärme besser leitet und diese besser ableiten kann.

Einfluss des Materials

Material E isoliert mehr Wärme als Material B, C und D. Die textiltechnologischen Eigenschaften der vier Textilien unterscheiden sich jedoch kaum voneinander. Was Material E von den anderen drei eingesetzten Materialien unterscheidet ist die Materialzusammensetzung und die Bindung. Eine mögliche Erklärung für die höhere Wärmeisolation könnte daher sein, dass durch abstehende Fasern eine höhere Haftluftschicht erzeugt wird. Eine andere Erklärung könnte sein, dass es die Spezialbindung selbst ist, welche die Luft besser einschließt. Im Gegensatz zu den anderen drei Materialien besteht das Material nicht aus einem Großteil an Baumwolle. Material E besteht aus 59,5 % Aramid und 40,5 % Viskosefasern. Wird die Wärmeleitfähigkeit von Baumwolle und Aramid verglichen, so fällt auf, dass Baumwolle mehr Wärme leitet als Aramid. Die Wärmeleitfähigkeit vom p-Aramid beträgt $0,05 \frac{W}{m \cdot K}$, die vom m-Aramid $0,13 \frac{W}{m \cdot K}$ [25]. Im Vergleich dazu hat Baumwolle eine Wärmeleitfähigkeit von 0,3 bis $0,5 \frac{W}{m \cdot K}$ [25]. Somit kann die Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials der Grund für die höhere Wärmeisolation von Material E sein. Die

geringere Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterialies, ermöglicht es nur begrenzt die Wärme abzuleiten.

Einfluss der Partikelkonzentration

Mit steigender Partikelkonzentration wird ein niedriger Wärmedurchgangswiderstand erreicht. Eine mögliche Erklärung hierfür kann die erhöhte Wärmeleitfähigkeit durch die Partikel sein. Bei einer höheren Partikelkonzentration sollte entsprechend auch die Wärme abgeleitet werden können.

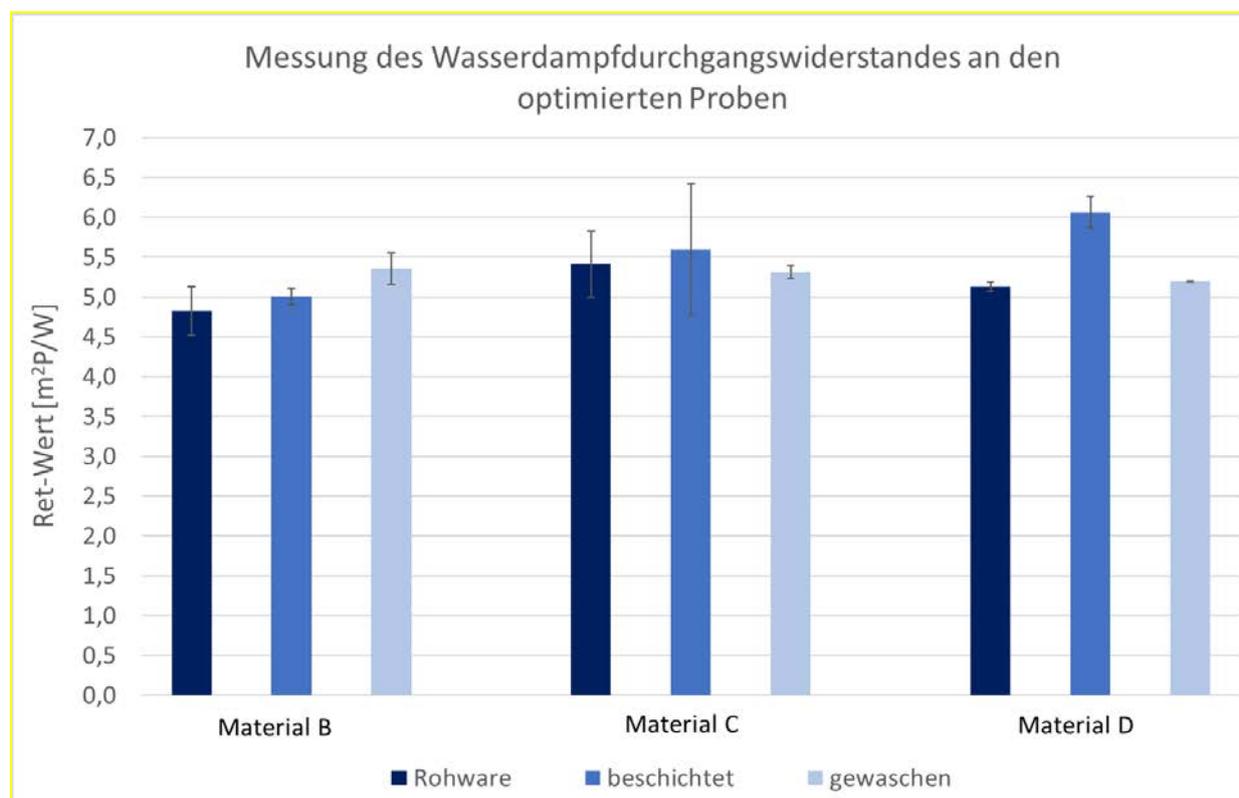


Abbildung 20: Wasserdampfdurchgangswiderstand der optimierten Proben im Vergleich zur Rohware und nach Wäsche

Beim Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} , dargestellt in Abbildung 20, ist eine Abweichung zwischen den Werten von über 10 % als signifikant anzusehen. Bei den Materialien B und C ist kein signifikanter Unterschied zwischen den optimierten, beschichteten Mustern und den jeweiligen Rohmaterialien, bzw. zu den gewaschenen Mustern zu erkennen. Bei Material D liegt ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen den Werten der Rohware und dem gewaschenen Muster vor, allerdings ist der Wert des Wasserdampfdurchgangswiderstandes bei den beschichteten Proben leicht erhöht.

Einfluss des Materials

Wasserdampf kann über die Kleidung unter anderem durch die Poren entweichen. Hierbei spielt die Dicke der Textilien eine Rolle. Je dicker das Textil ist, umso länger der Diffusionsweg und umso erschwerter ist der Wasserdampfdurchgang. Mit der Annahme, dass die Dicke der Materialien im Fall von Material E der Grund für den höheren Wasserdampfdurchgangswiderstand ist, müsste der Widerstand bei Material B auch höher sein. Material B weist nämlich die höchste Dicke auf. Daher kann die Dicke des Materials nicht allein die Ursache sein. Beim Transport über die Garnkapillaren kann die Benetzbarkeit, Faserfeinheit und Garndrehung bedeutend sein.

Ein großer Unterschied zwischen Material E und den anderen Materialien liegt in der Materialzusammensetzung. Wie bereits erwähnt, besteht Material E nicht aus einem Großteil an Baumwolle, sondern aus einer Aramid-Viskose-Mischung. Wasserdampf kann durch die Fasern aufgenommen werden und nach außen abgeleitet werden. Dieser Mechanismus funktioniert dann besser, wenn die Fasern viel Wasser aufnehmen können. Allgemein kann gesagt werden, dass Naturfasern eine bessere Feuchtigkeitsaufnahme aufweisen als synthetische Fasern. Jedoch spielt beim Wasserdampfdurchgangswiderstand nicht nur die Wasseraufnahme des Materials eine Rolle, sondern weitere Faktoren, wie Faserfeinheit, Garndrehung, Fadendichte, Dicke der Materialien, Benetzbarkeit können Einfluss darauf nehmen.

Einfluss der Schichtdicke

Umso größer die aufgetragene Schichtdicke ist, desto höher ist der Wasserdampfdurchgangswiderstand. Dieser Verlauf ist zu erwarten, da eine höhere Schichtdicke die Poren des Textils mehr verschließt, sodass der Wasserdampf weniger gut durch die Poren entweichen kann.

5.2.3. Spektroskopische Untersuchungen an optimierten Mustern

In Abbildung 21 ist die effektive Gesamtbestrahlungsstärke der optimiert, beschichteten Materialien dargestellt. Sie gibt die Intensität an Strahlung an, welche auf die Haut einwirkt. Demnach sind niedrige Werte anzustreben, um so einen Schutz für Schweißer gegen UV-Strahlung zu gewährleisten. Werden die beschichteten und unbeschichteten Materialien miteinander verglichen, so kann von einer Verbesserung durch die Beschichtung bei allen drei Schweißverfahren (WIG-, MMA- und MAG- Schweißen) ausgegangen

werden. Zwischen dem WIG- und MMA- Schweißen ist der Unterschied bei allen drei Materialien gering. Wird jedoch das MAG- Schweißen betrachtet, so sind signifikante Unterschiede zu erkennen. Die Beschichtung verbessert den Schutz gegen UV-Strahlung deutlich bei Material B und C. Insbesondere das Material D weist sowohl im unbeschichteten Zustand als auch im beschichteten Zustand geringe Strahlungsintensitäten auf. Aus der effektiven Gesamtbestrahlungsstärke wurde die maximale Einsatzdauer der Textilien bestimmt (siehe Abbildung 22). Tendenziell ist auch hier von einer verlängerten Einsatzdauer durch die Beschichtung auszugehen. Für das MAG-Schweißen ist die Einsatzdauer am geringsten. Verglichen zu Material B und C, ist die Einsatzdauer von Material D am größten.

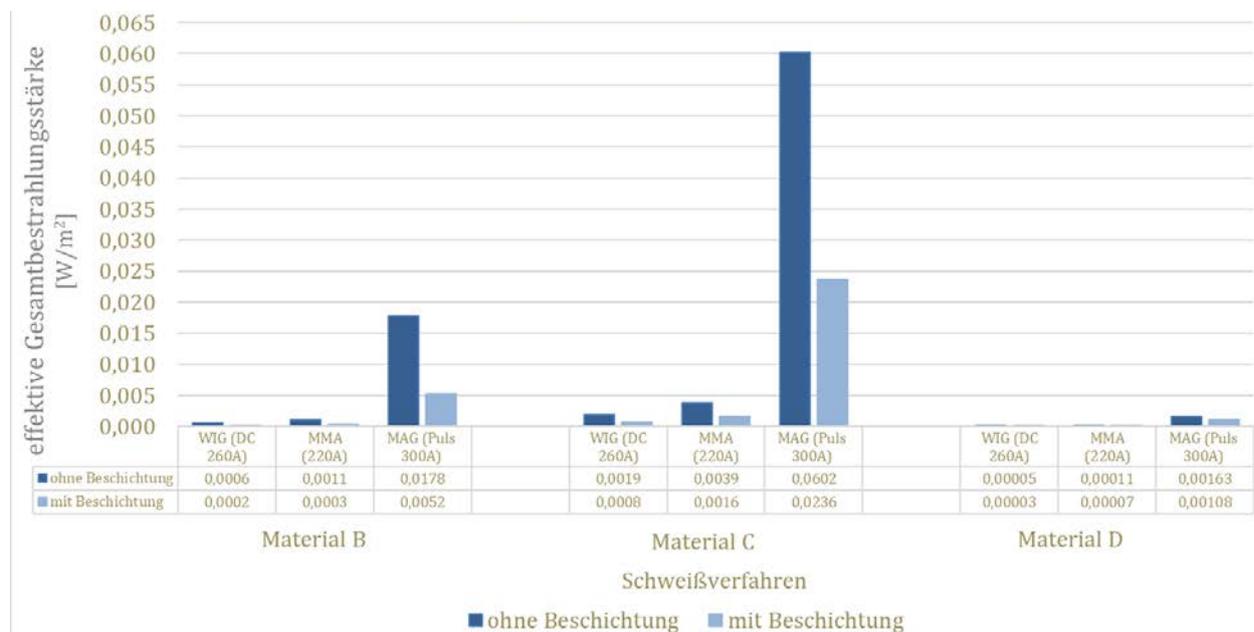


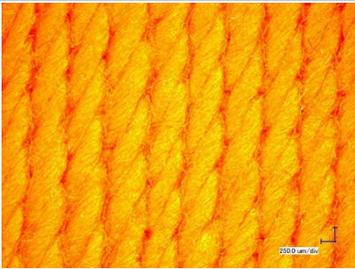
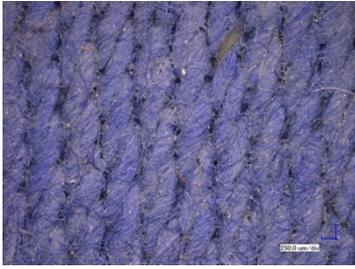
Abbildung 21: effektive Gesamtbestrahlungsstärke der Textilien bei verschiedenen Schweißverfahren



Abbildung 22: maximale Einsatzdauer der Textilien bei unterschiedlichen Schweißverfahren

5.2.4. *Waschversuche an optimierten Mustern*

Tabelle 8: Digitalmikroskopaufnahmen vom Material im Neuzustand, beschichtet und gewaschenen Zustand

	Material B	Material C	Material D
Rohmaterial			
beschichtetes Muster			
nach 5 Wasch- Trocknungs- Zyklen			

Zur Beurteilung der Waschbeständigkeit der optimierten Muster wurden die Proben fünfmal industriell wiederaufbereitet. Die Bewertung der Waschbeständigkeit wurde zunächst optisch durchgeführt. Mit Hilfe eines Digitalmikroskopes wurden die Rohmaterialien, die beschichteten Materialien und die beschichteten Materialien nach den fünf Waschzyklen (Wasch- Trocknungszyklen) betrachtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 aufgezeigt. Bei allen drei Materialien ist die Beschichtung im Neuzustand als grüliche Schicht auf den Fasern zu sehen. Beim gewaschenen Material lässt sich optisch kein Rückstand der Beschichtung erkennen. Das Material ähnelt nach dem Waschen dem Rohmaterial. Besonders bei Material C und D ist zusätzlich zu erkennen, dass sich die Fasern nach dem 5. Waschgang mehr aus dem Faserverband gelöst haben.

5.2.5. *Toxikologische Untersuchungen an optimierten Mustern*

Bei den durchgeführten toxikologischen Untersuchungen gilt eine Wachstumshemmung der Körperzellen von über 30 % gilt als zelltoxisch. Wie in Tabelle 9 zu sehen ist, beträgt die Wachstumshemmung der Beschichtung weit über 30 %. Bei Material B und C liegt sie bei 100 %.

Tabelle 9: Ergebnisse der Toxikologischen Untersuchungen

Material	B	C	D
Wachstumshemmung	100 %	100 %	92 %

5.2.6. *Untersuchung der Abriebbeständigkeit der optimierten Muster*

Mittels einer Bestimmung der Abriebfestigkeit nach dem Martindale-Verfahren sollte ermittelt werden, ob sich die Beschichtung abreibt und nach wie vielen Touren dies geschieht. Weiterhin wurde untersucht, ob die Beschichtung die Abriebfestigkeit nicht sogar noch zusätzlich erhöht. In Abbildung 23 sind die Ergebnisse dargestellt. Die Untersuchung wurde abgebrochen, wenn die Probe versagte oder 35.000 Touren erreicht waren.

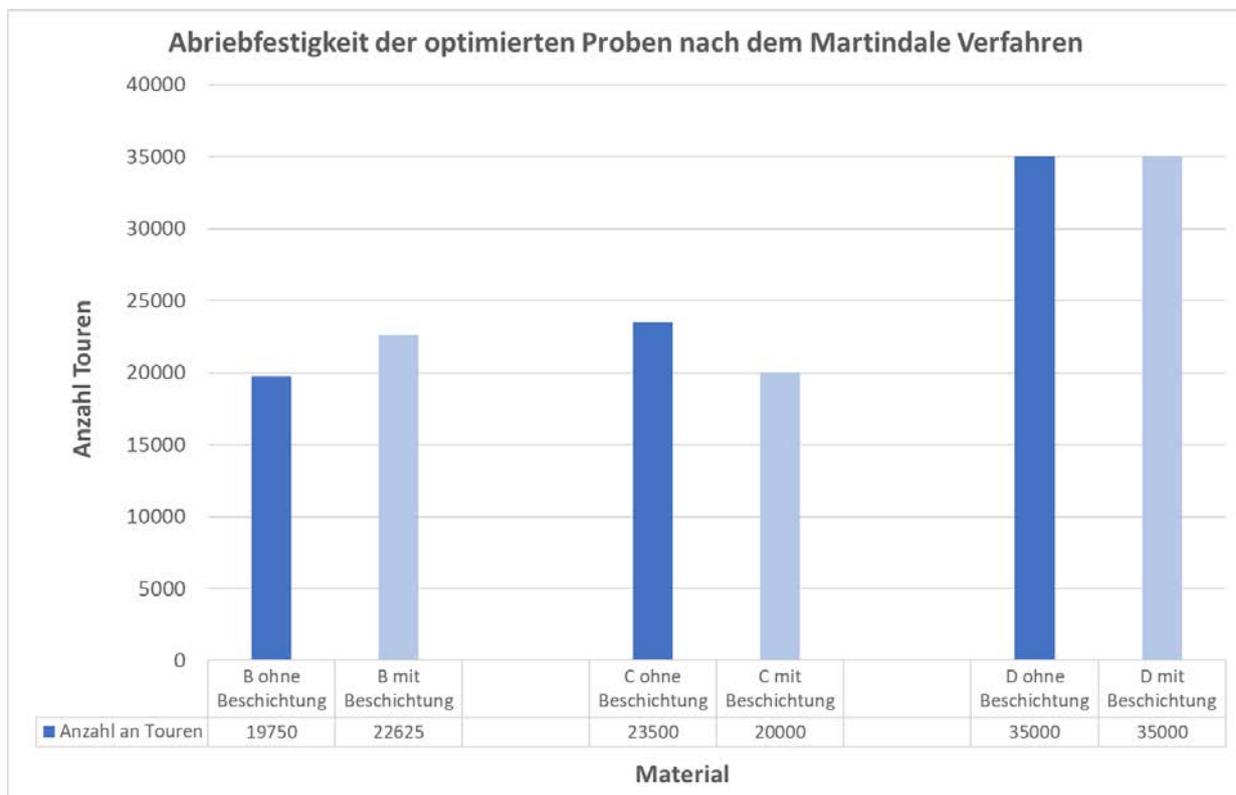
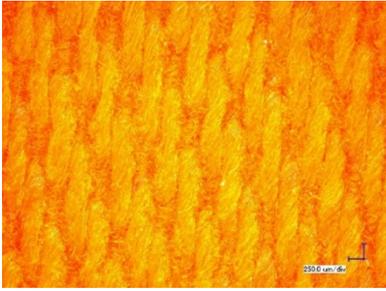
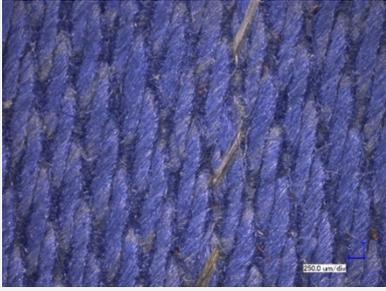


Abbildung 23: Ergebnisse der Martindale-Prüfung zur Abriebfestigkeit

Die in Abbildung 23 dargestellten Ergebnisse zeigen leichte Abweichungen zwischen der Anzahl der Touren, die ein beschichtetes Material und unbeschichtetes Material aushalten. Die Unterschiede wurden als nicht signifikant eingestuft. Die Prüfung von Material D wurde nach 35000 Touren abgebrochen, da die Anforderungen an das Material erfüllt wurden. Laut den Hohensteiner Qualitätsstandards soll eine Schutzbekleidung mindestens 30000 Touren standhalten können. Die Beurteilung, ob sich die Beschichtung abgetragen wurde, erfolgte optisch. Es wurden Digitalmikroskopieaufnahmen durchgeführt, welche in Tabelle 10 dargestellt sind. In den Bildern in 50-facher Vergrößerung ist zu sehen, dass sich noch Beschichtungsmasse an den Textilien befindet. Allerdings wurde auch Beschichtung abgetragen.

Tabelle 10: Digitalmikroskopieaufnahmen der optimierten Muster im neuzustand und nach Abriebversuchen nach dem Martindale-Verfahren

Material	Touren	Beschichtetes Textil im Neuzustand	Beschichtetes Textil nach dem Abriebversuch
B	22500		
C	20000		
D	35000		

5.3. Charakterisierung der strukturierenden Ausrüstungen

Im ersten Schritt wurde ein Screening durchgeführt, welches Beschichtungssystem und welche Partikel und in welcher Konzentration eine Verbesserung der Abweisung von flüssigen Metallspritzern erfolgt. Im ersten Schritt wurden der Feststoffanteil des Binders von 10, 5, 2,5 und 1,25 % getestet. Bei Feststoffanteilen von 5 % schnitt das ausgerüstete Textil im Metallspritzertest gut ab, wobei die Textilien nach der mit 5 und 10 % Ausrüstung jedoch sehr steif waren. Niedriger Feststoffanteile führten zu deutlich flexibleren Textilien, welche auch die Anforderungen der Norm, also einen Temperaturanstieg von 40 K erst nach 25 Tropfen erfüllen (Abbildung 24). Beim MAC Gewebe konnten in den ersten Vorversuchen keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden (Abbildung 25). Auch bei diesen Proben findet man bei hohen Feststoffgehalten des Binders eine Versteifung des Gewebes.

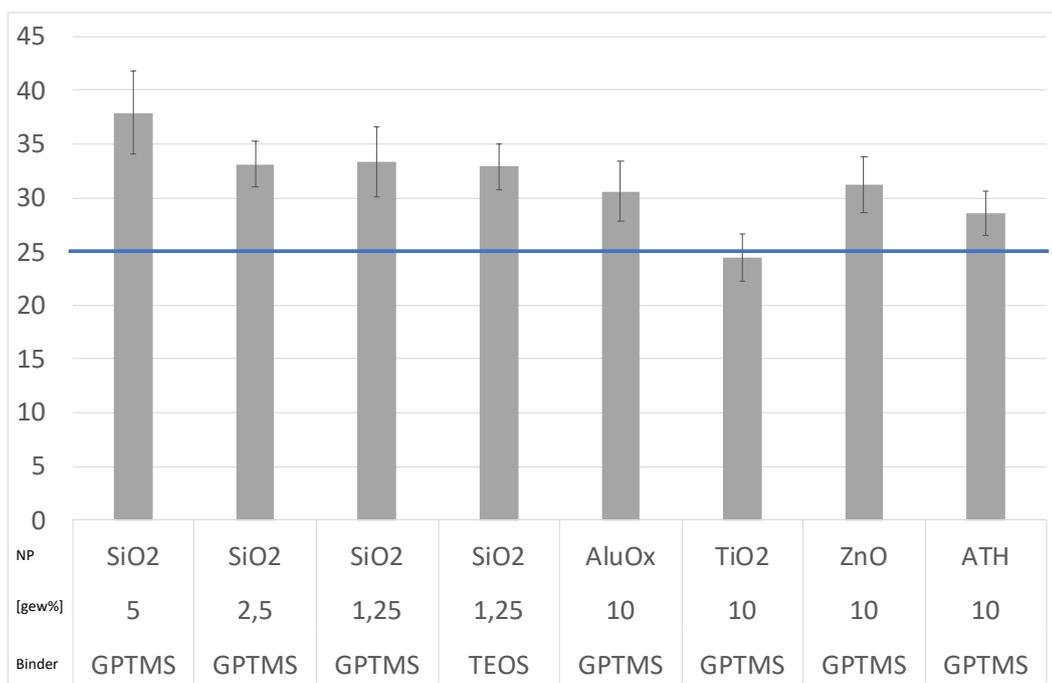


Abbildung 24: Orientierender Metallspritzertest auf Baumwolle in Abhängigkeit des Feststoffanteiles des Binders, der Nanopartikel und der Art des Binders

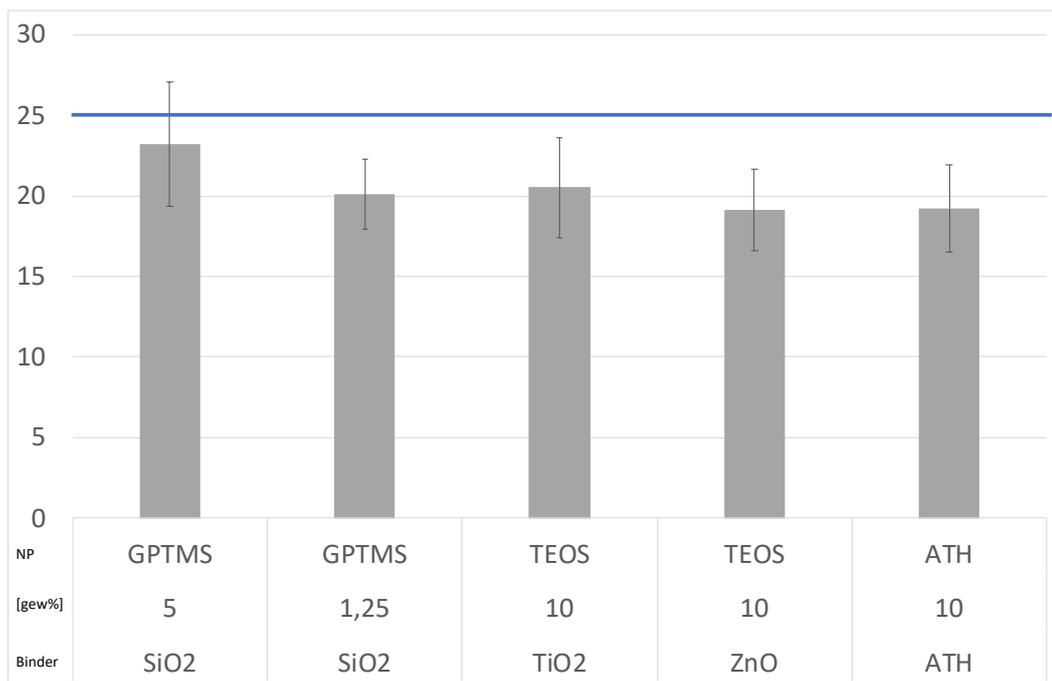


Abbildung 25: Orientierender Metallspritzertest auf MAC in Abhängigkeit des Feststoffanteiles des Binders, der Nanopartikel und der Art des Binders

Im weiteren Verlauf wurden zwei vom DTNW etablierten Solgel-Bindersysteme (TEOS und GPTMS) mit 1,25 und 2,5 gew% ausgewählt. In diese Binder wurden 5 verschiedene Nanopartikelsysteme zur Oberflächenstrukturierung eingebracht. Davon dienten AluOx und Stöberpartikel rein zur Oberflächenstrukturierung, TiO₂ und ZnO als UV-Adsorber und Nano-ATH als Flammschutzmittel. Der Gewichtsanteil der Nanopartikel wurde in den verschiedenen Ausrüstungen zwischen 20 und 80 g/L variiert. Dabei wurde auch immer eine Ausrüstung nur mit den entsprechenden Binder hergestellt.

Für die Ausrüstungen wurden zwei repräsentative Textilien ausgewählt, dabei handelte es sich um eine reines Baumwollgewebe (CO) und ein Modarcylgewebe (MAC).

5.3.1. Ergebnisse der CO und MAC-Gewebes

Von den ausgerüsteten Geweben wurden die Gewichtsauflagen und die Tropfeneinsinkzeiten bestimmt. Die Verteilung der Nanopartikel auf den Textilien wurden mittels SEM aufnahmen bestimmt und beurteilt. In Tabelle 11 ist die Auflage und in Tabelle 12 die Tropfeneinsinkzeiten der Gewebe mit der reinen Binderausrüstung und den Nanopartikelkompositen gegeben. Die Gewichtsaufgabe nimmt bei einem höheren Binderanteil in

der Ausrüstungslösung zu, genauso nimmt diese mit einem höheren Partikelanteil in der Ausrüstungslösung zu.

Die Tropfeneinsinkzeiten der Ausrüstung wurde gemessen, um einen Eindruck vom Benetzungsverhalten der Textilien zu erhalten. Dabei zeigte sich, dass Textilien mit GPTMS tendenziell schneller benetzen als Textilien mit einem TEOS-Binder. Von der Tendenz her ist zu sagen, dass ein höherer Partikelanteil zu einer schnelleren Benetzung der Textilien führt.

Tabelle 11. Gewichtauflage der unterschiedlichen Nanopartikelcompoite auf CO und MAC

Textil	Binder	Blind [g/L]	SiO ₂ [g/L]			AluOx [g/L]			ZnO [g/L]			ATH [g/L]			TiO ₂ [g/L]																																					
			Anteil [gew%]	20	40	80	20	40	80	20	40	80	20	40	80																																					
CO	GPTMS	1,45	3,00	4,52	7,83	4,25	5,86	9,70	3,70	5,28	8,9	3,70	5,77	9,19	2,99	4,79	8,25																																			
																		2,5	0,77	2,38	3,82	6,81	3,32	5,07	8,95	3,18	4,89	7,9	3,43	4,72	8,16	2,19	2,96	5,14																		
																																			1,25	1,44	3,29	4,72	8,34	3,71	5,29	8,78	3,53	5,05	8,24	3,18	4,84	8,16	3,38	5,43	8,57	
																																																				1,25
																		TEOS	2,50	4,26	5,80	8,94	5,14	6,74	10,21	5,20	7,91	10,0	4,56	6,11	9,43	4,66	6,15	9,90																		
																																			2,5	0,89	2,01	3,12	5,41	2,56	3,80	6,17	2,39	3,67	5,84	2,14	3,20	5,27	2,34	3,59	6,45	
	1,25	1,78	2,91	3,86	5,92	3,41	4,77	7,10	3,58	5,09	6,88	3,12	4,25	6,20	3,38	4,52	6,99																																			
																																																				1,25
	MAC	GPTMS	0,64	2,08	3,11	5,16	2,16	3,46	6,06	2,20	3,47	5,67	2,40	3,61	5,88	2,49	5,51																		7,18																	
																																				2,5	0,49	1,75	2,70	4,45	1,98	3,06	5,72	2,01	3,15	5,26	2,14	3,05	5,36	1,79	3,83	5,00
																		1,25	1,78	2,91	3,86	5,92	3,41	4,77	7,10	3,58	5,09	6,88	3,12	4,25	6,20	3,38	4,52	6,99																		
Add-On																		0	20	40	80	20	40	80	20	40	80	20	40	80	20	40	80																			
																																		[gew%]																		

5.3.1.1. Bewertung der Partikelverteilung auf CO

Die Ausrüstung mit Stöber-Nanopartikeln auf CO (Abbildung 26) lässt sich im Bereich von 20 – 80 g/L mit beiden Bindersystemen realisieren. Dabei lässt sich kein einheitlicher Trend in der Beschichtungsqualität von Partikelanteil, Binderanteil und Art des Binder für die Stöbernanopartikel feststellen. Im Fall der Kombination von TEOS 1,25 % und 80 g/L Stöbernanopartikel fällt die Beschichtung eher ungleichmäßig aus, die Ausrüstung mit GPTMS als Binder führt jedoch zu dicken Partikelauflagen.

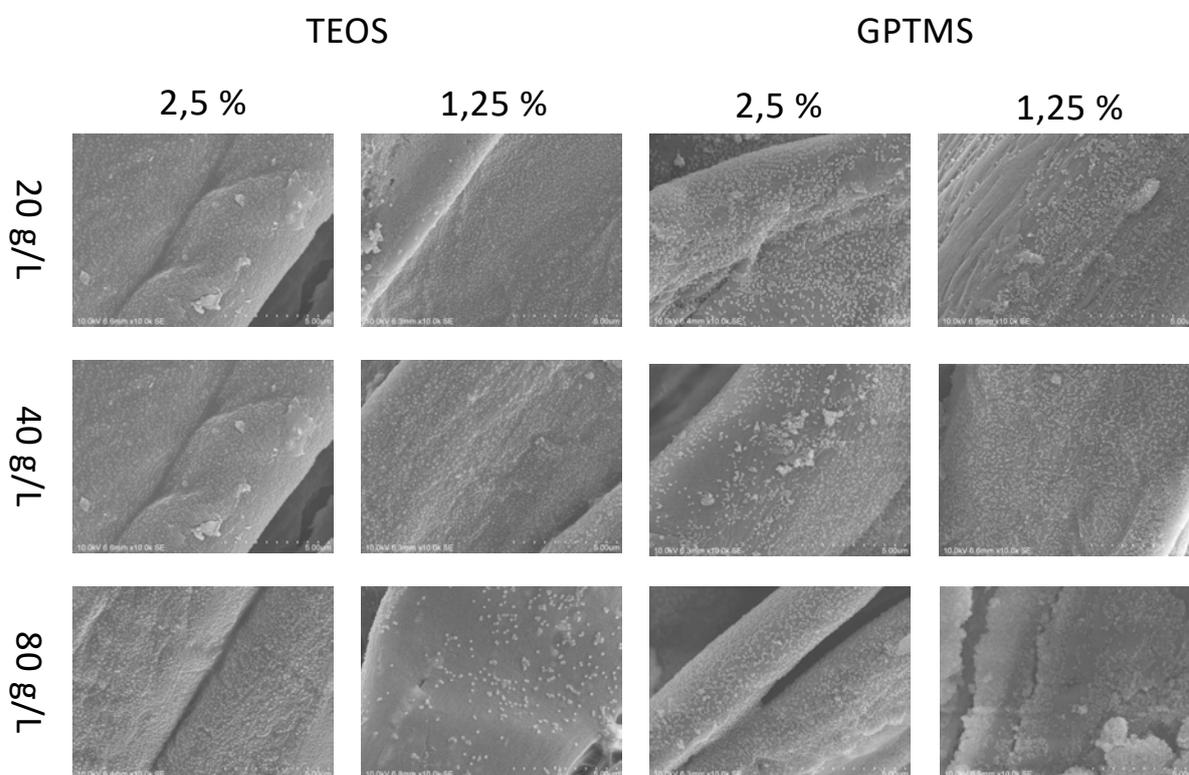


Abbildung 26: CO mit Stöber

Die Ausrüstung mit TiO_2 auf CO (Abbildung 27) lässt sich im Bereich von 20 – 80 g/L mit beiden Bindersystemen realisieren. Dabei lässt sich kein einheitlicher Trend in der Beschichtungsqualität von Partikelanteil, Binderanteil und Art des Binders für die Stöbernanopartikel feststellen. Die Verteilung der Partikel auf dem Gewebe ist jedoch deutlich ungleichmäßiger als beim zuvor betrachteten Stöbernanopartikeln.

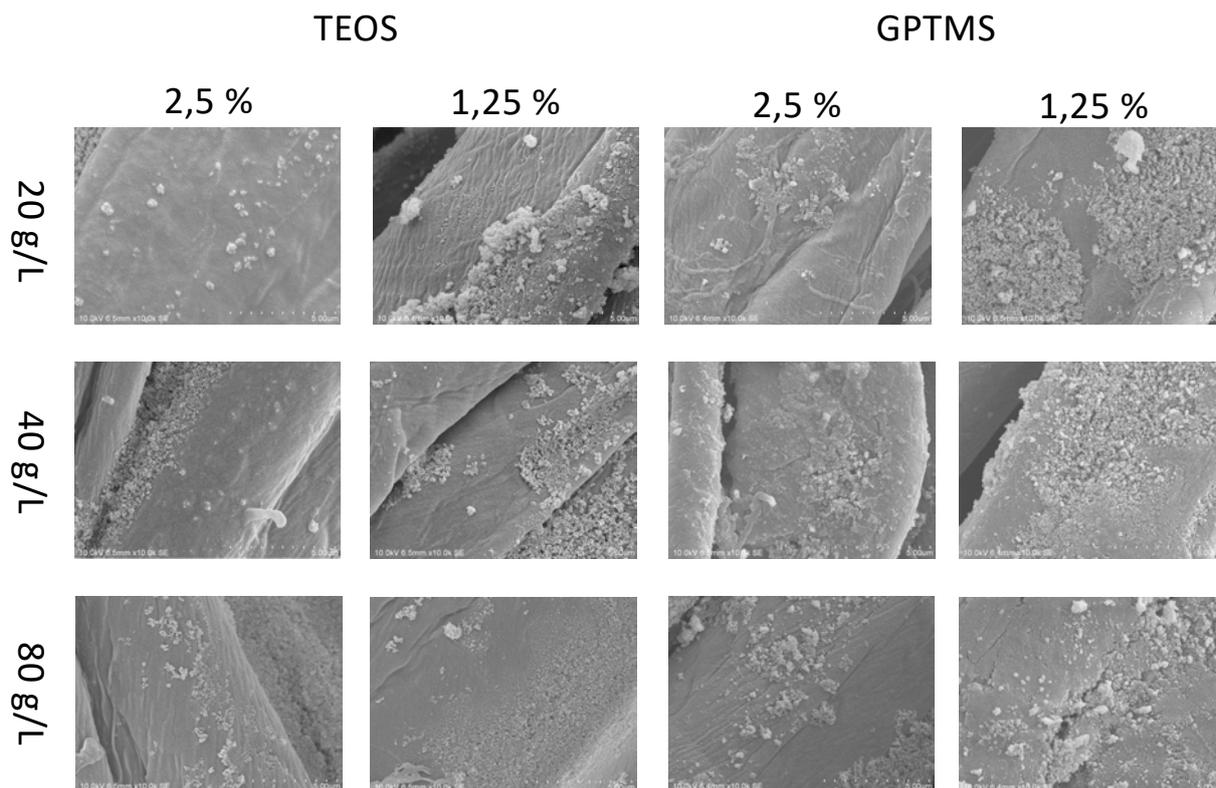


Abbildung 27: CO mit TiO_2

Die Ausrüstung mit ZnO auf CO (Abbildung 28) lässt sich im Bereich von 20 – 80 g/L mit beiden Bindersystemen realisieren. Dabei lässt sich kein einheitlicher Trend in der Beschichtungsqualität von Partikelanteil, Binderanteil und Art des Binders für die Stöbernanopartikel feststellen. Die Verteilung der Partikel auf dem Gewebe ist jedoch deutlich ungleichmäßiger als bei Stöbernanopartikeln. Die Ausrüstung mit 80 g/L ZnO in einen 1,25 %ig GPTMS Binder zeigt eine Nanopartikelverteilung, welche mit den Stöberpartikel vergleichbar ist.

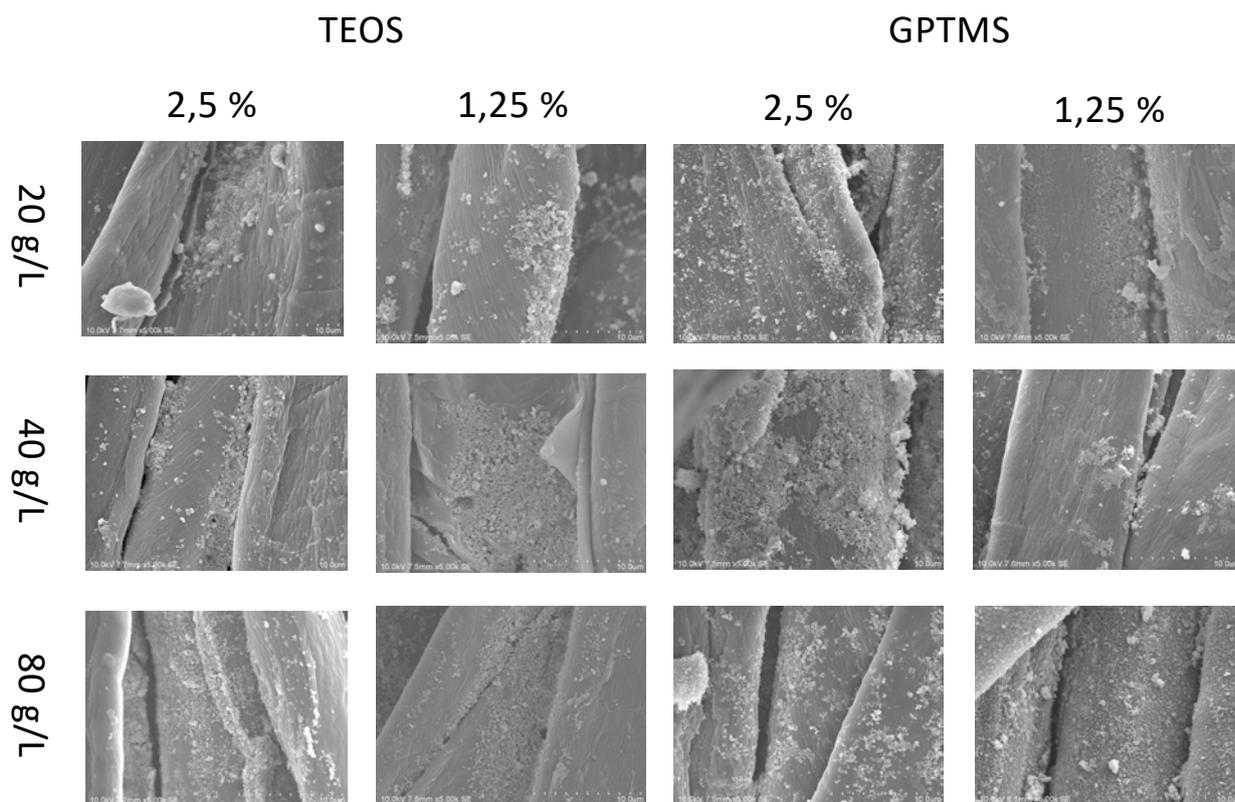


Abbildung 28: CO mit ZnO

Die Ausrüstung mit AluOx auf CO (Abbildung 29) lässt sich im Bereich von 20 – 80 g/L mit beiden Bindersystemen realisieren. Dabei lässt sich kein einheitlicher Trend in der Beschichtungsqualität von Partikelanteil, Binderanteil und Art des Binders für die Stöbernanopartikel feststellen. Die Verteilung der Partikel fällt bei einem Partikelanteil von 20 und 40 g/L sehr dünn aus. Im Fall von 80 g/L sind deutlich dicke Partikelschichten auf dem Gewebe erkennbar. Im Fall von TEOS ist zu sehen, dass die Fasern überbrücken und im Fall von GPTMS eine die Faser umschließende Schicht auftritt.

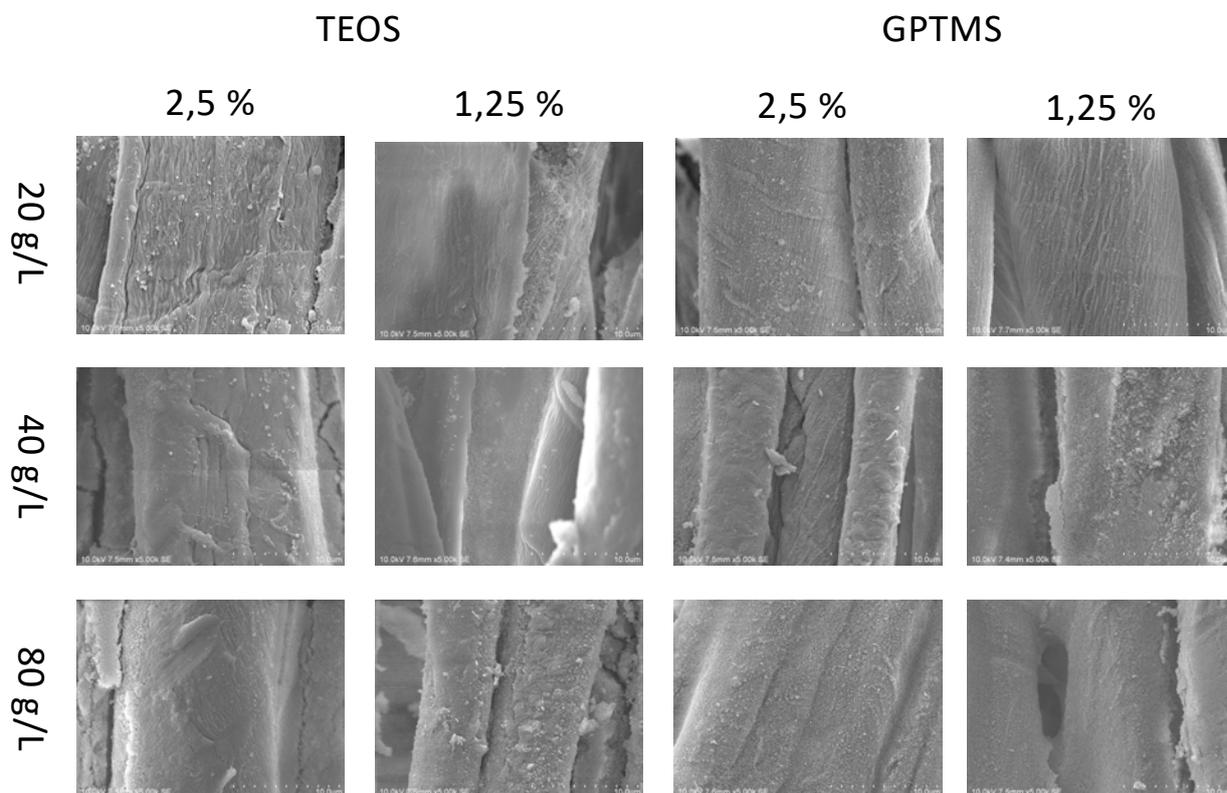


Abbildung 29: CO mit AluOx

Die Ausrüstung mit ATH auf CO (Abbildung 30) lässt sich im Bereich von 20 – 80 g/L mit beiden Bindersystemen realisieren. Bei ATH handelt es sich um die größten Nanopartikel, welche in den Versuchen eingesetzt wurden, was sich auch in der Beschichtungsqualität widerspiegelt. Dabei lässt sich kein einheitlicher Trend in der Beschichtungsqualität von Partikelanteil, Binderanteil und Art des Binders für die Stöbernanopartikel feststellen. Die Verteilung der Partikel auf dem Gewebe ist jedoch deutlich ungleichmäßiger als beim zuvor betrachteten Stöbernanopartikeln.

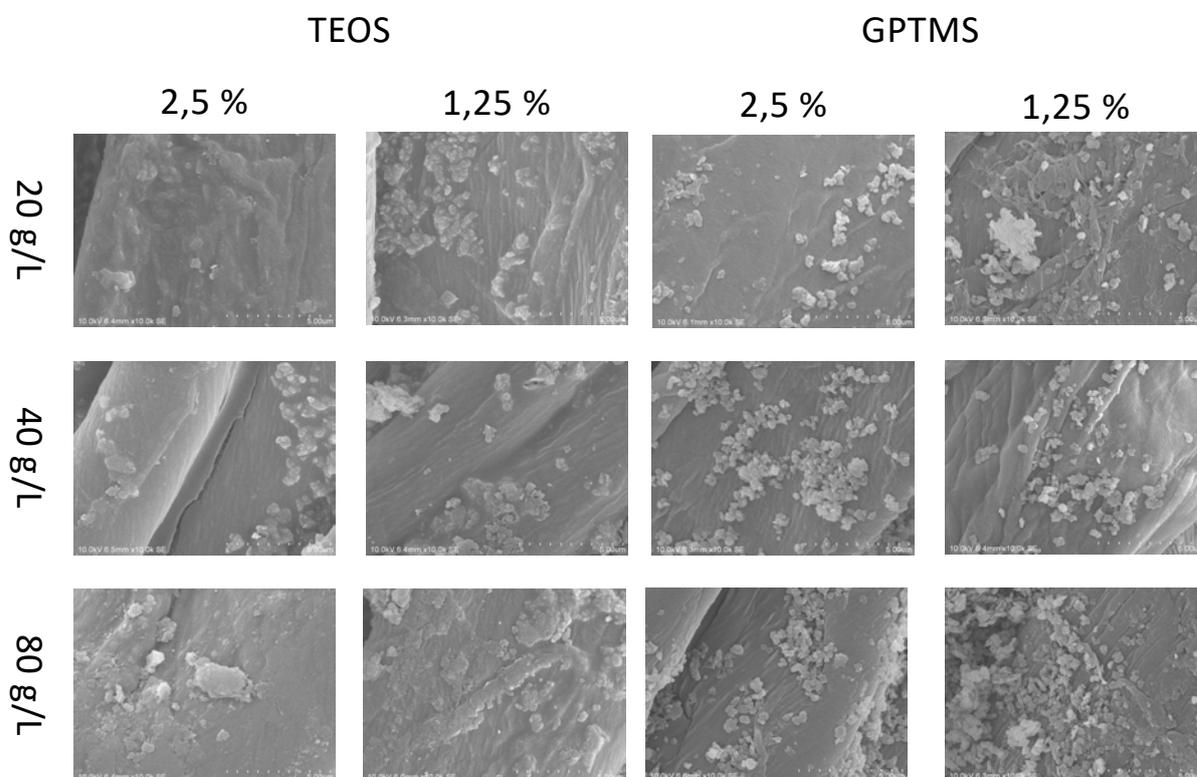


Abbildung 30: CO mit ATH

5.3.1.2. Bewertung der Partikelverteilung auf MAC

Die Ausrüstung mit SiO_2 auf MAC (Abbildung 31) lässt sich im Bereich von 20 – 80 g/L mit beiden Bindersystemen realisieren. Dabei lässt sich kein einheitlicher Trend in der Beschichtungsqualität von Partikelanteil, Binderanteil für die Stöbernanopartikel feststellen. TEOS scheint in dieser Kombination ein besser Binder zu sein als GPTMS. Im Fall der Kombination von TEOS 1,25 % und 20 g/L Stöbernanopartikel erhält man eine gleichmäßige Beschichtung. Die Ausrüstung mit GPTMS als Binder führen eher zu schlechteren Beschichtungen.

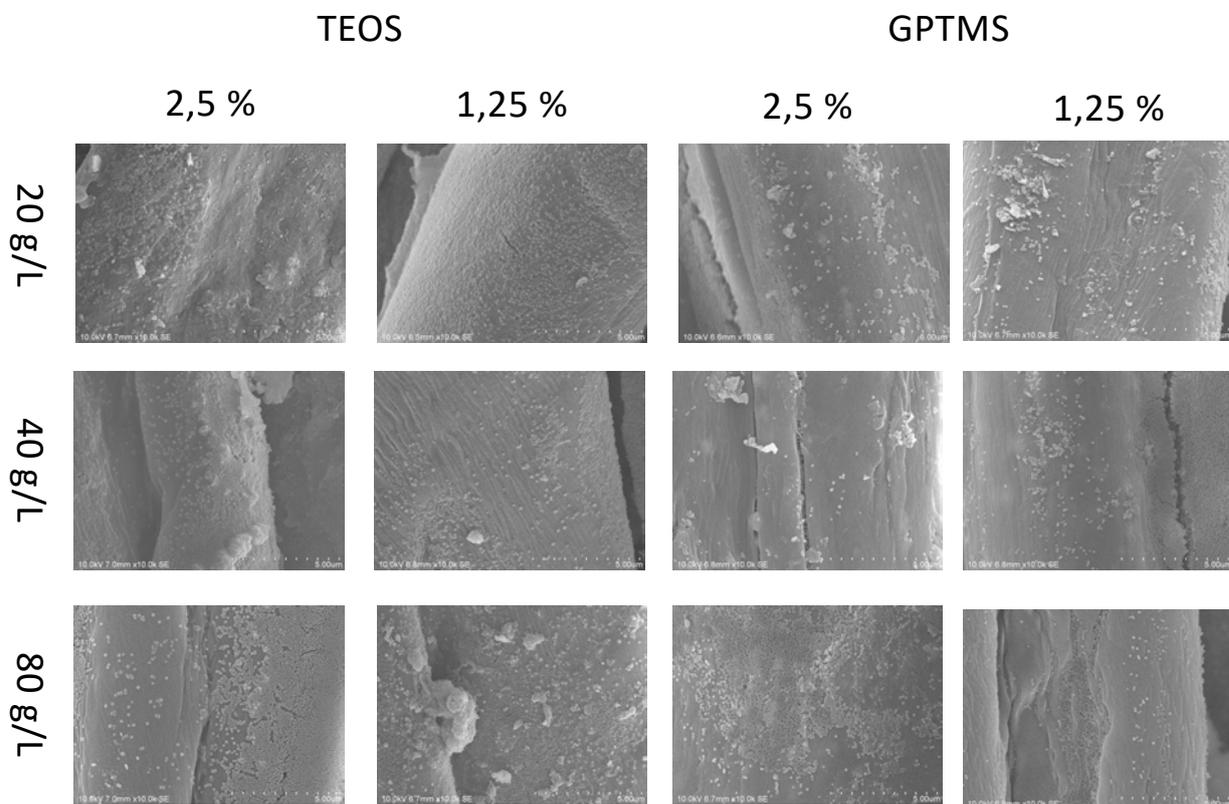


Abbildung 31: MAC mit Stöber

Die Ausrüstung mit TiO_2 auf MAC (Abbildung 32) lässt sich im Bereich von 20 – 80 g/L mit beiden Bindersystemen realisieren. Dabei lässt sich kein einheitlicher Trend in der Beschichtungsqualität von Partikelanteil, Binderanteil für TiO_2 feststellen. TEOS scheint in dieser Kombination ein besser Binder zu sein als GPTMS. Im Fall von TEOS erhält man eine gleichmäßige Beschichtung. Die Ausrüstung mit GPTMS als Binder führen eher zu schlechteren Beschichtungen und zu Partikelagglomeraten auf der Oberfläche.

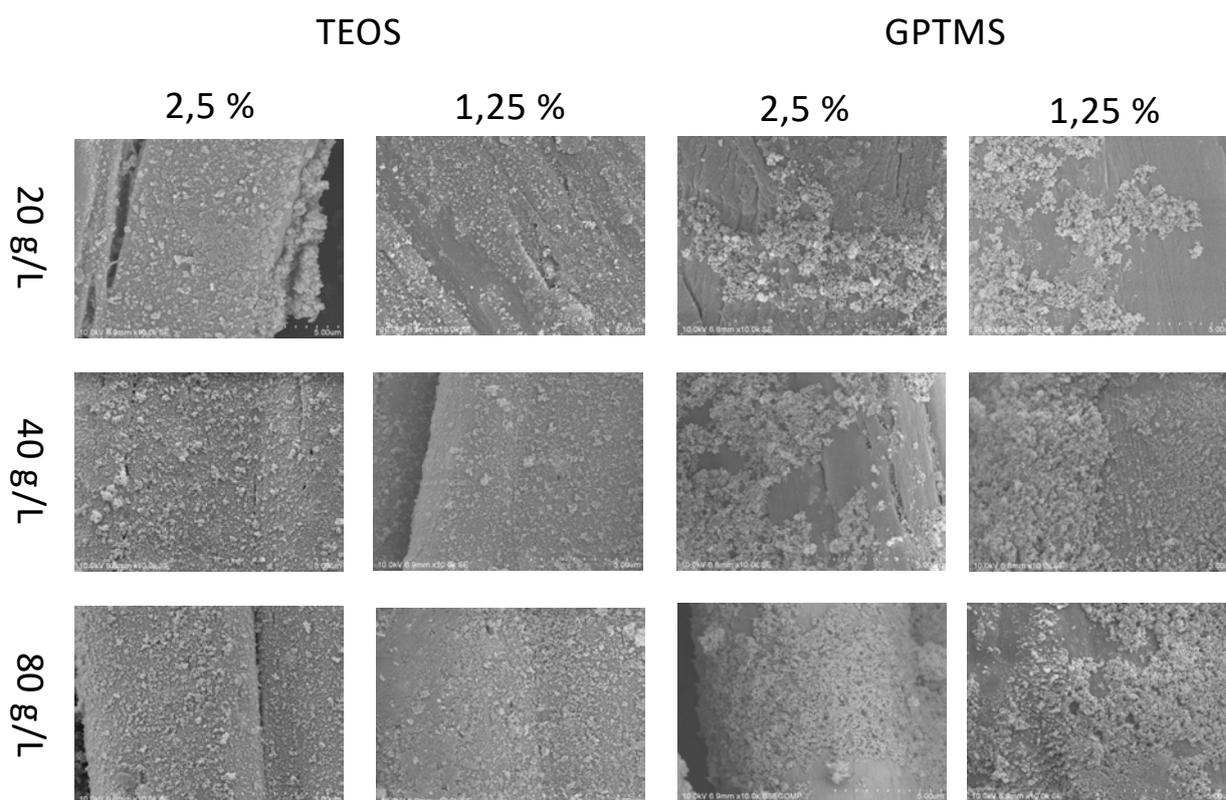


Abbildung 32: MAC mit TiO_2

Die Ausrüstung mit ZnO auf MAC (Abbildung 33) lässt sich im Bereich von 20 – 80 g/L mit beiden Bindersystemen realisieren. Dabei lässt sich kein einheitlicher Trend in der Beschichtungsqualität von Partikelanteil, Binderanteil für ZnO feststellen. TEOS scheint in dieser Kombination ein besser Binder zu sein als GPTMS. Im Fall von TEOS erhält man eine gleichmäßige Beschichtung. Die Ausrüstung mit GPTMS als Binder führen eher zu schlechteren Beschichtungen und zu Partikelagglomeraten auf der Oberfläche.

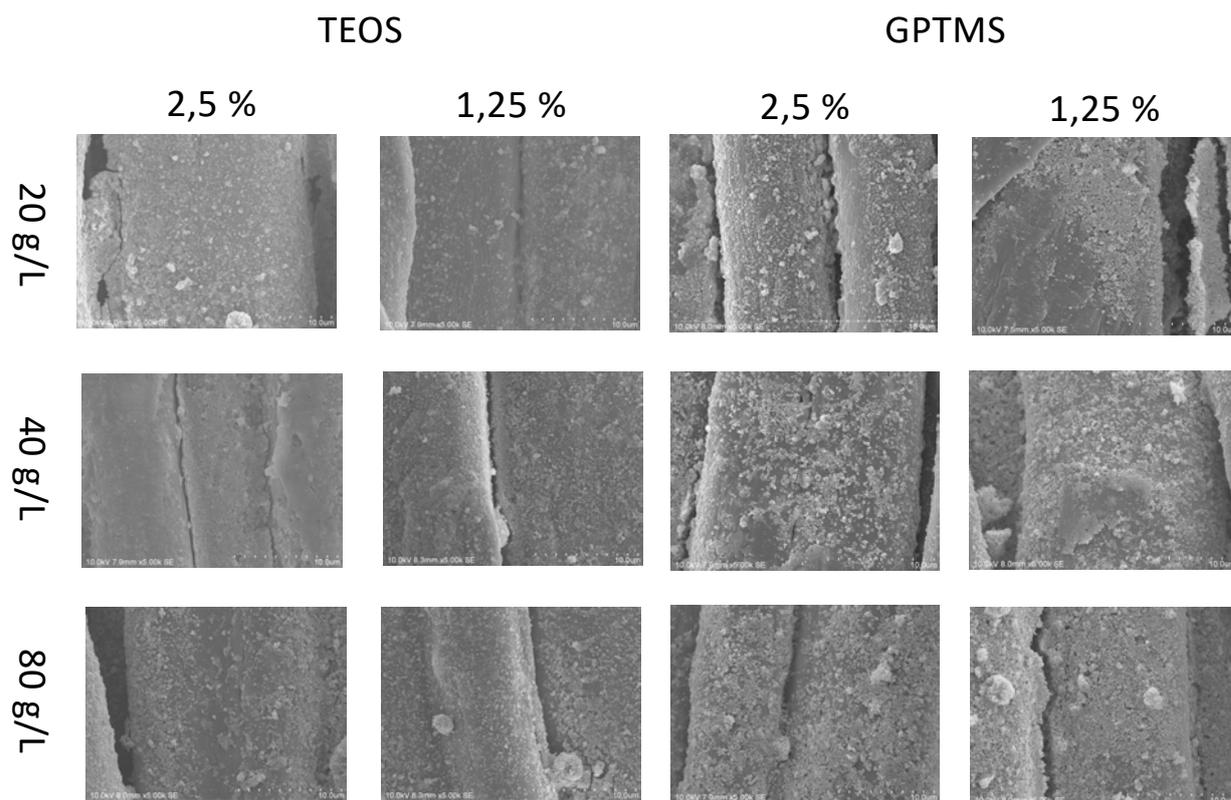


Abbildung 33: MAC mit ZnO

Die Ausrüstung mit AluOx auf MAC (Abbildung 34) lässt sich im Bereich von 20 – 80 g/L mit beiden Bindersystemen realisieren. Dabei lässt sich kein einheitlicher Trend in der Beschichtungsqualität von Partikelanteil, Binderanteil und des Binders für AluOx feststellen. In beiden Fällen lässt sich ein Verkleben der Faser feststellen.

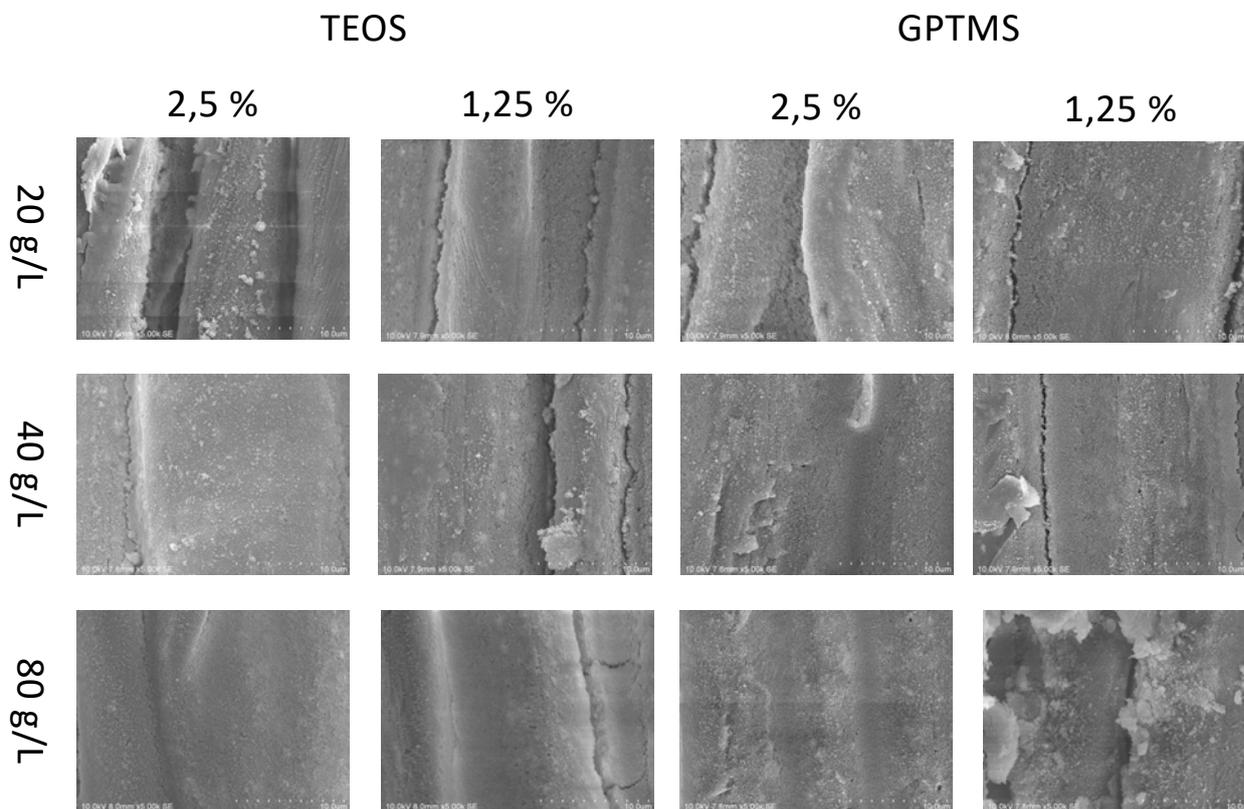


Abbildung 34: MAC AluOx

Die Ausrüstung mit ATH auf MAC (Abbildung 35) lässt sich im Bereich von 20 – 80 g/L mit beiden Bindersystemen realisieren. Bei ATH handelt es sich um die größten Nanopartikel, welche in den Versuchen eingesetzt wurden, was sich auch in der Beschichtungsqualität widerspiegelt. Dabei lässt sich kein einheitlicher Trend in der Beschichtungsqualität von Partikelanteil, Binderanteil und Art des Binders für die Stöbernpartikel feststellen. Die Verteilung der Partikel auf dem Gewebe ist jedoch deutlich ungleichmäßiger als beim zuvor betrachteten AluOx oder ZnO.

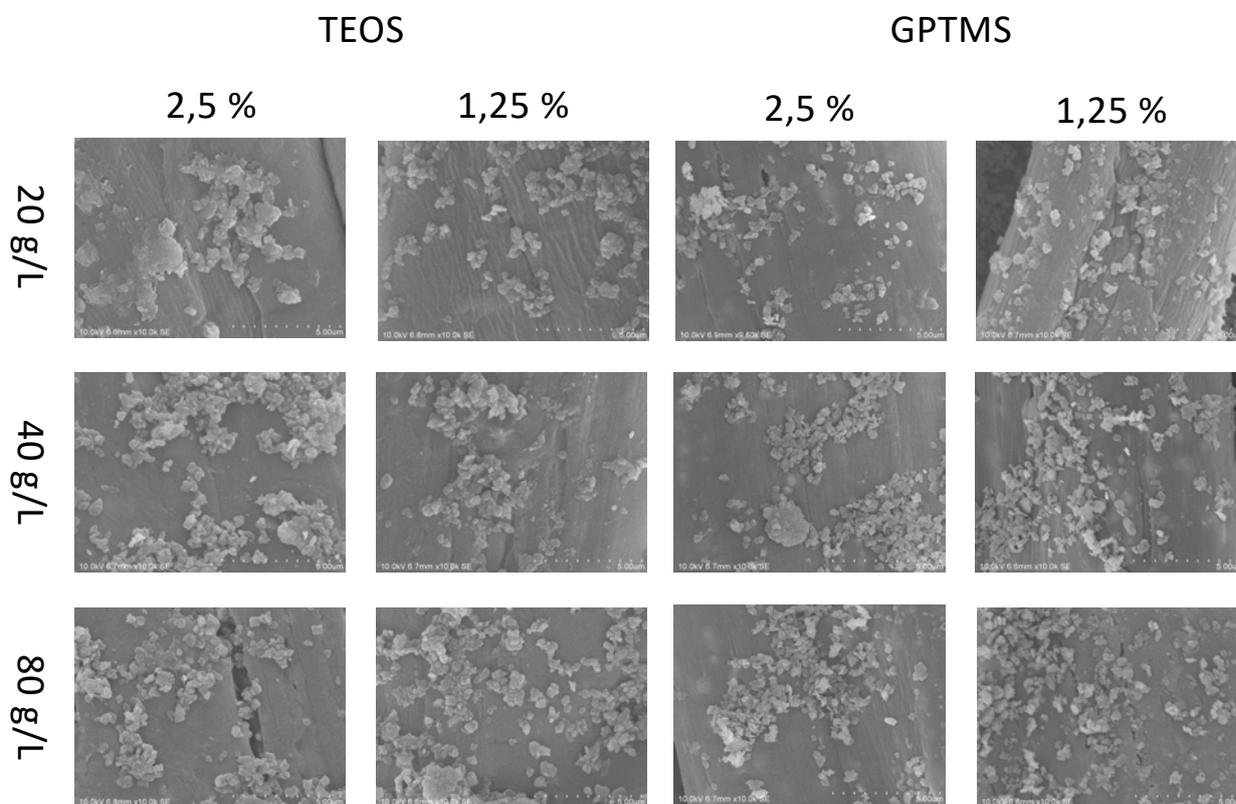


Abbildung 35: MAC ATH

5.3.1.3. Vergleich der Beschichtung von CO und MAC

Für die unterschiedlichen Gewebe lassen sich diese sich mit beiden Bindersystemen gut ausrüsten, jedoch gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen den Partikeln auf der Oberfläche. Diese Unterschiede sind in Tabelle 13 zusammengefasst. Eine Bewertung erfolgte dabei nach der Beschichtungsqualität. Ein ++ sagt, jede Binderkonzentration und

jeder Partikelanteil gibt eine gleichmäßige Beschichtung. Ein + besagt, dass nur bestimmtes Verhältnis gute Beschichtungen ergeben. Ein o besagt, es werden Beschichtungen erhalten, welche zum agglomerieren oder brechen neigen, ein – besagt die Beschichtung ist sehr ungleichmäßig.

Tabelle 13: Vergleich der Beschichtungsqualität

	CO		MAC	
	TEOS	GPTMS	TEOS	GPTMS
SiO₂	++	++	+	-
TiO₂	o	o	++	o
ZnO	o	+	+	+
AluOx	-	+	++	++
ATH	-	-	-	-

++ ohne Einschränkungen zu verwenden, + nur bestimmte Konzentrationen geeignet, o bedingt geeignet, - ungeeignet

5.3.1.4. *Metallspritzertest der ausgerüsteten Textilien*

Aufbauend auf den Vorversuchen (Abbildung 24 & Abbildung 25) wurden verschiedene Ausrüstungen mit beiden Bindersystem und einen Feststoffanteil von 1,25 und 2,5 % getestet. Dabei zeigte sich, dass Baumwollgewebe mit der Hilfe einer Nanostrukturierung gut auszurüsten sind, um die Schweißerschutznorm zu erfüllen. Je nach Ausrüstungsvariante ist es möglich, dass die auf das Gewebe fallenden Eisentropfen erst nach 25 – 31 Tropfen eine Temperaturerhöhung um 40 K erzeugen und somit das Gewebe für die höher Schweißerschutzklasse geeignet ist. Als Nanopartikelsysteme eignen sich dafür SiO₂, AluOx, ATH und ZnO. Da ein Nanopartikelanteil von 80 g/L sich auch eher negativ auf die Gewebephantik auswirkt sind Anteile von 20 g/L deutlich für eine Ausrüstung zu bevorzugen.

Im Fall des MAC-Gewebe zeigt sich, dass die Nanopartikelausrüstung, auch wenn sie eine gleichmäßige Beschichtung auf dem Gewebe ergibt, nur mit einem Binder/Nanopartikelsystem zu realisierbar ist. Als erfolgreiches Beschichtungssystem konnte TiO₂ in einem TEOS-Binder gefunden werden (Abbildung 37). Eine Erklärung für diesen signifikanten Unterschied konnte im Projekt nicht gefunden werden.

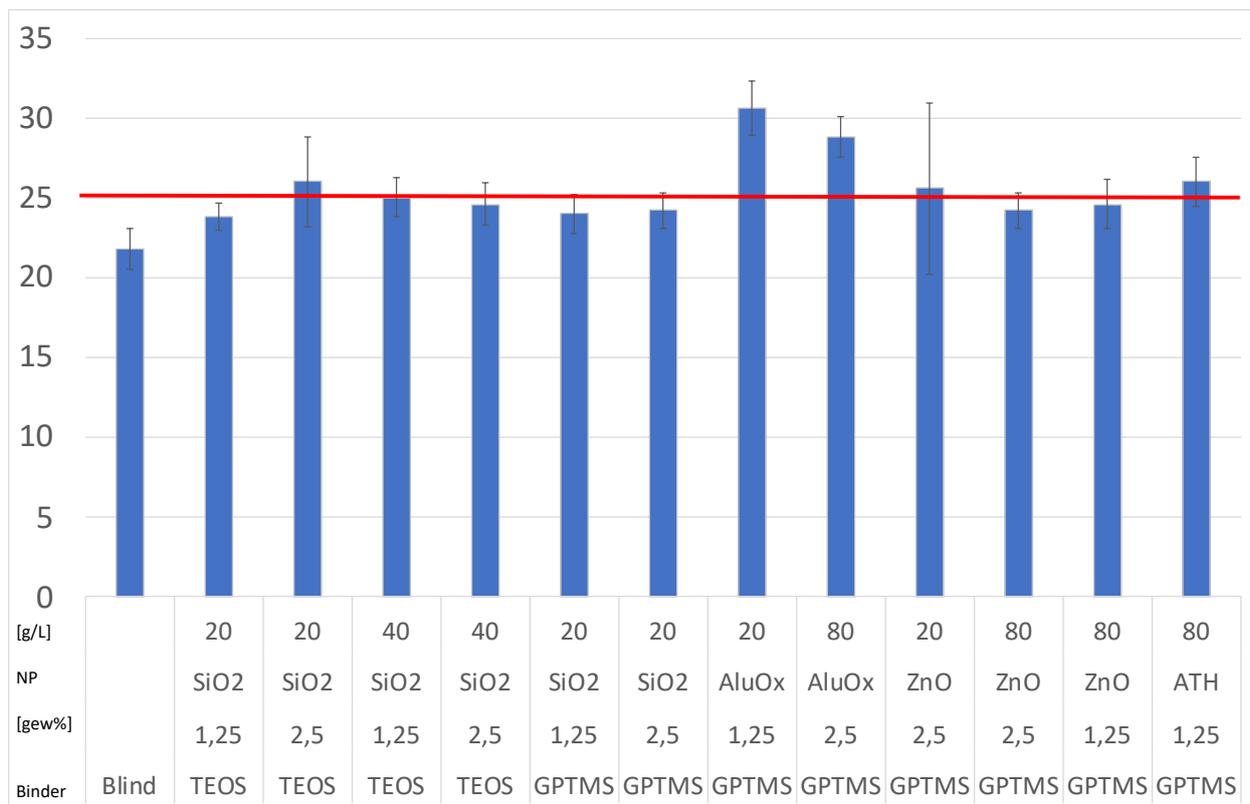


Abbildung 36. Schweißtropfentest mit unterschiedliche ausgerüsteten CO-Geweben

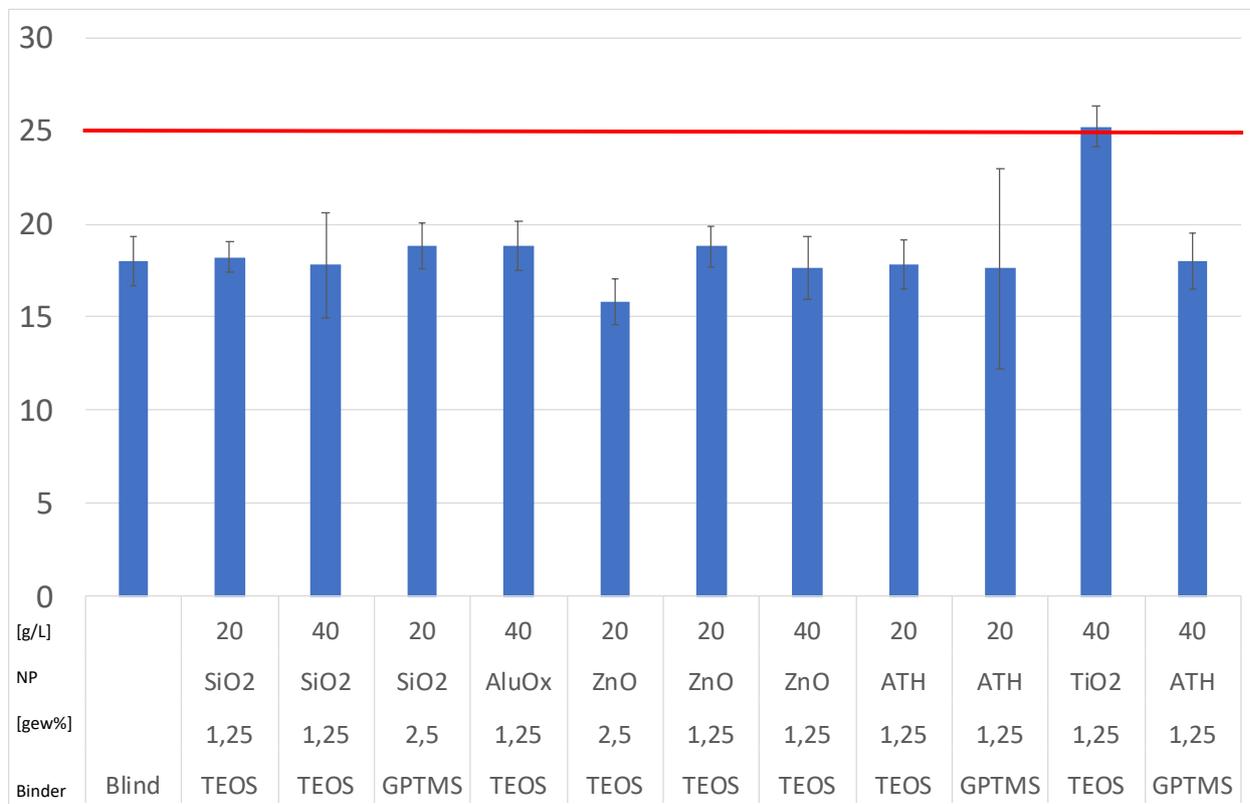


Abbildung 37. Schweißtropfentest mit unterschiedliche ausgerüsteten MAC-Geweben

5.3.1.5. Tragekomfort der Nanocomposites

Die Bewertung des Tragekomfort erfolgt auf Basis des Wärmedurchgangswiderstandes (R_{ct}) und des Wasserdampfdurchgangswiderstandes (R_{et}). Der Vergleich des beschichteten mit dem unbeschichteten Gewebe zeigt, dass durch die Ausrüstung mit einem Nanokomposit der Tragekomfort nicht beeinträchtigt wird. In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der Messungen zusammengefasst.

Tabelle 14: Tragekomfort von Baumwolle ausgerüstet mit einem Nanokomposite

Ausrüstung	R_{et}		R_{ct}	
	Mittelwert	Stabw	Mittelwert	Stabw
Blind	5,52	0,054	0,0248	0,001
TEOS, 1,25 % SiO_2 , 40 g/L	5,61	0,117	0,0234	0,000
TEOS, 2,5 % SiO_2 , 20 g/L	5,71	0,054	0,0242	0,000
GPTMS, 2,5 %, ZnO 20 g/L	5,34	0,080	0,0254	0,003
GPTMS, 1,25 %, AluOx 40 g/L	5,60	0,177	0,0252	0,003

5.3.1.6. Waschbeständigkeit

Die Waschbeständigkeit der Ausrüstung wurde bei 40 und 80 °C im Linientester bestimmt. Nach dem Trocken wurden die Proben zur Auflagenbestimmung 24 h im Klimaraum bei 65 % rH und 20 °C klimatisiert und ausgewogen.

Sowohl bei CO als auch bei MAC konnte beobachtet werden, dass die Gewebe nach der Wäsche eine erhöhte Gewichtsauflage aufweisen (Abbildung 41). Beim unbehandelten CO Gewebe liegt diese bei ca. 2 % und bei MAC wächst die Gewichtsauflage mit den Waschgängen. Bei der Beschichtung mit SiO_2 auf CO erkennt man, dass die Gewichtszunahme mehr dem von CO Gewebe entspricht, was auf eine geringe Waschbeständigkeit deuten kann.

Um die Ausrüstungen nach der Wäsche beurteilen zu können, wurden von den Textilien nach 10 Wäschen REM aufnahmen angefertigt. Auf diesen Bildern ist zu erkennen

(Abbildung 39), dass die oberste Lage der Nanopartikel in großen Teilen vom Gewebe abgeplatzt ist. Bei 40 °C findet man mehr Partikel auf der Oberfläche als bei einer 80 °C Wäsche. Wie die Ergebnisse aus dem Projekt CerOTex zeigen, kann man diese durch die Verwendung eines PU-Binders verhindern.

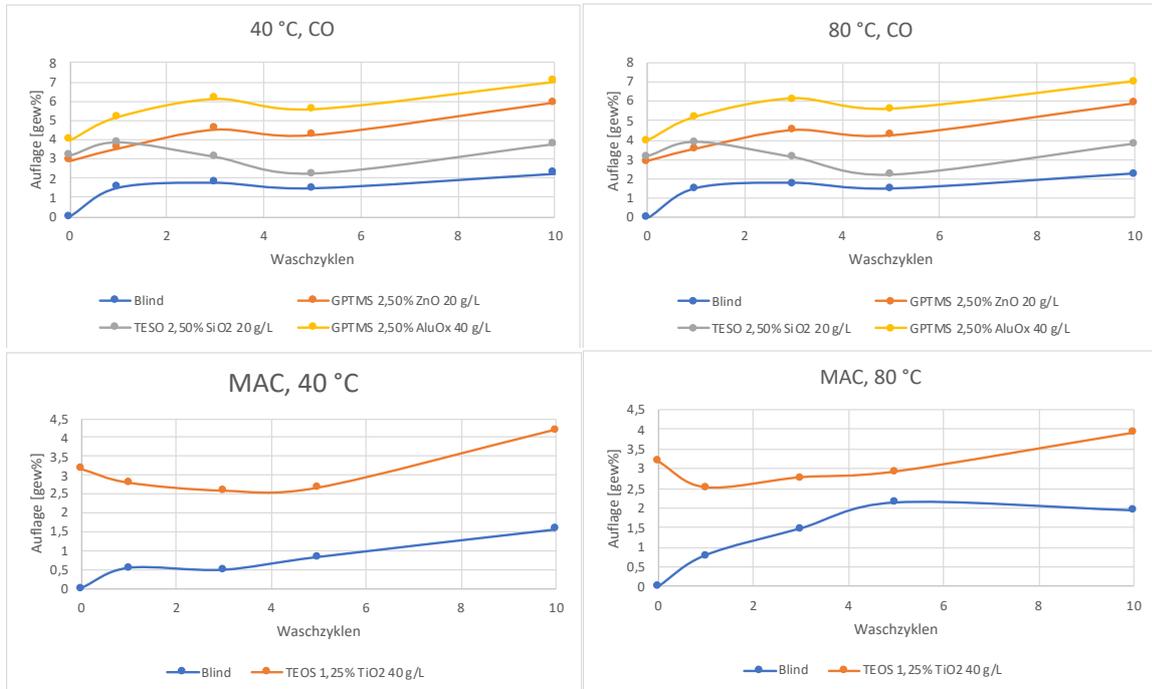


Abbildung 38: Waschbeständigkeit von Nanocompositen auf CO und MAC bei 40 und 80 °C

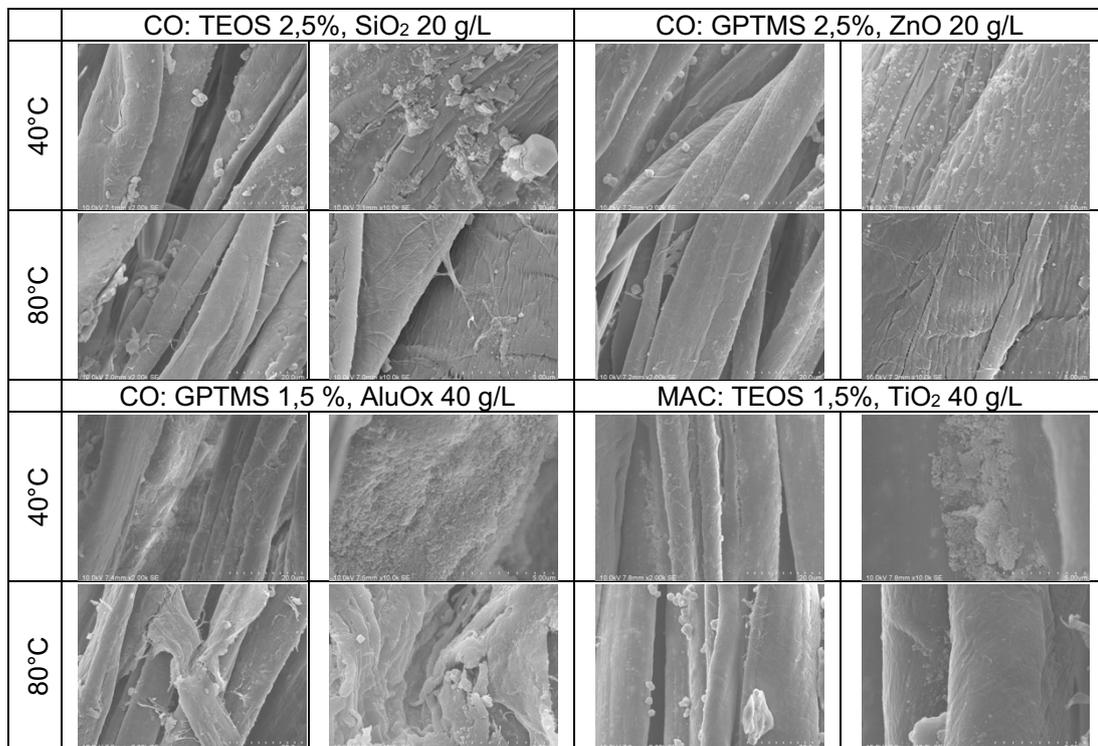


Abbildung 39: REM-Bilder der ausgerüsteten Gewebe nach 10 Wäschen

5.3.1.7. UV-Schutz des Gewebes

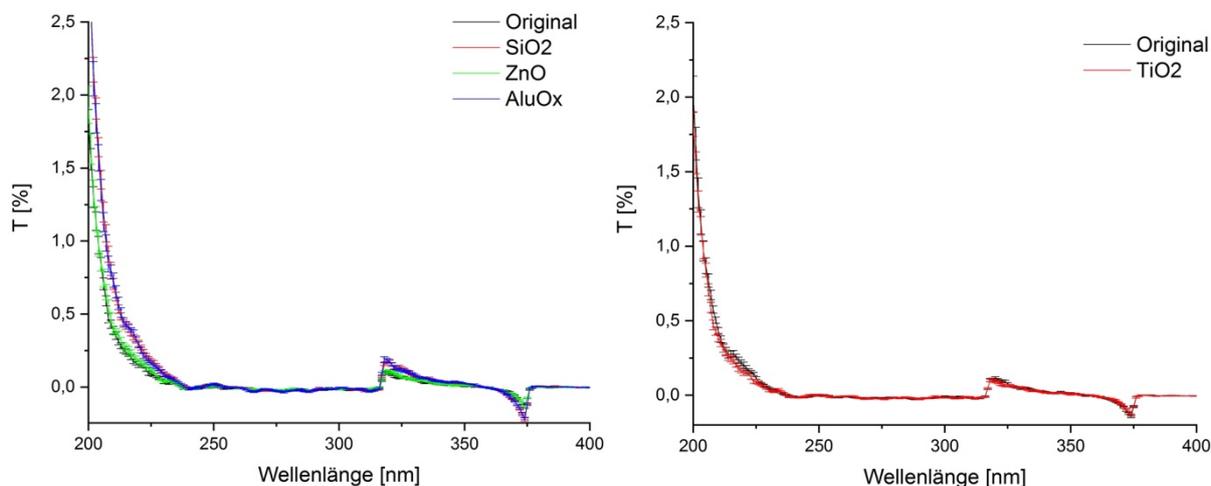


Abbildung 40: UV-Transmissionsmessungen von ausgerüsteten CO (links) und MAC (rechts)

Die Veränderung der UV-Durchlässigkeit wurde mittels eines Spektrometers in Transmission gemessen. Beim CO Gewebe (Abbildung 40) erkennt man das die Ausrüstung mit SiO₂ und AluOx etwas mehr UV-Strahlung durchlassen als das Original CO bzw. mit ZnO modifiziertes. Beim MAC führt die Ausrüstung zu einer leichten Reduktion der UV-Transmission. *Eine Berechnung der Gesamtbestrahlungsstärke in Abhängigkeit des Schweißverfahrens und der Expositionszeiten war nicht möglich, da die spektrale Bestrahlungsstärke für die Schweißverfahren nicht aus der hausinternen SOP von HIT hervorgeht.*

5.4. Charakterisierung der kombinierten Effekte

Aufbauend auf den Ergebnissen thermisch leitfähiger Beschichtungen und der Funktionalisierung zur Schaffung von strukturierten Oberflächen wurden beide Effekte kombiniert. Die Kombination der Effekte wurde auf den Materialien B und D durchgeführt. Als thermisch leitfähige Beschichtung, wurde analog zu Kapitel 5.2, Partikel 4 in einer Konzentration von 5 % und eine Schichtdicke von 120 µm gewählt.

Für die Beschichtung in Kombinationseffekt wurden zwei System ausgewählt, einmal ein Bindersystem auf der Basis von TEOS und eins auf der Basis von GPTMS, als Partikel wurden SiO₂ und AluOx gewählt, welche bereits einen guten Effekt bei der Beschichtung zeigen.

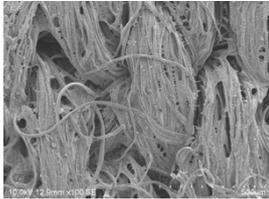
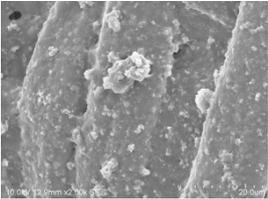
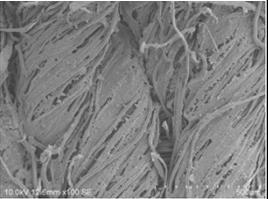
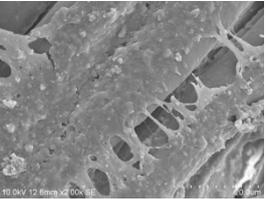
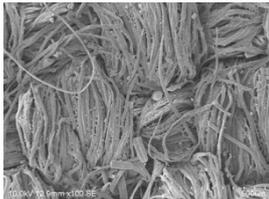
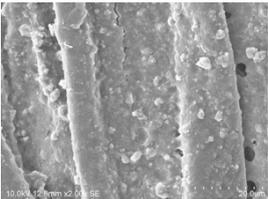
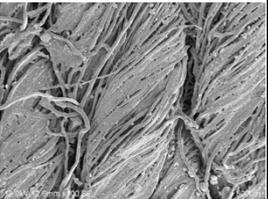
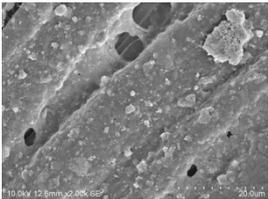
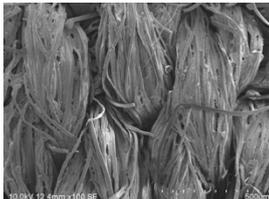
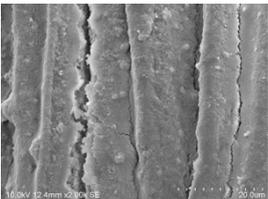
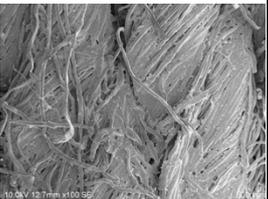
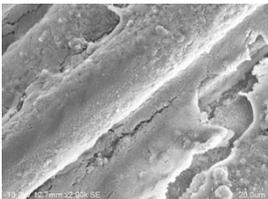
Tabelle 15: Ergebnisse der kombinierten Effekte

Material	Ausrüstung	Metallspritzer [Anzahl abgewiesene Tropfen]	Wärmedurchgangswiderstand R _{ct} [m ² K/W]	Wasserdampfdurchgangswiderstand R _{et} [m ² Pa/W]
B	-	19	0,019	4,83
	thermisch leitfähig, Partikel 4	24	0,022	5,01
	2,5 % TEOS, 20 g/l SiO ₂	26	0,023	5,61
	1,25 % GPTMS, 40 g/l AluOx	29	0,025	5,60
	thermisch leitfähig, Partikel 4 + 2,5 % TEOS, 20 g/l SiO ₂	17	0,012	4,49
	thermisch leitfähig, Partikel 4 + 1,25 % GPTMS, 40 g/l AluOx	21	0,013	4,86
D	-	17	0,020	5,13
	thermisch leitfähig, Partikel 4	22	0,022	6,06
	2,5 % TEOS, 20g/l SiO ₂	26	0,023	5,61
	1,25 % GPTMS, 40 g/l AluOx	29	0,025	5,60
	thermisch leitfähig, Partikel 4 + 2,5 % TEOS, 20g/l SiO ₂	20	0,019	4,54
	thermisch leitfähig, Partikel 4 + 1,25 % GPTMS, 40 g/l AluOx	21	0,017	4,89

Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse der kombinierten Effekte in Bezug auf die Abweisung von flüssigen Metallspritzern, wie auch ihren thermophysiologicalen Eigenschaften (Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} , Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et}).

Es ist ersichtlich, dass die Kombination der thermisch leitfähigen Beschichtung und der Funktionalisierung zur Schaffung von strukturierten Oberflächen keinen synergistischen, sondern einen antagonistischen Effekt auf die Abweisung von flüssigen Metallspritzern hat. Schaut man sich die REM-Aufnahmen der Ausrüstungen an (Abbildung 41), stellt man fest, dass die Ausrüstungen mit den wärmeleitfähigen Partikeln bereist eine Strukturierung der Oberfläche erfolgt, durch die zweite Ausrüstung mit Nanopartikeln erfolgt eine Glättung, wodurch die schlechtere Metalltropfenabweisung zu erklären ist. Die thermophysiologicalen Eigenschaften (Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} , Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et}) werden durch die Kombination der Effekte nicht beeinträchtigt.

Abbildung 41. REM-Bilder der kombinierten Ausrüstungen

	B		D	
ohne				
Partikel 4 + 2,5 % TEOS, 20 g/l SiO ₂				
Partikel 4 + 1,25 % GPTMS, 40 g/l				

5.5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Als Schweißerschutzgewebe für PSA werden Textilien mit einem Flächengewicht von:

Klasse 1 200 – 400 g/m²

Klasse 2 > 450 g/m²

verwendet. An diese Gewebe werden unterschiedliche Anforderungen gestellt, wie z.B. Flammschutz, Antistatik oder Eignung für die Mietwäsche.

Als Klasse 1 werden häufige Baumwollgewebe verwendet. Für die Klasse 2 können diese Baumwollgewebe sein oder auch Materialien mit Hochleistungsfasern (Kevlar) oder aus Modacryl, welches die Preise der Gewebe bestimmt. Gewebe der Klasse 1 bewegt sich im Preisrahmen von 6-8 €/m², Gewebe der Klasse 2 fängt dabei ab 8 €/m² an.

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden die Kosten für die Nanopartikel und ein Bindersystem angefragt. Dabei haben wir nur für die Kosten der ZnO-Nanopartikel eine Rückmeldung erhalten.

Binder-GPTMS 35 €/kg

ZnO-Nanopartikel 35 €/kg

Auf Basis der Gewichtsauflagen wurden daraufhin die Kosten für die Ausrüstung nur mit den Binder bzw. Binder + Nanopartikel berechnet. Die Kosten für die Ausrüstung wurde mit beiden Binderkonzentrationen und dem drei eingesetzten Nanopartikel Mengen berechnet (Tabelle 16)

Tabelle 16: Kosten ZnO-Ausrüstung pro m² mit GPTMS als Binder

	gew%	Binder	20 g/L	40 g/L	80 g/L
		€/m ²			
CO	1,25	9,38	38,73	59,56	96,22
	2,5	17,66	45,07	64,31	108,40
MAC	1,25	9,38	24,48	38,37	64,07
	2,5	17,66	26,80	42,26	69,06

Die Kosten in Tabelle 16 zeigen, dass sich mit der verwendeten Kombination Binder/Nanopartikel nur schwer eine kostengünstige Ausrüstung etablieren lässt. Da sich aber auch andere Nanopartikel als geeignet erwiesen haben, und auch in anderen Projekten gezeigt wurden, dass z.B. mit PU-Binder die Nanostrukturierung auch möglich ist (IGF 19585 N) existieren Stellschrauben, mit welchen sie die Kosten für die Ausrüstung verringern lassen.

Der Vorteil einer solchen Ausrüstung ist der deutlich verbesserte Tragekomfort eines leichten Schweißerschutzklasse 1-Gewebes, jedoch mit Sicherheit eines Klasse 2-Gewebes. Dies ist ein innovatives Produkt, welches entsprechende Mehrkosten rechtfertigen kann. Auch haben KMU so den Vorteil, dass sie bei Einkauf von Rohmaterialien, durch die Abnahme größerer Mengen, den Einkauf so bündeln können (nur ein Rohmaterial). Des Weiteren gibt es dadurch Vorteile bei den Rüstkosten für die Maschinen und bessere Auslastung dieser.

6. Wertende Zusammenfassung

Ziel des Projekts ist es die Schutzwirkung von Schweißerkleidung zu verbessern. Der Fokus lag dabei auf den Fragestellungen, kann man durch eine Ausrüstung die Beständigkeit der Textilien gegen Tropfen flüssigen Metalls erhöhen und gleichzeitig einen besseren UV-Schutz erhalten. Diese Schutzfaktoren von Schweißerschutzkleidung hängt stark vom Flächengewicht des verwendeten Textils ab, je höher das Flächengewicht desto beständiger ist die Kleidung gegenüber Metallspritzern und desto weniger UV wird durch die Kleidung hindurch gelassen. Jedoch gilt: je höher das Flächengewicht, desto schlechter ist der Tragekomfort, da ein hohes Flächengewicht u.a. das Schwitzen fördert. Schweißerschutzkleidung wird nach zwei Klassen unterteilt, im Fall von Kleidung der Klasse 1 darf ein Temperaturanstieg von 40 K auf der Rückseite des Textils erst nachdem 15. auftreffenden Tropfen flüssigen Eisens erfolgen. Im Fall der Klasse 2 darf der Temperaturanstieg erst nach 25 Tropfen auftreten.

Als Ausgang für diese Projekt wurden Gewebe ausgewählt, welche die Klasse 1 erfüllen. Es wurde versucht diese Gewebe durch die Ausrüstung entweder mit wärmeleitfähigen Kompositen oder durch eine Nanostrukturierung („Lotuseffekt“) entsprechend auszurüsten, so dass die Klasse 2 erhalten wird. Als dritte Möglichkeit sollte eine Kombination von beiden Effekten in Betracht gezogen werden. Das niedrigere Flächengewicht hat dabei den Vorteil, dass der Tragekomfort des Gewebes besser ist.

Wärmeleitfähige Komposite sollte für die Ausrüstung ein schnelles Ableiten und Verteilen der Wärme der Metalltropfen auf der Oberfläche garantieren, wodurch sichergestellt werden sollte, dass die Erwärmung der Rückseite des Gewebes deutlich verlangsamt wird. Bei den optimierten Geweben konnten die Anzahl der Metalltropfen bis auf 24 erhöht werden, bevor eine Erwärmung um 40 K stattfand. Diese Methode zeigt, dass wärmeleitfähige Komposite prinzipielle nach dem gewünschten Wirkmechanismus eine Verbesserung der Beständigkeit gegen Metallspritzer erzielen, jedoch ist diese nicht ausreichend für die Schutzklasse 2. Die Ausrüstung mit den wärmeleitfähigen Kompositen führt zu keiner Verschlechterung des Tragekomfort des leichteren Gewebes, jedoch wird die Transmission von schädlicher UV-Strahlung verringert, wodurch den Schweißer ein deutlich längeres Arbeiten, ohne des Risikos einer hohen UV-Belastung möglich ist.

Durch einen Nanostrukturierung sollte ein „Lotuseffekt“ für kleine Metalltropfen erzielt werden. Durch die Nanostrukturierung trifft der Metalltropfen zuerst auf der Oberfläche

der Nanopartikel auf, dadurch wird isolierende Luft zwischen Metalltropfen und Gewebeerfläche eingeschlossen und so das Gewebe geschützt. Gleichzeitig hat der Tropfen durch die Nanopartikel nur eine kleine Kontaktfläche, wodurch auch die Wärmemenge, welche auf das Gewebe übertragen werden kann, kleiner ist.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse des Tragekomforts und der Metalltropfenprüfung

Material	Ausrüstung	Metallspritzer [Anzahl abgewiesene Tropfen]	Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} [m^2K/W]	Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} [m^2Pa/W]
B MAC	ohne	19	0,019	4,83
	thermisch leitfähig, Partikel 4*	24	0,022	5,01
	1,25 % TEOS, 40 g/L TiO_2	26	-	-
	thermisch leitfähig, Partikel 4 + 2,5 % TEOS, 20 g/l SiO_2	17	0,012	4,49
	thermisch leitfähig, Partikel 4 + 1,25 % GPTMS, 40 g/l AluOx	21	0,013	4,86
D	ohne	17	0,020	5,13
	thermisch leitfähig, Partikel 4	22	0,022	6,06
	2,5 % TEOS, 20g/l SiO_2	26	0,023	5,61
	1,25 % GPTMS, 40 g/l AluOx	29	0,025	5,60
	thermisch leitfähig, Partikel 4 + 2,5 % TEOS, 20g/l SiO_2	20	0,019	4,54
	thermisch leitfähig, Partikel 4 + 1,25 % GPTMS, 40 g/l AluOx	21	0,017	4,89
CO	ohne	22	0,0248	5,52
	TEOS, 1,25 % SiO_2 , 40 g/L	25	0,0234	5,61
	TEOS, 2,5 % SiO_2 , 20 g/L	26	0,0242	5,71
	GPTMS, 2,5 %, ZnO 20 g/L	26	0,0254	5,34
	GPTMS, 1,25 %, AluOx 40 g/L	31	0,0252	5,60

*Partikel 4 = SiC

Dieser Ansatz zeigt, dass sich der Effekt gut über die aufgetragene Menge Nanopartikel / Binder einstellen lässt. Hohe Binderkonzentrationen führen zu höheren Auflagen auf dem Gewebe. Werden Binderkonzentrationen im Bereich von 5 gew% in der Ausrüstungslösung verwendet können 35 Tropfen flüssiges Eisen auf das Textil fallen bevor ein Temperaturanstieg von 40 K beobachtet wird, wird die Binderkonzentration kleiner nimmt auch die Zahl ab.

Der Nachteil hoher Binderkonzentration ist ein Versteifen des Gewebes. Im Fall von Binderkonzentrationen zwischen 1,25 und 2,5 % wird die Flexibilität nur geringfügig beeinträchtigt, wobei mit unterschiedlichen nach Partikel (SiO_2 , ZnO , AluOx und TiO_2) die Schweißerschutzklasse 2 erreicht werden kann. Der Tragekomfort der Gewebe wird nicht beeinflusst. Tabelle 17 fasst die Ergebnisse von HIT und DTNW zusammen.

Mit den Kosten für die Ausrüstungschemikalien, welche das DTNW von möglichen Lieferanten für die Ausrüstung des DTNW ermitteln konnte, kostet die Ausrüstung mit den Bindern alleine 9-20 €/m² mit den Partikeln liegen die Kosten bei 26-50 €/m². Mit diesen Kosten lässt sich die Ausrüstung nicht als wirtschaftlich betrachten. Ein Kostenfaktor, welcher die Wirtschaftlichkeit verbessern kann, ist der Wechsel des Bindersystems. Hinzu kommt, dass das DTNW keine Preise für die Abnahme großer Mengen im Tonnenmaßstab erhält, welches die Kosten für die Nanopartikel weiter senkt.

Das Verfahren, wenn sich die Kosten weiter senken lassen, bietet KMU aus dem Bereich der Textilveredlung neue innovative Produkte für den Arbeitsschutzsektor. Die Verwendung von leichter Kleidung im Bereich der PSA erhöht die Akzeptanz dieser, da der Tragekomfort im Vergleich zu Schweißerschutzkleidung der Klasse 2 durch das im Projekt entwickelte Verfahren der Nanostrukturierung von Kleidung der Schweißerschutzklasse 1 einen deutlich verbesserten Tragekomfort nach sich zieht. Dadurch können von KMU, welche sich auf den Sektor PSA spezialisiert haben, neu auch internationale Absatzmärkte eröffnet werden.

7. Danksagung

Das Forschungsvorhaben IGF-Nr. 20143 N der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Reinhardtstraße 14-16, 10117 Berlin, wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses danken wir für die Bereitstellung von Mustern, für die Durchführung von hauseigenen Flammtests sowie für die konstruktive Diskussion der Projektergebnisse, die zum Gelingen des vorliegenden Forschungsvorhabens wesentlich beigetragen hat.

8. Durchführende Forschungsstelle

Forschungsstelle 1: Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West gGmbH
Institut an der Universität Duisburg-Essen
Adlerstraße 1, 47798 Krefeld

Leiter der Forschungsstelle: Professor Dr. Jochen Gutmann
Tel.: 02151/843-0 Fax: 02151/843-2096
e-Mail: jochen.gutmann@dtnw.de

Projektleiter: Dr. Thomas Mayer-Gall
Tel.: 02151/843-2015 Fax: 02151/843-2096
e-Mail: mayer-gall@dtnw.de

Forschungsstelle 2: Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH
Schlosssteige 1
74357 Bönningheim

Leiter der Forschungsstelle: Professor Dr. Stefan Mecheels
Tel.: 07143/271-0
e-Mail: s.mecheels@hohenstein.de

Projektleiter: Dr. Bianca-Michaela Wölfling
Tel.: 07143/271-370
e-Mail: b.woelfling@hohenstein.de

9. Literatur

- 1 Statista GmbH, "Textil- und Bekleidungsindustrie in Deutschland - Statista-Dossier", 2015
- 2 R.-D. Reumann, "Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungsindustrie", Springer, Berlin, 2000
- 3 Reiniger & Wäscher 1997, 7, 20
- 4 V. Anderson, Ergonomics of PPE Personal Protective Equipment, 5th Scandinavian Symposium on Protective Clothing, Elsinore, Dänemark, 1997
- 5 Textile Network 2005, 12, 3, 17
- 6 <http://www.leipold-doehle.com/proban.html> (zuletzt überprüft: 01.09.2015).
- 7 T. Textor, J. S. Gutmann, M. Brey, E. Gierling, J. Beringer, Abschlussbericht IGF-Projekt Nr. 17680 N, „Entwicklung einer Ausrüstung zur Verbesserung der Abweisung von flüssigen Metallspritzern von Schweißerschutzkleidung“, 2015
- 8 Farouk, A.; Moussa, S.; Ulbricht, M.; Schollmeyer, E.; Textor, T. ZnO-Modified Hybrid Polymers as an Antibacterial Finish for Textiles. *Tex. Res. J.* **2014**, *84* (1), 40–51
- 9 C. M. Tian, Z. H. Shi, H. Y. Zhang, J. Z. Xu, J. R. Shi, H. Z. Guo, Thermal Degradation of Cotton Cellulose, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1999, *55*, 93-98
- 10 Taranov, V. F.; Potapov, A. Y.; Vorobev, E. N.; Bogachev, K. N.; Bogachev, S. N. Coating for Protecting Surface Against Splashes of Melt Metal Sticking During Welding. OOO "Univeko," Russia, RU2609120C2, 2017
- 11 Izawa, H.; Tanaka, M. Heat- and Sputtering-Resistant Fabrics for Protection Against Melted Metals and Welding Sparks with Good Washfastness. Teijin Ltd., Japan, , 1997
- 12 Yuasa, S. Self-Extinguishing Polyester Nonwoven Fabrics. Unitika Ltd., Japan, JP2010047883A, 2010

-
- 13 Assessment of Contaminants in Wildland Personal Protective Clothing (PPC) Made From PROBAN® Treated Cotton. *Australasian Fire and Emergency Service Authorities Council* **2012**
- 14 Hand, G.; Hicklin, R.; Smith, T. Treatment of Textile Materials. U.S. Pat. Appl., US20120122361 (A1), 2012
- 15 Eguchi, H. Lightweight Organic Nonwoven Fabric Sheets for Protection Against Welding Spark. Toyobo Co., Ltd., Japan, JP2008202155A, 2008
- 16 Greve & Co. KG, Gewebe für hitze- und flammfeste Schutzkleidung Patent, DE202008011427 U1, 2010
- 17 M. Fisher, A. Brown, Toray Textiles Europe Ltd., Heat Resistant Fabric, WO2011114107 (A1), 2011
- 18 <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/itm/ressourcen/dateien/presse/rueckblick-auf-veranstaltungen/textiltagung-2006/sektion2.pdf> (10.04.17)
- 19 Watanabe, S.; Watanabe, M. Protective Safety Clothes Against Molten Metal Splashes Used Under High-Temperature Heat Radiant Environment. Toyo Co., Ltd., Japan, JP2004156177A, 2004
- 20 Pryne, S. H.; Patel, A.; Pryne, W. H.; Tayebi, A. High-Temperature and Fire-Resistant Fabric and a Method of Manufacturing Thereof. American Felt and Filter Company, LLC, USA, US8026189B1, 2011
- 21 Dietzel, Y. *Entwicklung Einer Geeigneten Schutzkleidung Vor Thermischen Gefahren Bei Kontakt Mit Geschmolzenem Magnesium*; IW050400; Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V., 2006; pp 1–84
- 22 Dietzel, Y. *Untersuchungen Zur Entwicklung Industriell Wasch- Barer Hitzeschutzkleidung Zum Schutz Gegen Flüssige Aluminiumspritze*; 1126/03; Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V., 2005; pp 1–54
- 23 Bayerische Motoren Werke AG, Protective clothing for welding work, comprises welding spark resistant surface layer and steel fabric, DE202005002255 (U1), 2005.
- 24 J. Wang, G. Mao, C. K. Ober, E. J. Kramer, *Macromolecules*, 1997, 30, 1906-1914
- 25 H.G. Elias, *Makromoleküle: Physikalische Struktur & Eigenschaften*, Band 2, Wiley-VCH, Weinheim, 2001
- 26 A. B. D. Cassie, S. Baxter, *Transactions of the Faraday Society*, 1944, 40, 546

- 27 H. J. Ensikat, A.J. Schulte, K. Koch, W. Barthlott, Langmuir, 2009, 25 (22), 13077-13083
- 28 J. Specovius, Grundkurs Leistungselektronik, Springer, 2015
- 29 T. Schubert, H. Weidmüller, T. Weißgärber, B. Kieback, „Kupfer-Verbundwerkstoffe für passive Kühlkörper in der Elektronik“, Metall 61, 2007, No. 11, 752-756
- 30 M. Grundler, T. Reich, T. Derieth, A. Heinzl, „Entwicklung von hochwärmeleitfähigen Polymer-Compounds“, http://www.zbt-duisburg.de/fileadmin/user_upload/01-aktuell/05-publikationen/03-paper/2014/2013-031_Polymermischungen_MGR.pdf (zuletzt überprüft: 25.01.2016)
- 31 http://www.haniel.de/uploads/media/1._Haniel_CR-Bericht.pdf (zuletzt überprüft: 25.01.2016)
- 32 K. Hoffmann, J. Laperre, A. Avermaete, P. Altmeyer, T. Gamblicher, Defined UV-Protection by Apparel Textiles, Arch Dermatol., (2001) **137**, 1089-1094
- 33 B.R. Das, UV Radiation Protective clothing, The Open Textile Journal, (2010), **3**, 14-21
- 34 D. Saravanan, UV Protection Textile Materials, AUTEX Research Journal (2007) **7** (1), 53-62
- 35 M. Shateri-Khalilabad, M. E. Yazdanshenas, Bifunctionalization of cotton textile by ZnO nanostructures: antimicrobial and ultraviolet protection, Textile Research Journal, (2013) **83** (10), 993-1004
- 36 Wang, R.; Xin, J. H.; Tao, X. M.; Daoud, W. A. ZnO Nanorods Grown on Cotton Fabrics at Low Temperature. *Chemical Physics Letters* **2004**, 398 (1-3), 250–255.
- 37 W.A. Daoud and J.H. Xin, Low Temperature Sol-Gel Processed Photocatalytic Titania Coating, Journal of Sol-Gel Science and Technology **29**, 25–29, 2004
- 38 I. Perelshtein, G. Applerot, N. Perkash, J. Grinblat and a. Gedanken, A One-Step Process for the Antimicrobial Finishing of Textiles with Crystalline TiO₂ Nanoparticles, Chem. Eur. J. 2012, **18**, 4575 – 4582
- 39 H. de Marées, „Sportphysiologie“, Tropon Werke, Köln-Mühlheim, 1989
- 40 J. Mecheels, „Körper – Klima – Kleidung: Wie funktioniert unsere Kleidung?“, Schiele & Schön, Berlin, 1998.
- 41 ISO 15831 „Clothing — Physiological effects — Measurement of thermal insulation by means of a thermal manikin“, 2004

-
- 42 ISO 11092:2014 "Textiles — Physiological effects — Measurement of thermal and wa-ter-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hot-plate test)", 2014H. de Marées, „Sportphysiologie“, Tropon Werke, Köln-Mühlheim, 1989
- 43 ISO 11092:2014 "Textiles — Physiological effects — Measurement of thermal and wa-ter-vapour resistance under steady-state conditions (sweating guarded-hot-plate test)", 2014
- 44 <http://www.technischerhandel.com/Markt-Branche/Unternehmen-Maerkte/Umsatzrekord-im-deutschen-PSA-Markt> (zuletzt überprüft: 16.03.2017)
- 45 <http://dp.bgetem.de/pages/service/download/medien/327.pdf>
- 46 <https://www.tz.de/leben/karriere/fehltagereport-bayern-diese-berufe-machen-meisten-krank-2664151.html> (zuletzt überprüft: 16.03.2017)
- 47 RICHTLINIE 2006/25/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RA-
TES vom 5. April 2006 durch über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit
und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung physikalische Einwirkungen
(künstliche optische Strahlung), [https://eur-lex.europa.eu/legal-con-
tent/DE/ALL/?uri=celex:32006L0025](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=celex:32006L0025), zugegriffen am 10.08.2021