Emily Wuwer

Entwicklung und Charakterisierung UV-schützender Textilien durch funktionelle biobasierte Beschichtungen auf Basis von Tanninsäure und Polydopamin

Bachelorarbeit

eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Bekleidung – Technik und Management
an der Fakultät Design
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Markus Oberthür
Zweitgutachterin: Prof. Ulrike Schempp

Abgegeben am 19.08.2026

Danksagung

Herrn Prof. Dr. Markus Oberthür danke ich für die engagierte Betreuung dieser Arbeit – fachlich sowie im Labor.

Ebenso danke ich allen, die auf ihre Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich von Herzen –
für Geduld, Rückhalt und Zuspruch während der Studienzeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis VI

Tabellenverzeichnis X

Abkürzungsverzeichnis XI

1 Einleitung 1

1.1 Problemstellung und Motivation 2

1.2 Aufbau der Arbeit 4

2 Theoretische Grundlagen 6

2.1 Grundlagen der UV-Strahlung 6

2.1.1 Definition und Einteilung der UV-Strahlung 6

2.1.2 Einflussfaktoren auf die UV-Intensität 7

2.1.3 Wirkung von UV-Strahlung auf die Haut 8

2.1.4 Hauttypen und individuelle Schutzbedürftigkeit 9

2.1.5 UV-Index als Orientierungshilfe 10

2.2 Bewertung von UV-Schutz bei Textilien 12

2.2.1 Definition und Bedeutung des UPF-Wertes 12

2.2.2 Prüfprinzip der UPF-Bestimmung 13

2.2.3 Normen und Standards zur Bewertung von UV-Schutztextilien 14

2.2.3.1 Australisch-neuseeländischer Standard AS/NZS 4399 14

2.2.3.2 Europäische Norm DIN EN 13758-1/2 15

2.2.3.3 Amerikanischer Standard AATCC TM 183 15

2.2.3.4 UV-Standard 801 16

2.3 UV-Schutz durch Textilien 16

2.3.1 Die Bedeutung von Kleidung beim UV-Schutz 16

2.3.2 Vor- und Nachteile von Kleidung als UV-Schutz 19

2.3.3 Aktuelle Ansätze zur Gewährleistung von UV-Schutz bei Textilien ... 22

2.4 Polyphenolische Beschichtungen für UV-Schutztextilien 24

2.4.1 Tanninsäure als biobasierte polyphenolische Beschichtung 25

2.4.2 Tanninsäure-Metall-Komplexe und deren funktionelle Eigenschaften 26
2.4.3 Forschungsstand zu tanninsäurebasierten UV-Schutztextilien 28
2.5 Polydopamin als bioinspirierte Beschichtung 29
2.5.1 Grundlagen und Relevanz von Polydopamin 29
2.5.2 Forschungsstand zu Polydopamin-beschichteten Textilien 31
2.6 Einordnung der Beschichtungsansätze und Gebrauchstauglichkeit 32
2.7 Ableitung des experimentellen Untersuchungsansatzes 33
3 Experimenteller Teil – Methodik und Durchführung 34
3.1 Materialien und Chemikalien 34
3.1.1 Textile Ausgangsmaterialien 34
3.1.2 Verwendete Chemikalien und Hilfsmittel 35
3.1.3 Geräte 37
3.2 Probenvorbereitung 39
3.2.1 Zuschnitt und Vorbehandlung 39
3.2.2 Färbung der Textilproben 39
3.2.2.1 Dispersionsfärbung der Polyesterproben 40
3.2.2.2 Reaktivfärbung der Baumwollproben 41
3.3 UPF-Messung und Auswertung 41
3.4 UV/Vis-Remissionsmessung und Auswertung 42
3.5 Versuchsübersicht und Referenzproben 42
3.6 Beschichtung mit reiner Tanninsäure 44
3.7 Tanninsäure in Kombination mit Eisenverbindungen 46
3.7.1 Tanninsäure-Lösung mit Eisen(III)-chlorid 46
3.7.2 Tanninsäure-Lösung mit Eisen(II)-sulfat 47
3.8 Polydopaminbasierte Beschichtungsversuche 48
3.9 Waschversuche zur Gebrauchstauglichkeit 49
4 Beobachtungen, Ergebnisse und Diskussion 51
4.1 Referenzproben 51

4.2 Beschichtung mit reiner Tanninsäure 53
4.2.1 Ungefärbte Proben 53
4.2.2 Gefärbte Proben 65
4.3 Tanninsäure in Kombination mit Eisenverbindungen 75
4.3.1 Tanninsäure-Lösung mit Eisen(III)-chlorid 75
4.3.2 Tanninsäure-Lösung mit Eisen(II)-sulfat 77
4.4 Polydopaminbasierte Beschichtungsversuche 83
4.4.1 PDA-Beschichtung unter Rühren mit Kontakt zum Rührfisch 84
4.4.2 PDA-Beschichtung ohne Rühren 88
4.4.3 PDA-Beschichtung unter Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch 91
4.5 Vergleichende Betrachtung und Gebrauchstauglichkeit 94
4.5.1 Einfluss von Fasermaterial, Konzentration und Temperatur 94
4.5.2 Vergleich der Beschichtungsansätze 95
4.5.3 Waschbeständigkeit und praktische Eignung 97
5 Fazit und Ausblick 99
Literatur- und Quellenverzeichnis 104
Anhang 113
Selbstständigkeitserklärung 128

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Becherfärbeapparat LABOMAT BFA 12 des Herstellers Mathis. 37
Abb. 2: UV/VIS-Spektralphotometer Typ UV-2600i des Herstellers Shimadzu. 38
Abb. 3: Spektralphotometer CM-36dG des Herstellers Konica Minolta..... 38
Abb. 4: Unbeschichtete ungefärbte Referenzproben: Baumwolle (links) und Polyester (rechts). 52
Abb. 5: Unbeschichtete gefärbte Referenzproben: Baumwolle (links) und Polyester (rechts). 52
Abb. 6: Visuelle Erscheinung ungefärbter Baumwollproben vor und nach der Beschichtung mit Tanninsäure. 54
Abb. 7: Visuelle Erscheinung ungefärbter Baumwollproben nach der Beschichtung mit Tanninsäure. 54
Abb. 8: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Baumwollproben nach Beschichtung mit Tanninsäure. 55
Abb. 9: UPF-Werte ungefärbter Baumwollproben nach der Beschichtung mit reiner Tanninsäure in unterschiedlichen Konzentrationen. 56
Abb. 10: Visuelle Erscheinung TA-beschichteter Baumwollproben nach zwei Waschtests. 57
Abb. 11: UV/Vis-Remissionsspektrum der mit 2 Gew.-% Tanninsäure beschichteten Baumwollprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE. . 58
Abb. 12: UPF-Werte der mit TA 0,3 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE. 58
Abb. 13: UPF-Werte der mit TA 0,3 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf. 59
Abb. 14: UPF-Werte ungefärbter Baumwollproben nach Beschichtung mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure vor und nach den Waschtests mit ECE- und Ecosurf-Waschmittel. 59
Abb. 15: UPF-Werte der mit TA 2 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE. 60
Abb. 16: UPF-Werte der mit TA 2 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf. 60

Abb. 17: UPF-Werte ungefärbter Baumwollproben nach Beschichtung mit 2 Gew.-% Tanninsäure vor und nach den Waschtests mit ECE- und Ecosurf-Waschmittel. 61
Abb. 18: UPF-Werte der mit TA 10 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE. 62
Abb. 19: UPF-Werte der mit TA 10 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf. 62
Abb. 20: Visuelle Erscheinung ungefärbter Polyesterproben nach der Beschichtung mit reiner Tanninsäure in unterschiedlichen Konzentrationen. ... 64
Abb. 21: UPF-Werte ungefärbter Polyesterproben nach der Beschichtung mit reiner Tanninsäure in unterschiedlichen Konzentrationen; die Werte basieren auf einem Datensatz. 65
Abb. 22: Visuelle Erscheinung gefärbter Baumwollproben vor und nach der Beschichtung mit Tanninsäure. 66
Abb. 23: Visuelle Erscheinung gefärbter Baumwollproben nach der Beschichtung mit Tanninsäure. 67
Abb. 24: UV/Vis-Remissionsspektrum gefärbter Baumwollproben vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit 2 Gew.-% Tanninsäure (rot). 67
Abb. 25: UPF-Werte gefärbter Baumwollproben nach der Beschichtung mit reiner Tanninsäure in unterschiedlichen Konzentrationen. 68
Abb. 26: UPF-Werte von ungefärbtem und gefärbtem Baumwollgewebe nach Beschichtung mit 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% Tanninsäure. 69
Abb. 27: Visuelle Erscheinung TA-beschichteter Baumwollproben nach zwei Waschtests. 69
Abb. 28: UPF-Werte der mit TA 0,3 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE. 70
Abb. 29: UPF-Werte der mit TA 0,3 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf. 70
Abb. 30: UPF-Werte gefärbter Baumwollproben nach Beschichtung mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure vor und nach den Waschtests mit ECE- und Ecosurf-Waschmittel. 71
Abb. 31: UPF-Werte der mit TA 2 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE 72

Abb. 32: UPF-Werte der mit TA 2 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf. 72
Abb. 33: UPF-Werte gefärbter Baumwollproben nach Beschichtung mit 2 Gew.-% Tanninsäure vor und nach den Waschtests mit ECE- und Ecosurf-Waschmittel. 73
Abb. 34: UPF-Werte der mit TA 10 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE. 73
Abb. 35: UPF-Werte der mit TA 10 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf. 74
Abb. 36: Ungefärbte Baumwoll- und Polyesterproben nach Beschichtung mit Tanninsäure und Eisen(III)-chlorid; Baumwolle (links) und Polyester (rechts). . 75
Abb. 37: UPF-Werte der ungefärbten Referenzproben und der mit Tanninsäure/Eisen(III)-chlorid beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben. 77
Abb. 38: Ungefärbte Baumwoll- und Polyesterprobe nach Beschichtung mit Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat; Baumwolle (links) und Polyester (rechts). 78
Abb. 39: Gefärbte Baumwoll- und Polyesterproben nach Beschichtung mit Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat; Baumwolle (links) und Polyester (rechts). 79
Abb. 40: UPF-Werte der ungefärbten Referenzproben sowie der mit Tanninsäure/Eisen(II)-sulfat beschichteten ungefärbten und gefärbten Baumwoll- und Polyesterproben. 80
Abb. 41: UPF-Werte der ungefärbten, mit Tanninsäure/Eisen(II)-sulfat beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben vor und nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE. 80
Abb. 42: UPF-Werte der gefärbten, mit Tanninsäure/Eisen(II)-sulfat beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben vor und nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE. 81
Abb. 43: Ungefärbte, mit Tanninsäure/Eisen(II)-sulfat beschichtete Baumwoll- und Polyesterproben vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE. 82
Abb. 44: Gefärbte, mit Tanninsäure/Eisen(II)-sulfat beschichtete Baumwoll- und Polyesterproben vor und nach dem Waschtest mit ECE. 83
Abb. 45: Ungefärbte Baumwoll- und Polyesterproben nach PDA-Beschichtung unter Rühren mit direktem Kontakt zum Rührfisch; Baumwolle (links) und Polyester (rechts). 84

Abb. 46: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Baumwollprobe vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit PDA unter Rühren sowie direktem Kontakt zum Rührfisch (rot). 85
Abb. 47: UPF-Werte der ungefärbten Referenzproben und der PDA-beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben unter Rühren mit direktem Kontakt zum Rührfisch. 86
Abb. 48: UPF-Werte der PDA-beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben unter Rühren mit direktem Kontakt zum Rührfisch vor und nach dem ersten sowie zweiten Waschtest mit ECE. 87
Abb. 49: UPF-Werte der PDA-beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben unter Rühren mit direktem Kontakt zum Rührfisch vor und nach dem ersten sowie zweiten Waschtest mit Ecosurf. 87
Abb. 50: PDA-beschichtete Baumwoll- und Polyesterproben nach zwei Waschtests. 88
Abb. 51: Ungefärbte Baumwoll- und Polyesterproben nach PDA-Beschichtung ohne Rühren; Baumwolle (links) und Polyester (rechts). 89
Abb. 52: UPF-Werte der ungefärbten Referenzproben und der PDA-beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben ohne Rühren. 90
Abb. 53: UPF-Werte der PDA-beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben ohne Rühren vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE. 90
Abb. 54: PDA-beschichtete Baumwoll- und Polyesterproben ohne Rühren vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE. 91
Abb. 55: Ungefärbte Baumwollprobe nach PDA-Beschichtung unter Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch. 92
Abb. 56: UPF-Werte der unbeschichteten Baumwollreferenz sowie der ungefärbten und gefärbten PDA-beschichteten Baumwollproben bei Beschichtung unter Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch. 93
Abb. 57: Gefärbte Baumwollprobe nach PDA-Beschichtung unter Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch. 93

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hauttypen mit entsprechender Eigenschutzzeit; Daten aus Lit. 10
Tabelle 2: Einteilung des UV-Index mit abgeleiteten Schutzempfehlungen; Daten aus Lit. 11
Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Chemikalien und Hilfsmitteln 36
Tabelle 4: Übersicht zu den Versuchsreihen 43
Tabelle 5: Übersicht der Datensätze mit reiner Tanninsäurebeschichtung 45
Tabelle 6: Übersicht der Versuchsreihen mit Polydopamin 49
Tabelle 7: UPF-Werte der Referenzproben 51
Tabelle 8: Vergleichende Übersicht der UPF-Werte ungefärbter Baumwoll- und Polyesterproben nach den untersuchten Beschichtungsansätzen 95

Abkürzungsverzeichnis

CO	Baumwolle
ECE	Bezeichnung für das genormte Referenzwaschmittel nach EN ISO 105-C06
MED	Minimale Erythemdosis
PDA	Polydopamin
PES	Polyester
SPF	Sun Protection Factor
TA	Tanninsäure (Tannic Acid)
Tris	Tris(hydroxymethyl)aminomethan
UPF	Ultraviolet Protection Factor
UV	Ultraviolett(e)
UV-A	Ultraviolett-A-Strahlung
UV-B	Ultraviolett-B-Strahlung
UV-C	Ultraviolett-C-Strahlung
WT	Waschtest

1 Einleitung

Ultraviolette (UV-)Strahlung ist für den Menschen nicht sichtbar und entzieht sich damit der unmittelbaren Wahrnehmung, gehört jedoch zum energiereichsten Teil der optischen Strahlung und kann akute sowie langfristige gesundheitliche Auswirkungen auf Haut und Augen hervorrufen.[1] Zu den langfristigen Folgen zählen unter anderem vorzeitige Hautalterung und ein erhöhtes Risiko für Hautkrebserkrankungen. Weltweit wurden im Jahr 2020 mehr als 1,5 Millionen Hautkrebsfälle und über 120.000 damit verbundene Todesfälle erfasst.[2] Auch wenn sich die stratosphärische Ozonschicht langfristig erholt,[3] bleibt die UV-Belastung für die Bevölkerung stets relevant, da sie von zahlreichen Einflussgrößen wie Jahres- und Tageszeit, Bewölkung, geographischer Lage, Höhenlage und dem individuellen Aufenthaltsverhalten abhängt.[4] Vor diesem Hintergrund stellt UV-Strahlung einen gesundheitlich relevanten und umweltbedingten Risikofaktor dar, dessen Bedeutung in Prävention, Alltagsverhalten und UV-Schutz durch Bekleidung seit Jahren zunehmend in den Fokus rückt.[5]

Textilien übernehmen in diesem Zusammenhang eine wichtige Schutzfunktion, da sie als physische Barriere zwischen UV-Strahlung und Haut wirken. Allerdings bietet Kleidung nicht automatisch in jedem Fall denselben Schutz, da die Schutzwirkung textiler Materialien von diversen Parametern abhängig ist. Darunter fallen z. B. die Faserart, Flächenkonstruktion, Materialdichte, Farbe, Feuchtigkeit sowie vorhandene Ausrüstungen oder Beschichtungen. Neben konstruktiven Eigenschaften können daher insbesondere Färbe- und Veredelungsprozesse entscheidend dazu beitragen, das UV-Schutzvermögen eines Textils gezielt zu beeinflussen.[6]

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Entwicklung funktioneller UV-Schutztextilien zunehmend an Bedeutung. In der Forschung wurden bereits unterschiedliche Ansätze zur Verbesserung des UV-Schutzes beschrieben, etwa durch anorganische Partikel, polymere Beschichtungen oder multifunktionelle Oberflächenmodifika-

[1] Bundesamt für Strahlenschutz (2025)
[2] Saha et al. (2024)
[3] Nullis (2025)
[4] Hölzle & Hönigsmann (2005)
[5] Ebd.
[6] Saha et al. (2024)

tionen.[7] Zugleich zeigt die Literatur, dass nicht allein hohe Schutzwerte im Neuzustand relevant sind, sondern ebenso die Frage, ob die erreichte Schutzwirkung unter praxisnahen Bedingungen erhalten bleibt.[8] Gerade für Bekleidungstextilien ist daher nicht nur die initiale Funktionalisierung, sondern auch deren Beständigkeit im Gebrauch von zentraler Bedeutung.

1.1 Problemstellung und Motivation

Obwohl in der Literatur zahlreiche Ansätze zur funktionellen Ausrüstung von Textilien mit UV-schützenden Eigenschaften beschrieben werden, fokussieren sich viele Untersuchungen entweder auf einzelne Materialien, auf nur eine Modifikationsstrategie oder auf die unmittelbare Schutzwirkung nach der Ausrüstung. Häufig stehen dabei entweder Beschichtungen oder Färbungen im Vordergrund, während die vergleichende Betrachtung verschiedener textiler Ausgangszustände und deren Verhalten unter Gebrauchs- und Pflegebedingungen seltener systematisch untersucht wird. Wie bereits erwähnt, ist vor allem aber nicht nur wichtig zu erfassen, ob ein Material einen hohen UV-Schutz aufweist, sondern auch wie stabil diese Schutzwirkung unter praxisnahen Beanspruchungen bleibt.[9]

Gerade deshalb sind Textilien als Schutzsystem von besonderem Interesse, da sie eine alltagsnahe und potenziell dauerhafte Form des Sonnenschutzes darstellen. Im Unterschied zu topisch applizierten Sonnenschutzmitteln hängt ihre Schutzwirkung nicht unmittelbar vom korrekten Auftragen oder wiederholtem Nachcremen ab, sondern ist an das Material selbst und dessen Eigenschaften gebunden.[10]

Besonders interessant erscheinen in diesem Zusammenhang bioinspirierte und biobasierte Beschichtungsansätze für Textilien. Polydopamin gilt als universell einsetzbare, materialunabhängige Beschichtung, die auf einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien aufgebracht werden kann und zeitgleich als Grundlage für weitere Funktionalisierungen dient.[11] Darüber hinaus wird in der Literatur über

[7] Dhineshbabu & Bose (2018); Emam et al. (2024); Jia et al. (2024)
[8] Cole et al. (2023); Mondal (2022)
[9] Mondal (2022)
[10] Berry et al. (2022)
[11] H. Lee et al. (2007)

weitere funktionelle Eigenschaften polydopaminbeschichteter Textilien berichtet, darunter eine verbesserte Benetzbarkeit, antibakterielle Wirkung sowie UV-Schutz.[12]

Auch Tanninsäure weist aufgrund der polyphenolischen Struktur ein hohes Potenzial für UV-absorbierende und multifunktionelle Ausrüstungen auf und wird in verschiedenen Arbeiten als vielversprechende Komponente nachhaltiger Beschichtungssysteme beschrieben.[13]

Darüber hinaus ist bekannt, dass auch die Färbung einen relevanten Einfluss auf das UV-Schutzvermögen textiler Materialien ausüben kann, da Farbstoffe je nach chemischer Struktur und Konzentration UV-Strahlung absorbieren und die Eigenschaften des Materials verändern können.[14] Für eine praxisnahe Bewertung ist es daher nicht ausreichend, ausschließlich ungefärbte oder gefärbte Textilien zu betrachten. Vielmehr ist es sinnvoll, sowohl ungefärbte als auch gefärbte Textilien in der Kombination mit Beschichtungen in die Untersuchung einzubeziehen, um die Effekte beider Einflussgrößen vergleichend bewerten zu können.

An dieser Stelle setzt die vorliegende Bachelorarbeit an. Ziel ist es, die UV-Schutzwirkung von Baumwoll- und Polyestergeweben in unterschiedlichen Materialzuständen systematisch zu vergleichen. Dafür werden zwei im Bekleidungsbereich besonders relevante, jedoch materialseitig unterschiedliche Gewebearten, mit entsprechend unterschiedlich zu erwartender Wechselwirkung mit den eingesetzten Beschichtungen, sowohl ungefärbt als auch gefärbt sowie mit biobasierten Beschichtungen auf Basis von Tanninsäure und Polydopamin untersucht. Im Fokus steht dabei die Frage, wie Materialart, Färbung und Beschichtung die resultierende Schutzwirkung beeinflussen. Ergänzend wird untersucht, wie sich Waschbeanspruchung auf den Ultraviolet Protection Factor (UPF) und damit auf die Gebrauchstauglichkeit der funktionalisierten Gewebe auswirkt. Dadurch soll ein Beitrag dazu geleistet werden, die Wechselwirkung von Materialart, Färbung, Beschichtung und Beständigkeit für UV-Schutztextilien im Bekleidungsbereich besser zu verstehen.

[12] Jia et al. (2024)
[13] Sun et al. (2024); Yin et al. (2022); Zhang et al. (2020)
[14] Grundmeier (2019), S. 102 ff.

Aus dieser Problemstellung ergibt sich die Forschungsfrage: Inwieweit lassen sich die UV-Schutzeigenschaften von Baumwoll- und Polyestergeweben durch Färbung sowie durch Beschichtungen auf Basis von Tanninsäure und Polydopamin beeinflussen und wie beständig bleiben diese Effekte nach Waschbeanspruchung?

Die Motivation der Arbeit liegt damit in einer klaren Forschungslücke, denn während die Verbesserung des UV-Schutzes durch einzelne Ausrüstungs- oder Färbeansätze bereits mehrfach untersucht wurde, fehlt bislang eine vergleichende Betrachtung unterschiedlich modifizierter Baumwoll- und Polyestergewebe unter Einbezug der Waschbeständigkeit als praxisrelevantes Kriterium. Die Arbeit verfolgt daher das Ziel, nicht nur die Schutzwirkung einzelner Modifikationen zu erfassen, sondern deren Eignung für eine potenzielle Anwendung auf Bekleidungstextilien kritisch zu bewerten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Bachelorarbeit gliedert sich in einen theoretischen und einen experimentellen Teil. Der theoretische Teil vermittelt zunächst die für das Verständnis der Untersuchung erforderlichen Grundlagen zur UV-Strahlung und ihrer Wirkung. Darüber hinaus werden die Bedeutung von Kleidung und UV-Schutztextilien, die Einflussfaktoren auf das UV-Schutzvermögen textiler Materialien sowie ausgewählte Färbe- und Beschichtungsansätze erläutert. Der praktische Teil der Arbeit konzentriert sich auf die vergleichende Untersuchung der Baumwoll- und Polyestergewebe in unterschiedlichen Ausführungen. Wie eingangs bereits erwähnt, werden unbeschichtete ungefärbte, gefärbte, ungefärbt beschichtete sowie gefärbte und beschichtete Gewebe berücksichtigt, wobei als Färbemittel Reaktiv- und Dispersionsfarbstoffe genutzt werden und die Beschichtungsmethoden auf Tanninsäure und Polydopamin basieren. Die Bewertung der Gewebeproben erfolgt anhand ihrer visuellen Erscheinung sowie der UV/Vis-Remissionsspektren, UPF-Messungen und Waschtests (WT). Da nicht alle Material-Färbe-Beschichtungs-Kombinationen im zur Verfügung stehenden Zeitrahmen mit derselben Anzahl an Wiederholungen und Waschtests untersucht werden konnten, wurde der Versuchsschwerpunkt im Verlauf der Untersuchungen gezielt auf die Ansätze mit der größten UV-Schutzwirkung und der höchsten praktischen

Relevanz gelegt. Die konkrete Priorisierung wird in Kapitel 3 beschrieben und in Kapitel 5 kritisch reflektiert.

Kapitel 2 stellt die theoretischen Grundlagen zur UV-Strahlung, zur Bewertung von UV-Schutz bei Textilien sowie zu den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Beschichtungsansätzen auf Basis von Tanninsäure und Polydopamin dar und leitet daraus den experimentellen Untersuchungsansatz ab. Kapitel 3 beschreibt die verwendeten Materialien, Chemikalien und Geräte sowie die Durchführung der Färbe-, Beschichtungs- und Waschversuche. In Kapitel 4 werden die daraus resultierenden Beobachtungen und Messergebnisse dargestellt, materialübergreifend verglichen und hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit diskutiert. Kapitel 5 fasst die zentralen Erkenntnisse zusammen, benennt die Grenzen der vorliegenden Untersuchungen und gibt einen Ausblick auf mögliche weiterführende Arbeiten.

2 Theoretische Grundlagen

Das folgende Kapitel legt den wissenschaftlichen Hintergrund für die experimentelle Untersuchung. Zunächst werden die Grundlagen der UV-Strahlung und ihre Wirkung auf die Haut dargestellt (Kapitel 2.1), bevor die Bewertung von UV-Schutz bei Textilien sowie die Bedeutung von Kleidung als Schutzmaßnahme erläutert werden (Kapitel 2.2 und 2.3). Anschließend werden die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Beschichtungsansätze auf Basis von Tanninsäure und Polydopamin vorgestellt (Kapitel 2.4 und 2.5), bevor beide Ansätze eingeordnet und der experimentelle Untersuchungsansatz daraus abgeleitet wird (Kapitel 2.6 und 2.7).

2.1 Grundlagen der UV-Strahlung

Um die spätere Bewertung von UV-Schutztextilien nachvollziehen zu können, werden zunächst die grundlegenden Aspekte der UV-Strahlung und ihre Einteilung erläutert (Kapitel 2.1.1). Anschließend werden die Einflussfaktoren auf die UV-Intensität sowie die Wirkung von UV-Strahlung auf die Haut betrachtet (Kapitel 2.1.2 und 2.1.3). Darauf aufbauend werden die individuelle Schutzbedürftigkeit unterschiedlicher Hauttypen und der UV-Index als Orientierungshilfe vorgestellt (Kapitel 2.1.4 und 2.1.5).

2.1.1 Definition und Einteilung der UV-Strahlung

UV-Strahlung ist ein Teil der optischen Strahlung und für den Menschen weder sichtbar noch mit anderen Sinnesorganen direkt wahrnehmbar.[15] Innerhalb des elektromagnetischen Spektrums liegt sie im Wellenlängenbereich von etwa 100 bis 400 nm und stellt den energiereichsten Abschnitt der optischen Strahlung dar.[16]

Die optische Strahlung umfasst neben der UV-Strahlung auch das sichtbare Licht sowie die Infrarotstrahlung (IR). Das sichtbare Licht liegt etwa im

[15] Bundesamt für Strahlenschutz (2025)
[16] Asmuß & Mayer (2012), S. 10

Wellenlängenbereich von 400 bis 780 nm und wird im kurzwelligen Bereich von der UV-Strahlung sowie im langwelligen Bereich von der Infrarotstrahlung begrenzt.[17]

Aufgrund ihrer physikalischen und biologischen Eigenschaften wird UV-Strahlung in drei Bereiche eingeteilt: UV-A, UV-B und UV-C. UV-A umfasst den Wellenlängenbereich von etwa 315 bis 400 nm und erreicht die Erdoberfläche weitgehend ungehindert. UV-B liegt zwischen etwa 280 und 315 nm, ist energiereicher und wird in erheblichem Umfang durch die Atmosphäre bzw. die Ozonschicht absorbiert, jedoch nicht vollständig. UV-C mit Wellenlängen zwischen 100 und 280 nm ist der energiereichste Bereich, wird aber von der Atmosphäre vollständig herausgefiltert, sodass natürliche UV-C Strahlung die Erdoberfläche nicht erreicht.[18] Grundsätzlich gilt also, je kürzer die Wellenlänge, desto energiereicher ist die Strahlung und desto größer ist ihr potenziell schädigender Effekt auf biologisches Gewebe.

2.1.2 Einflussfaktoren auf die UV-Intensität

Für die tatsächliche UV-Belastung des Menschen ist nicht nur die Art der Strahlung entscheidend, sondern auch die Intensität, mit der sie die Erdoberfläche erreicht. Diese hängt von verschiedenen Umwelt- und Standortfaktoren ab, darunter vom Breitengrad, von der Jahres- und Tageszeit, vom Bewölkungsgrad sowie von der Höhenlage. Entsprechend ist die UV-Belastung im Sommer höher als im Winter, zur Mittagszeit stärker als morgens oder abends und in größeren Höhen intensiver als in tiefer gelegenen Regionen. Zusätzlich können reflektierende Flächen die Exposition erhöhen, während Schatten sie reduziert.[19] Diese Abhängigkeiten sind auch deshalb relevant, weil textile UV-Schutzsysteme immer im Zusammenhang mit realen Trage- und Expositionsbedingungen betrachtet werden müssen.[20]

[17] Şapcı & Öncü (2025)
[18] Al-Sadek & Yusuf (2024); Asmuß & Mayer (2012); Narayanan et al. (2010)
[19] Hölzle & Hönigsmann (2005)
[20] Boothby-Shoemaker et al. (2022); Saha et al. (2024)

2.1.3 Wirkung von UV-Strahlung auf die Haut

Die Wirkung der UV-Strahlung auf den menschlichen Organismus ist ambivalent. Einerseits kann sie im begrenzten Umfang positive biologische Effekte haben, andererseits ist sie bei übermäßiger oder wiederholter Exposition eindeutig gesundheitsschädlich.[21] Besonders betroffen sind Haut und Augen, da UV-Strahlung dort eindringt und von Zellen absorbiert wird.[22] Dabei dringt UV-A Strahlung tiefer in die Haut ein als UV-B Strahlung. UV-B wirkt vor allem in den oberen Hautschichten und ist in hohem Maß an akuten Reaktionen wie Sonnenbrand beteiligt. UV-A dringt tiefer ein und steht insbesondere mit lichtbedingter Hautalterung, oxidativem Stress und langfristigen Strukturveränderungen des Bindegewebes in Verbindung.[23]

Von besonderer Bedeutung ist, dass UV-Strahlung bereits bei suberythemalen Dosen, also noch vor dem sichtbaren Auftreten eines Sonnenbrandes, messbare biologische Schäden in der Haut auslösen kann.[24] In den bestrahlten Zellen kann es zu Veränderungen des Erbguts kommen. Wiederholte, langanhaltende und intensive UV-Expositionen erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass solche Schäden nicht mehr vollständig repariert werden. Die Folge können bleibende Mutationen sein, die als wesentlicher Faktor bei der Entstehung von Hautkrebs angesehen werden. Bei krebserregender UV-Strahlung sind sowohl natürliche solare UV-Strahlung als auch künstliche UV-Quellen gesundheitlich relevant.[25] Die Belastung des Menschen ist dabei zu einem großen Teil verhaltensabhängig, da Aufenthaltsdauer im Freien, Tageszeit, Urlaubssituationen und Schutzmaßnahmen die individuelle Exposition wesentlich beeinflussen.[26] Somit kommt präventiven Maßnahmen eine besondere Bedeutung zu. Hierzu gehört unter anderem das Aufsuchen von Schatten, das Vermeiden intensiver Sonnenstrahlung und die Nutzung von Sonnenschutzmittel sowie geeigneter Kleidung.[27]

[21] D'Orazio et al. (2013)
[22] Asmuß & Mayer (2012), S. 10 ff.
[23] Asmuß & Mayer (2012); Grundmeier (2019), S. 10 ff. und S. 101 f.
[24] Shih et al. (2018)
[25] Narayanan et al. (2010)
[26] Hölzle & Hönigsmann (2005)
[27] Saravanan (2007)

Damit wird deutlich, dass sich die Relevanz von UV-Schutz nicht allein aus akuten Beschwerden wie Sonnenbrand ableitet, sondern vor allem aus kumulativen Langzeitwirkungen. Genau diese langfristige Schutzfunktion macht Kleidung aus textiltechnischer Sicht zu einem besonders interessanten Forschungsgegenstand.

2.1.4 Hauttypen und individuelle Schutzbedürftigkeit

Die Eigenschutzzeit der menschlichen Haut vor UV-Strahlung ist stark vom Hauttyp abhängig, der nach der Fitzpatrick-Skala klassifiziert wird. Die Skala unterscheidet sechs Hauttypen u. a. anhand von Hautfarbe, Melaningehalt und Reaktion auf UV-Strahlung.[28] Dabei gilt grundsätzlich, dass helle und empfindliche Hauttypen eine kürzere Eigenschutzzeit sowie eine geringere minimale Erythemdosis (MED) aufweisen und somit bereits bei niedrigeren UV-Strahlendosen mit sichtbaren Hautreaktionen reagieren können. Im Vergleich zu dunkleren bzw. weniger UV-empfindlichen Hauttypen besteht dadurch ein erhöhtes Risiko für UV-bedingte Hautschäden, vorzeitige Hautalterung und die Entstehung von Hautkrebs.[29] Einen Überblick über die Hauttypen, ihre Eigenschutzzeit und die entsprechende Reaktion auf Sonnenexposition gibt folgende Tabelle:

[28] D'Orazio et al. (2013)
[29] Ebd.

Tabelle 1: Hauttypen mit entsprechender Eigenschutzzeit; Daten aus Lit. [30]

Hauttyp	Hautbild/Melanin-gehalt	Eigenschutz-zeit [min]	Reaktion auf UV-Strahlung	Schutzbedürf-tigkeit
I	Sehr helle, stark empfindliche Haut	5-10	Verbrennt sehr leicht, bräunt kaum	Sehr hoch
II	Helle Haut	8-12	Verbrennt leicht, bräunt selten	Hoch
III	Hellbraune Haut	10-15	Verbrennt manch-mal, bräunt allmäh-lich	Mittel bis hoch
IV	Braune Haut	15-20	Verbrennt selten, bräunt gut	mittel
V	Dunkelbraune Haut	20-35	Verbrennt sehr sel-ten, bräunt stark	Geringer, aber weiterhin rele-vant
VI	Dunkelbraun-schwarze Haut	35-70	Verbrennt kaum, starke Pigmentie-rung	Geringer, aber weiterhin rele-vant

Aus den unterschiedlichen Eigenschutzzeiten ergibt sich, dass der individuelle Schutzbedarf je nach Hauttyp variiert. Besonders helle und empfindliche Hauttypen benötigen aufgrund ihrer geringen Eigenschutzzeit einen frühzeitigen und konsequenten Schutz vor UV-Strahlung. Vor diesem Hintergrund gewinnen textile Schutzbarrieren an Bedeutung, da Bekleidung das direkte Auftreffen von UV-Strahlung auf die Haut verringern kann. Die Bewertung dieser Schutzwirkung erfolgt über den Ultraviolet Protection Factor (UPF), der in Kapitel 2.2.1 als zentrale Kenngröße für UV-Schutztextilien näher erläutert wird.[31]

2.1.5 UV-Index als Orientierungshilfe

Der UV-Index dient als Orientierungshilfe zur Einschätzung der aktuellen UV-Belastung. Er ist ein international normierter Richtwert und beschreibt den erwarteten Tageshöchstwert der sonnenbrandwirksamen UV-Strahlung am Boden, der

[30] Saha et al. (2024); Saravanan (2007)
[31] Saha et al. (2024)

in der Regel um die Mittagszeit erreicht wird. Dadurch macht der UV-Index sichtbar, wie stark die Haut durch solare UV-Strahlung beansprucht wird.[32] Die Bewertung erfolgt über eine Skala von 1 bis 11+, wobei mit steigenden Werten auch das Risiko für UV-bedingte Hautreaktionen zunimmt.[33] Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Einteilung des UV-Index und die daraus abgeleiteten Schutzempfehlungen.

Tabelle 2: Einteilung des UV-Index mit abgeleiteten Schutzempfehlungen; Daten aus Lit. [34]

UV-Index	UV-Belastung	Bedeutung und empfohlene Schutzmaßnahmen
1-2	Niedrig	In der Regel kein besonderer Schutz erforderlich. Bei sehr empfindlicher Haut kann leichter Schutz sinnvoll sein.
3-5	Mittel	Schutzmaßnahmen sollten berücksichtigt werden, z. B. Kleidung, Sonnenbrille und Sonnenschutzmittel.
6-7	Hoch	Schutz ist notwendig, direkte Mittagssonne sollte möglichst gemieden oder die Aufenthaltsdauer entsprechend reduziert werden.
8-10	Sehr hoch	Direkte Sonne sollte möglichst gemieden werden, konsequenter Schutz durch Kleidung, Kopfbedeckung, Sonnenbrille und Sonnenschutzmittel ist erforderlich.
11+	Extrem	Ungeschützte Haut kann sehr schnell geschädigt werden, direkte Sonnenexposition sollte vermieden und umfassender UV-Schutz angewendet werden.

Mit zunehmendem UV-Index steigt das Risiko, dass es bei ungeschützter Haut zu einem Sonnenbrand kommt. Dementsprechend gewinnen geeignete Schutzmaßnahmen an Bedeutung.[35] Der UV-Index ist für diese Arbeit besonders relevant, da er die äußere UV-Belastung beschreibt, während der Ultraviolet Protection Factor (UPF) angibt, in welchem Umfang ein Textil diese Belastung gegenüber der Haut reduzieren kann. Damit sind UV-Index und UPF-Wert nicht gleichzusetzen, sondern als sich ergänzende Kenngrößen zu verstehen.[36]

[32] Asmuß & Mayer (2012), S. 20
[33] Hohenstein Institut (2021)
[34] Ebd.
[35] Saravanan (2007)
[36] Ebd.

2.2 Bewertung von UV-Schutz bei Textilien

Für eine vergleichbare Bewertung der UV-Schutzwirkung von Textilien, wird im Folgenden zunächst der UPF-Wert als zentrale Kenngröße definiert (Kapitel 2.2.1). Aufbauend darauf wird das Prüfprinzip der UPF-Bestimmung erläutert (Kapitel 2.2.2), bevor nachfolgend die wichtigsten internationalen Normen und Standards zur Bewertung von UV-Schutztextilien vorgestellt werden (Kapitel 2.2.3).

2.2.1 Definition und Bedeutung des UPF-Wertes

Bekleidung bildet eine physikalische Barriere zwischen Strahlungsquelle und Haut und kann dadurch unabhängig vom Applikationsverhalten des Nutzers wirksam sein.[37] Die Schutzwirkung von Bekleidung gegenüber UV-Strahlung wird durch den Ultraviolet Protection Factor, kurz UPF-Wert, beschrieben. Der UPF gibt an, welcher Anteil der biologisch wirksamen UV-Strahlung ein textiles Material durchdringt und wie sich die UV-Exposition mit textiler Barriere im Vergleich zur Exposition ohne textile Barriere verhält. In seiner Grundfunktion ist der UPF mit dem Sun Protection Factor (SPF) von Sonnenschutzmitteln vergleichbar, wobei sich dieser auf aufgetragene Hautschutzpräparate bezieht.[38] Das heißt, dass der UPF-Wert auch als Multiplikator der natürlichen Eigenschutzzeit verstanden werden kann. Er gibt an, um wie viel länger man sich, geschützt, mit einem Textil in der Sonne aufhalten kann, ohne dass es zu schädigenden Auswirkungen auf die Haut kommt.[39]

Ein Textil mit einem UPF von 50 lässt beispielsweise nur 1/50 der einfallenden UV-Strahlung durch das textile Material bis zur Haut gelangen. Das entspricht etwa 2 % der Strahlung, während rund 98 % blockiert werden.[40] Zugleich gibt der UPF von 50 an, dass die Trägerperson mit dem Kleidungsstück 50-mal länger der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sein kann, bis es zu einem sonnenbedingten Erythem kommt als ohne die schützende Textilschicht.[41] Der UPF-Wert dient

[37] Narayanan et al. (2010); Saha et al. (2024)
[38] Saha et al. (2024)
[39] Hohenstein Institut (2021)
[40] Boothby-Shoemaker et al. (2022)
[41] Loy (2006), S. 80 f.

damit als zentrale Bewertungsgröße, um die UV-Schutzwirkung von Textilien einzuordnen.

2.2.2 Prüfprinzip der UPF-Bestimmung

Die Bestimmung des UPF-Wertes von Textilien erfolgt grundsätzlich nach zwei methodischen Ansätzen, der in-vivo- und der in-vitro-Methode. Für Textilien wird der UPF in der Regel in-vitro gemessen, da dieses Verfahren kostengünstiger, zeitsparender und praktikabler ist.[42]

Bei der in-vivo-Methode wird der UPF durch einen Hauttest am Menschen ermittelt. Dabei wird die minimale Erythemdosis (MED) der ungeschützten Haut ins Verhältnis zur MED der durch das Textil geschützten Haut gesetzt. Zum Einsatz kommen in der Regel Xenon-Lichtquellen, die das Sonnenspektrum simulieren. Die Haut wird im UVA- und UVB-Bereich (280-400 nm) bestrahlt und nach etwa 24 h wird das entstandene Erythem beurteilt. Das in-vivo-Verfahren wird jedoch seltener angewendet, da es aufwendiger, teurer und zeitintensiver ist. Es dient hauptsächlich der Bestätigung der in-vitro Messergebnisse.[43]

Das Kernprinzip der in-vitro-Methode ist die spektrophotometrische Messung der UV-Transmission durch das Textilgewebe. Die diffuse spektrale Transmission wird je nach zugrunde gelegter Norm im Wellenlängenbereich von 280-400 nm oder 290-400 nm erfasst.[44] Dazu wird die Stoffprobe in ein Spektrophotometer eingelegt und die durch das Gewebe hindurchtretende Strahlung gemessen.[45] Die Bewertung der durchgelassenen UV-Strahlung erfolgt gewichtet mit dem erythemwirksamen Spektrum, da UVB-Strahlung eine etwa 1000-fach höhere Erythemwirkung hat als die UVA-Strahlung.

Der UPF-Wert wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$UPF = \frac{\sum_{\lambda=400}^{\lambda=280} \mathrm{E}_\lambda \cdot S_\lambda \cdot \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=400}^{\lambda=280} \mathrm{E}_\lambda \cdot S_\lambda \cdot \mathrm{T}_\lambda \cdot \Delta\lambda}$$

[42] Saha et al. (2024)
[43] Boothby-Shoemaker et al. (2022)
[44] Berry et al. (2022); Gambichler et al. (2006)
[45] Berry et al. (2022)

Dabei steht E_λ für die relative erythematische Wirksamkeit bei der Wellenlänge λ, S_λ für die solare Spektralbestrahlungsstärke, T_λ für die gemessene spektrale Transmission der Stoffprobe und $\Delta\lambda$ für das Wellenlängenintervall.[46] Der Quotient beschreibt das Verhältnis der effektiven UV-Bestrahlungsstärke ohne Textil zu jener mit Textil. Je geringer die Transmission, desto höher der resultierende UPF-Wert und desto mehr Schutz wird gewährleistet.[47]

In der Praxis werden mehrere Messungen an verschiedenen Stellen und Orientierungen der Stoffprobe durchgeführt, um eine repräsentative Aussage zu erhalten. Beispielsweise können fünf Einzelmessungen bei unterschiedlichen Probenausrichtungen, gedreht um jeweils 45 Grad, durchgeführt werden.[48] Der gemittelte UPF-Wert wird anschließend einer Schutzklasse zugeordnet.

Die in-vitro Methode wird als valide und praktikabel angesehen. Allerdings ist zu beachten, dass das Prüfverfahren je nach Norm, die im folgenden Kapitel 2.2.3 erläutert werden, hinsichtlich Wellenlängenbereich, Probenvorbereitung und Bewertungskriterien variiert. Insbesondere unterscheiden sich die Standards darin, ob und in welchem Umfang Gebrauchsbedingungen wie Dehnung, Feuchtigkeitsgrad oder Alterung der Textilien berücksichtigt werden.[49]

2.2.3 Normen und Standards zur Bewertung von UV-Schutztextilien

International haben sich verschiedene Prüfverfahren und Normen zur Bewertung von UV-Schutztextilien etabliert. Im Folgenden werden der australisch-neuseeländische Standard, die europäische Norm, der amerikanische Standard sowie der UV-Standard 801 des Hohenstein Instituts vorgestellt.

2.2.3.1 Australisch-neuseeländischer Standard AS/NZS 4399

Der australisch-neuseeländische Standard wurde 1996 als weltweit erster Standard für UV-Schutzkleidung veröffentlicht und diente als Orientierung für zahlreiche nachfolgende Standards.[50] Der AS/NZS 4399 unterteilt den UPF in drei Kategorien: guter Schutz bei UPF 15-24 *(UPF 15 und 20)*, sehr guter Schutz bei

[46] Boothby-Shoemaker et al. (2022)
[47] Saravanan (2007)
[48] Berry et al. (2022)
[49] Ebd.
[50] Gambichler et al. (2006)

UPF 25-39 *(UPF 25, 30 und 35)* und exzellenter Schutz ab UPF 40 *(UPF 40, 45, 50 und 50+).* Dabei erhalten Materialien mit einem UPF unter 15 keine Kennzeichnung.[51] Die Prüfung erfolgt ebenfalls mithilfe einer spektralphotometrischen Messung. Zusätzliche Einflussfaktoren wie Dehnung, Nässe oder Abnutzung werden dabei nicht berücksichtigt. Als Grundlage dient dabei das Sonnenspektrum, das am 1. Januar in Melbourne in Australien ermittelt wurde sowie der empfindlichste Hauttyp des Trägers.[52]

2.2.3.2 Europäische Norm DIN EN 13758-1/2

Die europäische Norm wurde vom CEN/TC 248 WG14 mit einem Konsortium aus 30 Experten aus elf europäischen Ländern entwickelt. Teil 1 beschreibt das spektralphotometrische Prüfverfahren, Teil 2 die Klassifizierung und Kennzeichnung.[53] Die Messung erfolgt an neuen Materialien im trockenen und ungedehnten Zustand auf der Basis eines Sonnenspektrums, das sich an Albuquerque in New Mexico orientiert und der Sonneneinstrahlung in Südeuropa nahekommt.[54] Dabei handelt es sich um einen konservativen Prüfansatz, der vom ungünstigsten Fall ausgeht und eine besonders hohe UV-Belastung zugrunde legt. Die daraus ermittelten UPF-Werte fallen daher tendenziell niedriger aus und ermöglichen eine eher strenge Bewertung der Schutzwirkung des Textils. Als einheitlicher Grenzwert gilt UPF 40+ bei einer maximalen Transmission der UV-A Strahlung von 5%.[55]

2.2.3.3 Amerikanischer Standard AATCC TM 183

Die AATCC TM 183 ist die zentrale Prüfmethode des amerikanischen Regelwerks für UV-Schutztextilien, welches auf drei aufeinander abgestimmten Dokumenten basiert: Der Norm ASTM D 6544 zur Vorbereitung der Textilien vor der UV-Messung, der AATCC TM 183 zur Bestimmung der Transmission und Blockierung erythemgewichteter UV-Strahlung durch Textilien sowie dem Kennzeichnungsleitfaden ASTM D 6603 für UV-schützende Textilien.[56] Geprüft werden dabei

[51] Gies et al. (1998); Saravanan (2007)
[52] Hohenstein Institut (o. J. -b)
[53] Gambichler et al. (2006)
[54] Hohenstein Institut (o. J. -c)
[55] Boothby-Shoemaker et al. (2022); Gambichler et al. (2006)
[56] Hatch (2002), S. 42

neue, ungedehnte und trockene Materialien. Als Referenz dient, wie auch beim europäischen Standard, das Sonnenspektrum, das sich an Albuquerque in New Mexiko orientiert. Die Bewertung erfolgt in UPF-Stufen von 15, 30, 50 und 50+, wobei aus Gründen der kritischen Bewertung nach AS/NZS 4399 klassifiziert wird.[57]

2.2.3.4 UV-Standard 801

Der UV-Standard 801 ist ein praxisnahes Prüfverfahren des Hohenstein Instituts und basiert auf dem Sonnenspektrum des australisch-neuseeländischen Standards. Im Unterschied zu den zuvor genannten Normen und Standards beschränkt sich die Prüfung nicht ausschließlich auf neue, trockene und ungedehnte Materialien, sondern berücksichtigt zusätzlich simulierte reale Gebrauchsbedingungen wie Dehnen, Befeuchten, Scheuern und Waschen. Das ist das zentrale Merkmal dieser Prüfung. Der ermittelte UPF wird als ganzzahliger Schutzfaktor angegeben, beispielsweise UPF 10, 15, 20, 30, 40, 60 oder 80. Damit geht der UV-Standard 801 weit über die reine Materialprüfung im Neuzustand hinaus und bildet die tatsächliche Schutzwirkung unter alltagsnäheren Bedingungen ab, was ihn besonders für Bade- und Sporttextilien sowie Arbeitskleidung mit UV-Exposition relevant macht.[58]

2.3 UV-Schutz durch Textilien

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Bewertung des UV-Schutzes von Textilien anhand des UPF-Wertes erläutert wurde, widmet sich dieses Kapitel der grundsätzlichen Bedeutung von Kleidung als UV-Schutzmaßnahme (Kapitel 2.3.1), den damit verbundenen Vor- und Nachteilen (Kapitel 2.3.2) sowie aktuellen Ansätzen zur gezielten Verbesserung des textilen UV-Schutzes (Kapitel 2.3.3).

2.3.1 Die Bedeutung von Kleidung beim UV-Schutz

Kleidung stellt eine der einfachsten und wirksamsten Maßnahmen dar, um die Haut vor schädigender UV-Strahlung zu schützen. Führende

[57] Hohenstein Institut (o. J. -a)
[58] Hohenstein Institut (2021)

Gesundheitsorganisationen wie die Weltgesundheitsorganisation betrachten Textilien als eine primäre Schutzmethode gegen die schädlichen Wirkungen der Sonnenstrahlung.[59] Während Sonnenschutzmittel in ihrer Wirksamkeit durch Umwelteinflüsse wie Wind, Luftfeuchtigkeit und die aufgetragene Menge beeinflusst werden, bietet Kleidung eine physikalische Barriere, die kontinuierlich ohne Nachlassen wirkt.[60]

Die Funktionsweise textilen UV-Schutzes beruht auf drei grundlegenden Mechanismen: Absorption, Reflexion und Streuung der einfallenden Strahlung. Trifft UV-Strahlung auf die Oberfläche eines Textils, wird ein Teil der Strahlung reflektiert oder gestreut, ein weiterer Teil absorbiert und in eine andere Energieform umgewandelt. Der verbleibende Anteil kann das Textil durchdringen und die Haut erreichen.[61] Die Fähigkeit eines Textils, UV-Strahlung zu blockieren wird, wie in Kapitel 2.2.1 bereits beschrieben, durch den UPF quantifiziert.

Allerdings bietet nicht jedes Kleidungsstück automatisch einen ausreichenden Schutz. Wie in den vorangegangenen Kapiteln 2.1.4 und 2.1.5 dargelegt, hängt die Notwendigkeit des Schutzes zunächst vom individuellen Hauttyp und der aktuellen UV-Belastung, dem UV-Index, ab. Darüber hinaus wird die Schutzleistung eines Textils durch ein komplexes Zusammenspiel mehrerer Faktoren bestimmt. Dabei stellt die Flächenkonstruktion den wichtigsten Faktor dar, gefolgt von der Farbe des Textils, dem Flächengewicht, der Dehnung, Feuchtigkeit, dem Gebrauch und Waschverhalten des Gewebes sowie dem Einsatz UV-absorbierender Additive.[62]

Der UV-Schutz von Textilien wird zudem durch die Faserzusammensetzung und die chemische Beschaffenheit der Fasern beeinflusst und diese haben einen tiefgreifenden Einfluss auf den UPF-Wert.[63] Synthetische Fasern wie Polyester (PES) können UV-Strahlung aufgrund ihrer molekularen Struktur häufig effektiver absorbieren als Naturfasern wie Baumwolle (CO) oder Wolle. Bei Naturfasern kann zusätzlich der Verarbeitungszustand eine Rolle spielen, da ungebleichte Fasern durch natürliche Begleitstoffe wie Pektine oder Wachse teilweise höhere

[59] Boothby-Shoemaker et al. (2022)
[60] Saha et al. (2024)
[61] Ebd.
[62] Boothby-Shoemaker et al. (2022); Gies et al. (1998)
[63] Menter & Hatch (2003), S. 50 ff.

Schutzwerte aufweisen als gebleichte Materialien. Neben der Faserart beeinflusst auch, wie eingangs erwähnt, die Farbe die UV-Schutzwirkung, da dunkle und kräftige Farbtöne UV-Strahlung in der Regel stärker absorbieren als helle Nuancen und somit auch höhere UPF-Werte aufweisen.[64] Dieser Effekt ist jedoch nicht bei allen Materialien gleich ausgeprägt. Aguilera et al. (2022) konnten beispielsweise bei Sporttextilien aus 100% Polyester keinen nachweisbaren Einfluss der Stofffarbe auf den Schutzfaktor feststellen. Dies zeigt, dass die Bedeutung der Farbe immer im Zusammenhang mit der jeweiligen Faserart und Materialstruktur betrachtet werden muss, denn bei Naturfasern kann der Farbstoffgehalt eine deutlich wichtigere Rolle für die UV-Schutzwirkung einnehmen.[65] Trotzdem weisen zahlreiche Studien darauf hin, dass tiefere Farbnuancen, unabhängig vom Farbton, tendenziell einen höheren UV-Schutz bieten, da sie weniger UV-Strahlung transmittieren als helle Nuancen.[66]

Neben der Faser- und Farbstoffchemie beeinflussen weitere Faktoren den UV-Schutz eines Textils maßgeblich. Das Flächengewicht und die Porosität des Textils sind entscheidend. Ein dichteres textiles Material mit einem höheren Flächengewicht lässt in der Regel weniger UV-Strahlung passieren, während eine höhere Porosität den UPF reduzieren kann. Außerdem können Feuchtigkeit und Dehnung den Schutz erheblich vermindern, denn feuchte Textilien lassen mehr UV-Strahlung durch. Wobei auch dieser Effekt in seiner Intensität von der Faserart abhängig ist.[67] Hydrophile Fasern wie Baumwolle quellen zwar und reduzieren zunächst Zwischenräume, jedoch sinkt durch den angeglichenen Brechungsindex zwischen Wasser und Faser letztlich die Streuwirkung. Hydrophobe Fasern wie Polyester nehmen allgemein deutlich weniger Feuchtigkeit auf, weshalb ihre Schutzwirkung häufig etwas besser erhalten bleibt. Gedehnte Textilien weisen durch die Vergrößerung der Zwischenräume ebenfalls einen niedrigeren UPF auf.[68]

Des Weiteren kann sich der Gebrauch und die Pflege ambivalent auf die UV-Schutzwirkung auswirken. Während wiederholtes Waschen bei Baumwoll- und

[64] Boothby-Shoemaker et al. (2022); Saha et al. (2024)
[65] Aguilera et al. (2023)
[66] Saha et al. (2024)
[67] Gies et al. (1998)
[68] Saha et al. (2024)

Polyestermischgeweben durch das Einlaufen und Verdichten die Schutzleistung erhöhen kann, kann es bei mit optischen Aufhellern behandelten Textilien zu einem Rückgang des UPF-Werts führen. Optische Aufheller absorbieren UV-Strahlung, können jedoch durch Waschprozesse teilweise aus dem Material entfernt werden. Mit abnehmender Konzentration dieser UV-absorbierenden Substanzen verringert sich entsprechend auch ihr Beitrag zur Schutzwirkung.[69] Bei funktional ausgerüsteten Textilien ist zudem zu berücksichtigen, dass Waschbeanspruchung die Schutzwirkung verändern kann, da Beschichtungen, UV-Absorber oder weitere funktionelle Ausrüstungen durch mechanische und chemische Einwirkungen teilweise von der Faseroberfläche entfernt werden können. Die Waschbeständigkeit stellt daher einen wichtigen Aspekt für die langfristige Gebrauchstauglichkeit UV-schützender Textilien dar.[70]

Auch die Passform des Kleidungsstücks am Körper beeinflusst die UV-Schutzwirkung, da enganliegende Kleidung direkt auf der Haut aufliegt und durch den fehlenden Abstand zwischen Textil und Haut einen geringeren effektiven Schutz bieten kann.[71]

Die Relevanz von textilem UV-Schutz erstreckt sich über zahlreiche Anwendungsbereiche wie sommerliche Freizeitkleidung, Arbeitskleidung bei beruflicher UV-Exposition, Sportbekleidung für Outdoor-Aktivitäten sowie Kleidung für Babys und Kinder, deren Haut besonders empfindlich ist.[72] Damit wird deutlich, dass UV-schützende Textilien nicht nur im präventiven Gesundheitsschutz, sondern auch für die Entwicklung funktioneller Bekleidung eine hohe praktische Bedeutung besitzen.[73]

2.3.2 Vor- und Nachteile von Kleidung als UV-Schutz

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Kleidung als UV-Schutz sowohl bedeutende Vorteile als auch nicht zu vernachlässigende Einschränkungen aufweist.

[69] Gies et al. (1998); Saha et al. (2024)
[70] Mondal (2022); Saha et al. (2024)
[71] Boothby-Shoemaker et al. (2022)
[72] Hohenstein Institut (2021)
[73] Boothby-Shoemaker et al. (2022)

Ein wesentlicher Vorteil von Kleidung liegt in ihrer hohen, oft überlegenen Schutzwirkung. Es gibt Untersuchungen, die zeigen, dass moderne UV-Schutztextilien sowohl im UVB- als auch im UVA-Bereich eine deutlich bessere Schutzwirkung erzielten als handelsübliche Breitband-Sonnenschutzmittel mit SPF 30 und 50. Die geprüften Textilien blockierten über 99% der UVB und 96-98 % der UVA-Strahlung, während die Sonnenschutzmittel selbst bei der empfohlenen Auftragsmenge von 2 mg/cm^2 lediglich 76-94 % der UVB- und 54-82 % der UVA-Strahlung blockierten.[74] Darüber hinaus bietet geeignete Kleidung einen verlässlichen Breitbandschutz, also einen gleichzeitigen Schutz vor UVA- und UVB-Strahlung, als Dauerbarriere, da Kleidung, wie im vorherigen Kapitel bereits aufgezeigt, unabhängig von der Auftragsmenge oder dem Nachcremen einen konstanten Schutz gewährleistet.[75] Somit bleibt der Schutz durch Kleidung über die Tragedauer hinweg weitestgehend konstant, denn Studien zeigen, dass Verbraucher*innen Sonnencreme meist nur in etwa der Hälfte der laborgeprüften Schichtdicke auftragen, wodurch die Schutzwirkung geringer ist.[76]

Ein weiterer Vorteil ist die Vermeidung der systemischen Aufnahme von UV-Filtern und der damit verbundenen potenziellen Nebenwirkungen. Die langfristige, tägliche Absorption von Sonnenschutzmitteln durch die Haut, wird mit neurotoxischen, endokrinen und entwicklungsbiologischen Beeinträchtigungen in Verbindung gebracht.[77] Kleidung reduziert also die chemische Belastung der Haut durch Sonnenschutzmittel.[78] Hinzu kommt, dass handelsübliche Sonnenschutzmittel im langwelligen UVA-Bereich ab etwa 380 nm teilweise nur noch eine geringe Schutzwirkung aufweisen. Dicht konstruierte oder opake Textilien, die lichtundurchlässig sind, können hingegen auch diesen Spektralbereich wirksam abschirmen.[79]

Dem gegenüber steht, dass viele handelsübliche Sommertextilien keinen ausreichenden UV-Schutz bieten. Studien zeigen, dass etwa ein Drittel herkömmlicher „sommerlicher“ T-Shirts aus Baumwolle oder aus Baumwoll-Polyester-Mischungen einen geringeren Schutz aufweisen als ein Sonnenschutzmittel mit SPF 15+.

[74] Berry et al. (2022)
[75] Saha et al. (2024)
[76] Gies et al. (1998)
[77] Lu & Ilyas (2022); Sieniawska et al. (2024)
[78] Saha et al. (2024)
[79] Berry et al. (2022)

Teilweise lagen die ermittelten Schutzfaktoren lediglich im Bereich von 5 bis 10.[80] Auch bei Sommer- und Sportbekleidung wurden in Untersuchungen häufig UPF-Werte unter 15 festgestellt.[81]

Wie in Kapitel 2.3.1 ausführlich erläutert, besteht eine weitere Einschränkung darin, dass Kleidung keinen absolut vollständigen Schutz bietet. Aufgrund der textilen Struktur kann ein gewisser Anteil der UV-Strahlung durch Poren und Zwischenräume des Gewebes hindurchtreten. Zudem kann die Schutzwirkung unter realen Tragebedingungen, etwa durch Dehnung, Feuchtigkeit oder körpernahen Sitz, reduziert werden.

Darüber hinaus spielen Verfügbarkeit, Kosten und Akzeptanz eine Rolle. Spezielle UV-Schutzkleidung kann teurer in der Herstellung sein, was die Zugänglichkeit für jeden Einzelnen im Vergleich zu konventioneller Kleidung einschränkt.[82] Als Verbraucher*in ist man weiterhin auf Spezialmarken angewiesen, um zuverlässigen UV-Schutz zu erhalten.[83]

Schließlich stellt aber auch der Komfort und die Praktikabilität eine Herausforderung dar, denn dichte und schwere Gewebe bieten zwar besseren Schutz, sind aber weniger atmungsaktiv, steifer und bei warmen Witterungsbedingungen unbequemer.[84] Das kann eine Folge dafür sein, dass Verbraucher*innen trotz des bekannten Risikos auf leichtere, aber weniger schützende Kleidung zurückgreifen.

Insgesamt überzeugt Bekleidung somit definitiv durch die einfache Anwendung, den großflächigen Schutz und den Wegfall der wiederholten Applikation. Allerdings sollten Sonnenschutzmittel und Kleidung möglichst in Kombination zum Schutz vor der UV-Strahlung verwendet werden.[85] Zu empfehlen ist also, Kleidung als Grundpfeiler des UV-Schutzes zu betrachten und Sonnenschutzmittel gezielt für nicht bedeckte Körperpartien wie z. B. Gesicht und Hände einzusetzen.[86]

[80] Gies et al. (1998)
[81] Aguilera et al. (2023)
[82] Saha et al. (2024)
[83] Cole et al. (2023)
[84] Saha et al. (2024)
[85] Gies et al. (1998)
[86] Berry et al. (2022)

2.3.3 Aktuelle Ansätze zur Gewährleistung von UV-Schutz bei Textilien

Aufbauend auf den in Kapitel 2.3.1 dargestellten Einflussfaktoren lässt sich der UV-Schutz von Textilien grundsätzlich über zwei Wege gezielt verbessern. Zum einen kann die Schutzwirkung bereits durch die Auswahl geeigneter Fasern sowie durch eine angepasste Gewebekonstruktion, wie z. B. eine höhere Gewebedichte oder ein größeres Flächengewicht, beeinflusst werden. Zum anderen können funktionelle Ausrüstungen wie Beschichtungen, Finishes oder UV-absorbierende Additive eingesetzt werden, um die UV-Transmission des Textils weiter zu reduzieren. Ziel ist es, stets einen hohen UPF-Wert bei gleichzeitig gutem Tragekomfort zu bewahren.[87]

Während konstruktive Maßnahmen wie Faserwahl, Gewebedichte und Flächengewicht die UV-Schutzwirkung vor allem durch die physische Struktur des Textils beeinflussen, setzen funktionelle Ausrüstungen direkt an der Faser- oder Textiloberfläche an. Hierzu zählen insbesondere UV-absorbierende oder UV-blockierende Substanzen, die die Transmission der Strahlung zusätzlich reduzieren und somit zur Erhöhung des UPF-Wertes beitragen können. Organische UV-Absorber sind meist aromatische Moleküle mit konjugierten Doppelbindungen, die UV-Strahlung absorbieren und in Wärme umwandeln.[88] Die wichtigsten synthetischen Vertreter sind Derivate von Hydroxyphenylbenzotriazolen, Hydroxyphenylbenzophenonen und Hydroxyphenyltriazinen. Überwiegend werden diese als Ausrüstungsmittel eingesetzt. Bei synthetischen Fasern können organische UV-Absorber jedoch bereits während des Spinnprozesses als Additive eingebracht werden.[89] Allgemein können UV-absorbierende Wirkstoffe über das Pad-Dry-Cure-Verfahren oder Tauchprozesse auf das Gewebe aufgebracht werden. Parallel zu synthetischen UV-Absorbern werden zunehmend auch biobasierte Substanzen wie Flavonoide, Tannine, Aminosäuren oder pflanzliche Polyphenole untersucht, da sie ebenfalls UV-Strahlung absorbieren können und damit einen nachhaltigeren Ansatz für funktionelle UV-Schutzausrüstungen darstellen.[90] Beispiele hierfür sind Extrakte aus Meeresalgen, Ringelblumen, Aloe Vera oder

[87] Saha et al. (2024)
[88] Ebd.
[89] Mavrić et al. (2018)
[90] Saha et al. (2024)

Baikal-Helmkraut, die als natürliche UV-Absorber auf Textilfasern appliziert werden können. Neben der UV-absorbierenden Wirkung weisen viele dieser bioaktiven Substanzen zusätzliche Eigenschaften wie antioxidative, antimikrobielle und entzündungshemmende Wirkungen auf, wodurch sie u. a. für die Entwicklung medizinischer und hygienischer Textilien von besonderem Interesse sind.[91]

Eine weitere Möglichkeit stellen Waschadditive dar, die UV-Absorber enthalten und während des Waschvorgangs in das Gewebe eingelagert werden können. Dadurch lässt sich der UPF von Alltagskleidung temporär erhöhen. Die Beständigkeit solcher Behandlungen ist jedoch begrenzt.[92]

Anorganische UV-Blocker, insbesondere Nanopartikel aus Titandioxid (TiO_2) und Zinkoxid (ZnO), können den UV-Schutz deutlich verbessern, indem sie die UV-Strahlung absorbieren, streuen und teilweise reflektieren. TiO_2 wird dabei häufig als besonders wirksamer Breitband-UV-Blocker beschrieben, während ZnO ebenfalls eine hohe UV-blockierende Wirkung aufweist. Studien zeigen, dass entsprechend beschichtete Baumwollgewebe UPF-Werte von über 100 erreichen können, während unbehandelte Baumwollgewebe häufig nur einen geringen UV-Schutz mit UPF-Werten von unter 10 aufweisen. Zusätzlich können ZnO- und TiO_2-basierte Ausrüstungen weitere funktionelle Eigenschaften wie antibakterielle Wirkung, Selbstreinigung oder Hydrophilie verleihen, wodurch multifunktionale Textilien entstehen können.[93] Die Applikation solcher Partikel kann je nach System z. B. durch Beschichtungsverfahren, Sol-Gel- oder Dip-Pad-Dry-Cure-Prozesse, Binderfixierung, Plasmabehandlung oder durch das direkte Wachstum nanoskaliger Strukturen auf der Faseroberfläche erfolgen.[94]

Darüber hinaus werden auch landwirtschaftliche und biogene Nebenprodukte wie Reishülsen, Molokhia-Stängel oder Krabbenschalen als Rohstoffbasis für nachhaltige nano- und biobasierte Beschichtungssysteme untersucht. Dadurch wird textiler UV-Schutz zunehmend mit Ansätzen der Ressourcenschonung und der Entwicklung umweltfreundlicher Funktionstextilien verbunden.[95]

[91] Mavrić et al. 2018
[92] Lu & Ilyas (2022)
[93] Mondal (2022); Saha et al. (2024)
[94] Saha et al. (2024)
[95] Attia et al. (2022); Emam et al. (2024)

Eine weitere moderne Beschichtungsstrategie sind kohlenstoffbasierte Nanomaterialien, darunter graphenbasierte Beschichtungen und Carbon Nanotubes (CNTs). Graphen ist ein zweidimensionales Nanomaterial, das aufgrund seiner besonderen Materialeigenschaften zur UV-Blockierung auf Textilien eingesetzt werden kann. CNTs, also Kohlenstoffnanoröhren, werden als UV-schützende Beschichtungskomponenten untersucht. Auf der Textiloberfläche können sie netzartige Strukturen ausbilden, wodurch die UV-Transmission reduziert und die UV-Schutzwirkung verbessert werden kann. Da kohlenstoffbasierte Materialien teilweise aus erneuerbaren Rohstoffen gewonnen werden können, gelten sie als potenziell nachhaltigere Alternative für funktionelle UV-Schutzbeschichtungen.[96]

Der Fokus liegt weiterhin auf der Kombination aus einem hohen UPF, Atmungsaktivität und Tragekomfort. Gleichzeitig rücken jedoch Umwelt- und Gesundheitsaspekte in den Fokus. Die ökologischen Auswirkungen von Nanomaterialien und deren potenzieller Toxizität müssen weiter erforscht werden. Bei einigen synthetischen organischen UV-Absorbern werden zudem Umweltaspekte wie Persistenz oder mögliche Bioakkumulation diskutiert, weshalb eine sorgfältige Auswahl und Anwendung erforderlich ist. Darüber hinaus stellt die begrenzte Waschbeständigkeit von UV-Absorbern einen wesentlichen Nachteil dar.[97]

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Entwicklung ökologisch unbedenklicher, langlebiger und komfortabler UV-Schutztextilien stetig voranschreitet. Vor allem natürliche und bioinspirierte Beschichtungen, wie sie auch im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden, bieten dabei ein vielversprechendes Potenzial für zukünftige textile Ausrüstungen.

2.4 Polyphenolische Beschichtungen für UV-Schutztextilien

Im Rahmen dieser Arbeit wird Tanninsäure als polyphenolische, biobasierte Beschichtung für UV-Schutztextilien untersucht. Zunächst werden die grundlegenden Eigenschaften vorgestellt (Kapitel 2.4.1), anschließend wird auf die Tanninsäure-Metall-Komplexe und deren funktionelle Eigenschaften sowie auf den

[96] Attia et al. (2022); Kibria et al. (2022)
[97] Kibria et al. (2022); Mavrić et al. (2018)

aktuellen Forschungsstand zu tanninsäurebasierten UV-Schutztextilien eingegangen (Kapitel 2.4.2 und 2.4.3).

2.4.1 Tanninsäure als biobasierte polyphenolische Beschichtung

Tanninsäure ist ein natürlich vorkommendes pflanzliches Polyphenol. Sie kommt vor allem in Pflanzenbestandteilen wie Rinde, Blättern, Früchten oder Gallen vor. Chemisch betrachtet besteht Tanninsäure aus einer zentralen Glucose-Einheit, an die mehrere Gallussäure-Einheiten gebunden sind. Dadurch besitzt das Molekül zahlreiche phenolische Hydroxylgruppen (OH-Gruppen) und aromatische Ringsysteme. Aufgrund dieser Struktur ist Tanninsäure so reaktionsfähig und eignet sich als Bestandteil funktioneller Beschichtungen.[98]

Die Eigenschaften von Tanninsäure basieren vor allem auf den vielen Hydroxylgruppen und den aromatischen Strukturen, da diese unterschiedliche Wechselwirkungen ermöglichen. Dazu zählen nicht-kovalente Wechselwirkungen wie Wasserstoffbrückenbindungen, $\pi - \pi$ – Wechselwirkungen und elektrostatische Anziehungen. Darüber hinaus kann Tanninsäure über ihre phenolischen Gruppen koordinative Wechselwirkungen mit Metallionen eingehen und dadurch Metall-Phenol-Komplexe bilden. Tanninsäure ist farblos bis blassgelb, sehr gut wasserlöslich, biologisch abbaubar und gilt als vergleichsweise biokompatibel sowie weniger bedenklich als viele synthetische Ausrüstungsmaterialien.[99]

Je nach pH-Wert kann Tanninsäure unterschiedlich reagieren, denn im sauren Milieu sind die phenolischen Gruppen überwiegend protoniert und können als Wasserstoffbrücken-Donatoren wirken, während sie unter basischeren Bedingungen deprotoniert werden und eher als Wasserstoffbrücken-Akzeptoren fungieren. Diese pH-Abhängigkeit bestimmt, wie Tanninsäure mit anderen Molekülen oder Oberflächen interagiert.[100]

Für Textilien ist Tanninsäure interessant, da sie sich als biobasierte funktionelle Beschichtung einsetzen lässt. Die Haftung auf Faseroberflächen kann dabei vor allem durch nicht-kovalente Wechselwirkungen erfolgen, die zusätzliche funktionelle Eigenschaften erzeugen können. Zu den nicht-kovalenten

[98] Chen et al. (2022); Oreja et al. (2025)
[99] Chen et al. (2022)
[100] Oreja et al. (2025)

Wechselwirkungen zählen insbesondere Wasserstoffbrückenbindungen, elektrostatische Wechselwirkungen und $\pi - \pi$ – Wechselwirkungen. Bei Baumwolle ist besonders relevant, dass die Cellulose zahlreiche Hydroxylgruppen besitzt. Dadurch können zwischen der Baumwollfaser und den polyphenolischen Hydroxylgruppen der Tanninsäure Wasserstoffbrückenbindungen entstehen.[101] Bei Polyester ist die Anbindung im Vergleich zu Naturfasern meist schwieriger, da Polyester weniger reaktive funktionelle Gruppen aufweist. Trotzdem kann Tanninsäure über nicht-kovalente Wechselwirkungen, insbesondere über $\pi - \pi$ – Wechselwirkungen mit den aromatischen Strukturen des Polyesters, auf der Oberfläche eingebunden werden.[102]

Auf Textilien kann Tanninsäure mehrere Funktionen erfüllen und beispielsweise antibakterielle, antioxidative, flammhemmende und UV-schützende Eigenschaften unterstützen.[103] Für den UV-Schutz ist Tanninsäure vor allem wegen ihrer aromatischen und polyphenolischen Struktur relevant, da aromatische Ringsysteme UV-Strahlung absorbieren können. Wird Tanninsäure auf ein Textil aufgebracht, kann sie daher dazu beitragen, dass weniger UV-Strahlung durch das Gewebe dringt.[104] Durch die Fähigkeit zur Komplexbildung mit Metallionen kann Tanninsäure außerdem als Grundlage für Metall-Phenol-Komplexe dienen, die im folgenden Abschnitt näher betrachtet werden.[105]

2.4.2 Tanninsäure-Metall-Komplexe und deren funktionelle Eigenschaften

Aufbauend auf der Komplexbildungsfähigkeit von Tanninsäure stellen Tanninsäure-Metall-Komplexe einen wichtigen Ansatz zur weiteren Funktionalisierung textiler Oberflächen dar. Dabei können Metallionen mit den phenolischen Gruppen der Tanninsäure koordinieren und dadurch sogenannte Metall-Phenol-Komplexe bilden. Je nach Faserart können zusätzlich Wechselwirkungen mit funktionellen Gruppen des Textils entstehen, beispielsweise mit Hydroxylgruppen bei Cellulosefasern oder mit weiteren polaren Gruppen auf der Faseroberfläche. Die Metallionen können somit zur Vernetzung der Beschichtung beitragen und die

[101] Liu et al. (2024)
[102] Ebd.
[103] Ebd.
[104] Sun et al. (2024)
[105] Liu et al. (2024)

Fixierung von Tanninsäure auf dem Textil verbessern.[106] Gleichzeitig kann Tanninsäure weiterhin über Wasserstoffbrückenbindungen und andere nicht-kovalente Wechselwirkungen an der Faseroberfläche haften.

Durch diese zusätzliche Koordination kann im Vergleich zu einer reinen Tanninsäure-Beschichtung eine stabilere und funktionell wirksamere Ausrüstung entstehen. Neben der verbesserten Haftung beeinflussen Metallionen häufig auch die optischen Eigenschaften der behandelten Textilien. Besonders Eisenionen können mit Tanninsäure dunkle Komplexe bilden, wodurch die Oberfläche stärker gefärbt erscheint. Mit Fe^{3+} können tiefblau-violette Farbtöne entstehen. Diese Farbvertiefung ist für den UV-Schutz relevant, da dunklere und damit stärker absorbierende Oberflächen die Transmission von UV-Strahlung durch das Gewebe zusätzlich verringern können.

Sun et al. (2024) zeigten diesen Effekt am Beispiel von Seidengewebe. Während eine Beschichtung mit reiner Tanninsäure den UPF-Wert auf über 31 erhöhte, führte die Kombination aus Tanninsäure und Fe^{3+} zu einem UPF-Wert von über 82. Bei der Kombination mit Cu^{2+} wurde ein UPF-Wert von ungefähr 73 erreicht. Die Ergebnisse zeigen, dass Metallionen die UV-Schutzwirkung tanninsäurebasierter Beschichtungen deutlich verstärken können. Gleichzeitig blieb die Schutzwirkung auch nach 30 Waschzyklen erhalten, was auf eine vergleichsweise stabile Fixierung der Beschichtung hinweist.[107]

Neben dem UV-Schutz können Tanninsäure-Metall-Komplexe auch weitere funktionelle Eigenschaften unterstützen. Für den Flammschutz ist relevant, dass bestimmte Metallsalze bei hohen Temperaturen Metalloxide bilden können. Diese können als Barriere wirken, indem sie den Kontakt der Faser mit Sauerstoff reduzieren und die Wärmeübertragung abschwächen. Dadurch kann die thermische Stabilität des Textils verbessert werden. Insgesamt zeigen Tanninsäure-Metall-Komplexe daher ein hohes Potenzial für multifunktionelle Textilausrüstungen, da sie UV-Schutz, Waschbeständigkeit, Farbveränderung und Flammschutz miteinander verbinden können.[108]

[106] Liu et al. (2024)
[107] Sun et al. (2024)
[108] Sun et al. (2024)

2.4.3 Forschungsstand zu tanninsäurebasierten UV-Schutztextilien

Der Forschungsstand zeigt, dass Tanninsäure bereits in verschiedenen Ansätzen zur funktionellen Ausrüstung von Textilien eingesetzt wurde. Häufig steht dabei nicht ausschließlich der UV-Schutz im Vordergrund, sondern vielmehr die Entwicklung multifunktioneller Textilien, die neben einer verbesserten UV-Barriere auch Flammschutz, antibakterielle Wirkung oder verbesserte Oberflächeneigenschaften aufweisen.

Zhou et al. (2021) behandelten Baumwollgewebe mit Diethylentriamin, Tanninsäure sowie Phytinsäure und erreichten damit eine deutliche Verbesserung des UV-Schutzes. Während unbehandelte Baumwolle lediglich einen UPF-Wert von etwa 11 aufwies, erreichte die mit Diethylentriamin und Tanninsäure behandelte Probe einen UPF-Wert von etwa 99. Durch die zusätzliche Behandlung mit Phytinsäure stieg der UPF-Wert auf über 131.[109]

Ein weiterer Ansatz ist die Kombination von Tanninsäure mit Metallionen. Yin et al. (2022) untersuchten Baumwollgewebe, das mit Tanninsäure und Kupferionen behandelt wurde, um den UV-Schutz der Baumwolle zu erhöhen. In dieser Studie wurde die zuvor beschriebene Komplexbildungsfähigkeit gezielt genutzt, um die UV-schützende Wirkung der Beschichtung zu verstärken.[110] Auch Sun et al. (2024) kombinierten Tanninsäure mit Sophora-Blütenextrakt und Metallsalzen auf Seidengewebe, um gleichzeitig Flammschutz und UV-Beständigkeit zu verbessern.[111]

Insgesamt verdeutlichen diese Arbeiten, dass Tanninsäure vor allem als biobasierter Bestandteil multifunktioneller Beschichtungssysteme erforscht wird. Viele Studien kombinieren Tanninsäure mit weiteren Komponenten wie Phytinsäure, Metallionen oder pflanzlichen Extrakten, wodurch neben dem UV-Schutz zusätzliche textile Funktionen erzielt werden können. Für bekleidungstechnische Anwendungen bleibt jedoch relevant, inwiefern einfache tanninsäurebasierte Beschichtungen auf praxisnahe Baumwoll- und Polyestergewebe übertragbar sind und wie beständig der erzielte UV-Schutz nach Waschbeanspruchung bleibt.

[109] Zhou et al. (2021)
[110] Yin et al. (2022)
[111] Sun et al. (2024)

2.5 Polydopamin als bioinspirierte Beschichtung

Neben Tanninsäure wird im Rahmen dieser Arbeit auch Polydopamin als Beschichtung für den UV-Schutz von Textilien untersucht. Es werden zunächst die Grundlagen und die Relevanz von Polydopamin als materialunabhängige Beschichtung erläutert (Kapitel 2.5.1) und nachfolgend der aktuelle Forschungsstand zu Polydopamin-beschichteten Textilien dargestellt (Kapitel 2.5.2).

2.5.1 Grundlagen und Relevanz von Polydopamin

Polydopamin (PDA) ist ein bioinspiriertes Polymer, das aus dem Monomer Dopamin entsteht. Die Entwicklung und Verwendung von Polydopamin-Beschichtungen ist an die Haftmechanismen von Miesmuscheln angelehnt. Diese können sich auch unter feuchten Bedingungen sehr fest an unterschiedliche Oberflächen anlagern, da sie Kleberproteine absondern, die reich an Catechol- (DOPA) und Aminogruppen (Lysin) sind. Genau diese funktionellen Gruppen besitzt auch Dopamin, wodurch es sich als Ausgangsstoff für universell haftende Beschichtungen eignet.[112]

Die Bildung von Polydopamin erfolgt meist durch die oxidative Selbstpolymerisation von Dopamin in einer leicht alkalischen wässrigen Lösung. Häufig wird dafür eine Dopaminlösung in Tris-Puffer (Tris(hydroxymethyl)aminomethan-Puffer), also einer Pufferlösung auf Basis von Tris(hydroxymethyl)aminomethan, bei einem pH-Wert von etwa 8,5 verwendet. Nach gängigen Strukturmodellen oxidiert Dopamin während der Polymerisation im alkalischen Milieu zunächst zu Dopaminchinon. Dieses kann anschließend zu Dopaminchrom cyclisieren, sich über weitere Zwischenstufen zu Oligomeren verbinden und schließlich zur Bildung von Polydopamin beitragen.[113] Da die Reaktionswege Ähnlichkeiten zur natürlichen Melaninbildung aufweisen, wird Polydopamin häufig auch als melaninähnliches Polymer beschrieben.[114]

Wie bereits eingangs angedeutet ist die Schlüsseleigenschaft von Polydopamin, dass es auf einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien, wie Metallen, Oxiden,

[112] H. Lee et al. (2007); You et al. (2017)
[113] Hemmatpour et al. (2023); You et al. (2017)
[114] H. Lee et al. (2007)

Keramik oder Polymeren haften kann. Dieser Prozess erfolgt bereits durch einfaches Eintauchen in eine alkalische Dopaminlösung.[115] Die Schichtdicke liegt typischerweise zwischen 1 und 100 nm.[116]

Dadurch ist dieser einfache Prozess besonders relevant für textile Anwendungen, da keine aufwendigen Apparaturen notwendig sind und die Ausrüstung grundsätzlich über ein Tauchverfahren erfolgen kann. Auf Textilfasern bildet Polydopamin eine dünne, bräunliche bis dunkelbraune, melaninähnliche Schicht, die als charakteristisches Merkmal der Polydopaminbildung gilt.[117] Diese Eigenfärbung kann einerseits als optischer Effekt genutzt werden, muss andererseits jedoch bei der Farbgestaltung berücksichtigt werden, da sie die gestalterische Flexibilität des Textils einschränken kann. Die Farbintensität und Schichtausprägung können unter anderem durch die Polymerisationsdauer, die Dopaminkonzentration und die Prozessbedingungen beeinflusst werden.[118]

Die Haftung von Polydopamin auf Textilfasern beruht auf verschiedenen Wechselwirkungen. Dazu zählen unter anderem Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den phenolischen OH-Gruppen des Polydopamins und den hydrophilen Gruppen einer Faser. Bei Proteinfasern wie Wolle oder Seide können zusätzlich kovalente Reaktionen wie Michael-Additionen oder Schiff-Base-Reaktionen auftreten. Bei Fasern mit aromatischen Strukturen, wie Polyester, sind außerdem $\pi - \pi -$ Wechselwirkungen möglich.[119] Durch diese verschiedenen Haftmechanismen kann Polydopamin als vielseitige Zwischenschicht dienen, um Textiloberflächen funktionell zu verändern.[120]

Im Hinblick auf UV-Schutztextilien kann Polydopamin zur Erhöhung der UV-Absorption beitragen. Verantwortlich dafür sind insbesondere die aromatischen Strukturen und phenolischen Gruppen innerhalb der Polydopamin-Schicht, die UV-Strahlung absorbieren und mit reaktiven Spezies wechselwirken können.[121] Die funktionelle Wirkung kann auch bei Polydopamin durch die Kombination mit Metallionen zusätzlich erweitert oder verstärkt werden. Polydopamin kann als

[115] Ebd.
[116] Hemmatpour et al. (2023)
[117] You et al. (2017)
[118] Liu et al. (2024)
[119] Liu et al. (2024)
[120] H. A. Lee et al. (2020)
[121] Jia et al. (2024); Liu et al. (2024)

Haftvermittler dienen, um weitere funktionelle Substanzen besser an die Textiloberfläche anzubinden. Jia et al. (2024) zeigten am Beispiel von Baumwollgeweben, dass Polydopamin in Verbindung mit verschiedenen Metallionen zur Herstellung multifunktionaler Textilien mit antibakteriellen und UV-schützenden Eigenschaften eingesetzt werden kann.[122]

Im folgenden Abschnitt werden daher ausgewählte Studien betrachtet, die Polydopamin als funktionelle Beschichtung auf unterschiedlichen textilen Substraten einsetzen.

2.5.2 Forschungsstand zu Polydopamin-beschichteten Textilien

Auch für Polydopamin zeigt der Forschungsstand, dass es nicht ausschließlich im Zusammenhang mit UV-Schutz untersucht wird. Aufgrund seiner guten Haftfähigkeit auf unterschiedlichen Oberflächen dient Polydopamin häufig als Grundlage für weitere Funktionalisierungen. Im Vordergrund steht daher meist die Entwicklung multifunktioneller Textilien, bei denen verbesserte Oberflächeneigenschaften, antibakterielle Wirkung, Eigenfärbung oder UV-Schutz miteinander kombiniert werden.

Die Grundlage für diese Arbeiten legten Lee et al. (2007), die die oxidative Selbstpolymerisation von Dopamin im alkalischen Milieu als materialunabhängiges Beschichtungsprinzip beschrieben. Sie zeigten, dass Polydopamin auf zahlreichen Materialoberflächen einen dünnen, festhaftenden Film bildet und anschließend als Plattform für weitere Funktionalisierungen dienen kann, z. B. zur Metallisierung oder zur Anbindung zusätzlicher funktioneller Moleküle.[123]

Für Polyestergewebe untersuchten Rastegar et al. (2017) die Behandlung mit Dopaminhydrochlorid in alkalischer Lösung bei pH 8,5 und Raumtemperatur. Die Proben wurden über 24 h mit verschiedenen Dopaminkonzentrationen behandelt. Dabei zeigte sich, dass die Polydopaminbildung zu einer bräunlichen Eigenfärbung des Polyestergewebes führte, deren Intensität mit steigender Dopaminkonzentration zunahm. Gleichzeitig verbesserten sich weitere funktionelle

[122] Jia u. a. 2024; H. A. Lee u. a. 2019
[123] H. Lee et al. (2007)

Eigenschaften wie Hydrophilie, antibakterielle Wirkung und Zugfestigkeit. Zudem wiesen die behandelten Proben gute Wasch-, Licht- und Reibechtheiten auf.[124]

Anknüpfend an das vorherige Kapitel 2.4.2 ist die Kombination von Polydopamin mit Metallionen ein weiterer relevanter Ansatz. Jia et al. (2024) untersuchten Baumwollgewebe, die mit PDA und verschiedenen Metallionen wie Fe^{3+}, Ca^{2+}, Zr^{4+}, Zn^{2+}, Co^{2+} und Ni^{2+} ausgerüstet wurden. Ziel war es, antibakterielle Eigenschaften und UV-Schutz in einer multifunktionellen Beschichtung zu verbinden. Besonders die mit Zinkionen komplexierte Polydopamin-Beschichtung zeigte eine deutliche Verbesserung des UPF-Wertes sowie eine sehr hohe antibakterielle Wirkung. Zudem blieb bei der zinkbasierten Beschichtung die antibakterielle Wirkung auch nach wiederholten Waschzyklen weitgehend erhalten, während die mechanischen Eigenschaften und die Luftdurchlässigkeit der Baumwolle nur begrenzt beeinträchtigt wurden.[125]

Zusammenfassend zeigen diese Arbeiten, dass Polydopamin vor allem als vielseitige Basisschicht für multifunktionale Textilausrüstungen erforscht wird. Neben der direkten Veränderung der Faseroberfläche ermöglicht PDA auch die Anbindung weiterer funktioneller Komponenten, etwa Metallionen. Für textile Anwendungen bleibt daher auch hier relevant, inwiefern sich solche Beschichtungen auf praxisnahe Gewebe aus Baumwolle und Polyester übertragen lassen und wie beständig der erzielte UV-Schutz nach Waschbeanspruchung ist.

2.6 Einordnung der Beschichtungsansätze und Gebrauchstauglichkeit

Die vorherigen Kapitel zeigen, dass Tanninsäure und Polydopamin unterschiedliche, aber für textile UV-Schutzanwendungen relevante Beschichtungsansätze darstellen. Tanninsäure ist insbesondere aufgrund ihrer polyphenolischen Struktur, ihrer Fähigkeit zur Metallkomplexbildung und ihrer möglichen UV-absorbierenden Wirkung interessant. Polydopamin bietet dagegen vor allem durch materialübergreifende Haftfähigkeit und die einfache Ausbildung dünner Beschichtungsschichten einen geeigneten Vergleichsansatz.

[124] Rastegar et al. (2017)
[125] Jia et al. (2024)

Für die Bewertung beider Systeme ist der Ausgangszustand des Gewebes von Bedeutung, da sich die Beschichtungen auf ungefärbten und gefärbten Proben unterschiedlich auf die UV-Schutzwirkung auswirken können. Ergänzend sind tanninsäurebasierte Beschichtungen mit Eisenverbindungen von Interesse, da die entstehenden Metall-Phenol-Komplexe sowohl die Farbwirkung als auch die UV-Schutzwirkung beeinflussen können.

Für eine mögliche Anwendung im Bekleidungsbereich ist zudem nicht allein der unmittelbar nach der Ausrüstung erzielte UPF-Wert entscheidend. Ebenso relevant ist, ob die Schutzwirkung nach Gebrauch und Pflegebeanspruchung erhalten bleibt, da Waschprozesse die UV-Schutzwirkung funktionalisierter Textilien verändern können und insbesondere bei oberflächenbasierten Modifikationen dazu führen, dass Beschichtungen verändert, teilweise abgelöst oder in ihrer Wirksamkeit reduziert werden. Die Waschbeständigkeit stellt daher ein wesentliches Kriterium zur Bewertung der praktischen Eignung funktionalisierter UV-Schutztextilien dar.[126]

2.7 Ableitung des experimentellen Untersuchungsansatzes

Aus den dargestellten theoretischen Grundlagen leitet sich die zentrale Fragestellung dieser Arbeit ab und es ergibt sich der experimentelle Untersuchungsansatz, inwiefern Beschichtungen auf Basis von Tanninsäure und Polydopamin den UPF-Wert von Baumwoll- und Polyestergeweben verbessern können. Um die jeweilige Wirkung der Behandlung nachvollziehbar zu bewerten, werden die entsprechenden Proben miteinander verglichen. Ausgewählte Proben werden darüber hinaus vor und nach der Waschbeanspruchung betrachtet, um erste Aussagen zur Beständigkeit der erzielten UV-Schutzwirkung treffen zu können.

Damit bildet der theoretische Teil die Grundlage für die anschließende experimentelle Untersuchung, in der die eingesetzten Materialien, die Probenvorbereitung, die Beschichtungsverfahren, die Waschtests sowie die UPF-Messungen beschrieben und ausgewertet werden.

[126] Fernau et al. (2023)

3 Experimenteller Teil – Methodik und Durchführung

Aufbauend auf den im Theorieteil abgeleiteten Beschichtungsansätzen werden diese im experimentellen Teil praktisch umgesetzt und hinsichtlich ihrer Wirkung auf den UV-Schutz textiler Gewebe untersucht. Analysiert wurden Baumwoll- und Polyestergewebe in unbehandeltem, gefärbtem und beschichtetem Zustand, wobei ausgewählte Proben zusätzlich einer Waschbeanspruchung unterzogen wurden. Da sich im Verlauf der Untersuchungen die tanninsäurebasierte Beschichtung von Baumwolle als besonders wirksam erwies, liegt der Schwerpunkt der Ergebnisdarstellung und Diskussion in Kapitel 4 auf diesem Versuchsansatz.

Im Folgenden werden zunächst die eingesetzten Materialien, Chemikalien und Prüfgeräte beschrieben (Kapitel 3.1). Anschließend werden Verfahren der UPF- und UV/Vis-Remissionsmessung erläutert (Kapitel 3.3 und 3.4). Darauf folgen die Versuchsübersicht mit den Referenzproben (Kapitel 3.5) sowie die Durchführung der Beschichtungen mit Tanninsäure, Tanninsäure-Eisen-Systemen und Polydopamin (Kapitel 3.6 bis 3.8). Anschließend wird die Durchführung der Waschversuche beschrieben (Kapitel 3.9). Die in diesem Kapitel dargestellten Verfahren bilden die Grundlage für die Auswertung und Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 4.

3.1 Materialien und Chemikalien

Die für die experimentellen Untersuchungen verwendeten Textilien, Chemikalien, Hilfsmittel und Prüfgeräte stammen aus dem Laborbestand der HAW Hamburg. Zunächst werden die textilen Ausgangsmaterialien beschrieben, anschließend die für die Färbe-, Beschichtungs- und Waschversuche eingesetzten Chemikalien, Hilfsmittel sowie Prüfgeräte.

3.1.1 Textile Ausgangsmaterialien

Als textile Ausgangsmaterialien wurden ein Baumwoll- und Polyestergewebe verwendet. Beide Materialien stammen aus dem Bestand der HAW Hamburg. Die Untersuchung beschränkt sich auf Gewebe, da diese im Vergleich zu Maschenwaren aufgrund der dichteren Fadenverkreuzung eine geschlossenere und damit besser vergleichbare Flächenstruktur aufweisen, während Maschenwaren

aufgrund ihrer offeneren und dehnbareren Struktur eine höhere Porosität zeigen. Da die Porosität und Strukturparameter die Licht- und UV-Transmission wesentlich beeinflussen und sich die UV-Schutzwirkung von Maschenwaren unter Dehnung deutlich verändern kann, wurden Maschenwaren zur Vermeidung eines zusätzlichen strukturellen Einflussfaktors nicht einbezogen.[127]

Die Auswahl von Baumwolle und Polyester erfolgte, da beide Faserarten im Bekleidungsbereich weit verbreitet sind, sich jedoch hinsichtlich ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften deutlich unterscheiden. Baumwolle als natürliche Cellulosefaser besitzt zahlreiche Hydroxylgruppen, wodurch Wechselwirkungen mit polyphenolischen Beschichtungen wie Tanninsäure begünstigt werden können. Polyester als synthetische Faser weist dagegen eine hydrophobere und weniger reaktive Faseroberfläche auf. Der Vergleich beider Materialien ermöglicht daher die Untersuchung, inwiefern die Wirkung der Beschichtungen vom jeweiligen Textil abhängt.

Bei dem Polyestergewebe handelt es sich um ein texturiertes Trevira-Polyester des ehemaligen Unternehmens Hoechst AG bzw. der Farbwerke Hoechst. Das Gewicht einer Probe mit den Maßen 10 x 20 cm beträgt etwa 1,4 g, das Flächengewicht der Polyesterprobe liegt bei 70 g/m^2. Das verwendete Baumwollgewebe lag in gebleichter Form vor. Eine Angabe zum Hersteller war nicht vorhanden, lediglich ein Etikett mit dem Flächengewicht, welches 160 g/m^2 beträgt. Das Gewicht einer Baumwollprobe mit den Maßen 10 x 20 cm liegt bei etwa 3,4 g. Beide Gewebe wurden als Prüfmaterialien für die weiteren Färbe-, Beschichtungs- und Waschversuche eingesetzt.

3.1.2 Verwendete Chemikalien und Hilfsmittel

Die im Rahmen der Vorbehandlung, Färbung, Beschichtung und Waschversuche eingesetzten Chemikalien und Hilfsmittel sind in Tabelle 3 aufgeführt und stammen wie zuvor erwähnt aus dem Laborbestand der HAW Hamburg. Die Übersicht dient der Darstellung der im experimentellen Teil verwendeten Stoffe sowie ihrer jeweiligen Funktion im Versuchsablauf. Die Angaben zu Konzentrationen und

[127] Imrith et al. (2016); Wong et al. (2016)

Verhältnissen wurden, soweit vorhanden, den Etiketten und verwendeten Versuchsvorschriften entnommen.

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Chemikalien und Hilfsmitteln

Verwendung	**Chemikalie / Hilfsmittel**	**Konzentration / Verhältnis**
Verdünnen und reinigen	entmineralisiertes Wasser	-
Vorbehandlung, Nachwaschen und Waschtests	Ecosurf SA-9 Carl Roth	1 g/L, 5 g/L
Färbung Baumwolle	Reaktivfarbstoff Remazol Brilliantrot BB	2 %, 1:1000
Färbung Baumwolle	Natriumcarbonat	50 g/L
Färbung Polyester	Dispersionsfarbstoff Terasilrot G	1:1000
Färbung Polyester	Ameisensäure-Lösung	85 %, 1:10
Färbung Polyester	Ammoniumsulfat-Lösung	1:10
Färbung Polyester	Irgasol-DAM-Lösung	1:100
Reduktive Nachreinigung PES	Natronlauge	3,3 %
Reduktive Nachreinigung PES	Natriumhydrosulfit	1:10
Reduktive Nachreinigung PES	Nekanil-Lösung	1 g/L
TA-Beschichtung	Tanninsäure ($C_{76}H_{52}O_{46}$) Alfa Aesar	0,3; 2; 10 Gew.-%
TA-Beschichtung	Natronlauge	5 %
TA-Beschichtung	Eisen(III)-chlorid ($FeCl_3$), 97 % Alfa Aesar	-
TA-Beschichtung	Eisen(II)-sulfat ($FeSO_4$), p.a. MERCK	-
PDA-Beschichtung	Dopamin Hydrochlorid (3-Hydroxytyramin-Hydrochlorid), 99% Thermoscientific	-
PDA-Beschichtung	Tris-(hydroxymethyl)-aminomethan für Tris-Puffer	pH ca. 8,5
PDA-Beschichtung	Salzsäure	0,5 %
Waschtest	ECE-Referenzwaschmittel, ohne optische Aufheller, James Heal	4 g/L

Ergänzend wurden, sofern verfügbar, Angaben zum Hersteller sowie zur Reinheit der verwendeten Chemikalien aufgenommen.

3.1.3 Geräte

Für die Durchführung der Versuche und Messungen wurden die nachfolgenden Geräte verwendet.

Färbeautomat

Für die Dispersionsfärbung der Polyesterproben wurde der Becherfärbeautomat *LABOMAT BFA 12* des Herstellers *Mathis* verwendet. Das Gerät kann mit bis zu zwölf Färbebechern bestückt werden und ist für Flottenverhältnisse von 1:6 bis 1:50 geeignet. Die Färbung erfolgt nach dem Ausziehverfahren in Färbebechern mit einem Volumen von 250 mL. Der *LABOMAT BFA 12* eignet sich für verschiedenen textile Materialien, darunter Web-, Maschen- und Strickwaren sowie Garne und Flocken. Während des Färbeprozesses beträgt die Drehzahl 40 U/min und die Umsteuerzeit liegt bei jeweils 60 s nach rechts und 60 s nach links. Dadurch wird eine regelmäßige Bewegung der Färbebecher und damit eine gleichmäßige Behandlung der Proben während des Färbevorgangs ermöglicht.



Abb. 1: Becherfärbeapparat LABOMAT BFA 12 des Herstellers Mathis.[128]

UPF-Messgerät

Für die Bestimmung der UPF-Werte wurde ein UV/VIS-Spektralphotometer vom Typ *UV-2600i* des Herstellers *Shimadzu* verwendet. Das Gerät eignet sich zur Messung im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich und deckt damit den

[128] Mathis AG - Weltweite Kompetenz im Färben und Beschichten (o. J.)

für die UPF-Bewertung relevanten Wellenlängenbereich von 280 bis 400 nm ab. Für die Untersuchung textiler Flächen wurde das Spektralphotometer mit dem Multi-Purpose Large Sample Compartment *MPC-2600A* eingesetzt, welches die Messung größerer Proben ermöglicht. Dadurch konnten die zugeschnittenen Textilproben hinsichtlich ihrer spektralen UV-Transmission untersucht werden. Die Auswertung der Messdaten erfolgte mithilfe der zugehörigen Software *Spectrum Analysis*.



Abb. 2: UV/VIS-Spektralphotometer Typ UV-2600i des Herstellers Shimadzu.[129]

Spektralphotometer

Für die Aufnahme der UV/Vis-Remissionsspektren wurde das Spektralphotometer *CM-36dG* des Herstellers *Konica Minolta* in Verbindung mit der Software *Qtex 2.9* verwendet. Das Gerät ermöglicht sowohl Remissions- bzw. Reflexionsmessungen an Festkörpern als auch Transmissionsmessungen an Flüssigkeiten oder transparenten Proben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde es zur Erfassung der spektralen Remission der textilen Proben genutzt, um farbliche Veränderungen infolge von Färbung und Beschichtung vergleichend darzustellen.



Abb. 3: Spektralphotometer CM-36dG des Herstellers Konica Minolta.[130]

[129] Shimadzu - Excellence in Science (o. J.)
[130] Konica Minolta (o. J.)

3.2 Probenvorbereitung

Für die weiteren Beschichtungsversuche mussten die Textilproben zunächst zugeschnitten und vorbehandelt sowie teilweise gefärbt werden. Diese Schritte werden in Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 im Detail beschrieben.

3.2.1 Zuschnitt und Vorbehandlung

Für die Versuchsdurchführung wurden die Baumwoll- und Polyestergewebe zunächst in Proben mit den Maßen 10 x 20 cm zugeschnitten und den jeweiligen Versuchsreihen zugeordnet. Vor den Färbe- und Beschichtungsversuchen wurden alle Proben vorgewaschen, um mögliche Verunreinigungen, Fette oder sonstige Rückstände von der textilen Oberfläche zu entfernen. Hierfür wurde eine Tensidlösung mit Ecosurf SA-9 in einer Konzentration 1 g/L angesetzt. Die Baumwoll- und Polyesterproben wurden getrennt voneinander vorgewaschen, sodass für jede Faserart ein separates Behältnis verwendet wurde. Die Proben wurden in ca. 1 L Tensidlösung in einem Becherglas oder Metallbehältnis auf einer Heizplatte behandelt. Sobald die Lösung eine Temperatur von 60 °C erreicht hat, wurden die Proben für 30 min in der Lösung belassen. Während der Vorbehandlung wurde die Flotte regelmäßig bewegt und umgerührt, um eine möglichst gleichmäßige Benetzung der Proben zu gewährleisten.

Nach Abschluss der Vorwäsche wurden die Proben in Wasser gespült. Dafür wurde ein Behältnis mit ca. 2 L Wasser verwendet, in dem die Proben jeweils einzeln kurz gespült wurden. Das Spülwasser wurde dabei nicht nach jeder Probe ausgetauscht. Anschließend wurden die Proben an der Luft getrocknet. Nach dieser Vorbehandlung lagen die Proben in einem vorbereiteten Zustand für weitere Färbe- und Beschichtungsversuche vor.

3.2.2 Färbung der Textilproben

Ein Teil der vorbereiteten Baumwoll- und Polyesterproben wurde vor der weiteren Beschichtung gefärbt. Ziel war es, neben den ungefärbten Proben auch gefärbte textile Ausgangszustände zu berücksichtigen und deren UPF-Wert sowie den Einfluss auf die spätere Beschichtungswirkung vergleichend einordnen zu

können. Für beide Faserarten wurden möglichst ähnliche Rottöne ausgewählt, um eine vergleichbare farbliche Ausgangssituation zu schaffen.

Die Baumwollproben wurden mit dem Reaktivfarbstoff Remazol Brilliantrot BB gefärbt, während für die Polyesterproben der Dispersionsfarbstoff Terasilrot G verwendet wurde. Die Wahl unterschiedlicher Farbstoffklassen ergibt sich aus den jeweiligen Faserarten und den dafür geeigneten Färbeverfahren. Die gefärbten Proben wurden anschließend, ebenso wie die ungefärbten Proben, für die weiteren Beschichtungsversuche eingesetzt. Zusätzlich wurden die UPF-Werte der ungefärbten und gefärbten Ausgangsproben bestimmt, um den Einfluss der Färbung auf den UV-Schutz zunächst unabhängig von der Beschichtung beurteilen zu können. Diese Referenzwerte werden in Kapitel 4.1 dargestellt.

3.2.2.1 Dispersionsfärbung der Polyesterproben

Die Polyesterproben wurden mit dem Dispersionsfarbstoff Terasilrot G im Färbeautomaten gefärbt. Pro Färbebecher wurden jeweils drei Polyesterproben möglichst knickfrei und mit geringem Kontakt zueinander eingelegt. Vor dem Einbringen in die Färbeflotte wurden die Proben mit einer Tensidlösung aus Ecosurf SA-9 mit der Konzentration von 1 g/L benetzt.

Die Färbeflotte bestand aus der Farbstoff-Stammlösung, Ameisensäure-Lösung, Ammoniumsulfat-Lösung, Irgasol-DAM-Lösung und entmineralisiertem Wasser. Das Flottenverhältnis lag bei 1:30. Die Färbebecher wurden gleichmäßig im Färbeautomaten verteilt und das entsprechende Programm gestartet. Dabei wurden Textil und Flotte innerhalb von 30 min auf 125 °C erhitzt. Diese Temperatur wurde für 60 min gehalten. Anschließend kühlte das System im Rahmen des Programmdurchlaufs ab.

Nach der Färbung wurden die Proben aus den Färbebechern entnommen und gemeinsam in 1 L Wasser für etwa 1 min ausgespült. Anschließend erfolgte eine reduktive Nachreinigung. Die Nachreinigungsflotte bestand aus Natronlauge, Natriumhydrosulfit, Nekanil-Lösung und entmineralisiertem Wasser. Die Proben wurden darin für 30 min bei 80 °C behandelt und gelegentlich bewegt. Danach wurden sie jeweils zweimal in 1 L Wasser für etwa 1 min gespült und anschließend hängend getrocknet.

3.2.2.2 Reaktivfärbung der Baumwollproben

Die Baumwollproben wurden mit dem Reaktivfarbstoff Remazol Brilliantrot BB in Metallbehältnissen auf Heizplatten gefärbt. Dieses Verfahren wurde gewählt, da die Reaktivfärbung durch die zeitversetzte Zugabe von Natriumcarbonat zur Färbeflotte manuell gut umsetzbar war. Pro Gefäß wurden jeweils drei Baumwollproben gemeinsam gefärbt. Vor dem Überführen der Proben in die Färbeflotte wurden auch diese mit einer Tensidlösung aus Ecosurf SA-9 mit der Konzentration von 1 g/L gleichmäßig benetzt.

Die Färbeflotte, bestehend aus Farbstoff-Stammlösung, Natriumcarbonat und entmineralisiertem Wasser, wies ein Flottenverhältnis von 1:40 auf. Nach Zugabe des Textilguts wurde die Flotte innerhalb von 20 min auf 60 °C erhitzt. Während des Färbevorgangs wurden die Proben regelmäßig bewegt, um eine möglichst gleichmäßige Färbung zu erzielen. Nach 10 min bei 60 °C wurde zunächst die Hälfte der vorgesehenen Natriumcarbonatmenge unter Bewegung der Proben zur Flotte hinzugegeben. Nach weiteren 10 min erfolgte die Zugabe der zweiten Hälfte. Anschließend wurden die Proben für weitere 20 min bei 60 °C in der Färbeflotte gehalten und weiterhin leicht bewegt.

Nach der Färbung wurden die Proben jeweils einmal in 1 L Wasser für etwa 1 min ausgespült. Danach erfolgte eine Nachwäsche in einer Tensidlösung mit der Konzentration von 5 g/L bei einem Flottenverhältnis von 1:25. Die Proben wurden dafür für 30-45 min bei 90-100 °C behandelt. Zum Schluss wurden sie jeweils zweimal in 1 L Wasser für etwa 1 min ausgespült und hängend an der Luft getrocknet.

3.3 UPF-Messung und Auswertung

Die UPF-Werte der Textilproben wurden mit dem in Kapitel 3.1.3 genannten UV/VIS-Spektralphotometer *Shimadzu UV-2600i* in Verbindung mit dem Multi-Purpose Large Sample Compartment *MPC-2600A* bestimmt. Die Messung erfolgte anhand der spektralen UV-Transmission im für die Bewertung des UV-Schutzes relevanten Wellenlängenbereich von 280 bis 400 nm. Um mögliche Unterschiede innerhalb einer Probe zu berücksichtigen, wurde jede Probe an drei unterschiedlichen Stellen gemessen. Aus den drei Einzelmessungen wurde

anschließend der Mittelwert gebildet, der für die weitere Darstellung und den Vergleich der Proben verwendet wurde. Bei einzelnen Proben traten deutliche Unterschiede zwischen den Messpunkten auf. Diese Streuungen wurden bei der Auswertung berücksichtigt und, sofern sinnvoll, in den Diagrammen durch Fehlerbalken dargestellt. Die entsprechenden Ergebnisse wurden vorsichtig interpretiert. Sofern erforderlich, wurden ausgewählte Proben erneut gemessen.

3.4 UV/Vis-Remissionsmessung und Auswertung

Die UV/Vis-Remissionsspektren ausgewählter Textilproben wurden mit dem in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Spektralphotometer *Konica Minolta CM-36dG* in Verbindung mit der Software *Qtex 2.9* aufgenommen. Vor Beginn der Messreihe wurde ein Schwarz- und Weißabgleich durchgeführt, um das Gerät auf die Referenzwerte für vollständige Absorption und vollständige Reflexion zu kalibrieren. Für die Messung wurden die textilen Proben jeweils doppelt gelegt und in das Messgerät eingespannt. Auch bei dieser Durchführung wurde jede Probe an drei unterschiedlichen Stellen gemessen, um Unterschiede innerhalb einer Probe zu berücksichtigen. Dabei wurde jede Probe zwischen den Einzelmessungen neu positioniert. Aus den drei Einzelmessungen wurde anschließend durch die Software ein Mittelspektrum gebildet. Die gespeicherten Spektren wurden in *Qtex 2.9* geladen und vergleichend ausgewertet.

Die Auswertung erfolgte anhand des vergleichenden Kurvenverlaufs der Remissionsspektren im UV/Vis-Bereich. Dabei wurden insbesondere Unterschiede zwischen unbehandelten, gefärbten und beschichteten Proben betrachtet. Die Remissionsmessungen ausgewählter Proben ergänzen die UPF-Bestimmung und wurden herangezogen, um farbliche und optische Veränderungen der Probenoberfläche infolge von Färbung, Beschichtung und Waschbehandlung nachvollziehbar und vergleichend darzustellen.

3.5 Versuchsübersicht und Referenzproben

Für die weiteren Beschichtungsversuche wurden die zuvor zugeschnittenen Proben weiter unterteilt. Die Beschichtung erfolgte überwiegend an Proben mit den Maßen 10 x 10 cm. Für anschließende Waschversuche wurden ausgewählte

beschichtete Proben erneut verkleinert, sodass Probenabschnitte mit den Maßen 5 x 10 cm verwendet wurden.

Die Beschichtungen wurden zunächst an ungefärbten Baumwoll- und Polyesterproben durchgeführt. Auf Grundlage der dabei gewonnenen Beobachtungen und Messergebnisse wurden ausgewählte Beschichtungsansätze anschließend zusätzlich auf gefärbte Proben übertragen. Dadurch konnte neben dem Einfluss der Beschichtung auf ungefärbte Textilien auch untersucht werden, inwiefern sich die jeweiligen Verfahren auf bereits gefärbten textilen Ausgangszuständen anwenden lassen. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuchsreihen.

Tabelle 4: Übersicht zu den Versuchsreihen

Versuchsreihe	Material	Ausgangszustand	Behandlung	Prüfungen
Referenzproben	CO, PES	Ungefärbt und gefärbt	Keine Beschichtung	UPF-Messung
Tanninsäure	CO, PES	Ungefärbt, ausgewählt gefärbt	TA in unterschiedlichen Konzentrationen (0,3; 2; 10 Gew.-%)	UPF-Messung, ausgewählte Waschtests
TA und $FeCl_3$	CO, PES	Ungefärbt	TA + Eisen(III)-chlorid	UPF-Messung
TA und $FeSO_4$	CO, PES	Ungefärbt, ausgewählt gefärbt	TA + Eisen(II)-sulfat	UPF-Messung, ausgewählte Waschtests
Polydopamin	CO, PES	Ungefärbt, ausgewählt gefärbt	PDA unter verschiedenen Versuchsbedingungen	UPF-Messung, ausgewählte Waschtests

Zur Einordnung der späteren Beschichtungsergebnisse wurden zunächst die UPF-Werte der unbeschichteten Referenzproben bestimmt. Dabei wurden sowohl ungefärbte als auch gefärbte Baumwoll- und Polyesterproben betrachtet. Diese Werte dienen im weiteren Verlauf als Ausgangswerte, um den Einfluss der

jeweiligen Beschichtungen auf den UV-Schutz vergleichend bewerten zu können. Die entsprechenden UPF-Werte sind in Kapitel 4.1 dargestellt und werden dort eingeordnet.

3.6 Beschichtung mit reiner Tanninsäure

Die Beschichtung mit reiner Tanninsäure wurde an Baumwoll- und Polyesterproben durchgeführt, um den Einfluss unterschiedlicher Tanninsäurekonzentrationen auf die UV-Schutzwirkung der Textilien zu untersuchen. Dabei wurden sowohl ungefärbte als auch ausgewählte gefärbte Proben betrachtet. Die Beschichtungen erfolgten jeweils getrennt nach Material und Probenzustand an 10 x 10 cm großen Proben.

Für die Beschichtungen wurden Tanninsäurelösungen mit Konzentrationen von 0,3 Gew.-%, 2 Gew.-% und ergänzend 10 Gew.-% eingesetzt. Die Durchführung unterscheidet sich je nach Konzentration. Bei der 0,3 Gew.-%igen Tanninsäurelösung, die in Anlehnung an Gu et al. (2017), jedoch ohne Metallsalzzugabe durchgeführt wurde, wurden 100 mL Lösung in einem Becherglas unter Verwendung eines Rührfischs gerührt. Anschließend wurde eine Gewebeprobe in die Lösung gegeben und zunächst 5 min unter Rühren behandelt. Danach wurde der pH-Wert durch tropfenweise Zugabe von Natronlauge auf etwa pH 8 eingestellt. Die Probe ist anschließend für 1 h bei Raumtemperatur unter konstantem Rühren in der Lösung verblieben. Nach Ablauf der Behandlungszeit wurde sie für etwa 1 min in 1 L Wasser gespült und hängend an der Luft getrocknet.[131]

Die Beschichtungen mit 2 Gew.-% und 10 Gew.-% Tanninsäure wurden unter Wärmezufuhr durchgeführt. Die Versuchsdurchführung erfolgte in Anlehnung an Sun et al. (2024), jedoch auch hier ohne die weitere Stufe mit der Metallsalz-Beschichtung. Hierfür wurden je Probe 100 mL der jeweiligen Tanninsäurelösung in einem Becherglas auf einer Heizplatte unter konstantem Rühren auf 70 °C erhitzt. Nach Erreichen der Temperatur wurde die Gewebeprobe in die Lösung gegeben und für 45 min bei 70 °C behandelt. Im Anschluss folgte eine etwa einminütige Spülung in 1 L Wasser, bevor die Probe hängend an der Luft

[131] Gu et al. (2017)

trocknete.[132] Dieses Vorgehen wurde sowohl für ungefärbte als auch gefärbte Baumwoll- und Polyesterproben jeweils getrennt durchgeführt.

Die Versuche mit reiner Tanninsäure wurden teilweise in mehreren Datensätzen angelegt. Der erste Datensatz diente der orientierenden Untersuchung der Konzentrationen 0,3 Gew.-%, 2 Gew.-% und 10 Gew.-% auf Baumwolle und Polyester. Für Polyester wurde ausschließlich dieser erste, orientierende Datensatz an ungefärbten Proben angelegt. Für Baumwolle wurden die Versuche dagegen in mehreren Datensätzen wiederholt und sowohl an ungefärbten als auch an gefärbten Proben durchgeführt. In den Datensätzen 2 und 3 wurde die Tanninsäurekonzentration auf 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% beschränkt. Die Konzentration von 10 Gew.-% wurde nur im ersten Datensatz berücksichtigt. Die Gründe für diese Schwerpunktsetzung ergeben sich aus den Ergebnissen und werden in Kapitel 4.2 erläutert.

Zur Bewertung der Beständigkeit wurden die tanninsäurebeschichteten Baumwollproben zusätzlich Waschversuchen unterzogen. Dabei wurden jeweils Waschbeanspruchungen mit ECE-Referenzwaschmittel sowie mit der Tensidlösung Ecosurf SA-9 durchgeführt (zur Durchführung siehe Kapitel 3.9). Die Waschtests dienen dazu, mögliche Veränderungen der UPF-Werte und des visuellen Erscheinungsbildes nach der Behandlung zu erfassen. Je Probe und Konzentration der Tanninsäurebeschichtung wurden jeweils zwei Waschtests mit ECE-Referenzwaschmittel und Ecosurf SA-9 durchgeführt. In der Ergebnisdarstellung werden für die vergleichende Einordnung gemittelte Werte aus den Datensätzen herangezogen. Die Einzelwerte der jeweiligen Datensätze sind in den Übersichtstabellen im Anhang A1 bis A8 aufgeführt.

Tabelle 5: Übersicht der Datensätze mit reiner Tanninsäurebeschichtung

Datensatz	**Material**	**Zustand**	**TA-Konzentration [Gew.-%]**	**Waschtests**
1	PES	Ungefärbt	0,3; 2; 10	Keine
1	CO	Ungefärbt und gefärbt	0,3; 2; 10	ECE / Ecosurf
2	CO	Ungefärbt und gefärbt	0,3; 2	ECE / Ecosurf
3	CO	Ungefärbt und gefärbt	0,3; 2	ECE / Ecosurf

[132] Sun et al. (2024)

Die Übersicht in Tabelle 5 zeigt ebenso auf, dass Polyester nur im ersten Datensatz orientierend untersucht wurde, während die Versuche mit Baumwolle in weiteren Datensätzen fortgeführt wurden.

Wie sich die reine Tanninsäurebeschichtung visuell und messtechnisch auswirkt, zeigt Kapitel 4.2.

3.7 Tanninsäure in Kombination mit Eisenverbindungen

Ergänzend zur Beschichtung mit reiner Tanninsäure wurden tanninsäurebasierte Beschichtungen in Kombination mit Eisenverbindungen untersucht. Ziel war es, den Einfluss einer möglichen Metall-Polyphenol-Komplexbildung auf die Beschichtungswirkung und den UV-Schutz der Textilien einzuordnen. Hierfür wurden Eisen(III)-chlorid und Eisen(II)-sulfat in Kombination mit Tanninsäure auf Baumwoll- und Polyesterproben getestet.

3.7.1 Tanninsäure-Lösung mit Eisen(III)-chlorid

Die Beschichtung mit Eisen(III)-chlorid erfolgte in Anlehnung an Gu et al. (2017).[133] Zunächst wurde eine Eisen(III)-chlorid-Hexahydrat-Lösung hergestellt, indem das Eisen(III)-chlorid-Hexahydrat zuerst zerkleinert und anschließend in entmineralisiertem Wasser gelöst wurde. Die Konzentration der Ausgangslösung betrug anfangs ca. 0,08 Gew.-%. Parallel dazu wurde eine Tanninsäurelösung mit einer Konzentration von etwa 0,3 Gew.-% angesetzt.

Für die Beschichtung wurden eine ungefärbte Baumwoll- und Polyesterprobe mit den Maßen 10 x 10 cm unabhängig voneinander behandelt. Dazu wurden zunächst 100 mL Eisen(III)-chlorid-Lösung in einem Becherglas unter Verwendung eines Rührfischs gerührt. Anschließend wurde die jeweilige Textilprobe in die Lösung gegeben und für 1 min unter Rühren behandelt. Danach wurden 100 mL der Tanninsäurelösung hinzugegeben und die Probe wurde für weitere 5 min in der Lösung belassen. Im Anschluss wurde der pH-Wert durch tropfenweise Zugabe von 5% Natronlauge auf etwa pH 8 eingestellt. Die Probe verblieb anschließend für 1 h bei Raumtemperatur unter stetigem Rühren in der

[133] Gu et al. (2017)

Behandlungsflotte. Nach Ablauf der Behandlungszeit wurde die Probe entnommen und nach kurzem Spülen (etwa 1 min) in 1 L Wasser an der Luft getrocknet.

Die dabei beobachteten farblichen Veränderungen sowie die gemessenen UPF-Werte greift Kapitel 4.3.1 auf und ordnet sie ein.

3.7.2 Tanninsäure-Lösung mit Eisen(II)-sulfat

Die Beschichtung mit Eisen(II)-sulfat in Anlehnung an Sun et al. (2024) erfolgte im Unterschied zur Behandlung mit Eisen(III)-chlorid als zweistufiges Verfahren, bei dem die Proben zunächst mit Tanninsäure und anschließend mit Eisen(II)-sulfat behandelt wurden.[134] Untersucht wurden jeweils ungefärbte sowie gefärbte Baumwoll- und Polyesterproben mit den Maßen 10 x 10 cm, die jeweils separat beschichtet wurden.

Für die Beschichtung wurden eine Tanninsäurelösung mit einer Konzentration von 10 Gew.-% sowie eine Eisen(II)-sulfat-Lösung mit einer Konzentration von 10 Gew.-% angesetzt. In der Vorschrift nach Sun et al. (2024) ist ein Flottenverhältnis von 1:50 vorgesehen. Für die praktische Durchführung wurde die Menge der Flotte jedoch für beide Lösungen einheitlich auf jeweils 100 mL festgelegt, unabhängig vom jeweiligen Probengewicht.

Zunächst wurden 100 mL der Tanninsäurelösung in einem Becherglas auf einer Heizplatte unter konstantem Rühren mit einem Rührfisch auf 70 °C erhitzt. Nach Erreichen der Temperatur wurde die jeweilige Textilprobe in die Lösung gegeben und für 45 min bei 70 °C behandelt. Anschließend wurde die Probe direkt in die zuvor ebenfalls auf 70 °C erhitzte Eisen(II)-sulfat-Lösung überführt. Dort erfolgte eine weitere Behandlung für 45 min bei 70 °C unter konstantem Rühren. Nach Abschluss der zweistufigen Beschichtung erfolgte für beide Proben eine etwa einminütige Spülung in 1 L Wasser, gefolgt von der Trocknung an der Luft.

Wie sich die Farbe, die UPF-Werte sowie das Verhalten nach der Waschbeanspruchung darstellen, wird in Kapitel 4.3.2 gezeigt und diskutiert.

[134] Sun et al. (2024)

3.8 Polydopaminbasierte Beschichtungsversuche

Für die polydopaminbasierten Beschichtungsversuche wurden Baumwoll- und Polyesterproben jeweils einzeln behandelt. Die verwendeten Proben hatten auch bei diesem Beschichtungsversuch jeweils eine Größe von 10 x 10 cm. Grundlage der Beschichtung war die oxidative Selbstpolymerisation von Dopaminhydrochlorid in einer leicht alkalischen Tris-Pufferlösung. Hierfür wurde zunächst Tris-Puffer in entmineralisiertem Wasser gelöst und der pH-Wert durch Zugabe von 0,5% Salzsäure auf pH 8,5 eingestellt. Die Kontrolle des pH-Wertes erfolgte mithilfe einer pH-Elektrode. Anschließend wurde Dopaminhydrochlorid unter starkem Rühren hinzugegeben.

Der Tris-Puffer dient dabei zur Einstellung und Stabilisierung des leicht alkalischen pH-Wertes. Unter diesen Bedingungen kann Dopamin unter Sauerstoffeinfluss oxidieren und zu Polydopamin polymerisieren. Während dieses Prozesses kann sich eine dünne Polydopaminschicht auf der Oberfläche der Textilproben ausbilden.[135]

Die Gewebeproben wurden in die vorbereitete Dopaminlösung eingelegt und für etwa 20 h bei Raumtemperatur behandelt. Um den Einfluss der Versuchsdurchführung auf die Beschichtung zu untersuchen, wurden drei unterschiedliche Behandlungsvarianten durchgeführt: eine Behandlung im Becherglas unter konstantem Rühren mit möglichem Kontakt zwischen Gewebe und Rührfisch, eine Behandlung ohne Rühren in einem flachen Behältnis sowie eine Behandlung im Becherglas unter konstantem Rühren, jedoch ohne direkten Kontakt zwischen Gewebe und Rührfisch. Bei letzterer Variante wurde ein Uhrglas zwischen Rührfisch und Probe platziert. Dadurch wurde die Lösung weiterhin bewegt, die Probe lag jedoch nicht direkt auf dem Rührfisch auf. Für die erste Variante wurde je Probe etwa 100 mL Lösung eingesetzt, bei den weiteren Varianten je Probe etwa 200 mL Lösung. Die letzte Variante wurde nur an Baumwollproben durchgeführt, da die UPF-Werte bei Polyester zu gering ausfielen. Die Behandlung der Gewebeproben mit der Dopaminlösung erfolgte in Anlehnung an eine von Herrn Prof.

[135] Hemmatpour et al. (2023); H. Lee et al. (2007)

Dr. Oberthür zur Verfügung gestellten Versuchsvorschrift, die verschiedene in der Literatur übliche Varianten kombiniert.[136]

Die unterschiedlichen Versuchsbedingungen wurden gewählt, da sich im Verlauf der Untersuchungen zeigte, dass die Bewegung der Flotte und der Kontakt zum Rührfisch sowohl das visuelle Erscheinungsbild als auch die erzielten UPF-Werte beeinflussen können. Auf diese Weise sollte eine geeignete Versuchsdurchführung für die Polydopaminbeschichtungen textiler Proben ermittelt werden.

Nach der Behandlungszeit wurden die Proben jeweils einzeln in 1 L lauwarmem Wasser gespült, bis das Spülwasser farblos erschien. Anschließend wurden die Proben an der Luft getrocknet.

Folgende Tabelle gibt einen detaillierten Überblick über die Versuchsreihen, die im Rahmen dieser Arbeit mit Polydopamin durchgeführt wurden:

Tabelle 6: Übersicht der Versuchsreihen mit Polydopamin

Versuchsbedingungen	Material	Ausgangszustand	Prüfungen
PDA-Beschichtung unter Rühren mit Kontakt zum Rührfisch	CO, PES	Ungefärbt	UPF-Messung, ausgewählte Waschtests
PDA-Beschichtung ohne Rühren	CO, PES	Ungefärbt	UPF-Messung, ausgewählte Waschtests
PDA-Beschichtung unter Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch	CO	Ungefärbt und gefärbt	UPF-Messung

Die visuellen Beobachtungen und UPF-Ergebnisse aller drei Varianten sind Gegenstand von Kapitel 4.4.

3.9 Waschversuche zur Gebrauchstauglichkeit

Zur Beurteilung der Beständigkeit ausgewählter Beschichtungen gegenüber der Waschbeanspruchung wurden Waschtests durchgeführt. Diese erfolgten nicht für alle Probenreihen in identischem Umfang. Teilweise wurde nur ein erster Waschtest durchgeführt, während bei ausgewählten Proben zusätzlich ein zweiter oder

[136] Prof. Dr. M. Oberthür, persönliche Mitteilung, E-Mail (2026)

mehrere weitere Waschgänge erfolgten. Der Schwerpunkt lag auf den tanninsäurebasierten Baumwollproben, da diese im Vergleich aller Beschichtungsversuche die deutlichsten Veränderungen der UV-Schutzwirkung zeigten.

Die Waschtests mit ECE-Referenzwaschmittel wurden in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 105-C06 durchgeführt, jedoch mit Abweichungen hinsichtlich Probenvorbereitung- und Menge, Flottenverhältnis und Prüfaufbau- sowie Durchführung.[137] Die Prüflinge wurden ohne Begleitgewebe gewaschen. Als Waschlösung wurde überwiegend ECE-Referenzwaschmittel der Variante ECE (B) in einer Konzentration von 4 g/L eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein phosphatfreies, nach ISO 105-C06 genormtes Standardwaschmittel. In einzelnen Versuchsreihen wurde alternativ die Tensidlösung Ecosurf SA-9 mit einer Konzentration von 1 g/L eingesetzt. Diese Waschversuche dienten ausschließlich dem vergleichenden Einfluss der Tensidlösung und erfolgten unabhängig von einer normativen Prüfvorschrift.

Für den Waschvorgang wurden jeweils 100 mL der Waschlösung in ein Becherglas auf einer Heizplatte auf 40 °C erwärmt. Nach Erreichen der Temperatur wurde die jeweilige Probe in die Waschlösung eingebracht und 30 min bei möglichst konstanter Temperatur behandelt. Während des Waschvorgangs wurde die Probe gelegentlich umgerührt und in der Lösung bewegt, um eine gleichmäßigere Benetzung und Waschbeanspruchung zu ermöglichen.

Nach dem Waschvorgang wurden die Proben aus der Waschlösung entnommen und anschließend jeweils zweimal 1 min in 1 L Wasser ausgespült. Danach erfolgte die Trocknung an der Luft bei Raumtemperatur. Nach vollständiger Trocknung wurden die Proben erneut hinsichtlich ihrer UV-Schutzwirkung untersucht. In Abhängigkeit von den Ergebnissen des ersten Waschtests wurden ausgewählte Proben einem zweiten Waschtest mit gleicher Durchführung unterzogen oder ergänzend mit unterschiedlichen Waschmitteln, insbesondere ECE-Referenzwaschmittel oder Ecosurf SA-9, geprüft.

[137] DIN EN ISO 105-C06 2010

4 Beobachtungen, Ergebnisse und Diskussion

Hinweis: Im Anhang sind ausführliche Tabellen mit allen Einzelwerten der UPF-Messungen (siehe Anhang A1 bis A8) sowie die vollständigen UV/Vis-Remissionsspektren aller untersuchten Proben hinterlegt (Anhang B1 ff.). Im Fließtext werden, sofern mehrere Datensätze vorlagen, zur besseren Lesbarkeit die gerundeten Mittelwerte genannt und in den Diagrammen dargestellt. Von den Remissionsspektren wird im Fließtext nur eine Auswahl besonders aussagekräftiger Kurven gezeigt.

In diesem Kapitel werden die, im Rahmen der in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren, erzielten Beobachtungen und Messergebnisse dargestellt und diskutiert. Die Gliederung folgt dabei der Reihenfolge der Beschichtungsansätze aus Kapitel 3. Zunächst werden die UPF-Werte der unbeschichteten Referenzproben eingeordnet (Kapitel 4.1). Anschließend werden die Ergebnisse der reinen Tanninsäurebeschichtung (Kapitel 4.2), der Tanninsäure-Eisen-Systeme (Kapitel 4.3) und der Polydopaminbeschichtung (Kapitel 4.4) dargestellt. Abschließend werden die Beschichtungsansätze vergleichend gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit diskutiert (Kapitel 4.5).

4.1 Referenzproben

Die Durchführung der Referenzmessungen ist in Kapitel 3.5 beschrieben. Tabelle 7 zeigt die UPF-Werte der unbeschichteten Referenzproben, die im Verlauf als Ausgangswerte für die Bewertung der Beschichtungsergebnisse dienen.

Tabelle 7: UPF-Werte der Referenzproben

Probe	Zustand	UPF-Wert
Baumwolle	Unbehandelt (original)	5
Baumwolle	Vorgewaschen, ungefärbt	5
Baumwolle	Vorgewaschen, gefärbt	55
Polyester	Unbehandelt (original)	12
Polyester	Vorgewaschen, ungefärbt	12
Polyester	Vorgewaschen, gefärbt	37

Die Vorwäsche mit Ecosurf SA-9 bei 60 °C für 30 min zeigte bei den untersuchten Referenzproben keinen erkennbaren Einfluss auf die UPF-Werte. Sowohl Baumwolle als auch Polyester wiesen nach der Vorwäsche denselben UPF-Wert auf wie im unbehandelten Originalzustand. Die Färbung führte dagegen bei beiden Materialien zu einer deutlichen Erhöhung des UPF-Wertes und ist daher bei der späteren Bewertung der Beschichtungsergebnisse als veränderter Ausgangszustand zu berücksichtigen. Die in den weiteren Versuchsreihen als Ausgangszustände verwendeten unbeschichteten Referenzproben sind in Abb. 4 und Abb. 5 dargestellt. Bei den gefärbten Proben zeigen sich deutliche Farbtonunterschiede, die sowohl auf die unterschiedliche Faserart als auch auf die jeweils abgestimmte Farbstoffklasse zurückzuführen sind.

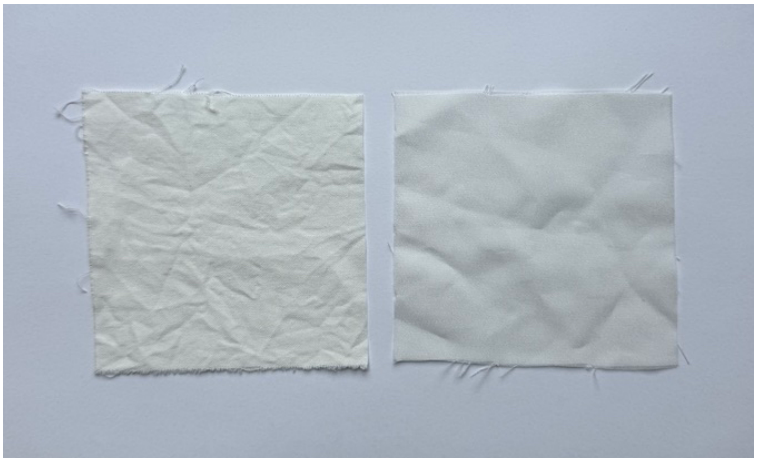


Abb. 4: Unbeschichtete ungefärbte Referenzproben: Baumwolle (links) und Polyester (rechts).

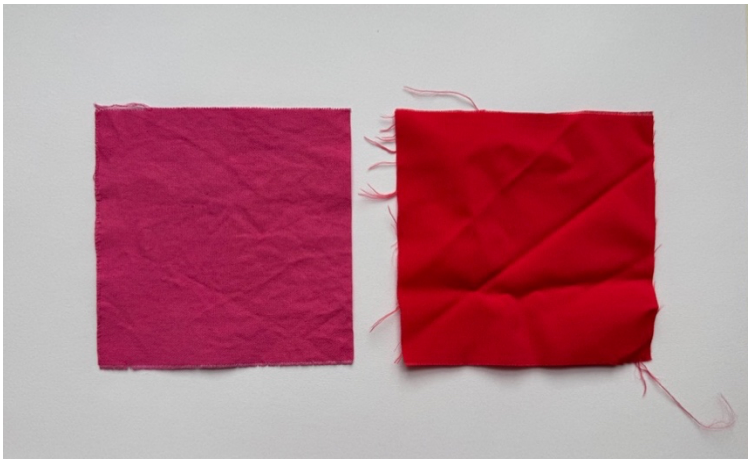


Abb. 5: Unbeschichtete gefärbte Referenzproben: Baumwolle (links) und Polyester (rechts).

Bereits an dieser Stelle lässt sich festhalten, dass beide unbehandelten Gewebe nach der UPF-Klassifizierung (vgl. Kapitel 2.2) keinen oder nur einen sehr geringen UV-Schutz bieten. Erst die Färbung hebt insbesondere Baumwolle in einen Bereich, der nach gängigen Bewertungsmaßstäben als guter UV-Schutz gelten kann, während ungefärbte Polyesterproben trotz der Färbung noch unterhalb dieses Bereichs liegen. Dieser Ausgangsunterschied ist bei allen folgenden Beschichtungsergebnissen mitzudenken, da die gefärbten Proben von vornherein einen höheren UPF-Ausgangswert besitzen als die ungefärbten.

4.2 Beschichtung mit reiner Tanninsäure

Wie die Beschichtung mit reiner Tanninsäure durchgeführt und die Versuche auf mehrere Datensätze aufgeteilt wurden, ist in Kapitel 3.6 dargestellt. Die Ergebnisse werden im Folgenden anhand ausgewählter Diagramme veranschaulicht. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden dabei, sofern mehrere Datensätze vorlagen, arithmetische Mittelwerte verwendet, welche in den Diagrammen als gerundete Zahl dargestellt sind. Dies betrifft sowohl die Beschichtungen als auch die Waschtests mit 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% Tanninsäure. Zur Darstellung der Streuung wurden zusätzlich die Standardabweichungen berechnet und in entsprechenden Diagrammen als Fehlerbalken aufgezeigt. Für die Beschichtung und die dazugehörigen Waschtests mit 10 Gew.-% lag hingegen nur ein Datensatz vor, weshalb hier kein Mittelwert gebildet und keine Standardabweichung berechnet wurde. Der entsprechende Einzelwert ist dementsprechend vorsichtiger zu bewerten.

4.2.1 Ungefärbte Proben

Bei den ungefärbten Baumwollproben führte die Beschichtung mit reiner Tanninsäure zu einer deutlich erkennbaren Veränderung der Probenoptik. Während die unbehandelte Baumwolle weiß erschien, wiesen die beschichteten Proben nach der Behandlung einen cremefarbenen bis leicht gelblichen Farbton auf. Dieser Effekt nahm mit steigender Tanninsäurekonzentration zu. Die Probe mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure zeigte eine leichte Abweichung vom Ausgangsmaterial, während die mit 2 Gew.-% behandelte Probe sichtbar stärker in einen gelblich-cremefarbenen Ton überging (siehe Abb. 6). Für die mit 10 Gew.-% behandelte Probe

wurde die stärkste farbliche Veränderung beobachtet (siehe Abb. 7), weshalb diese Konzentration zwar in die erste vergleichende Betrachtung einbezogen wurde, im weiteren Verlauf jedoch nicht im gleichen Umfang wiederholt wurde (vgl. Kapitel 3.6).

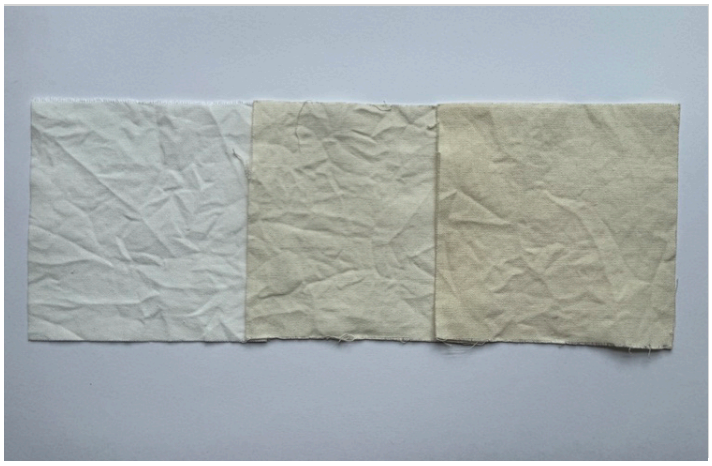


Abb. 6: Visuelle Erscheinung ungefärbter Baumwollproben vor und nach der Beschichtung mit Tanninsäure.
Unbehandelte Baumwolle (links), Baumwolle mit TA 0,3 Gew.-% (Mitte) und Baumwolle mit TA 2 Gew.-% (rechts).

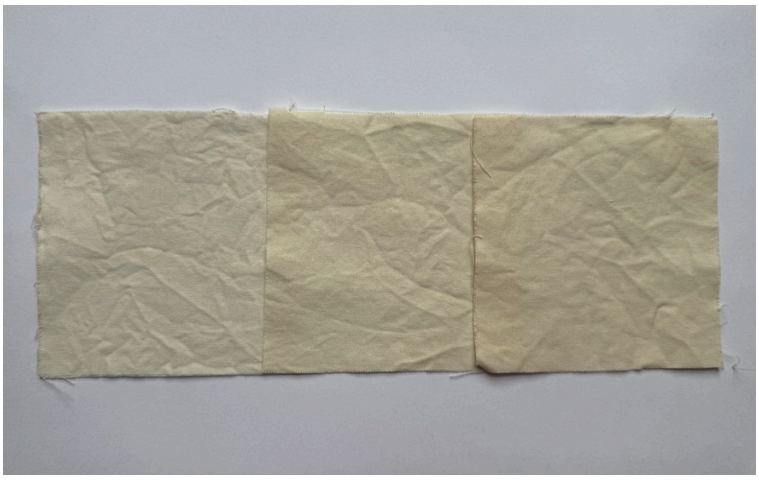


Abb. 7: Visuelle Erscheinung ungefärbter Baumwollproben nach der Beschichtung mit Tanninsäure.
Baumwolle mit TA 0,3 Gew.-% (links), Baumwolle mit TA 2 Gew.-% (Mitte) und Baumwolle mit TA 10 Gew.-% (rechts).

Zur ergänzenden Beurteilung der optischen Veränderung wurde eine UV/Vis-Remissionsmessung durchgeführt (zum Verfahren vgl. Kapitel 3.4). Das Remissionsspektrum bestätigt den visuell erkennbaren Unterschied zwischen den mit 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% Tanninsäure beschichteten Baumwollproben. Die mit 2 Gew.-% behandelte Probe weist über den betrachteten Wellenlängenbereich hinweg eine geringere Remission auf als die mit 0,3 Gew.-% behandelte Probe.

Besonders deutlich ist dieser Unterschied im kurzwelligen sichtbaren Bereich, etwa zwischen 380 und 520 nm (siehe Abb. 8). Dies weist darauf hin, dass die stärker beschichtete Probe weniger Licht reflektiert und stärker absorbiert und dadurch dunkler oder im vorliegenden Fall gelblicher erscheint. Mit zunehmender Wellenlänge nähern sich die Kurven an, sodass der Unterschied im langwelligen Bereich geringer ausfällt.

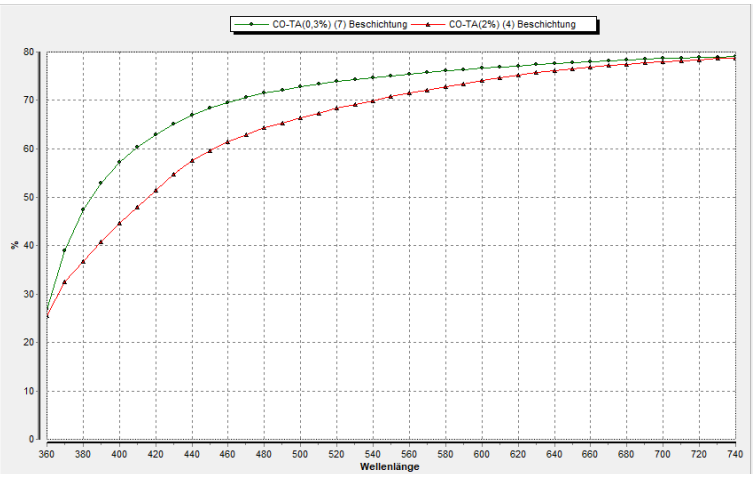


Abb. 8: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Baumwollproben nach Beschichtung mit Tanninsäure.
CO TA 0,3 Gew.-% (grün) und CO TA 2 Gew.-% (rot).

Diese visuelle Veränderung spiegelt sich auch in den UPF-Werten wider. Die unbehandelte ungefärbte Baumwolle erreichte lediglich einen UPF-Wert von 5. Durch die Beschichtung mit Tanninsäure stieg der UPF-Wert deutlich an. Bereits bei einer Konzentration von 0,3 Gew.-% wurde ein UPF-Wert von 104 erreicht, bei 2 Gew.-% erhöhte sich der Wert auf 129, und die Beschichtung mit 10 Gew.-% führte zu einem UPF-Wert von 153. Es zeigt sich somit ein konzentrationsabhängiger Anstieg der UV-Schutzwirkung, wobei bereits die niedrigste untersuchte Konzentration eine sehr deutliche Verbesserung gegenüber der unbehandelten Baumwolle bewirkte (siehe Abb. 9). Der Unterschied zwischen 2 Gew.-% und 10 Gew.-% fällt im Vergleich zur starken Anfangssteigerung von unbehandelt zu 0,3 Gew.-% geringer aus. Da die höhere Konzentration zugleich mit einer stärkeren farblichen Veränderung und einem höheren Materialeinsatz verbunden war, wurden die weiteren Wiederholungen vor allem auf 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% konzentriert (vgl. Kapitel 3.6). Die in den folgenden Diagrammen dargestellten Werte für 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% beruhen daher, wie zuvor erwähnt, auf gerundeten

Mittelwerten aus drei Datensätzen, während der Wert für 10 Gew.-% lediglich aus dem ersten Datensatz stammt und entsprechend vorsichtiger zu bewerten ist.

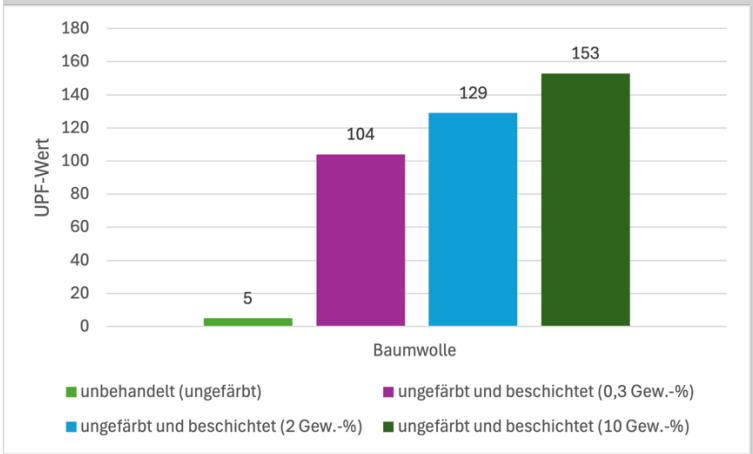


Abb. 9: UPF-Werte ungefärbter Baumwollproben nach der Beschichtung mit reiner Tanninsäure in unterschiedlichen Konzentrationen.
Für 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% sind Mittelwerte aus drei Datensätzen dargestellt; der Wert für 10 Gew.-% basiert auf einem Datensatz.

Nach den Waschtests zeigten die Baumwollproben weiterhin sichtbare farbliche Veränderungen (siehe Abb. 10). Besonders bei den mit ECE gewaschenen Proben war eine stärkere Nachdunklung und ein intensiverer Gelbstich zu erkennen. Dieser Effekt trat bei höherer Tanninsäurekonzentration deutlicher auf und war bei den mit Ecosurf gewaschenen Proben weniger stark ausgeprägt. Die Proben wirkten nach den Waschtests insgesamt nicht mehr rein weiß, sondern weiterhin leicht gelblich bis cremefarben. Dies zeigt, dass die Tanninsäurebeschichtung visuell zumindest teilweise auf dem Gewebe erhalten blieb. Gleichzeitig deuten die beobachteten Veränderungen der Waschflotte, insbesondere bei höherer Konzentration, darauf hin, dass während des Waschens auch Beschichtungsbestandteile gelöst oder umgelagert worden sein können.

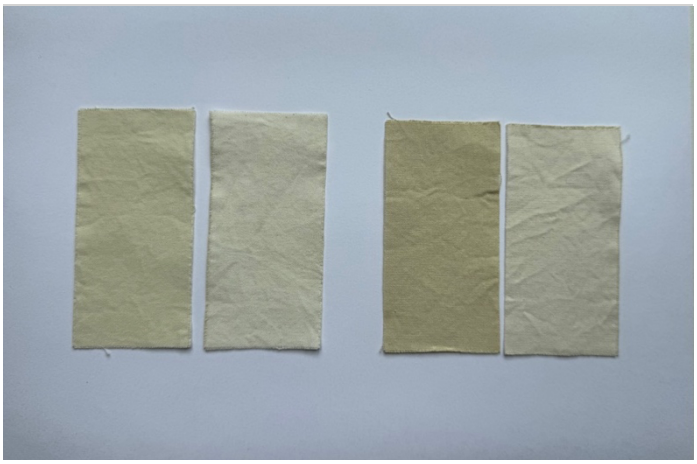


Abb. 10: Visuelle Erscheinung TA-beschichteter Baumwollproben nach zwei Waschtests. TA 0,3 Gew.-% nach ECE-Waschtests (links), TA 0,3 Gew.-% nach Ecosurf-Waschtests (Mitte links), TA 2 Gew.-% nach ECE-Waschtest (Mitte rechts), TA 2 Gew.-% nach Ecosurf-Waschtest (rechts).

Der durch die Waschbeanspruchung veränderte Farbeindruck lässt sich auch im Remissionsspektrum nachvollziehen (siehe Abb. 11). Beispielhaft ist hierfür die mit 2 Gew.-% Tanninsäure beschichtete Baumwollprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE dargestellt. Nach dem Waschtest verläuft die Kurve vor allem im kurzwelligen sichtbaren Bereich niedriger als vor der Waschbehandlung. Die Probe reflektiert in diesem Bereich somit weniger Licht, was mit dem dunkleren und stärker gelblich-cremefarbenen Erscheinungsbild übereinstimmt. Ab dem mittleren Wellenlängenbereich liegen beide Kurven näher beieinander, sodass die optische Abweichung dort weniger deutlich ausgeprägt ist. Insgesamt zeigt die Remissionsmessung damit, dass die Waschbehandlung nicht zu einer Rückkehr zum helleren Ausgangszustand führte, sondern den Farbeindruck der beschichteten Probe teilweise weiter veränderte.

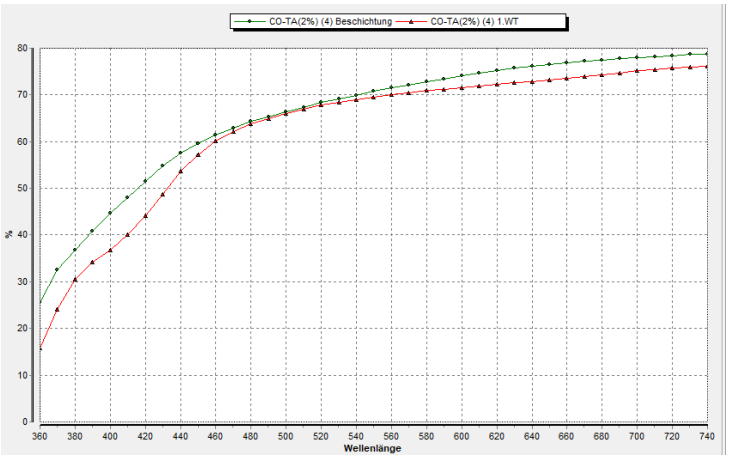


Abb. 11: UV/Vis-Remissionsspektrum der mit 2 Gew.-% Tanninsäure beschichteten Baumwollprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE.

Die UPF-Werte nach den Waschtests zeigen keinen einfachen linearen Abfall der Schutzwirkung. Bei der mit 0,3 Gew.-% beschichteten Baumwolle sank der UPF-Wert nach dem ersten Waschtest mit ECE von 104 auf 61 und stieg nach dem zweiten Waschtest wieder auf 78 (siehe Abb. 12). Damit blieb der Wert zwar deutlich über dem unbehandelten Ausgangswert von 5, lag jedoch unter dem Wert direkt nach der Beschichtung. Bei den Waschtests mit Ecosurf hingegen zeigte sich ein vorteilhafterer Verlauf, denn nach dem ersten Waschtest lag der UPF-Wert bei 84, nach dem zweiten Waschtest bei 106 und damit wieder etwa auf dem Niveau der beschichteten Probe vor dem Waschen (siehe Abb. 13). Für die niedrigere Tanninsäurekonzentration wirkte sich ECE somit stärker negativ auf den UPF-Wert aus als Ecosurf.

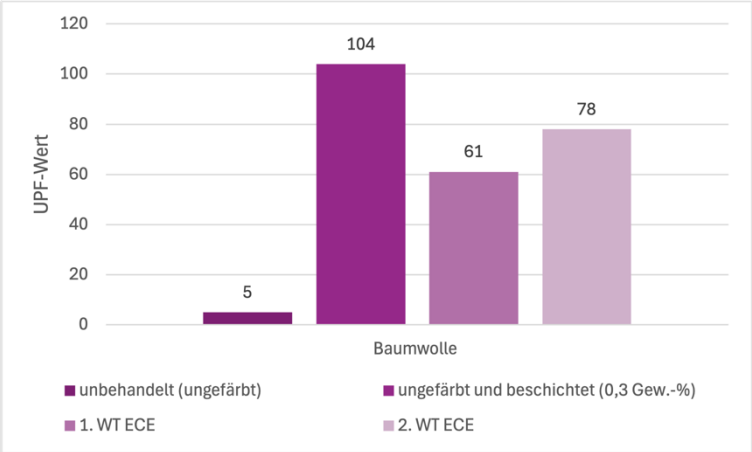


Abb. 12: UPF-Werte der mit TA 0,3 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE.



Abb. 13: UPF-Werte der mit TA 0,3 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf.

Da diesen Werten jeweils drei Datensätze zugrunde liegen, lohnt sich ergänzend ein Blick auf deren Streuung. Abbildung 14 fasst die UPF-Werte der 0,3 Gew.-%-Beschichtung vor der Wäsche sowie nach den Waschtests mit beiden Waschmitteln in einem gemeinsamen Diagramm zusammen und ergänzt sie um die Standardabweichung der drei Datensätze als Fehlerbalken. Die Standardabweichung liegt an allen fünf Messzeitpunkten zwischen rund 16 und 31 UPF-Einheiten und damit in einer Größenordnung, die den oben beschriebenen Wiederanstieg nach dem zweiten Waschtest relativiert. Dieser bewegt sich innerhalb der Streubreite der Einzeldatensätze und ist entsprechend vorsichtig zu interpretieren.

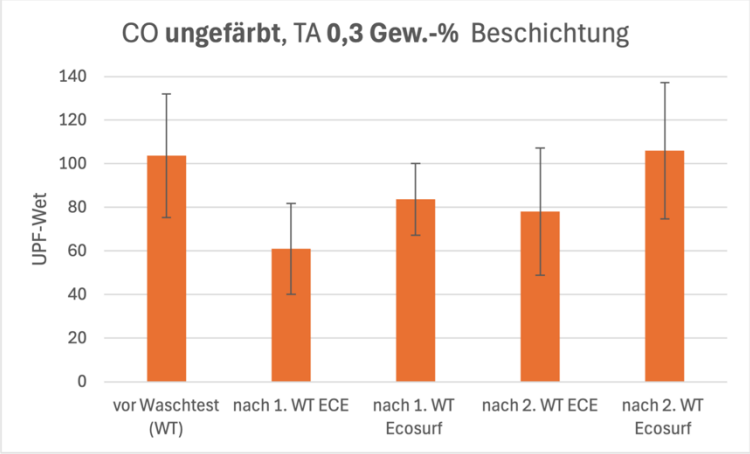


Abb. 14: UPF-Werte ungefärbter Baumwollproben nach Beschichtung mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure vor und nach den Waschtests mit ECE- und Ecosurf-Waschmittel. Dargestellt sind Mittelwerte aus drei Datensätzen; die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung (n=3).

Bei der mit 2 Gew.-% Tanninsäure beschichteten Baumwolle lag der UPF-Wert vor dem Waschen bei 129. Nach dem ersten Waschtest mit ECE wurde ein Wert

von 107 gemessen, nach dem zweiten Waschtest stieg der Wert auf 157 (siehe Abb. 15). Auch bei Ecosurf bleibt die Schutzwirkung hoch, denn nach dem ersten Waschtest wurde ein UPF von 143 erreicht, nach dem zweiten Waschtest lag der Wert bei 138 (siehe Abb. 16). Insgesamt fiel die UV-Schutzwirkung der 2 Gew.-%-Beschichtung damit stabiler aus als die der 0,3 Gew.-%-Beschichtung. Besonders auffällig ist, dass die UPF-Werte nach dem Waschen teilweise wieder anstiegen und nicht durchgängig abnahmen.

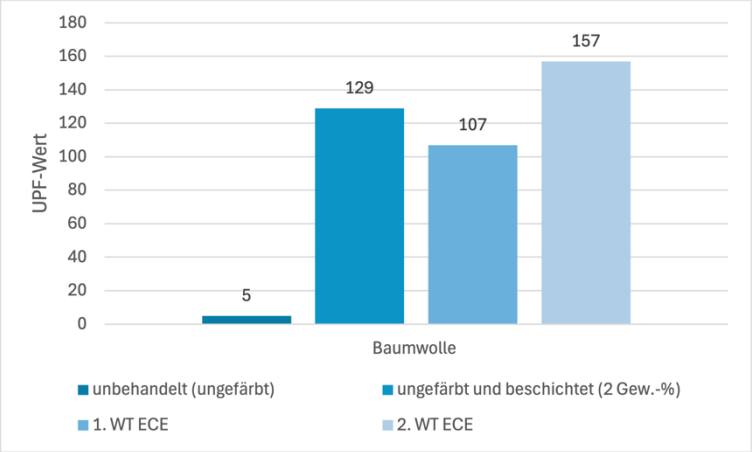


Abb. 15: UPF-Werte der mit TA 2 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE.

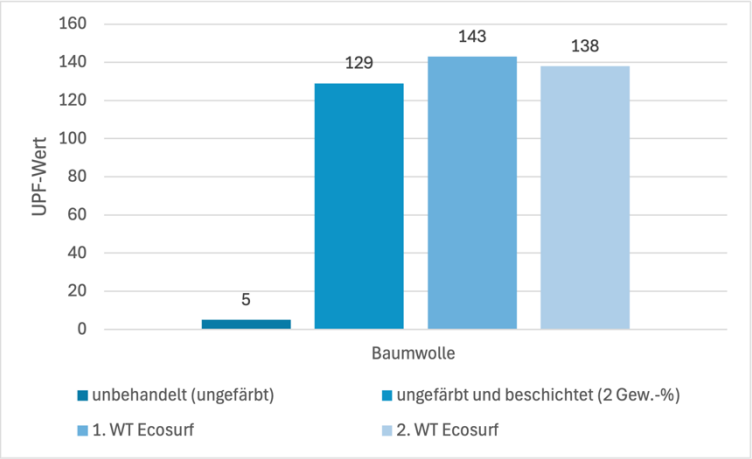


Abb. 16: UPF-Werte der mit TA 2 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf.

Auch für die 2 Gew.-%-Beschichtung liefert die Betrachtung der Standardabweichung eine zusätzliche Einordnung. Abbildung 17 zeigt die entsprechenden Mittelwerte mit Fehlerbalken. Vor der Wäsche und nach dem ersten Waschtest mit ECE fällt die Streuung mit rund 8 UPF-Einheiten vergleichsweise gering aus, nach dem zweiten Waschtest mit ECE steigt sie dagegen auf rund 38 UPF-

Einheiten an. Bei Ecosurf liegt die Streuung mit rund 13 bzw. 21 UPF-Einheiten insgesamt etwas moderater, ohne den starken Anstieg wie bei ECE. Diese größere Streuung nach dem zweiten Waschgang deutet darauf hin, dass sich die Proben der drei Datensätze im Zuge der wiederholten Waschbeanspruchung zunehmend uneinheitlich verhielten, was die Aussagekraft des dortigen Mittelwerts entsprechend einschränkt.

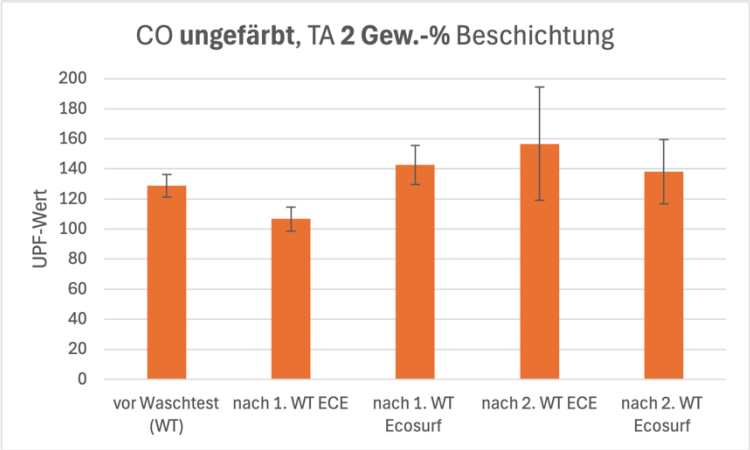


Abb. 17: UPF-Werte ungefärbter Baumwollproben nach Beschichtung mit 2 Gew.-% Tanninsäure vor und nach den Waschtests mit ECE- und Ecosurf-Waschmittel. Dargestellt sind Mittelwerte aus drei Datensätzen; die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung (n=3).

Für die mit 10 Gew.-% Tanninsäure beschichtete Baumwolle liegen nur Werte aus einem Datensatz vor. Der UPF-Wert betrug vor dem Waschen 153. Nach dem ersten Waschtest mit ECE wurde ein Wert von 131 gemessen, nach dem zweiten Waschtest stieg der Wert auf 160 (siehe Abb. 18). Bei Ecosurf lag der UPF-Wert nach dem ersten Waschtest sogar bei 185 und nach dem zweiten Waschtest bei 157 (siehe Abb. 19). Auch hier zeigt sich somit keine eindeutige Abnahme der UV-Schutzwirkung durch das Waschen. Aufgrund des fehlenden Wiederholungsdatensatzes sollte dieses Ergebnis jedoch nicht überbewertet werden, sondern vor allem als Tendenz verstanden werden.

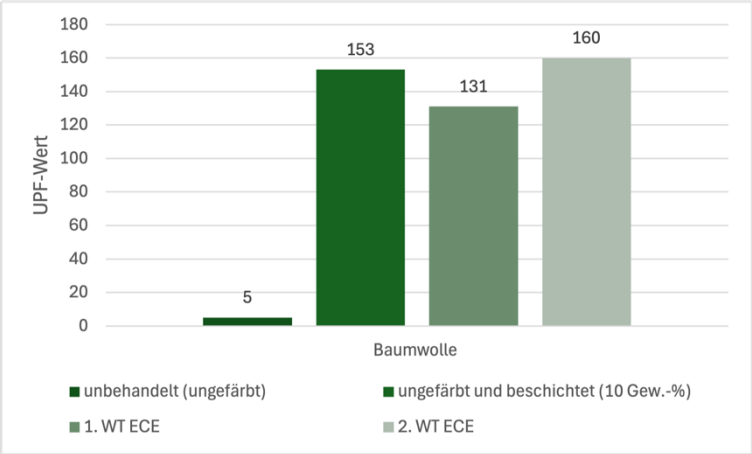


Abb. 18: UPF-Werte der mit TA 10 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE.

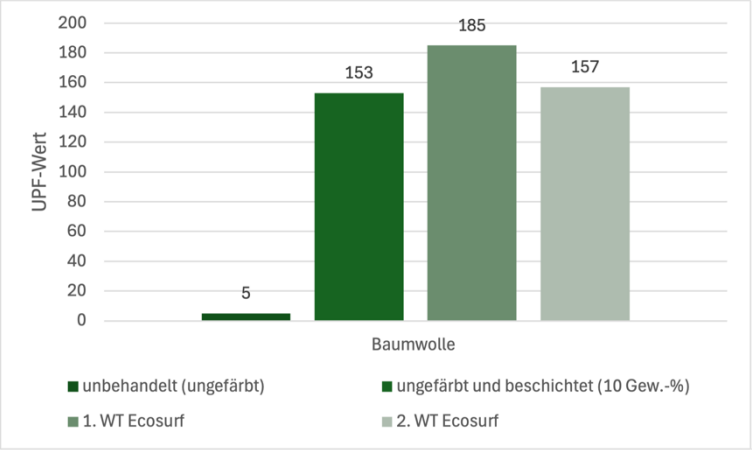


Abb. 19: UPF-Werte der mit TA 10 Gew.-% beschichteten ungefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf.

Die schwankenden UPF-Werte nach den Waschtests lassen sich nicht eindeutig auf eine einzelne Ursache zurückführen. Eine reine Alterung der Taninnsäurebeschichtung erscheint auf Grundlage der Beobachtungen nicht als alleinige Erklärung, da bei zeitversetzt gemessenen Proben keine Veränderung des UPF-Wertes allein durch die Lagerzeit festgestellt wurde. Wahrscheinlicher ist ein Zusammenspiel mehrerer Einflussfaktoren. Zum einen können während des Waschens Beschichtungsbestandteile teilweise entfernt, gelöst oder innerhalb der textilen Struktur umverteilt werden. Zum anderen kann das Waschen selbst zu einer Veränderung des Gewebes führen, etwa durch Verdichtung, leichte Schrumpfung oder veränderte Faserlage. Eine solche Verdichtung kann die UV-Transmission verringern und dadurch trotz teilweiser Beschichtungsablösung zu gleichbleibenden oder sogar höheren UPF-Werten führen. Zusätzlich ist zu berücksichtigen,

dass die Waschtests im Becherglas durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 3.9) und die mechanische Beanspruchung sowie der Kontakt zwischen Probe, Waschflotte und Gefäß nicht vollständig homogen waren. Auch kleine Unterschiede in der Messstelle, Faltenbildung oder lokale Unregelmäßigkeiten der Beschichtung können sich daher auf die UPF-Werte auswirken.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der ungefärbten Baumwollproben, dass eine reine Tanninssäurebeschichtung den UV-Schutz von Baumwolle sehr deutlich erhöhen kann. Bereits eine Konzentration von 0,3 Gew.-% führte zu einer starken Verbesserung des UPF-Wertes. Die Beschichtung mit 2-Gew.-% zeigte im Vergleich dazu eine etwas höhere und nach den Waschtests insgesamt stabilere Schutzwirkung. Die Konzentration von 10 Gew.-% erreichte zwar den höchsten Ausgangswert, brachte gegenüber 2 Gew.-% jedoch nur eine begrenzte zusätzliche Steigerung und war zugleich mit einer stärkeren farblichen Veränderung sowie einem höheren Materialeinsatz verbunden. Für die weitere Bewertung der reinen Tanninsäurebeschichtung sind daher insbesondere die Konzentrationen 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% relevant.

Im Vergleich zur Baumwolle fiel die Wirkung der reinen Tanninsäurebeschichtung auf ungefärbtem Polyester deutlich geringer aus. Visuell war lediglich ein sehr schwacher Gelbstich erkennbar, der vor allem bei Überlappung der Proben oder auf weißem Hintergrund auffiel (siehe Abb. 20). Auch hier nahm die leichte Farbveränderung tendenziell mit steigender Tanninsäurekonzentration zu, blieb jedoch insgesamt wesentlich unauffälliger als bei Baumwolle. Besonders bei der niedrigsten Konzentration war kaum ein Unterschied zum unbehandelten Polyester sichtbar.



Abb. 20: Visuelle Erscheinung ungefärbter Polyesterproben nach der Beschichtung mit reiner Tanninsäure in unterschiedlichen Konzentrationen.
0,3 Gew.-% (links), 2 Gew.-% (Mitte) und 10 Gew.-% (rechts).

Auch die UPF-Werte bestätigen die deutlich geringere Wirkung auf Polyester. Der unbehandelte und ungefärbte Polyester wies einen UPF-Wert von 12 auf. Nach der Beschichtung mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure stieg der Wert auf 18, bei 2 Gew.-% auf 21 und bei 10 Gew.-% auf 20 (siehe Abb. 21). Damit wurde zwar eine leichte Erhöhung des UV-Schutzes erreicht, die Steigerung blieb jedoch im Vergleich zur Baumwolle sehr gering. Zudem zeigte sich kein klarer weiterer Anstieg bei der höchsten Konzentration. Aufgrund dieser geringen Verbesserung wurde für Polyester nur ein Datensatz durchgeführt (vgl. Kapitel 3.6). Auf zusätzliche Waschtests wurde verzichtet, da der Fokus im weiteren Verlauf auf die deutlich wirksamere Beschichtung der Baumwolle gelegt wurde. Aus demselben Grund wurde die reine Tanninsäurebeschichtung bei Polyester nur an ungefärbten Proben untersucht und nicht zusätzlich auf gefärbte Polyesterproben übertragen.

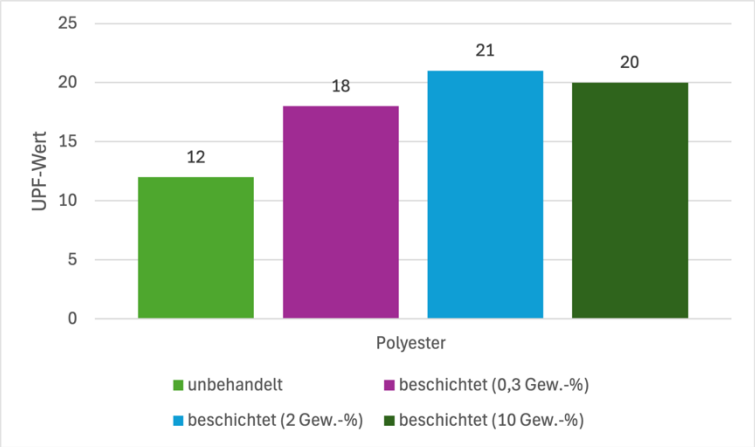


Abb. 21: UPF-Werte ungefärbter Polyesterproben nach der Beschichtung mit reiner Tanninsäure in unterschiedlichen Konzentrationen; die Werte basieren auf einem Datensatz.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich zwischen Baumwolle und Polyester, dass die reine Tanninsäurebeschichtung auf Baumwolle wesentlich effektiver war. Während Baumwolle bereits bei niedriger Tanninsäurekonzentration eine sehr starke Erhöhung des UPF-Wertes zeigte, blieb die Verbesserung bei Polyester gering. Die Ergebnisse deuten daher darauf hin, dass die Wirksamkeit der reinen Tanninsäurebeschichtung stark vom Fasermaterial abhängig ist. Ein naheliegender Erklärungsansatz liegt in der unterschiedlichen chemischen Zugänglichkeit der beiden Faseroberflächen. Baumwolle verfügt als Cellulosefaser über zahlreiche Hydroxylgruppen, die Wasserstoffbrückenbindungen und andere Wechselwirkungen mit den phenolischen Gruppen der Tanninsäure begünstigen, während die hydrophobere und chemisch reaktionsträgere Oberfläche von Polyester deutlich weniger Anknüpfungspunkte für eine vergleichbare Anlagerung bietet (vgl. Kapitel 3.1.1). Für die weiteren Untersuchungen und die Bewertung der Waschbeständigkeit ist insbesondere die ungefärbte Baumwolle relevant, da hier sowohl die stärkste UV-Schutzwirkung als auch mehrere Datensätze zur besseren Vergleichbarkeit vorliegen.

4.2.2 Gefärbte Proben

Aufbauend auf den Ergebnissen der ungefärbten Baumwollproben wurde die Beschichtung mit reiner Tanninsäure anschließend auch an gefärbten Baumwollproben untersucht. Da Polyester bei den ungefärbten Proben nur eine geringe Verbesserung der UPF-Werte zeigte, wurde die Versuchsreihe mit gefärbten Proben auf Baumwolle beschränkt. Für die Konzentrationen 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-%

wurden auch hier jeweils drei Datensätze aufgenommen, sodass die in den Diagrammen dargestellten Werte Mittelwerte darstellen. Die Beschichtung mit 10 Gew.-% wurde ebenso wie bei den ungefärbten Proben ergänzend durchgeführt, beruht jedoch nur auf einem Datensatz und ist daher zurückhaltender zu bewerten.

Visuell führte die Tanninsäurebeschichtung bei den gefärbten Baumwollproben nur zu einer geringen Veränderung (siehe Abb. 22 und 23). Während die farbliche Veränderung bei den ungefärbten Proben durch den Übergang von Weiß zu Creme deutlich sichtbar war, fiel sie bei den bereits pink gefärbten Proben wesentlich weniger auf. Mit steigender Tanninsäurekonzentration war jedoch eine leichte Verdunkelung der Proben erkennbar. Insgesamt blieb der optische Unterschied zwischen der unbehandelten gefärbten Baumwolle und den beschichteten Proben jedoch vergleichsweise gering.

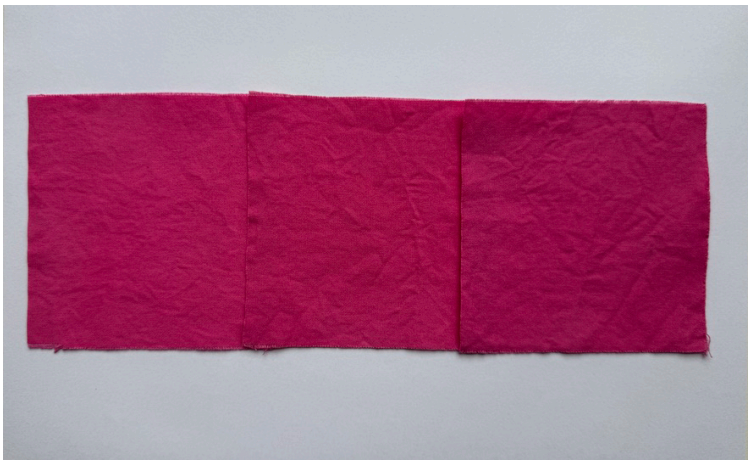


Abb. 22: Visuelle Erscheinung gefärbter Baumwollproben vor und nach der Beschichtung mit Tanninsäure.
Gefärbte Baumwolle unbehandelt (links), Baumwolle mit TA 0,3 Gew.-% (Mitte), Baumwolle mit TA 2 Gew.-% (rechts).



Abb. 23: Visuelle Erscheinung gefärbter Baumwollproben nach der Beschichtung mit Tanninsäure.
Baumwolle mit TA 0,3 Gew.-% (links), Baumwolle mit TA 2 Gew.-% (Mit-te), Baumwolle mit TA 10 Gew.-% (rechts).

Das UV/Vis-Remissionsspektrum bestätigt diesen visuellen Eindruck (siehe Abb. 24). Die Kurven der gefärbten Baumwolle vor der Beschichtung und nach der Behandlung mit 2 Gew.-% Tanninsäure verlaufen über weite Bereiche sehr ähnlich und liegen nahezu übereinander. Im Vergleich zu den ungefärbten Baumwollproben tritt die zusätzliche Tanninsäurebeschichtung bei den gefärbten Proben in dieser Versuchsreihe damit optisch deutlich weniger hervor. Die intensive Pinkfärbung der Ausgangsprobe überdeckt den leichten Eigenfarbton der Tanninsäure weitgehend, sodass sich die Beschichtung im Remissionsspektrum nur durch geringe Abweichungen zeigt. Somit unterstützt die Messung die Beobachtung, dass die Tanninsäurebehandlung bei gefärbter Baumwolle einen wesentlich schwächeren farblichen Einfluss hatte.

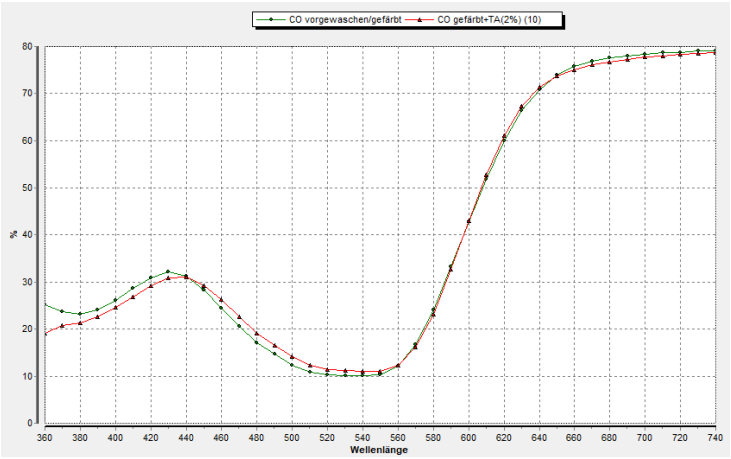


Abb. 24: UV/Vis-Remissionsspektrum gefärbter Baumwollproben vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit 2 Gew.-% Tanninsäure (rot).

Trotz der nur geringen visuellen Veränderung zeigte sich bei den UPF-Werten eine deutliche Verbesserung der UV-Schutzwirkung. Die unbehandelte gefärbte Baumwolle erreichte bereits einen UPF-Wert von 55 und lag damit deutlich über dem Wert der ungefärbten unbehandelten Baumwolle. Dies zeigt, dass die Färbung selbst bereits wesentlich zur Erhöhung des UV-Schutzes beitrug. Durch die zusätzliche Beschichtung mit Tanninsäure konnte der UPF-Wert weiter gesteigert werden. Bei einer Konzentration von 0,3 Gew.-% wurde ein gemittelter UPF-Wert von 158 erreicht, bei 2 Gew.-% ein Wert von 234. Die mit 10 Gew.-% beschichtete Probe erreichte einen UPF-Wert von 259 (siehe Abb. 25). Auch bei den gefärbten Baumwollproben zeigt sich damit ein konzentrationsabhängiger Anstieg der UPF-Werte, wobei der größte zusätzliche Effekt zwischen der unbehandelten gefärbten Probe und der mit 0,3 Gew.-% beschichteten Probe auftrat.

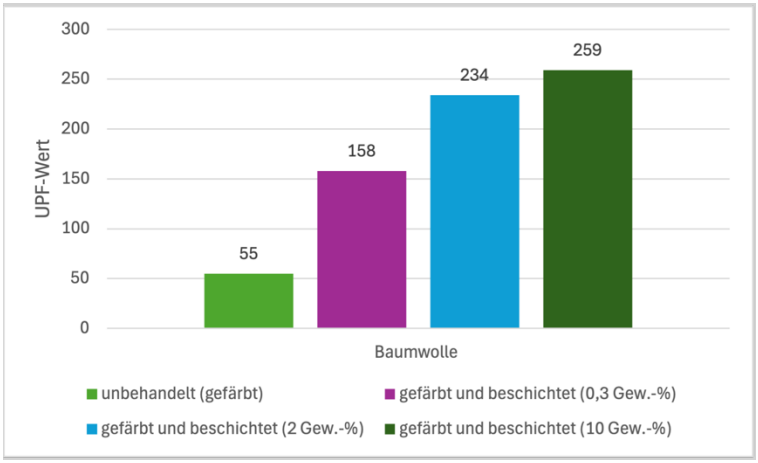


Abb. 25: UPF-Werte gefärbter Baumwollproben nach der Beschichtung mit reiner Tanninsäure in unterschiedlichen Konzentrationen.
Für 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% sind Mittelwerte aus drei Datensätzen dargestellt; der Wert für 10 Gew.-% basiert auf einem Datensatz.

Da nun sowohl für ungefärbte (vgl. Kapitel 4.2.1) als auch für gefärbte Proben Mittelwerte aus drei Datensätzen für die Konzentrationen 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% vorliegen, lassen sich diese in einer gemeinsamen Darstellung mit Standardabweichung direkt gegenüberstellen. Abbildung 26 zeigt die UPF-Werte von ungefärbtem und gefärbtem Baumwollgewebe jeweils vor der Wäsche im Vergleich. Die Darstellung verdeutlicht, dass die Färbung bei beiden Konzentrationen einen deutlichen zusätzlichen Ausgangsvorteil verschafft. Die Fehlerbalken der gefärbten Proben, insbesondere bei 2 Gew.-% mit einer Standardabweichung

von knapp 40 UPF-Einheiten, lassen jedoch auch eine größere Streuung zwischen den Datensätzen erkennen als bei den ungefärbten Proben.

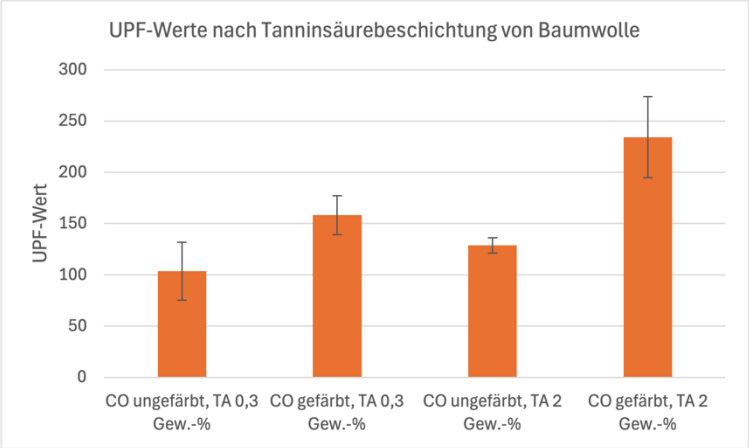


Abb. 26: UPF-Werte von ungefärbtem und gefärbtem Baumwollgewebe nach Beschichtung mit 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-% Tanninsäure.
Dargestellt sind Mittelwerte aus drei Datensätzen und die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung (n=3).

Nach den Waschtests waren auch bei den gefärbten Proben nur geringe farbliche Veränderungen sichtbar (siehe Abb. 27). Tendenziell erschienen die mit ECE gewaschenen Proben etwas dunkler als die mit Ecosurf behandelten Proben. Dieser Effekt war bei höherer Tanninsäurekonzentration leicht stärker ausgeprägt, blieb durch die vorhandene Färbung jedoch deutlich weniger auffällig als bei den ungefärbten Baumwollproben.

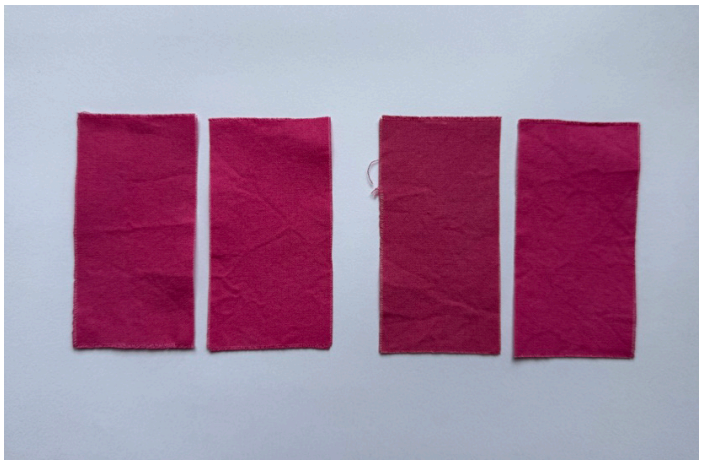


Abb. 27: Visuelle Erscheinung TA-beschichteter Baumwollproben nach zwei Waschtests.
TA 0,3 Gew.-% nach ECE-Waschtests (links), TA 0,3 Gew.-% nach Ecosurf-Waschtests (Mitte links), TA 2 Gew.-% nach ECE-Waschtests (Mitte rechts), TA 2 Gew.-% nach Ecosurf-Waschtests (rechts).

Bei der mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure beschichteten gefärbten Baumwolle sank der UPF-Wert nach dem ersten Waschtest mit ECE von 158 auf 107 und nach dem zweiten Waschtest weiter auf 97 (siehe Abb. 28). Die Schutzwirkung nahm durch die Waschbeanspruchung zwar ab, blieb jedoch weiterhin deutlich über dem Ausgangswert der unbehandelten gefärbten Baumwolle von 55. Bei den Waschtests mit Ecosurf war der Rückgang geringer ausgeprägt. Nach dem ersten Waschtest wurde ein UPF-Wert von 124 gemessen, nach dem zweiten Waschtest stieg der Wert wieder auf 139 an (siehe Abb. 29). Somit blieb die UV-Schutzwirkung bei der Waschbehandlung mit Ecosurf näher am Ausgangswert der beschichteten Probe als bei ECE.

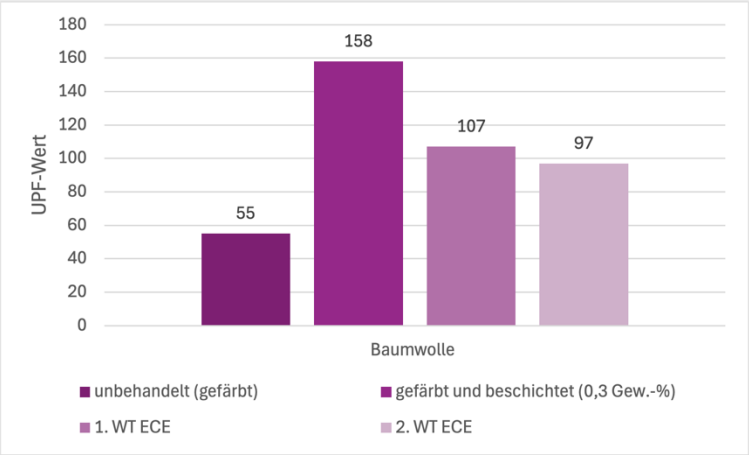


Abb. 28: UPF-Werte der mit TA 0,3 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE.

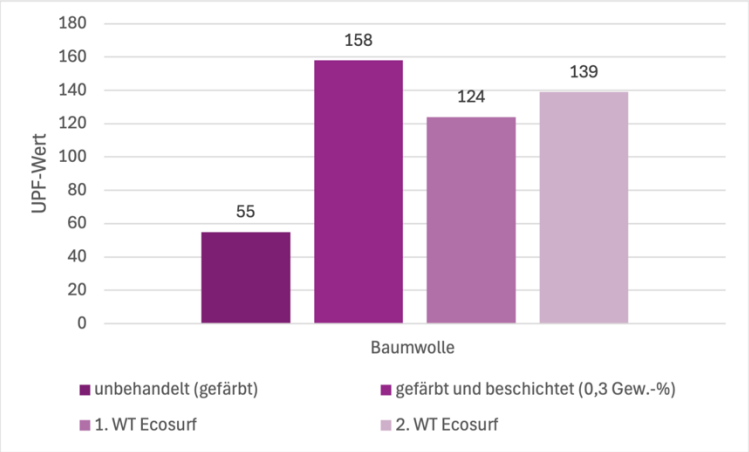


Abb. 29: UPF-Werte der mit TA 0,3 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf.

Auch hier lohnt sich der Blick auf die Streuung der zugrunde liegenden Datensätze. Abbildung 30 stellt die Mittelwerte der 0,3 Gew.-%-Beschichtung vor und

nach beiden Waschverfahren mit Fehlerbalken dar. Die Standardabweichungen bewegen sich zwischen rund 15 und 24 UPF-Einheiten und fallen damit etwas geringer aus als bei der ungefärbten 0,3 Gew.-%-Variante (vgl. Kapitel 4.2.1), was für eine etwas gleichmäßigere Beschichtung auf der bereits gefärbten Faseroberfläche sprechen könnte.

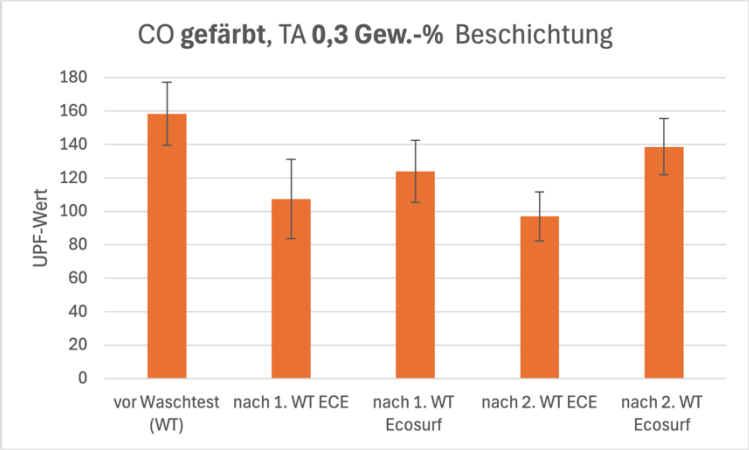


Abb. 30: UPF-Werte gefärbter Baumwollproben nach Beschichtung mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure vor und nach den Waschtests mit ECE- und Ecosurf-Waschmittel. Dargestellt sind Mittelwerte aus drei Datensätzen; die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung (n=3).

Für die mit 2 Gew.-% Tanninsäure beschichtete gefärbte Baumwolle wurde vor dem Waschen ein gemittelter UPF-Wert von 234 ermittelt. Nach dem ersten Waschtest mit ECE sank der Wert auf 187 und blieb nach dem zweiten Waschtest mit 185 nahezu konstant (siehe Abb. 31). Bei Ecosurf zeigte sich zunächst ein Anstieg auf 259 nach dem ersten Waschtest, während nach dem zweiten Waschtest ein Wert von 202 gemessen wurde (siehe Abb. 32). Trotz dieser Schwankungen lagen alle Werte weiterhin deutlich über dem Ausgangswert der unbehandelten gefärbten Baumwolle. Die Beschichtung mit 2 Gew.-% zeigte damit auch nach Waschbeanspruchung eine hohe UV-Schutzwirkung.

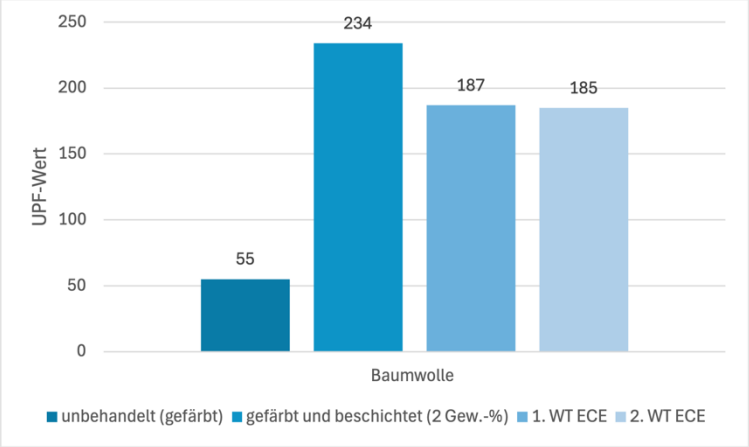


Abb. 31: UPF-Werte der mit TA 2 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE.

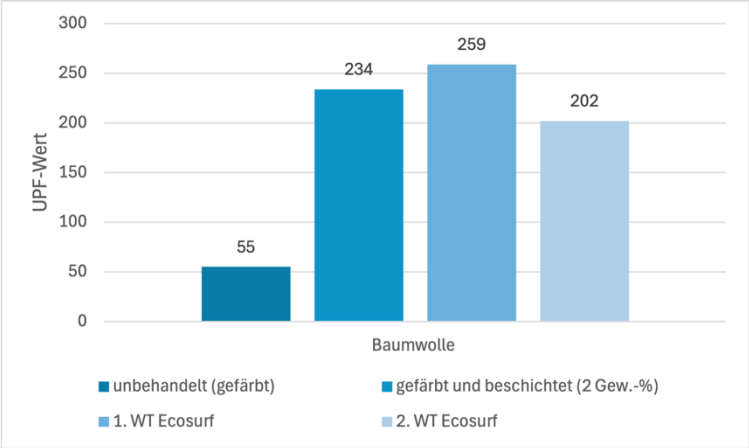


Abb. 32: UPF-Werte der mit TA 2 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf.

Für die 2 Gew.-%-Beschichtung fällt die Streuung der gefärbten Proben insgesamt am größten aus. Die entsprechenden Mittelwerte mit Fehlerbalken sind in Abbildung 33 zu sehen. Die Standardabweichung liegt vor der Wäsche knapp bei 40 und nach dem ersten Waschtest mit Ecosurf sogar bei rund 51 UPF-Einheiten. Diese vergleichsweise große Streuung bestätigt, dass die Einzelwerte der Datensätze bei dieser Versuchsreihe stark variierten und mahnt zur Zurückhaltung bei der Interpretation der einzelnen Mittelwerte.

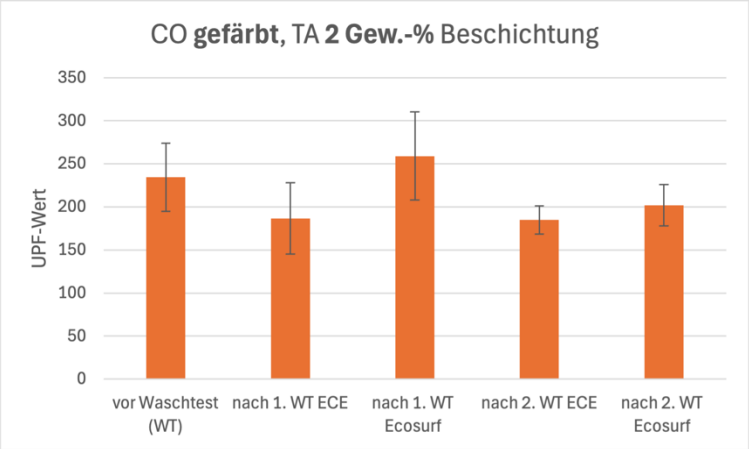


Abb. 33: UPF-Werte gefärbter Baumwollproben nach Beschichtung mit 2 Gew.-% Tanninsäure vor und nach den Waschtests mit ECE- und Ecosurf-Waschmittel. Dargestellt sind Mittelwerte aus drei Datensätzen; die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung (n=3).

Die mit 10 Gew.-% Tanninsäure beschichtete gefärbte Baumwollprobe erreichte vor dem Waschen einen UPF-Wert von 259. Nach dem ersten Waschtest mit ECE sank der Wert auf 223 und nach dem zweiten Waschtest auf 201 (siehe Abb. 34). Bei Ecosurf wurde nach dem ersten Waschtest ein UPF-Wert von 298 gemessen, nach dem zweiten Waschtest lag der Wert bei 242 (siehe Abb. 35). Auch hier blieb die Schutzwirkung nach dem Waschen auf einem hohen Niveau. Da für diese Konzentration jedoch nur ein Datensatz vorliegt, dienen die Werte vor allem als ergänzende Orientierung und sollten nicht im gleichen Umfang bewertet werden wie die Mittelwerte der Konzentrationen 0,3 Gew.-% und 2 Gew.-%.

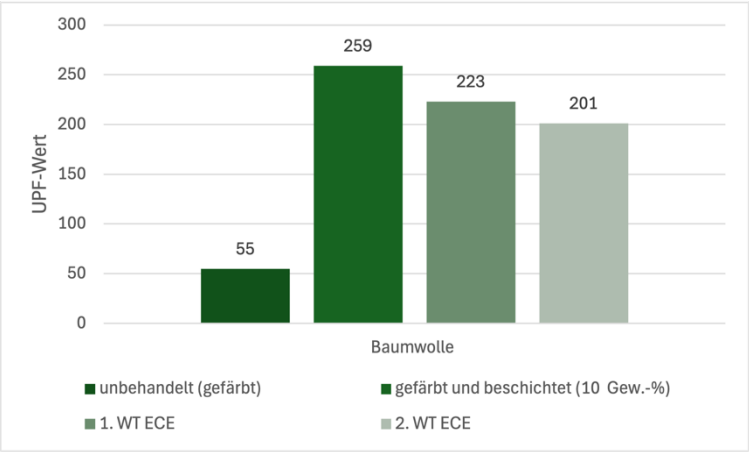


Abb. 34: UPF-Werte der mit TA 10 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE.

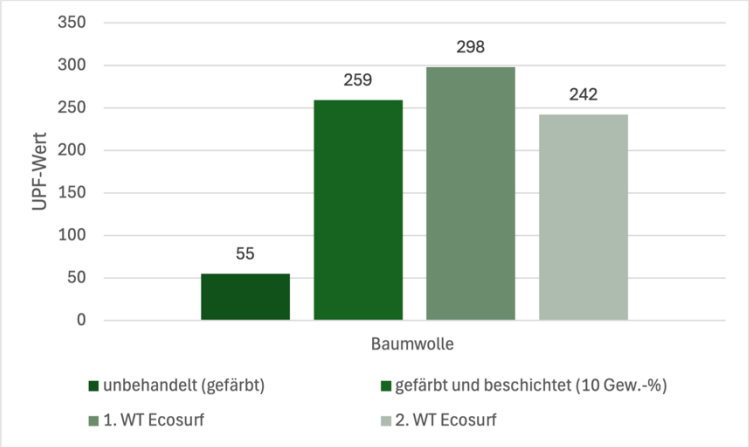


Abb. 35: UPF-Werte der mit TA 10 Gew.-% beschichteten gefärbten Baumwolle nach dem ersten und zweiten Waschtest mit Ecosurf.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Tanninsäurebeschichtung auch bei gefärbter Baumwolle eine deutliche zusätzliche Verbesserung des UV-Schutzes bewirkte. Die Färbung erhöhte den UPF-Wert bereits ohne Beschichtung auf 55, während durch die anschließende Behandlung mit Tanninsäure Werte von 158 bis 259 erreicht wurden. Im Vergleich zur 0,3 Gew.-%-Beschichtung zeigte die Konzentration von 2 Gew.-% höhere UPF-Werte und blieb auch nach den Waschtests insgesamt auf einem hohen Niveau. Die 10 Gew.-%-Beschichtung führte zwar ebenfalls zu sehr hohen Werten, wurde jedoch nur einmal durchgeführt und ist daher weniger belastbar.

Die nach den Waschtests auftretenden Schwankungen zeigen, dass die Waschbeanspruchung nicht ausschließlich zu einer gleichmäßigen Abnahme der UPF-Werte führte. Neben einer möglichen teilweisen Entfernung der Beschichtung können, wie bereits bei den ungefärbten Proben diskutiert (vgl. Kapitel 4.2.1), Veränderungen der Gewebestruktur, Faserumlagerungen oder lokale Unterschiede der Beschichtungsverteilung Einfluss auf die UV-Transmission haben. Für die Bewertung ist daher vor allem relevant, dass die UPF-Werte der beschichteten gefärbten Baumwollproben auch nach den Waschtests deutlich über dem Wert der unbehandelten gefärbten Baumwolle lagen. Besonders die Beschichtung mit 2 Gew.-% Tanninsäure erwies sich unter Berücksichtigung der Schutzwirkung, der Wiederholungsdatensätze und des Materialeinsatzes als geeignete Variante für gefärbte Baumwolle.

4.3 Tanninsäure in Kombination mit Eisenverbindungen

Die Durchführung der Beschichtungen mit Eisen(III)-chlorid und Eisen(II)-sulfat ist Kapitel 3.7 zu entnehmen. Im Folgenden werden die dabei beobachteten optischen Veränderungen sowie die gemessenen UPF-Werte dargestellt und diskutiert.

4.3.1 Tanninsäure-Lösung mit Eisen(III)-chlorid

Schon unmittelbar nach der Beschichtung ließ sich eine ausgeprägte Farbveränderung der Proben feststellen. Die Baumwollprobe zeigte eine dunkle, violett- bis fliederfarbene und leicht gräuliche Verfärbung, während die Polyesterprobe heller, unregelmäßiger und fleckiger erschien (siehe Abb. 36). Die stärkere Farbveränderung der Baumwollprobe deutet darauf hin, dass die Ausbildung des Tanninsäure-Eisen-Komplexes auf Baumwolle ausgeprägter erfolgte als auf Polyester.

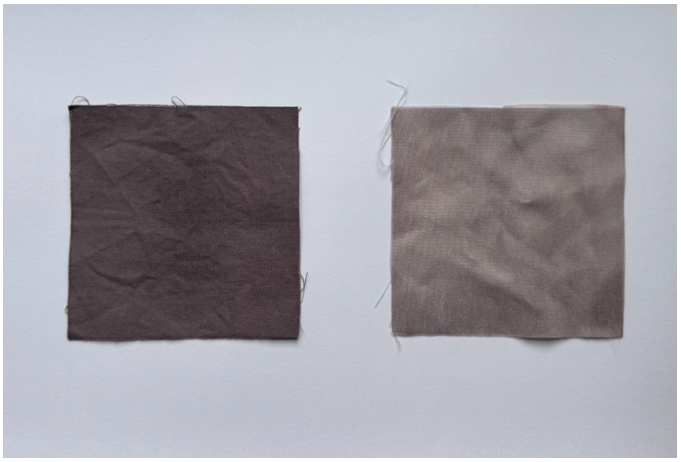


Abb. 36: Ungefärbte Baumwoll- und Polyesterproben nach Beschichtung mit Tanninsäure und Eisen(III)-chlorid; Baumwolle (links) und Polyester (rechts).

Die Beschichtung mit Tanninsäure und Eisen(III)-chlorid hat somit einen starken Einfluss auf das visuelle Erscheinungsbild der Proben. Aufgrund dieser deutlichen und teilweise ungleichmäßigen optischen Veränderung wurde der Versuchsansatz im Rahmen dieser Arbeit zunächst nicht weiter auf gefärbte Proben übertragen. Zudem wurde unter Berücksichtigung der begrenzten Bearbeitungszeit auf weitere Wiederholungen sowie auf anschließende Waschtests verzichtet. Für einen möglichen Einsatz im Bereich der Bekleidung bleibt die beobachtete Farbveränderung dennoch relevant, da die Beschichtung nicht nur die UV-

Schutzwirkung, sondern auch das visuelle Erscheinungsbild des Textils deutlich beeinflusst.

Auch anhand der UPF-Werte lässt sich die Wirksamkeit dieser Kombination ablesen. Insbesondere bei Baumwolle führte die Beschichtung mit Tanninsäure und Eisen(III)-chlorid zu einer sehr deutlichen Verbesserung des UV-Schutzes. Während die unbehandelte Baumwollprobe lediglich einen UPF-Wert von 5 aufwies, erreichte die beschichtete Baumwollprobe einen UPF-Wert von 214 (siehe Abb. 37). Diese Variante erzielte damit eine sehr hohe Schutzwirkung innerhalb der untersuchten Beschichtungsversuche. Die starke visuelle Veränderung der Baumwollprobe spiegelt sich somit auch in der deutlichen Erhöhung des UPF-Wertes wider. Die deutliche Steigerung des UV-Schutzes bestätigt tendenziell die in Kapitel 2.4.2 beschriebene verstärkende Wirkung von Metall-Tanninsäure-Komplexen (vgl. Sun et al. 2024). Ein direkter quantitativer Vergleich der UPF-Werte ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da sich die dort berichteten Werte auf ein anderes Fasermaterial sowie eine abweichende Versuchsdurchführug beziehen.

Bei Polyester blieb die Verbesserung demgegenüber deutlich schwächer. Der UPF-Wert stieg durch die Beschichtung von 12 auf 24 (siehe Abb. 37). Damit konnte zwar auch bei Polyester eine Erhöhung des UV-Schutzes festgestellt werden, die Wirkung blieb jedoch im Vergleich zur Baumwollprobe deutlich begrenzt. Dies bestätigt den bereits bei der reinen Tanninsäurebeschichtung beobachteten Zusammenhang (vgl. Kapitel 4.2.1), wonach die polyphenolbasierte Beschichtung wesentlich stärker mit der cellulosischen Baumwollfaser wechselwirkt als mit der hydrophoberen Polyesteroberfläche.

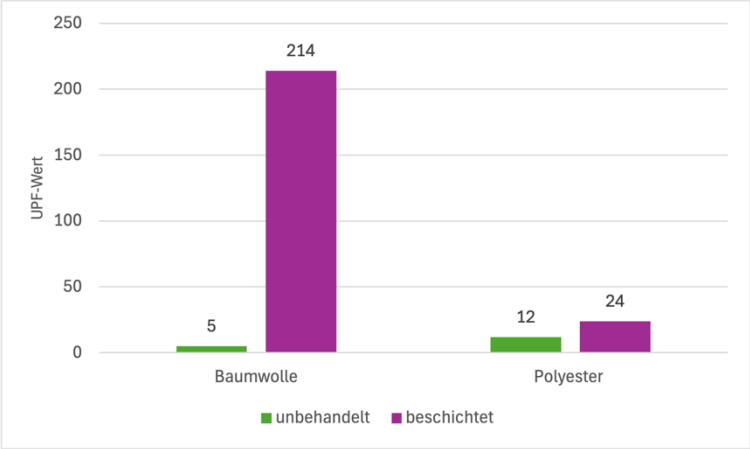


Abb. 37: UPF-Werte der ungefärbten Referenzproben und der mit Tanninsäure/Eisen(III)-chlorid beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben.

Diese Versuchsreihe verdeutlicht, dass die Kombination aus Tanninsäure und Eisen(III)-chlorid besonders auf Baumwolle eine sehr wirksame UV-Schutzbeschichtung ausbilden konnte. Gleichzeitig war die starke Farbveränderung kritisch zu betrachten, da sie die optische Erscheinung des Textils deutlich veränderte und damit die spätere Anwendbarkeit im Bekleidungsbereich beeinflussen kann. Bei Polyester war die optische Veränderung zwar weniger stark ausgeprägt, jedoch fiel auch gleichzeitig die Verbesserung des UPF-Wertes deutlich geringer aus. Da diese Variante aufgrund der ausgeprägten Farbveränderung und der begrenzten Bearbeitungszeit nicht weiter vertieft wurde, lassen sich zur Waschbeständigkeit sowie zur Übertragbarkeit auf gefärbte Proben keine weiterführenden Aussagen treffen.

4.3.2 Tanninsäure-Lösung mit Eisen(II)-sulfat

Bereits im Verlauf der Behandlung zeichnete sich eine deutliche Farbveränderung der Proben ab. Die Baumwollprobe zeigte nach der Beschichtung eine sehr dunkle, violett bis tintenblau wirkende Färbung. Auch die Polyesterprobe verfärbte sich deutlich violett bis dunkelblau, erschien jedoch stellenweise unregelmäßiger und fleckiger als die Baumwollprobe (siehe Abb. 38). Im Vergleich zur Beschichtung mit Eisen(III)-chlorid war die Farbveränderung insgesamt intensiver.

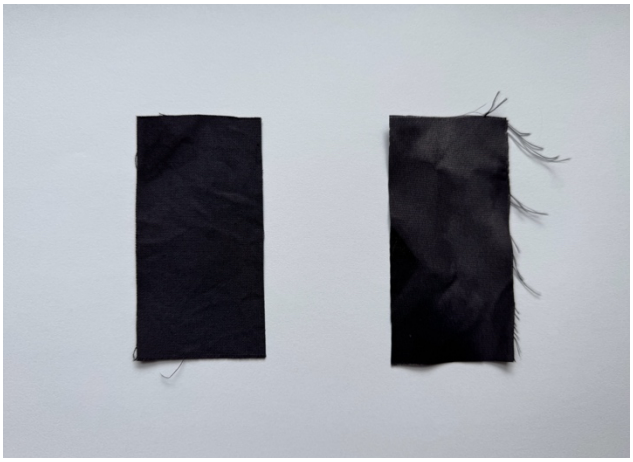


Abb. 38: Ungefärbte Baumwoll- und Polyesterprobe nach Beschichtung mit Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat; Baumwolle (links) und Polyester (rechts).

Auch quantitativ bestätigt sich die starke Wirkung dieser Beschichtung. Vor allem auf Baumwolle steigerte die Kombination aus Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat den UV-Schutz erheblich. Der UPF-Wert der unbehandelten Baumwollprobe lag, wie bereits bekannt ist, bei 5, während die ungefärbte und beschichtete Baumwollprobe einen UPF-Wert von 324 erreichte (siehe Abb. 40). Wie zuvor bei der Eisen(III)-chlorid-Variante eingeordnet (vgl. Kapitel 4.3.1), bestätigt auch dieser noch deutlich höhere UPF-Wert die verstärkende Wirkung von Metallionen auf tanninsäurebasierten Beschichtungen. Auch bei Polyester konnte eine deutliche Verbesserung festgestellt werden. Hier stieg der UPF-Wert von 12 auf 74 (siehe Abb. 40). Damit wirkte die Beschichtung auf beiden Materialien UV-schützend, wobei die Schutzwirkung bei Baumwolle deutlich stärker ausgeprägt war.

Da die Beschichtung mit Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat sowohl hinsichtlich der starken farblichen Veränderung als auch im Hinblick auf die hohen UPF-Werte als vielversprechend erschien, wurde dieser Versuchsansatz zusätzlich auf gefärbte Baumwoll- und Polyesterproben übertragen. Dabei zeigte sich, dass die Beschichtung auch auf den bereits gefärbten Proben eine deutliche dunkle Farbveränderung hervorrief und die ursprüngliche Färbung visuell stark überlagerte. Allerdings ist dieser Effekt bei der Baumwolle wesentlich stärker und regelmäßiger ausgeprägt als bei dem Polyestergewebe (siehe Abb. 39). Die intensive Farbentwicklung deutet darauf hin, dass die Metall-Polyphenol-Komplexbildung nicht nur zur funktionellen Beschichtung, sondern auch zur gezielten Veränderung des visuellen Erscheinungsbildes genutzt werden könnte. Dies ist insbesondere für Anwendungen im Bekleidungsbereich relevant, da eine UV-schützende

Beschichtung die textile Fläche nicht nur funktionell, sondern gegebenenfalls auch gestalterisch beeinflussen kann.



Abb. 39: Gefärbte Baumwoll- und Polyesterproben nach Beschichtung mit Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat; Baumwolle (links) und Polyester (rechts).

Bei den gefärbten Proben lagen die UPF-Werte auf einem ähnlich hohen Niveau wie bei den ungefärbten, beschichteten Proben. Die gefärbte und beschichtete Baumwollprobe erreichte einen UPF-Wert von 331 und lag damit nur minimal über der ungefärbten, beschichteten Baumwollprobe mit einem UPF-Wert von 324 (siehe Abb. 40). Auch bei Polyester war der Unterschied gering. Die gefärbte und beschichtete Polyesterprobe erreichte einen UPF-Wert von 75, während die ungefärbte, beschichtete Polyesterprobe einen UPF-Wert von 74 aufwies (siehe Abb. 40). Daraus lässt sich ableiten, dass die Färbung bei dieser Beschichtungsvariante nur einen geringen zusätzlichen Einfluss auf den UPF-Wert hatte. Der wesentliche Beitrag zur UV-Schutzwirkung scheint hier vor allem durch die Tanninsäure-Eisen(II)-sulfat-Beschichtung selbst zu entstehen.

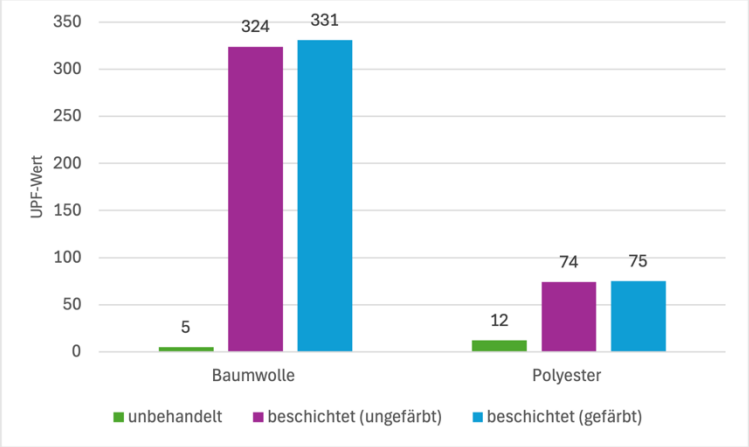


Abb. 40: UPF-Werte der ungefärbten Referenzproben sowie der mit Tanninsäure/Eisen(II)-sulfat beschichteten ungefärbten und gefärbten Baumwoll- und Polyesterproben.

Anschließend wurden die beschichteten Proben einem ersten Waschtest mit ECE-Waschmittel unterzogen (zur Durchführung vgl. Kapitel 3.9). Bei der ungefärbten, beschichteten Baumwollprobe stieg der UPF-Wert nach dem ersten Waschtest von 324 auf 401 (siehe Abb. 41). Auch bei der gefärbten und beschichteten Baumwollprobe zeigte sich eine Erhöhung des UPF-Wertes von 331 auf 423 (siehe Abb. 42). Die Schutzwirkung blieb damit nicht nur erhalten, sondern nahm nach dem Waschtest sogar weiter zu.

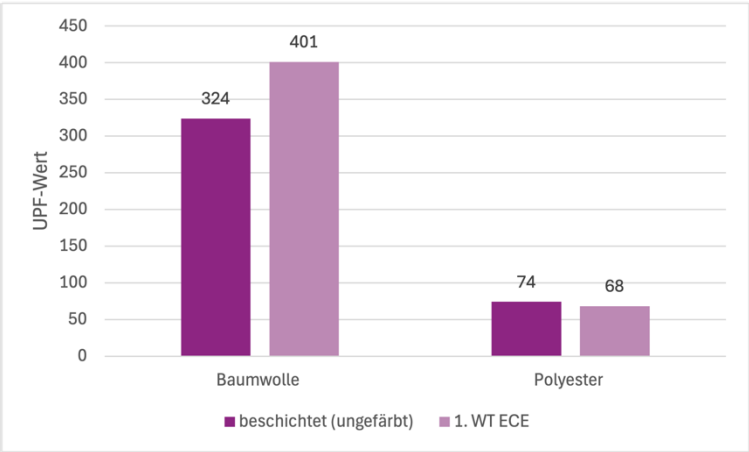


Abb. 41: UPF-Werte der ungefärbten, mit Tanninsäure/Eisen(II)-sulfat beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben vor und nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE.

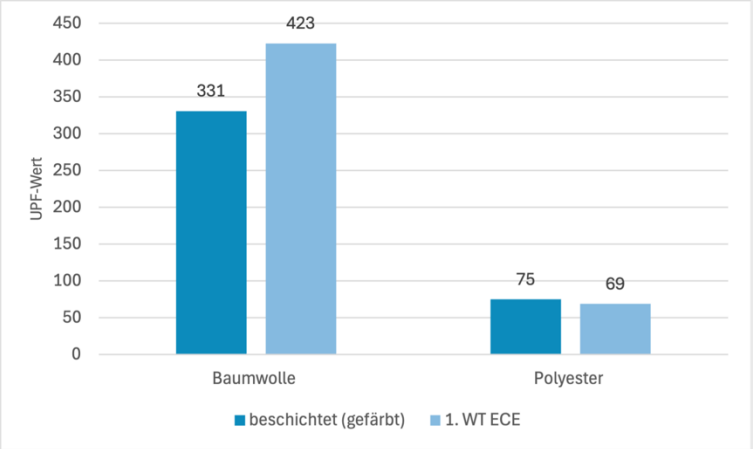


Abb. 42: UPF-Werte der gefärbten, mit Tanninsäure/Eisen(II)-sulfat beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben vor und nach dem ersten und zweiten Waschtest mit ECE.

Diese Erhöhung der UPF-Werte nach dem Waschtest sollte jedoch vorsichtig interpretiert werden. Sie kann nicht ausschließlich auf die Beschichtung zurückgeführt werden. Möglich ist auch bei dieser Versuchsreihe, dass zusätzlich strukturelle Veränderungen des Baumwollgewebes, wie eine Verdichtung oder ein verändertes Warenbild durch die Waschbeanspruchung, zur weiteren Reduktion der UV-Transmission beigetragen haben (vgl. hierzu bereits die Diskussion in Kapitel 4.2.1). Dennoch zeigten die Werte deutlich, dass die Beschichtung auf Baumwolle auch nach dem Waschtest eine sehr hohe UV-Schutzwirkung aufwies.

Bei Polyester fiel die Veränderung nach dem Waschtest geringer aus und zeigte eine leicht abnehmende Tendenz. Die ungefärbte, beschichtete Polyesterprobe sank von einem UPF-Wert von 74 auf 68 (siehe Abb. 41). Die gefärbte und beschichtete Polyesterprobe verringerte sich von 75 auf 69 (siehe Abb. 42). Damit blieb der UV-Schutz auch nach dem Waschtest deutlich höher als bei unbehandeltem Polyester, allerdings war eine minimale Reduktion der Schutzwirkung erkennbar. Dies kann darauf hindeuten, dass durch die Waschbeanspruchung lose oder weniger fest gebundene Bestandteile der Beschichtung teilweise entfernt wurden.

Auch visuell zeigte sich nach dem ersten Waschtest eine Veränderung der beschichteten Proben. Bei der ungefärbten Baumwollprobe blieb die dunkle Färbung weiterhin deutlich erhalten, wirkte nach dem Waschen jedoch weniger blauviolett und stärker gräulich. Die ungefärbte Polyesterprobe zeigte ebenfalls weiterhin eine erkennbare dunkle Verfärbung, wies jedoch zusätzlich kleine

weißliche Punkte auf der Gewebeoberfläche auf (siehe Abb. 43). Diese könnten auf punktuelle Rückstände oder ungleichmäßig angelagerte Bestandteile der Beschichtung hindeuten, die sich nicht vollständig homogen auf der Faseroberfläche verteilt haben. Insgesamt blieb die optische Veränderung nach dem Waschtest jedoch deutlich sichtbar, sodass die Beschichtung nicht vollständig entfernt wurde.

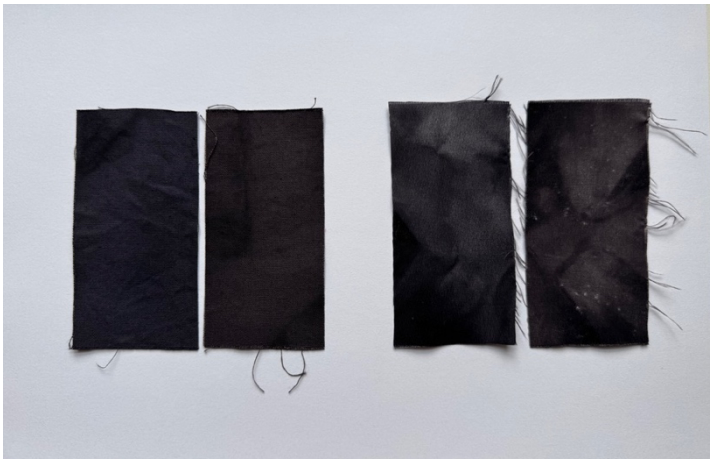


Abb. 43: Ungefärbte, mit Tanninsäure/Eisen(II)-sulfat beschichtete Baumwoll- und Polyesterproben vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE.
Baumwolle vor dem Waschtest (links), Baumwolle nach dem Waschtest (Mitte links), Polyester vor dem Waschtest (Mitte rechts).

Ein ähnliches Verhalten zeigte sich bei den gefärbten und beschichteten Proben. Bei der Baumwollprobe nahm der blau-violette Farbeindruck nach dem Waschtest etwas ab, wodurch die ursprüngliche pinke Färbung der Baumwolle wieder stärker sichtbar wurde. Die Beschichtung blieb jedoch weiterhin deutlich erkennbar und überlagerte den ursprünglichen Farbton weiterhin. Bei Polyester war das Erscheinungsbild bereits vor dem Waschtest unregelmäßiger und die ursprüngliche rote Färbung wurde durch die Beschichtung weniger stark überdeckt als bei der Baumwolle. Nach dem Waschtest waren auch bei dieser Probe vereinzelt kleine helle Punkte auf der Oberfläche sichtbar, ähnlich wie bei der ungefärbten Polyesterprobe (siehe Abb. 44). Abgesehen davon, war visuell keine wesentliche weitere Veränderung zu erkennen.



Abb. 44: Gefärbte, mit Tanninsäure/Eisen(II)-sulfat beschichtete Baumwoll- und Polyesterproben vor und nach dem Waschtest mit ECE.
Baumwolle vor dem Waschtest (links), Baumwolle nach dem Waschtest (Mitte links), Polyester vor dem Waschtest (Mitte rechts), Polyester nach dem Waschtest (rechts).

Die visuellen Beobachtungen stimmen somit weitgehend mit den gemessenen UPF-Werten überein. Die Waschbeanspruchung führte zwar zu leichten optischen Veränderungen, insbesondere zu einer weniger blau-violetten Farbwirkung bei den Baumwollproben und zu punktuellen hellen Rückständen bei Polyester, die Beschichtungen blieben jedoch erkennbar erhalten. Zugleich zeigten die weiterhin hohen UPF-Werte, vor allem bei Baumwolle, dass auch die funktionelle Wirkung nach dem ersten Waschtest in weiten Teilen bestehen blieb.

Innerhalb der tanninsäurebasierten Metallkomplex-Beschichtungen erwies sich die Kombination aus Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat als besonders wirksam für den UV-Schutz. Im Vergleich zur Variante mit Eisen(III)-chlorid wurden bei Baumwolle und Polyester höhere UPF-Werte erreicht. Besonders bei Baumwolle führte die Beschichtung zu sehr hohen UPF-Werten, die auch nach dem Waschtest weitgehend erhalten blieben oder teilweise weiter anstiegen. Gleichzeitig ist die starke Farbveränderung differenziert zu betrachten, da sie das visuelle Erscheinungsbild der Textilien deutlich beeinflusst. Für eine praktische Umsetzung bei Bekleidung muss daher abgewogen werden, ob diese dunkle Farbwirkung gestalterisch gewünscht ist oder die Einsatzmöglichkeit einschränkt.

4.4 Polydopaminbasierte Beschichtungsversuche

Die drei Versuchsvarianten, mit Kontakt zum Rührfisch, ohne Rühren sowie mit Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch, sind hinsichtlich ihrer

Durchführung bereits in Kapitel 3.8 erläutert worden. Die jeweiligen Beobachtungen und Messergebnisse werden im Folgenden für jede Variante einzeln ausgeführt.

4.4.1 PDA-Beschichtung unter Rühren mit Kontakt zum Rührfisch

Sowohl die ungefärbte Baumwoll- als auch Polyesterprobe wiesen nach der PDA-Beschichtung unter konstantem Rühren eine gut sichtbare Farbveränderung auf (siehe Abb. 45). Die Baumwollprobe nahm eine braun-graue bis schlammige Färbung an und erschien überwiegend gleichmäßig beschichtet. Im mittleren Bereich der Probe war jedoch ein deutlich dunklerer, nahezu schwarzer kreisförmiger Fleck erkennbar. Dieser Bereich entsprach der Kontaktstelle zwischen Gewebe und Rührfisch während der Behandlung. Auch bei der Polyesterprobe zeigte sich ein dunkler kreisförmiger Fleck im Kontaktbereich mit dem Rührfisch. Insgesamt war die farbliche Veränderung bei Polyester jedoch weniger intensiv ausgeprägt als bei Baumwolle. Das Gewebe erschien eher hellgrau-braun und wirkte etwas unregelmäßiger.

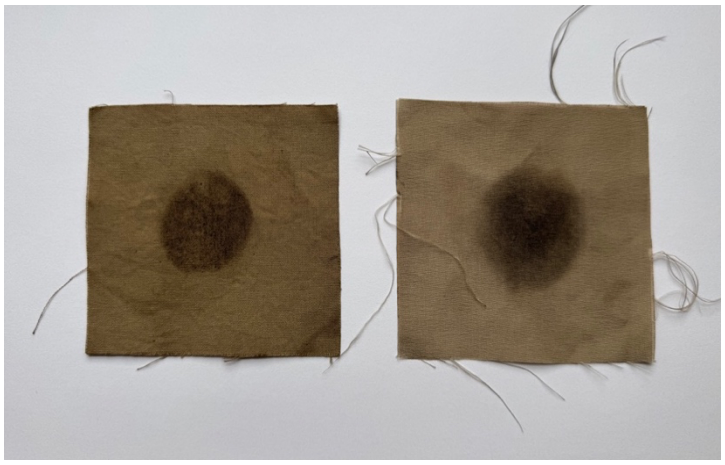


Abb. 45: Ungefärbte Baumwoll- und Polyesterproben nach PDA-Beschichtung unter Rühren mit direktem Kontakt zum Rührfisch; Baumwolle (links) und Polyester (rechts).

Auch in dieser Versuchsreihe spiegelt das UV/Vis-Remissionsspektrum am Beispiel der Baumwollprobe die beobachtete Veränderung durch die PDA-Beschichtung deutlich wider (siehe Abb. 46). Im Vergleich zur unbehandelten Probe liegt die Remission der beschichteten Baumwolle über den gesamten betrachteten Wellenlängenbereich auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Dies weist auf eine wesentlich dunklere Probenoberfläche hin und bestätigt die ausgeprägte

Braunfärbung nach der Behandlung. Da die Messungen außerhalb des sehr dunklen Kontaktflecks durchgeführt wurden, beschreibt das Spektrum die übrige beschichtete Probenfläche und nicht den lokal besonders stark verfärbten Bereich. Die Messung belegt somit, dass bereits außerhalb der direkten Kontaktstelle eine deutliche optische Veränderung durch die PDA-Beschichtung vorlag.

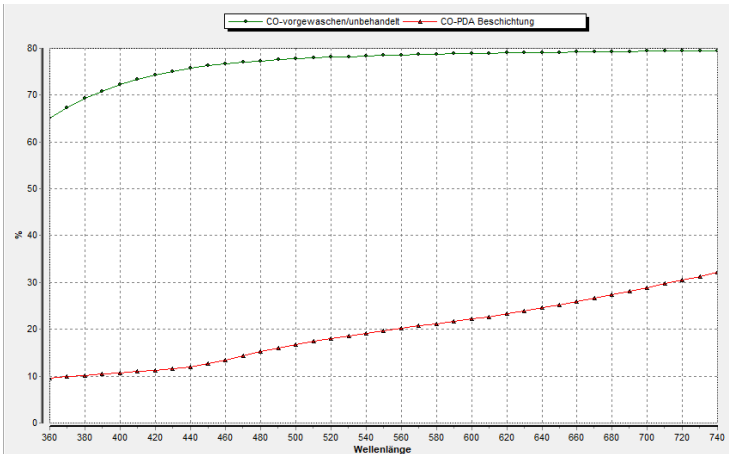


Abb. 46: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Baumwollprobe vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit PDA unter Rühren sowie direktem Kontakt zum Rührfisch (rot).

Der direkte Kontakt zwischen Probe und Rührfisch beeinflusste somit das Erscheinungsbild der Beschichtung lokal deutlich. Zugleich weisen die bestimmten UPF-Werte darauf hin, dass die intensive Flottenbewegung die Ausbildung der PDA-Beschichtung begünstigte. Bei der Bewertung des Remissionsspektrums und der UPF-Werte ist, wie oben erwähnt, zu berücksichtigen, dass die Messungen bei dieser Versuchsreihe jeweils außerhalb des dunklen Kontaktflecks durchgeführt wurden. Die Werte beschreiben daher den UV-Schutz der übrigen beschichteten Probenfläche und nicht den lokal besonders stark verfärbten Kontaktbereich. Im Vergleich zur unbehandelten Baumwollprobe, erreichte die beschichtete Baumwollprobe etwa das 16-fache mit einem UPF-Wert von 81 (siehe Abb. 47). Bei der Baumwolle zeigte sich somit eine deutliche Verbesserung des UV-Schutzes durch die PDA-Beschichtung.

Auch bei Polyester ließ sich eine Erhöhung des UPF-Wertes durch die Beschichtung feststellen und die PDA-beschichtete Polyesterprobe erreichte einen mehr als doppelt so hohen UPF-Wert mit 28 (Abb. 47). Die Steigerung fällt allerdings deutlich geringer aus als bei der Baumwolle. Das deutet, in Übereinstimmung mit den Beobachtungen zur Tanninsäurebeschichtung (vgl. Kapitel 4.2 und 4.3),

erneut darauf hin, dass polyphenol- und katecholbasierte Beschichtungen auf Baumwolle eine stärkere UV-schützende Wirkung erzielen als auf Polyester.

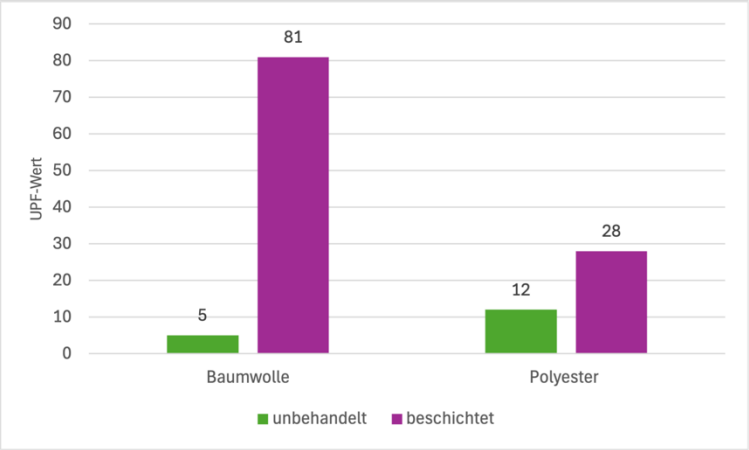


Abb. 47: UPF-Werte der ungefärbten Referenzproben und der PDA-beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben unter Rühren mit direktem Kontakt zum Rührfisch.

Im nächsten Schritt durchliefen die beschichteten Proben Waschtests mit ECE-Referenzwaschmittel und Ecosurf-Tensid, um zu prüfen, wie sich die Schutzwirkung durch die Waschbeanspruchung verändert. Bei der Baumwollprobe blieb der UPF-Wert nach den Waschtests weiterhin auf einem hohen Niveau. Nach dem ersten Waschtest mit ECE stieg der UPF-Wert von 81 auf 101 und nach dem zweiten Waschtest sogar bis auf 110 (siehe Abb. 48). Auch nach dem ersten Waschtest mit Ecosurf wurde mit einem UPF-Wert von 138 zunächst eine weitere Erhöhung gemessen. Nach dem zweiten Waschtest sank dieser Wert allerdings auf 82 und lag damit wieder etwa im Bereich der ungewaschenen beschichteten Probe (siehe Abb. 49).

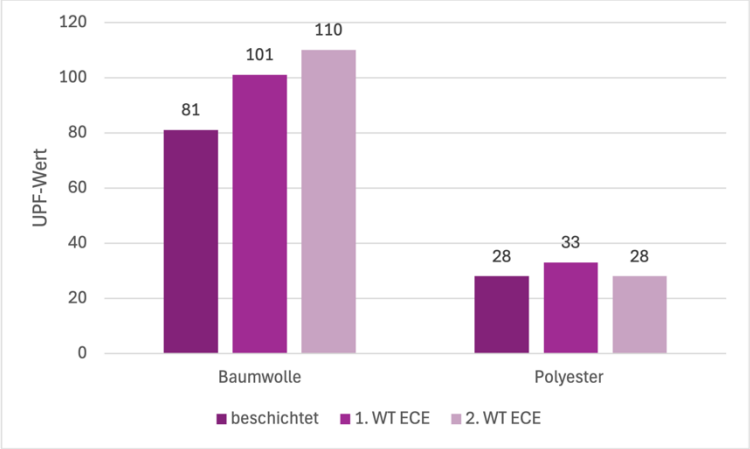


Abb. 48: UPF-Werte der PDA-beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben unter Rühren mit direktem Kontakt zum Rührfisch vor und nach dem ersten sowie zweiten Waschtest mit ECE.

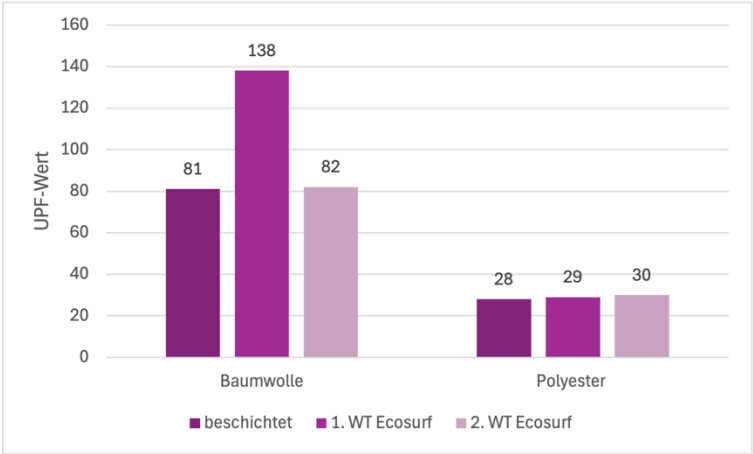


Abb. 49: UPF-Werte der PDA-beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben unter Rühren mit direktem Kontakt zum Rührfisch vor und nach dem ersten sowie zweiten Waschtest mit Ecosurf.

Die Erhöhung der UPF-Werte nach einzelnen Waschtests kann auch bei der polydopaminbasierten Beschichtung nicht ausschließlich auf die PDA-Beschichtung zurückgeführt werden. Möglich ist, wie bereits bei den tanninsäurebasierten Beschichtungen diskutiert (vgl. Kapitel 4.2.1), dass auch Veränderungen der textilen Struktur, etwa ein dichteres Warenbild durch die Waschbeanspruchung, zur verbesserten UV-Barriere beigetragen haben. Dennoch zeigte sich, dass die PDA-beschichtete Baumwollprobe auch nach den Waschtests weiterhin einen deutlich höheren UPF-Wert aufwies als die unbehandelte Baumwolle.

Bei Polyester verändern sich die UPF-Werte durch die Waschtests nur geringfügig. Ausgehend von einem UPF-Wert von 28 nach der Beschichtung lagen die Werte nach dem ersten ECE-Waschtest bei 33, nach dem zweiten ECE-

Waschtest bei 28, nach dem ersten Ecosurf-Waschtest bei 29 und nach dem zweiten Ecosurf-Waschtest bei 30 (siehe Abb. 48 und 49). Damit blieb die Schutzwirkung von Polyester weitgehend stabil, allerdings insgesamt auf einem deutlich niedrigeren Niveau als bei Baumwolle.

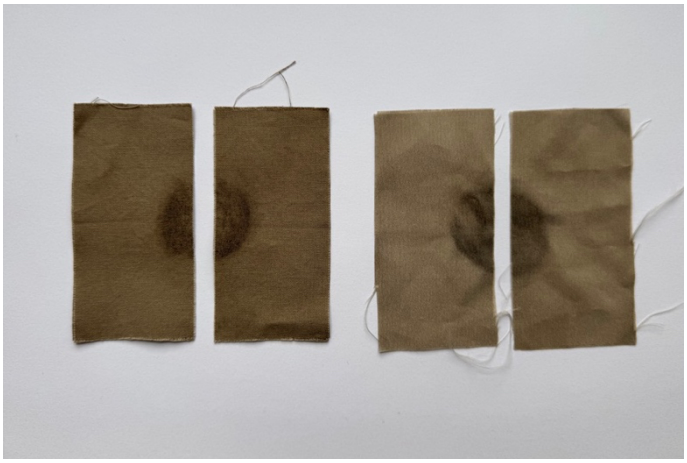


Abb. 50: PDA-beschichtete Baumwoll- und Polyesterproben nach zwei Waschtests. Baumwolle ECE-Waschtests (links), Baumwolle nach Ecosurf-Waschtests (Mitte links), Polyester nach ECE-Waschtests (Mitte rechts) und Polyester nach Eco-surf-Waschtests (rechts).

Visuell verblieb der dunkle kreisförmige Fleck im mittleren Probenbereich auch nach den Waschtests erkennbar (siehe Abb. 50). Dies zeigt, dass die lokale stärkere Ablagerung und die damit verbundene Verfärbung im Kontaktbereich mit dem Rührfisch durch die Waschbeanspruchung nicht entfernt wurde. Die Variante unter Rühren mit direktem Kontakt zum Rührfisch erzielte somit zwar hohe UPF-Werte, führte jedoch zugleich zu einem ungleichmäßigen visuellen Erscheinungsbild.

4.4.2 PDA-Beschichtung ohne Rühren

Aufgrund des deutlich sichtbaren dunklen Flecks im Kontaktbereich zwischen Gewebe und Rührfisch wurde eine weitere PDA-Beschichtung ohne Rühren durchgeführt. Ziel war es, zu prüfen, ob sich durch den Verzicht auf mechanische Bewegung ein gleichmäßigeres visuelles Erscheinungsbild der Proben erzielen lässt.

Im Vergleich zur Beschichtung unter Rühren (vgl. Kapitel 4.4.1) zeigten sowohl die Baumwoll- als auch die Polyesterprobe nach der Behandlung eine deutlich geringere farbliche Veränderung (siehe Abb. 51). Gleichzeitig wirkte das

Erscheinungsbild etwas gleichmäßiger, da keine lokal stark verfärbte Kontaktstelle durch den Rührfisch entstand. Beide Gewebe zeigten jedoch nur eine geringe visuell erkennbare Beschichtung, was auf eine schwächere Ausbildung der Polydopaminschicht oder eine geringere Ablagerung auf der Gewebeoberfläche hinweisen kann.

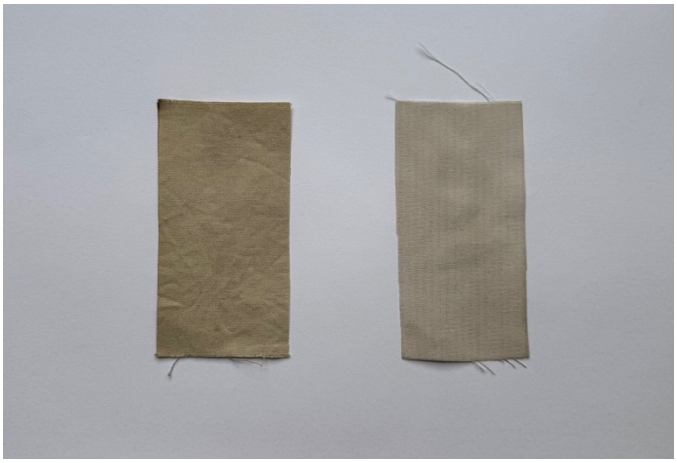


Abb. 51: Ungefärbte Baumwoll- und Polyesterproben nach PDA-Beschichtung ohne Rühren; Baumwolle (links) und Polyester (rechts).

Auch messtechnisch ließ sich diese schwächere Ausprägung nachvollziehen. Der UPF-Wert der Baumwolle stieg durch die Beschichtung zwar auf etwa das Vierfache von 5 auf 22, blieb damit jedoch im Vergleich zur stärker verfärbten Variante unter Rühren geringer (siehe Abb. 52). Bei Polyester stieg der UPF-Wert durch die PDA-Beschichtung ohne Rühren von 12 auf 17 (siehe Abb. 52). Die Verbesserung fiel damit geringer aus als bei der Baumwolle, was darauf hindeuten kann, dass die PDA-Beschichtung unter diesen Bedingungen auf Baumwolle wirksamer zur Erhöhung des UV-Schutzes beigetragen hat als bei Polyester.

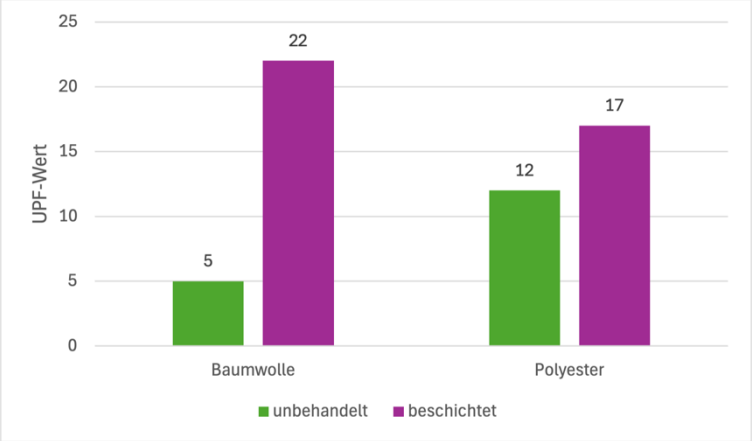


Abb. 52: UPF-Werte der ungefärbten Referenzproben und der PDA-beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben ohne Rühren.

Nach dem Waschtest zeigte sich nur eine geringe Abnahme der UPF-Werte. Bei Baumwolle sank der UPF-Wert von 22 auf 20, während Polyester nach dem Waschen einen UPF-Wert von 15 gegenüber zuvor 17 auswies (siehe Abb. 53). Damit blieb vermutlich ein Teil der durch die Beschichtung erzielten Schutzwirkung auch nach der Waschbeanspruchung erhalten. Zugleich zeigt die leichte Abnahme, dass durch die Waschbeanspruchung wahrscheinlich lose oder weniger fest angelagerte Bestandteile der Beschichtung entfernt wurden.

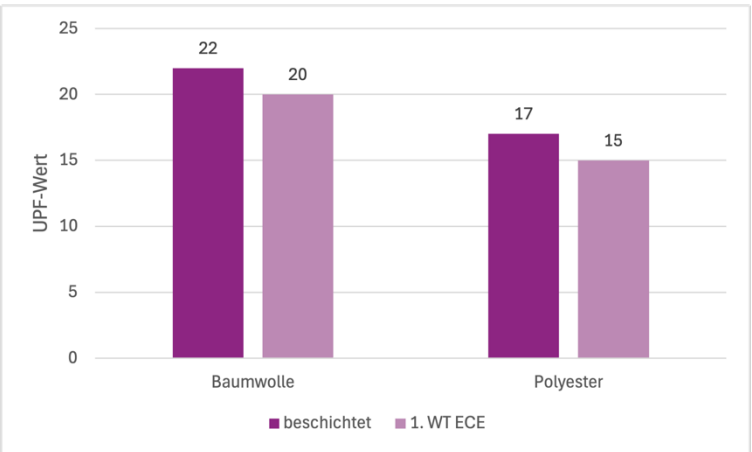


Abb. 53: UPF-Werte der PDA-beschichteten Baumwoll- und Polyesterproben ohne Rühren vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE.

Visuell war nach dem Waschtest dagegen keine Veränderung der Proben erkennbar (siehe Abb. 54). Sowohl bei Baumwolle als auch bei Polyester blieb der helle bräunlich-beige Farbton weitgehend erhalten, sodass die Waschbeanspruchung vor allem anhand der UPF-Werte und weniger anhand der optischen Veränderung nachvollziehbar ist.

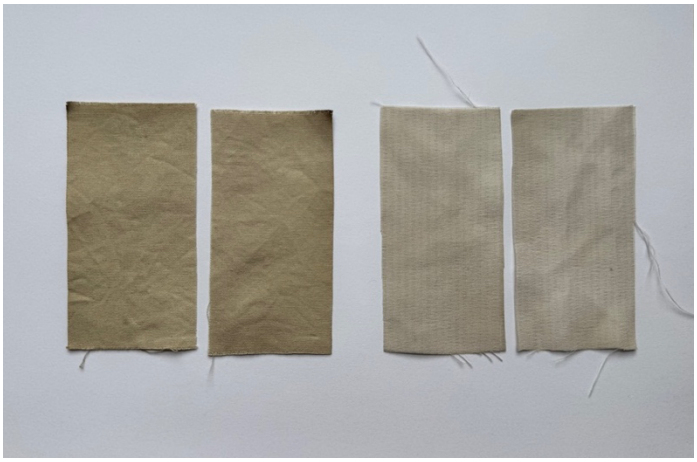


Abb. 54: PDA-beschichtete Baumwoll- und Polyesterproben ohne Rühren vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE.
Baumwolle vor dem Waschtest (links), Baumwolle nach dem Waschtests (Mitte links), Polyester vor dem Waschtest (Mitte rechts), Polyester nach dem Waschtest (rechts).

Die Beschichtung ohne Rühren führt damit zu einem gleichmäßigeren optischen Erscheinungsbild, jedoch auf Kosten einer geringeren UV-schützenden Wirkung im Vergleich zur Beschichtung unter Rühren. Die mechanische Bewegung der Flotte scheint demnach einen relevanten Einfluss auf die Ausbildung und Wirksamkeit der PDA-Beschichtung zu haben. Der Verzicht auf Rühren reduziert zwar lokale Verfärbungen durch den direkten Kontakt mit dem Rührfisch, führt jedoch zugleich zu einer insgesamt schwächeren Beschichtung.

4.4.3 PDA-Beschichtung unter Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch

Auf Grundlage der beiden vorherigen Versuchsvarianten wurde eine weitere PDA-Beschichtung unter konstantem Rühren durchgeführt, bei der jedoch der direkte Kontakt zwischen der Gewebeprobe und dem Rührfisch vermieden wurde. Dadurch sollte der positive Einfluss der Flottenbewegung beibehalten und zugleich die lokale, stark dunkle Verfärbung im Kontaktbereich des Rührfischs reduziert werden.

Diese Versuchsvariante wurde, wie in Kapitel 3.8 beschrieben, nur an Baumwollproben durchgeführt, da die PDA-Beschichtungen auf Polyester in den vorherigen Versuchen nur zu vergleichsweise geringen Steigerungen der UPF-Werte geführt hatten (vgl. Kapitel 4.4.1 und 4.4.2). Nach der Behandlung zeigte die Baumwollprobe erneut eine sichtbare braun-graue Verfärbung (siehe Abb. 55).

Im Vergleich zur Beschichtung ohne Rühren war die Farbaufnahme stärker ausgeprägt, was auf eine intensivere Ausbildung der Polydopaminschicht hindeuten kann. Gleichzeitig wirkte die Oberfläche im Vergleich zur Variante mit direktem Kontakt zum Rührfisch gleichmäßiger, da kein deutlich abgegrenzter dunkler Kreis im mittleren Probenbereich entstand. Die Versuchsdurchführung stellte damit einen möglichen Kompromiss zwischen ausreichender Flottenbewegung und einem gleichmäßigeren visuellen Erscheinungsbild dar.

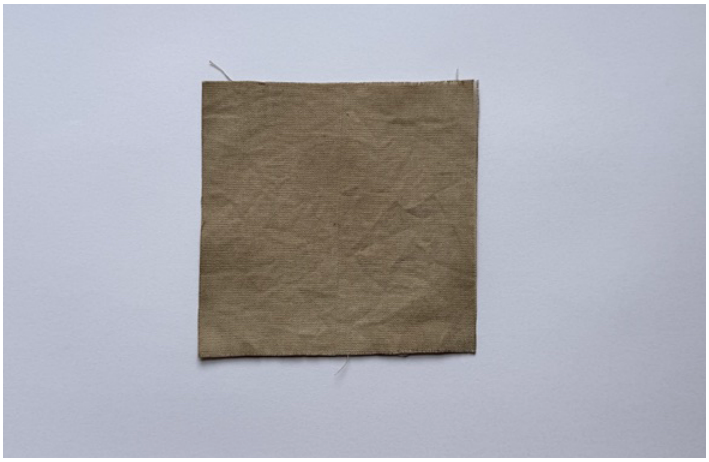


Abb. 55: Ungefärbte Baumwollprobe nach PDA-Beschichtung unter Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch.

Auch hier zeigen die UPF-Werte, dass die Bewegung der Beschichtungsflotte einen Einfluss auf die Wirksamkeit der PDA-Beschichtung hat. Der UPF-Wert der ungefärbten, beschichteten Baumwollprobe liegt bei 33 (siehe Abb. 56) und damit über dem Wert der ungefärbten Probe, die ohne Rühren beschichtet wurde und dadurch einen UPF-Wert von 22 erreichte (vgl. Kapitel 4.4.2). Im Vergleich zur Variante mit direktem Kontakt zum Rührfisch fällt der UPF-Wert jedoch geringer aus als die dort erzielten 81 (vgl. Kapitel 4.4.1). Dadurch wird deutlich, dass die mechanische Bewegung der Lösung für die Beschichtungswirkung relevant ist, während der direkte Kontakt zum Rührfisch vor allem das lokale Erscheinungsbild der Probe beeinflusst.

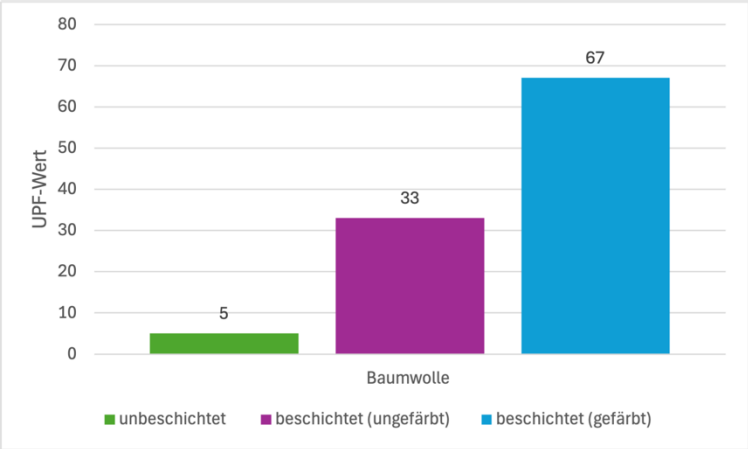


Abb. 56: UPF-Werte der unbeschichteten Baumwollreferenz sowie der ungefärbten und gefärbten PDA-beschichteten Baumwollproben bei Beschichtung unter Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch.

Zusätzlich wurde diese Versuchsvariante an gefärbten Baumwollproben durchgeführt, um zu prüfen, inwiefern die PDA-Beschichtung die bereits vorhandene Färbung beeinflusst und ob sich die Beschichtung auch auf gefärbten Textilien anwenden lässt. Visuell zeigte die Probe nach der Behandlung eine deutlich dunklere und gedämpftere Farbwirkung als die ausschließlich gefärbte Baumwollprobe (siehe Abb. 57). Dies ist auf die zusätzliche braun-graue Eigenfärbung der Polydopaminschicht zurückzuführen, die den ursprünglichen Farbton überlagert oder abschwächt.

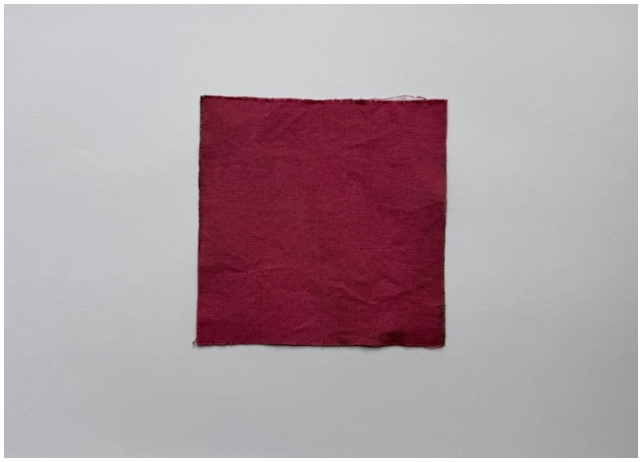


Abb. 57: Gefärbte Baumwollprobe nach PDA-Beschichtung unter Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch.

Der UPF-Wert der gefärbten und PDA-beschichteten Baumwollprobe beträgt 67 (siehe Abb. 56). Im Vergleich zur ausschließlich gefärbten Baumwollprobe mit einem UPF-Wert von 55 konnte somit eine leichte Verbesserung des UV-Schutzes durch die zusätzliche Beschichtung mit PDA festgestellt werden. Besonders

deutlich wird der Einfluss der Färbung im Vergleich zur ungefärbten PDA-beschichteten Probe. Während diese einen UPF-Wert von 33 erreichte, lag der UPF-Wert der gefärbten und PDA-beschichteten Probe etwa doppelt so hoch. Das deutet darauf hin, dass die Färbung einen wesentlichen zusätzlichen Beitrag zur UV-Barriere leistete und in Kombination mit der PDA-Beschichtung die höchste Schutzwirkung innerhalb dieser PDA-Versuchsvariante erzielt wurde.

4.5 Vergleichende Betrachtung und Gebrauchstauglichkeit

Nachdem die einzelnen Beschichtungsansätze in den vorangegangenen Kapiteln jeweils für sich betrachtet wurden, werden sie im Folgenden materialübergreifend zusammengeführt und hinsichtlich ihrer Eignung für eine mögliche bekleidungstechnische Anwendung diskutiert.

4.5.1 Einfluss von Fasermaterial, Konzentration und Temperatur

Über alle untersuchten Beschichtungsansätze hinweg zeigt sich ein durchgehendes Muster: Baumwolle reagierte auf sämtliche polyphenol- und katecholbasierte Beschichtungen, darunter reine Tanninsäure, Tanninsäure-Eisen-Komplexe und Polydopamin, deutlich stärker als Polyester. Dieser Zusammenhang wurde bereits einzeln in den Kapiteln 4.2 bis 4.4 angesprochen und lässt sich, wie in Kapitel 3.1.1 dargestellt, plausibel auf die unterschiedliche chemische Beschaffenheit der Faseroberflächen zurückführen. Die zahlreichen Hydroxylgruppen der cellulosischen Baumwollfaser bieten deutlich mehr Anknüpfungspunkte für Wasserstoffbrückenbindungen und andere Wechselwirkungen mit den phenolischen und katecholischen Gruppen der Beschichtungssubstanzen als die hydrophobe, chemisch reaktionsträgere Oberfläche von Polyester. Diese Faserabhängigkeit zieht sich konsistent durch alle vier untersuchten Beschichtungsvarianten und ist damit eines der zentralen Ergebnisse dieser Arbeit.

Auch der Einfluss von Konzentration und Temperatur zeigt über die Versuchsreihen hinweg ein differenziertes Bild. Bei der reinen Tanninsäurebeschichtung auf Baumwolle (Kapitel 4.2) stieg der UPF-Wert mit zunehmender Konzentration an, wobei der größte Zuwachs jeweils zwischen der unbehandelten Probe und der niedrigsten Konzentration (0,3 Gew.-%) auftrat. Der zusätzliche Gewinn zwischen 2 Gew.-% und 10 Gew.-% fiel demgegenüber gering aus und stand in

keinem günstigen Verhältnis zum höheren Materialeinsatz und der stärkeren Farbveränderung. Bei Polyester zeigte sich dieser Zusammenhang dagegen nicht in gleicher Form. Hier blieben die UPF-Werte über alle drei Konzentrationen nahezu konstant und sanken zwischen 2 Gew.-% und 10 Gew.-% sogar minimal. Hinsichtlich der Prozesstemperatur lässt sich zudem kein einheitliches Bild ableiten. Während die Beschichtung auf Baumwolle mit Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat bei 70 °C durchgeführt wurde und bei ungefärbter Baumwolle mit 324 UPF den höchsten Wert der untersuchten Ansätze erzielte, erfolgte die Beschichtung mit Eisen(III)-chlorid bei Raumtemperatur (vgl. Kapitel 3.7.1) und erreichte mit 214 UPF dennoch einen höheren Wert als die bei 70 °C durchgeführte reine Tanninsäurebeschichtung mit 2 Gew.-% (UPF 129) und 10 Gew.-% (UPF 153). Ein genereller, von der jeweiligen Beschichtungschemie unabhängiger Temperatureffekt lässt sich anhand der vorliegenden Daten somit nicht ableiten. Die Unterschiede zwischen den Ansätzen dürften stärker durch die jeweilige Reaktionschemie, wie die reine Anlagerung, die Bildung von Metall-Polyphenol-Komplexen und die oxidative Polymerisation, als durch die Temperatur allein bestimmt sein.

4.5.2 Vergleich der Beschichtungsansätze

Tabelle 8 stellt die UPF-Werte der wichtigsten Beschichtungsvarianten für ungefärbte Baumwolle und Polyester vergleichend gegenüber und macht die in Kapitel 4.5.1 beschriebene Faserabhängigkeit sowie die Rangfolge der Beschichtungsansätze auf einen Blick sichtbar.

Tabelle 8: Vergleichende Übersicht der UPF-Werte ungefärbter Baumwoll- und Polyesterproben nach den untersuchten Beschichtungsansätzen

Beschichtungsansatz	**UPF-Wert Baumwolle**	**UPF-Wert Polyester**
Unbeschichtete Referenz	5	12
Reine Tanninsäure, 2 Gew.-%	129	21
Tanninsäure und $FeCl_3$	214	24
Tanninsäure und $FeSO_4$	324	74
PDA, unter Rühren mit Kontakt	81	28

Der Vergleich zeigt, dass alle Beschichtungsansätze den UV-Schutz gegenüber der jeweiligen Referenzprobe deutlich verbessern, das Ausmaß der Verbesserung jedoch stark vom gewählten Ansatz abhängt. Für Baumwolle liefert die

Kombination aus Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat mit einem UPF-Wert von 324 die stärkste Schutzwirkung innerhalb der untersuchten Varianten, gefolgt von der Kombination mit Eisen(III)-chlorid. Die reine Tanninsäurebeschichtung und die PDA-Beschichtung erreichen demgegenüber ein niedrigeres, aber für sich genommen weiterhin deutliches Schutzniveau. Für Polyester liegen die absoluten UPF-Werte insgesamt auf einem deutlich niedrigeren Niveau als bei Baumwolle. Die Rangfolge der Ansätze weicht dabei jedoch von der bei Baumwolle beobachteten ab. Während auf Baumwolle die reine Tanninsäurebeschichtung mit 2 Gew.-% (UPF 129) deutlich vor der PDA-Beschichtung (UPF 81) liegt, kehrt sich dieses Verhältnis bei Polyester um. Hier erzielt die PDA-Beschichtung (UPF 28) einen minimal höheren UPF-Wert als die reine Tanninsäurebeschichtung mit 2 Gew.-% (UPF 21). Lediglich die Eisen(II)-sulfat-Variante bleibt auf beiden Materialien der wirksamste Ansatz.

Dieser Rangfolge steht jedoch ein deutlicher Zielkonflikt zwischen UV-Schutzwirkung und optischer Veränderung gegenüber, der bereits in den Kapiteln 4.3 und 4.4 angesprochen wurde. Die beiden UV-schutzstärksten Varianten, also Tanninsäure in Kombination mit Eisen(III)-chlorid oder Eisen(II)-sulfat, gehen zugleich mit der stärksten und am wenigsten steuerbaren Farbveränderung einher (violettgraue und violett-tintenblaue Verfärbung). Die reine Tanninsäurebeschichtung und insbesondere die PDA-Beschichtung ohne Rühren verändern das Erscheinungsbild der Textilien dagegen deutlich moderater, erzielen im Gegenzug aber auch einen geringeren UPF-Wert. Für eine Anwendung im Bereich der Bekleidung ergibt sich daraus kein eindeutig „bester" Ansatz, sondern eine Abwägung zwischen maximaler Schutzwirkung und gewünschter optischer Erscheinung, die je nach Anwendungsfall unterschiedlich ausfallen kann. Wie im Ausblick dieser Arbeit angemerkt, könnte diese dunkle Eigenfärbung der stark schützenden Varianten insbesondere bei ohnehin dunkel gefärbten Textilien einen Vorteil darstellen, da die optische Veränderung dort weniger stark ins Gewicht fällt.

Ergänzend zeigt der Vergleich der Datenlage selbst eine methodische Einschränkung auf. Während für die reine Tanninsäurebeschichtung auf Baumwolle in den Konzentrationen 0,3 und 2 Gew.-% mehrere Datensätze und damit Standardabweichungen vorliegen (vgl. Kapitel 4.2), beruhen die Werte für die 10 Gew.-% Konzentration auf Baumwolle, für die reine Tanninsäurebeschichtung auf

Polyester, beide Eisen-Varianten sowie für die PDA-Beschichtungsvarianten jeweils nur auf einem einzelnen Datensatz. Die in Tabelle 8 dargestellten Werte für diese Ansätze sind daher als Einzelmessungen und nicht als abgesicherte Mittelwerte zu verstehen. Die Rangfolge der Beschichtungsansätze sollte entsprechend als Tendenz und nicht als statistisch abgesicherter Vergleich gelesen werden.

4.5.3 Waschbeständigkeit und praktische Eignung

Die in den Kapiteln 4.2 bis 4.4 dargestellten Waschtestergebnisse lassen sich zu folgendem Gesamtbild zusammenführen: Bei keiner der untersuchten Beschichtungen führte die Waschbeanspruchung zu einem vollständigen Verlust der UV-Schutzwirkung. Auffällig ist jedoch, dass die UPF-Werte nach dem Waschen nicht durchgängig abnahmen, sondern in mehreren Fällen, etwa bei der reinen Tanninsäurebeschichtung (Kapitel 4.2) und insbesondere bei der Tanninsäure-Eisen(II)-sulfat-Beschichtung auf Baumwolle (Kapitel 4.3.2), sogar anstiegen. Dieses auf den ersten Blick unerwartete Verhalten wurde bereits einzeln diskutiert und lässt sich am plausibelsten durch ein Zusammenspiel aus zwei gegenläufigen Effekten erklären. Einerseits können lose Beschichtungsbestandteile beim Waschen teilweise herausgelöst werden, andererseits kann eine waschbedingte Verdichtung oder strukturelle Veränderung des Gewebes für sich genommen die UV-Transmission senken. Da beide Effekte in der vorliegenden Versuchsanordnung nicht unabhängig voneinander erfasst wurden, lässt sich ihr jeweiliger Anteil an der beobachteten Veränderung nicht quantifizieren.

Vergleicht man zudem die beiden eingesetzten Waschmittel, zeigte sich bei mehreren der untersuchten Tanninsäure-Konzentrationen die Tendenz, dass das ECE-Referenzwaschmittel den UPF-Wert stärker verringerte als die Tensidlösung Ecosurf SA-9 (vgl. Kapitel 4.2.1 und 4.2.2). Eine gesicherte Erklärung für diesen Unterschied lässt sich anhand der vorliegenden Daten nicht ableiten. Denkbar wären etwa unterschiedliche Wechselwirkungen der jeweiligen Waschmittelbestandteile mit der Tanninsäurebeschichtung. Da sich dieser Effekt nicht bei allen Konzentrationen und Ausgangszuständen gleichermaßen eindeutig zeigte, ist er ebenso als Tendenz und nicht als statistisch abgesicherter Befund zu werten.

Für die Bewertung der praktischen Gebrauchstauglichkeit ist zudem zu berücksichtigen, dass die Waschtests im Labor mit einer begrenzten Anzahl an Wiederholungen, mit überwiegend ein bis zwei Waschgängen, und im Becherglas anstelle einer Waschmaschine durchgeführt wurden. Die mechanische Beanspruchung realer Waschmaschinenprozesse, etwa durch Schleudern, höhere Umdrehungszahlen oder wiederholtes Tragen und die damit verbundene Reibung, wurde damit nur eingeschränkt abgebildet. Die hier ermittelten UPF-Werte nach Waschbeanspruchung sind daher als erste Anhaltspunkte zur relativen Beständigkeit der Beschichtungen zu verstehen und nicht als Nachweis einer Alltagstauglichkeit über viele Waschzyklen hinweg.

In der Zusammenschau der Waschbeständigkeit schneidet die Tanninsäure-Eisen(II)-sulfat-Beschichtung auf Baumwolle am günstigsten ab, da sie sowohl vor als auch nach dem Waschtest die höchsten UPF-Werte aller untersuchten Ansätze erzielte. Innerhalb der reinen Tanninsäurebeschichtung ergibt sich dagegen kein eindeutiges Bild. Die Konzentration von 2 Gew.-% erzielt zwar durchgehend höhere UPF-Werte als 0,3 Gew.-%, zeigt jedoch nach einzelnen Waschtests deutlich größere Standardabweichungen zwischen den Datensätzen (vgl. Kapitel 4.2), während 0,3 Gew.-% etwas geringere, dafür aber konsistentere Werte liefert. Beide Konzentrationen beruhen auf drei unabhängigen Datensätzen und sind damit gleichermaßen statistisch besser abgesichert als die übrigen Beschichtungsansätze. Die Wahl zwischen ihnen hängt davon ab, ob ein möglichst hoher UPF-Wert oder eine möglichst konsistente, gut vorhersehbare Schutzwirkung im Vordergrund steht oder ob eventuell auch das optische Erscheinungsbild eine Rolle spielt.

5 Fazit und Ausblick

Ausgangspunkt dieser Arbeit war die Frage, inwieweit sich die UV-Schutzeigenschaften von Baumwoll- und Polyestergeweben durch Färbung sowie durch Beschichtungen auf Basis von Tanninsäure und Polydopamin beeinflussen lassen und wie beständig die erzielten Effekte nach Waschbeanspruchung bleiben (vgl. Kapitel 1.1). Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass sich der UV-Schutz beider Gewebe durch die untersuchten Maßnahmen zum Teil erheblich steigern lässt, das Ausmaß dieser Steigerung jedoch stark von drei Faktoren abhängt: dem Fasermaterial, dem gewählten Beschichtungsansatz und dem Ausgangszustand des Textils, also ob es ungefärbt oder gefärbt vorlag.

Über alle untersuchten Beschichtungsvarianten hinweg zeigte sich durchgängig, dass Baumwolle deutlich stärker auf die polyphenol- und katecholbasierten Beschichtungen reagierte als Polyester (vgl. Kapitel 4.5.1). Bereits die reine Tanninsäurebeschichtung hob den UPF-Wert der unbehandelten, ungefärbten Baumwolle von 5 auf über 100 an und übertraf damit die Schwelle für die Klassifizierung als „exzellenter Schutz" nach AS/NZS 4399 sowie den einheitlichen Grenzwert der europäischen Norm von UPF 40+ deutlich (vgl. Kapitel 2.2), während die Wirkung auf Polyester in allen Versuchsreihen vergleichsweise gering blieb. Dieser Materialunterschied bestätigt die eingangs formulierte Erwartung, dass die Zugänglichkeit der Faseroberfläche für polyphenolische und katecholische Verbindungen einen entscheidenden Einfluss auf die erzielbare Schutzwirkung hat, und liefert damit eine erste, differenzierte Antwort auf die Forschungsfrage. Die Wirkung der untersuchten Beschichtungen ist materialabhängig und wird durch die chemischen Eigenschaften der jeweiligen Faser beeinflusst.

Innerhalb der untersuchten Beschichtungsansätze erwies sich die Kombination aus Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat als wirksamste Variante und erzielte auf Baumwolle die höchsten UPF-Werte aller Versuchsreihen. Auch die Kombination mit Eisen(III)-chlorid, die reine Tanninsäurebeschichtung sowie die Polydopaminbeschichtung führten zu einer deutlichen Verbesserung des UV-Schutzes (vgl. Kapitel 4.5.2). Diesem Befund steht jedoch ein Zielkonflikt zwischen Schutzwirkung und optischer Veränderung gegenüber, denn gerade die beiden wirksamsten Varianten gingen mit einer starken, kaum steuerbaren Verfärbung der Textilien einher, während die moderater verfärbenden Ansätze, z. B. die reine

Tanninsäurebeschichtung und die Polydopaminbeschichtung ohne Rühren, eine geringere, aber weiterhin deutliche Schutzwirkung erzielten. Für den Einsatz im Bekleidungsbereich lässt sich daraus kein universell optimaler Ansatz ableiten, sondern nur eine Empfehlung in Abhängigkeit vom gewünschten optischen Erscheinungsbild des Textils.

Auch die Färbung selbst leistete in mehreren Versuchsreihen einen relevanten Beitrag zum UV-Schutz. Bereits die gefärbte, unbeschichtete Baumwolle erreichte einen UPF-Wert von 55 gegenüber 5 im ungefärbten Zustand, und bei der Kombination aus Färbung und Beschichtung mit Eisen(II)-sulfat zeigte sich, dass die Färbung nur noch einen geringen zusätzlichen Effekt, auf den bereits durch die Beschichtung erzielten UPF-Wert, hatte (vgl. Kapitel 4.3.2). Dies deutet darauf hin, dass Färbung und Beschichtung nicht unabhängig voneinander wirken, sondern sich in ihrem Beitrag zum UV-Schutz gegenseitig überlagern können.

Hinsichtlich der Waschbeständigkeit als zweiten Teil der Forschungsfrage zeigte sich, dass keine der untersuchten Beschichtungen durch die Waschbeanspruchung ihre Schutzwirkung vollständig verlor. In mehreren Fällen blieben die UPF-Werte nach ein bis zwei Waschgängen nahezu unverändert oder stiegen sogar an (vgl. Kapitel 4.5.3). Dieser auf den ersten Blick positive Befund muss jedoch mit Vorsicht interpretiert werden, da er sich nicht eindeutig auf eine dauerhafte Stabilität der Beschichtung zurückführen lässt, sondern zumindest teilweise auch durch waschbedingte Veränderungen der Gewebestruktur, etwa eine Verdichtung des Gewebes, mitverursacht sein kann. Eine abschließende Aussage darüber, welcher Anteil auf die Beschichtung und welcher auf strukturelle Veränderungen des Gewebes zurückgeht, ist auf Grundlage der vorliegenden Daten nicht möglich.

An dieser Stelle ist außerdem eine grundsätzliche Einschränkung dieser Arbeit zu benennen, die bei der Bewertung sämtlicher Ergebnisse mitgedacht werden muss. Nicht für alle Beschichtungsansätze konnte im Rahmen des zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeitraums die gleiche Anzahl an Wiederholungen, Waschtests oder Materialzuständen untersucht werden. Für die reine Tanninsäurebeschichtung auf Baumwolle liegen in den Konzentrationen 0,3 und 2 Gew.-% jeweils drei unabhängige Datensätze vor, während die Beschichtung mit 10

Gew.-%, die Beschichtungen mit Eisen(III)-chlorid und Eisen(II)-sulfat sowie alle drei Polydopamin-Varianten nur einmalig durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 4.2 bis 4.4). Diese Priorisierung ergab sich unmittelbar aus dem Versuchsverlauf, da nach ersten orientierenden Ergebnissen der Schwerpunkt gezielt auf die Ansätze und Materialzustände mit der größten UV-Schutzwirkung und der höchsten praktischen Relevanz gelegt wurde. So wurde beispielsweise Polyester bei der reinen Tanninsäurebeschichtung nach dem ersten Datensatz nicht weiterverfolgt, da sich hier nur eine sehr geringe Verbesserung des UPF-Wertes zeigte (vgl. Kapitel 4.2.1), und auch nicht jede Beschichtung wurde in gleichem Umfang auf gefärbten Proben oder über mehrere Waschzyklen hinweg untersucht. Eine vollständig einheitliche Versuchsdurchführung für alle Kombinationen aus Material, Färbung, Beschichtung und Waschbeanspruchung war im Rahmen einer Bachelorarbeit zeitlich nicht leistbar. Die auf Einzelmessungen beruhenden UPF-Werte sind daher als Tendenzen und nicht als statistisch abgesicherte Ergebnisse zu verstehen. Eine Verallgemeinerung dieser Einzelwerte auf eine größere Grundgesamtheit ist nicht zulässig, auch wenn die durchgängige Ausrichtung der Befunde ein konsistentes Gesamtbild ergibt.

Ausblick

Rückblickend hätte die vorliegende Untersuchung von einer einheitlicheren Versuchsstruktur profitiert. Wünschenswert wäre es gewesen, für alle Beschichtungsansätze dieselbe Anzahl an Datensätzen, denselben Umfang an Waschtests sowie durchgängig sowohl ungefärbte als auch gefärbte Proben zu untersuchen, um die Ergebnisse der unterschiedlichen Verfahren direkt und statistisch abgesichert miteinander vergleichen zu können. Eine derart vollständig symmetrische Versuchsplanung war im zeitlichen Rahmen der vorliegenden Arbeit jedoch nicht umsetzbar und hätte ihren Umfang deutlich überschritten. Die vorgenommene Priorisierung einzelner Ansätze war daher eine bewusste und notwendige Entscheidung, keine methodische Nachlässigkeit.

Die in Kapitel 4.5.3 bereits diskutierte eingeschränkte Aussagekraft der Waschtests, durch die Begrenzung auf maximal zwei Zyklen im Becherglas, legt für künftige Untersuchungen nahe, deutlich mehr Waschzyklen einzubeziehen und diese nach Möglichkeit in einer Waschmaschine durchzuführen, um praxisnähere

mechanische Beanspruchungen wie Schleudern, höhere Umdrehungszahlen und realistischere Temperaturverläufe abzubilden. Ergänzend wäre es sinnvoll, auch die mechanische Beanspruchung durch das Tragen der Textilien selbst zu berücksichtigen, etwa Reibung sowie Zug- und Scherkräfte, die im späteren Gebrauch zusätzlich zur Waschbelastung auf die Beschichtung einwirken und deren Beständigkeit beeinflussen können.

Diese methodische Einschränkung betrifft neben den Waschtests auch den Beschichtungsprozess selbst, der in der vorliegenden Arbeit ausschließlich im Becherglas auf einer Heizplatte bei bis zu 70 °C durchgeführt wurde (vgl. Kapitel 3.6). Für eine praxisnähere Einschätzung der industriellen Übertragbarkeit wäre es sinnvoll, die Tanninsäurebeschichtung zukünftig auch maschinell umzusetzen, z. B. unter Nutzung des bereits für die Färbeversuche eingesetzten Färbeautomaten (vgl. Kapitel 3.1.3), und die so beschichteten Proben anschließend ebenfalls maschinell, statt im Becherglas zu waschen. Auf diese Weise ließe sich prüfen, ob sich die im Labor ermittelten UPF-Werte und die beobachtete Waschbeständigkeit auch unter maschinellen Bedingungen reproduzieren lassen. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang auch eine Prüfung der Übertragbarkeit auf klassische Ausrüstungsmaschinen der Textilveredlung wie einen Jigger oder eine Haspelkufe, da sich die kurzen Behandlungszeiten der Tanninsäurebeschichtung hierfür grundsätzlich eignen könnten. Die rund 20-stündige Reaktionszeit der Polydopaminbeschichtung (vgl. Kapitel 3.8) erscheint für eine solche kontinuierliche oder chargenweise Verarbeitung dagegen deutlich weniger praktikabel.

Weiterführend wäre es interessant, den Einfluss anderer Farbstoffe auf das Beschichtungsverhalten zu untersuchen, insbesondere im Hinblick auf die Tanninsäure-Metallsalz-Systeme sowie die Polydopaminbeschichtung. Da beide Ansätze mit einer eher dunklen Eigenfärbung einhergehen, Tanninsäure in Kombination mit Metallsalzen etwa in dunkelblauen, violetten oder schwärzlichen Farbtönen und Polydopamin in dunkelgrünen, braunen oder khakifarbenen Tönen, könnten sie sich besonders für von vornherein dunkel gefärbte Textilien eignen, bei denen die optische Veränderung durch die Beschichtung weniger stark ins Gewicht fallen würde als bei hellen oder hier rötlich-gefärbten Stoffen.

Schließlich könnte eine mikroskopische Untersuchung der beschichteten Faseroberflächen zusätzliche Erkenntnisse liefern. Eine solche Analyse würde es ermöglichen, die Beschichtung visuell auf der Faseroberfläche nachzuweisen sowie strukturelle Veränderungen der Fasern durch die Beschichtung und durch die Waschbeanspruchung sichtbar zu machen, und könnte die in dieser Arbeit anhand von UPF-Werten und Remissionsspektren getroffenen Aussagen zusätzlich absichern.

Insgesamt liefert die vorliegende Arbeit einen ersten systematischen Einblick in die Wechselwirkung von Fasermaterial, Färbung, Beschichtung und Waschbeständigkeit bei biobasierten UV-Schutzbeschichtungen und zeigt zugleich konkrete Ansatzpunkte auf, wie zukünftige Untersuchungen diese Befunde methodisch vertiefen und praxisnäher absichern könnten.

Literatur- und Quellenverzeichnis

[1] Aguilera, J., Navarrete-de Gálvez, E., Sánchez-Roldán, C., Herrera-Ceballos, E., & De Gálvez, M. V. (2023), Sun-protective Properties of Technical Sportswear Fabrics 100% Polyester: The Influence of Moisture and Sweat on Protection against Different Biological Effects of Ultraviolet (UV) Radiation, *Photochemistry and Photobiology*, *99*(1), S. 184-192, https://doi.org/10.1111/php.13679

[2] Al-Sadek, T., & Yusuf, N. (2024), Ultraviolet Radiation Biological and Medical Implications, *Current Issues in Molecular Biology*, *46*(3), S. 1924-1942, https://doi.org/10.3390/cimb46030126

[3] Asmuß, M., & Mayer, I. (2012), Themenheft UV-Strahlung - Sonne aber sicher, *UMID. Umwelt und Mensch - Informationsdienst*, *2*, S. 10-24

[4] Attia, N. F., Osama, R., Elashery, S. E. A., Kalam, A., Al-Sehemi, A. G., & Algarni, H. (2022), Recent Advances of Sustainable Textile Fabric Coatings for UV Protection Properties, *Coatings*, *12*(10), Art. 1597, S. 1-15, https://doi.org/10.3390/coatings12101597

[5] Berry, E. G., Bezecny, J., Acton, M., Sulmonetti, T. P., Anderson, D. M., Beckham, H. W., Durr, R. A., Chiba, T., Beem, J., Brash, D. E., Kulkarni, R., Cassidy, P. B., & Leachman, S. A. (2022), Slip versus Slop: A Head-to-Head Comparison of UV-Protective Clothing to Sunscreen, *Cancers*, *14*(3), Art. 542, S. 1-19, https://doi.org/10.3390/cancers14030542

[6] Boothby-Shoemaker, W. T., Mohammad, T. F., Ozog, D. M., & Lim, H. W. (2022), Photoprotection by clothing: A review, *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine*, *38*(5), S. 478-488, https://doi.org/10.1111/phpp.12776

[7] Bundesamt für Strahlenschutz (05.02.2025), *Bundesamt für Strahlenschutz*, Optische Strahlung - Was ist UV-Strahlung? URL: https://www.bfs.de/DE/themen/opt/uv/wirkung/einfuehrung/einfuehrung.html [letzter Zugriff: 14.05.2026]

[8] Chen, C., Yang, H., Yang, X., & Ma, Q. (2022), Tannic acid: a crosslinker leading to versatile functional polymeric networks: a review, *RSC Advances*, *12*(13), S. 7689-7711, https://doi.org/10.1039/D1RA07657D

[9] Cole, Y., Ilyas, A. M., & Ilyas, E. N. (2023), Assessment of UV Protection for Children's Summer Clothing, *Cureus*, *15*(8), Art. e44137, S. 1-8, https://doi.org/10.7759/cureus.44137

[10] Dhineshbabu, N. R., & Bose, S. (2018), Smart Textiles Coated with Eco-Friendly UV-Blocking Nanoparticles Derived from Natural Resources, *ACS Omega*, *3*(7), S. 7454-7465, https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00822

[11] DIN EN ISO 105-C06:2010-08, Textilien- Farbechtheitsprüfungen- Teil_C06: Farbechtheit bei der Haushaltswäsche und der gewerblichen Wäsche (ISO_105-C06:2010); Deutsche Fassung EN ISO 105-C06:2010 (2010), DIN Media GmbH, https://doi.org/10.31030/1555307

[12] D'Orazio, J., Jarrett, S., Amaro-Ortiz, A., & Scott, T. (2013), UV Radiation and the Skin, *International Journal of Molecular Sciences*, *14*(6), S. 12222-12248, https://doi.org/10.3390/ijms140612222

[13] Emam, R. H. A., El-Sayed, I. E., Xin, J., Lu, X., & Attia, N. F. (2024), Innovative coating of cotton textile fabrics for integrating outstanding flame hazard safety, UV protection, tensile strength strengthening and

antibacterial properties, *Industrial Crops and Products*, *216*, Art. 118752, S. 1-9, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118752

[14] Fernau, E., Ilyas, S. M., & Ilyas, E. N. (2023), The Impact of Routine Laundering on Ultraviolet Protection Factor (UPF) Values for Commercially Available Sun-Protective Clothing, *Cureus*, *15*(7), Art. e42256, S. 1-6, https://doi.org/10.7759/cureus.42256

[15] Gambichler, T., Laperre, J., & Hoffmann, K. (2006), The European standard for sun-protective clothing: EN 13758, *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, *20*(2), S. 125-130, https://doi.org/10.1111/j.1468-3083.2006.01401.x

[16] Gies, P. H., Roy, C. R., Toomey, S., & McLennan, A. (1998), Protection against solar ultraviolet radiation, *Mutation Research - Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, *422*(1), S. 15-22, https://doi.org/10.1016/S0027-5107(98)00181-X

[17] Grundmeier, A.-M. (2019), *Bekleidung und Gesundheit - Ein Kompendium mit ausgewählten Aspekten*, Schneider Verlag Hohengehren GmbH

[18] Gu, S., Yang, L., Huang, W., Bu, Y., Chen, D., Huang, J., Zhou, Y., & Xu, W. (2017), Fabrication of hydrophobic cotton fabrics inspired by polyphenol chemistry, *Cellulose*, *24*(6), S. 2635-2646, https://doi.org/10.1007/s10570-017-1274-1

[19] Hatch, K. L. (2002), American Standards for UV-Protective Textiles, in R. Dummer, F. O. Nestle, & G. Burg (Hrsg.), *Cancers of the Skin* (Bd. 160, S. 42-47), Springer Berlin Heidelberg, https://doi.org/10.1007/978-3-642-59410-6_6

[20] Hemmatpour, H., De Luca, O., Crestani, D., Stuart, M. C. A., Lasorsa, A., Van Der Wel, P. C. A., Loos, K., Giousis, T., Haddadi-Asl, V., & Rudolf, P. (2023), New insights in polydopamine formation via surface adsorption, *Nature Communications*, *14*(1), Art. 664, S. 1-12, https://doi.org/10.1038/s41467-023-36303-8

[21] Hohenstein Institut (o. J. -a), *Amerikanischer Standard AATCC TM 183*, UV-Schutz @Hohenstein, URL: https://uv-schutz.hohenstein.de/de/pruefen-zertifizieren/amerikanischer-standard-aatcc-tm-183 [letzter Zugriff: 16.05.2026]

[22] Hohenstein Institut (o. J. -b), *Australisch/Neuseeländischer Standard AS/NZS 4399*, UV-Schutz @Hohenstein, URL: https://uv-schutz.hohenstein.de/de/pruefen-zertifizieren/australischneuseelaendischer-standard-asnzs-4399 [letzter Zugriff: 16.05.2026]

[23] Hohenstein Institut (o. J. -c), *Europäischer Standard DIN EN 13758-1*, UV-Schutz @Hohenstein, URL: https://uv-schutz.hohenstein.de/de/pruefen-zertifizieren/europaeischer-standard-din-en-13758-1 [letzter Zugriff: 16.05.2026]

[24] Hohenstein Institut (2021), *Textiler UV-Schutz*, UV-Schutz @Hohenstein, URL: https://uv-schutz.hohenstein.de/de/textiler-uv-schutz [letzter Zugriff: 16.05.2026]

[25] Hölzle, E., & Hönigsmann, H. (2005), Ultraviolette Strahlung - Quellen, Spektren, Umwelteinflüsse, *JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft*, *3*(s2), S. 3-10, https://doi.org/10.1111/j.1610-0387.2005.04392.x

[26] Imrith, M. K., Unmar, R., & Rosunee, S. (2016), Investigating the Relationship between Knitted Fabric Porosity and Light Permeability, *Indian Journal of Materials Science*, *2016*, S. 1-12, https://doi.org/10.1155/2016/7536108

[27] Jia, M., He, X., Wang, J., Zhu, L., & Shao, Z.-B. (2024), Effects of durable antibacterial, UV-resistant cotton fabrics with differentiated polydopamine metal complexes, *Materials Letters*, *355*, Art. 135495, S. 1-4, https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135495

[28] Kibria, G., Repon, Md. R., Hossain, Md. F., Islam, T., Jalil, M. A., Aljabri, M. D., & Rahman, M. M. (2022), UV-blocking cotton fabric design for comfortable summer wears: factors, durability and nanomaterials, *Cellulose*, *29*(14), S. 7555-7585, https://doi.org/10.1007/s10570-022-04710-7

[29] Konica Minolta (o. J.), Stationäre Spektralphotometer für Farbe und Glanz CM-36dG Serie, URL: https://sensing.konicaminolta.eu/produkte/farbmessung/spektralphotometer-stationaer/cm-36-reihe [letzter Zugriff: 15.06.2026]

[30] Lee, H. A., Ma, Y., Zhou, F., Hong, S., & Lee, H. (2019), Material-Independent Surface Chemistry beyond Polydopamine Coating, *Accounts of Chemical Research*, *52*(3), S. 704-713, https://doi.org/10.1021/acs.accounts.8b00583

[31] Lee, H. A., Park, E., & Lee, H. (2020), Polydopamine and Its Derivative Surface Chemistry in Material Science: A Focused Review for Studies at KAIST, *Advanced Materials*, *32*(35), Art. 1907505, S. 1-20, https://doi.org/10.1002/adma.201907505

[32] Lee, H., Dellatore, S. M., Miller, W. M., & Messersmith, P. B. (2007), Mussel-Inspired Surface Chemistry for Multifunctional Coatings, *Science*, *318*(5849), S. 426-430, https://doi.org/10.1126/science.1147241

[33] Liu, W., Zhang, R., Duan, G., Zhang, L., Li, Y., & Yang, L. (2024), Bio-inspired and Multifunctional Polyphenol-Coated Textiles, *Advanced Fiber Materials*, *6*(4), S. 952-977, https://doi.org/10.1007/s42765-024-00403-x

[34] Loy, W. (2006), *Textile Produkte für Medizin, Hygiene und Wellness*, Dt. Fachverlag

[35] Lu, J. T., & Ilyas, E. (2022), An Overview of Ultraviolet-Protective Clothing, *Cureus*, *14*(7), Art. e27333, S. 1-4, https://doi.org/10.7759/cureus.27333

[36] Mathis AG - Weltweite Kompetenz im Färben und Beschichten (o. J.), Becherfärbeapparat LABOMAT Typ << BFA >>, URL: https://www.mathis-ag.com/DE/product_detail.php?txtProductID=123110 [letzter Zugriff: 15.06.2026]

[37] Mavrić, Z., Simončič, B., & Tomšič, B. (2018), Recent advances in the ultraviolet protection finishing of textiles, *TEKSTILEC*, *61*(3), S. 201-220, https://doi.org/10.14502/Tekstilec2018.61.201-220

[38] Menter, J. M., & Hatch, K. L. (2003), Clothing as Solar Radiation Protection, in P. Elsner, K. Hatch, & W. Wigger-Alberti (Hrsg.), *Current Problems in Dermatology* (Bd. 31, S. 50–63), KARGER, https://doi.org/10.1159/000072237

[39] Mondal, S. (2022), Nanomaterials for UV protective textiles, *Journal of Industrial Textiles*, *51*(4_suppl), S. 5592S-5621S, https://doi.org/10.1177/1528083721988949

[40] Narayanan, D. L., Saladi, R. N., & Fox, J. L. (2010), Review: Ultraviolet radiation and skin cancer, *International Journal of Dermatology*, *49*(9), S. 978-986, https://doi.org/10.1111/j.1365-4632.2010.04474.x

[41] Nullis, C. (16.09.2025), *World Meteorological Organization*, WMO Bulletin shows successful recovery of ozone layer, driven by science, URL: https://wmo.int/news/media-centre/wmo-bulletin-shows-successful-recovery-of-ozone-layer-driven-science [letzter Zugriff: 16.05.2026]

[42] Oberthür, Prof. Dr. M. (21.05.2026), *Persönliche Mitteilung: Versuchsvorschrift*, E-Mail

[43] Oreja, E., Zaytseva-Zotova, D., Rogala, A., Barrantes, A., Messersmith, P. B., & Tiainen, H. (2025), Multifunctional Tannic Acid and Polyamino Acid Layer-by-Layer Coatings for Tailored Implant Surfaces, *ACS Biomaterials Science & Engineering*, *11*(9), S. 5376-5388, https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.5c00832

[44] Rastegar, L., Montazer, M., & Gaminian, H. (2017), Multifunctional colored polyester fabric treated with dopamine hydrochloride at room temperature: higher tensile, hydrophilicity and anti-bacterial properties along with aminolysis, *Fibers and Polymers*, *18*(10), S. 1915-1923, https://doi.org/10.1007/s12221-017-7012-3

[45] Saha, B., Saha, A., Das, P., Kakati, A., Banerjee, A., & Chattopadhyay, P. (2024), A comprehensive review of ultraviolet radiation and functionally modified textile fabric with special emphasis on UV protection, *Heliyon*, *10*(22), Art. e40027, S. 1-14, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40027

[46] Şapcı, N., & Öncü, G. (2025), Barrier Properties Against UV Radiation of Woven Fabrics Coated With Micronized Pumice, *Fibers and Polymers*, *26*(2), S. 675-683, https://doi.org/10.1007/s12221-024-00841-9

[47] Saravanan, D. (2007), UV PROTECTION TEXTILE MATERIALS, *AUTEX Research Journal*, *7*(1), S. 53-62, https://doi.org/10.1515/aut-2007-070106

[48] Shih, B. B., Farrar, M. D., Cooke, M. S., Osman, J., Langton, A. K., Kift, R., Webb, A. R., Berry, J. L., Watson, R. E. B., Vail, A., De Gruijl, F. R., & Rhodes, L. E. (2018), Fractional Sunburn Threshold UVR Doses Generate Equivalent Vitamin D and DNA Damage in Skin Types I–VI but with Epidermal DNA Damage Gradient Correlated to Skin Darkness, *Journal of Investigative Dermatology*, *138*(10), S. 2244-2252, https://doi.org/10.1016/j.jid.2018.04.015

[49] Shimadzu - Excellence in Science (o. J.), Uv-Vis-Spektrophotometer für eine Vielzahl von Anwendungen UV-2600i Plus/UV-2700i Plus, URL: https://www.shimadzu.de/products/uv-vis/uv-vis-nir-spectroscopy/uv-2600i2700i-plus/index.html [letzter Zugriff: 15.06.2026]

[50] Sieniawska, D., Proszowska, P., Madoń, M., Kotowicz, Z., Orzeł, A., Pich-Czekierda, A., & Sieniawska, J. (2024), Ultraviolet-Protective Clothing and Sunscreen: Sun-Protection for Healthy Skin, *Journal of Education, Health and Sport*, *71*, Art. 51237, S. 1-16, https://doi.org/10.12775/JEHS.2024.71.51237

[51] Sun, L., Ding, L., Zhang, Q., Yu, J., Cao, Y., Liu, X., Ren, Y., & Li, Y. (2024), Combination of bio-based tannic acid, sophora flower extract and metal salts: A facile route towards improving durable flame retardancy and UV resistance of silk fabric, *Progress in Organic Coatings*, *186*, Art. 108067, S. 1-9, https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108067

[52] Wong, W.-Y., Lam, J. K.-C., Kan, C.-W., & Postle, R. (2016), Ultraviolet protection of weft-knitted fabrics, *Textile Progress*, *48*(1), S. 1-54, https://doi.org/10.1080/00405167.2015.1126952

[53] Yin, Y., Huang, Z., Wang, P., Zhu, Z., Xu, J., Chen, S., & Wang, H. (2022), The Use of Copper Ions and Tannic Acid to Enhance the UV Protection of Cotton Fabrics, *Journal of Natural Fibers*, *19*(9), S. 3492-3501, https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848708

[54] You, I., Jeon, H., Lee, K., Do, M., Seo, Y. C., Lee, H. A., & Lee, H. (2017), Polydopamine coating in organic solvent for material-independent immobilization of water-insoluble molecules and avoidance of substrate hydrolysis, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *46*, S. 379-385, https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.11.007

[55] Zhang, W., Yang, Z.-Y., Tang, R.-C., Guan, J.-P., & Qiao, Y.-F. (2020), Application of tannic acid and ferrous ion complex as eco-friendly flame retardant and antibacterial agents for silk, *Journal of Cleaner Production*, *250*, Art. 119545, S. 1-10, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119545

[56] Zhou, X., Yin, Y., Huang, Z., Fu, L., Chen, S., Wang, H., & Wang, L. (2021), *Preparation and Test of UV Resistant and Flame Retardant Cotton Fabric With Phytic Acid, Tannic Acid and Diethylenetriamine as Raw Materials*, in Review, https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-376887/v1

Anhang

Anhang A – Tabellen

Anhang A1: Übersichtstabelle mit Werten zu den Diagrammen in Kapitel 4.2.1 – ungefärbte Baumwolle beschichtet mit Tanninsäure in drei verschiedenen Konzentrationen einschließlich Waschtests

Datensatz	Versuchsbedingungen	Material	Ausgangszustand	UPF-Wert *vor* Beschichtung	UPF-Wert *nach* Beschichtung	UPF-Wert *nach* 1.WT mit ECE 4 g/L	UPF-Wert *nach* 2.WT mit ECE 4 g/L	UPF-Wert *nach* 1.WT mit Ecosurf 1 g/L	UPF-Wert *nach* 2.WT mit Ecosurf 1 g/L
1	TA (0,3 Gew.-%)	CO	ungefärbt	5	134	72	105	96	123
2					99	74	82	90	125
3					78	37	47	65	70
Mittelwert					103,6666667	61	78	83,66666667	106
Standardabweichung					28,29016319	20,80865205	29,20616373	16,44181661	31,19294792
1	TA (2 Gew.-%)				129	106	196	144	114
2					121	115	153	155	155
3					136	99	121	129	145
Mittelwert					128,6666667	106,6666667	156,6666667	142,6666667	138
Standardabweichung					7,505553499	8,020806277	37,6342043	13,0511813	21,37755833
1	TA (10 Gew.-%)				153	131	160	185	157

Anhang A2: Übersichtstabelle mit Werten zu den Diagrammen in Kapitel 4.2.1 – ungefärbte Polyester beschichtet mit Tanninsäure in drei verschiedenen Konzentrationen

Datensatz	Versuchsbedingungen	Material	Ausgangszustand	UPF-Wert *vor* Beschichtung	UPF-Wert *nach* Beschichtung
1	TA (0,3 Gew.-%)	PES	ungefärbt	12	18
1	TA (2 Gew.-%)				21
1	TA (10 Gew.-%)				20

Anhang A3: Übersichtstabelle mit Werten zu den Diagrammen in Kapitel 4.2.2 – gefärbte Baumwolle beschichtet mit Tanninsäure in drei verschiedenen Konzentrationen einschließlich Waschtests

Datensatz	Versuchsbedingungen	Material	Ausgangszustand	UPF-Wert *vor* Beschichtung	UPF-Wert *nach* Beschichtung	UPF-Wert *nach* 1.WT mit ECE 4 g/L	UPF-Wert *nach* 2.WT mit ECE 4 g/L	UPF-Wert *nach* 1.WT mit Ecosurf 1 g/L	UPF-Wert *nach* 2.WT mit Ecosurf 1 g/L
1	TA (0,3 Gew.-%)	CO	gefärbt	55	154	123	83	106	124
2					142	80	96	143	157
3					179	119	112	123	135
Mittelwert					158,3333333	107,3333333	97	124	138,6666667
Standardabweichung					18,87679351	23,75570107	14,52583905	18,52025918	16,80277755
1	TA (2 Gew.-%)				234	201	191	314	221
2					195	140	166	213	210
3					274	219	197	250	175
Mittelwert					234,3333333	186,6666667	184,6666667	259	202
Standardabweichung					39,50105484	41,40450861	16,44181661	51,09794516	24,0208243
1	TA (10 Gew.-%)				259	223	201	298	242

Anhang A4: Übersichtstabelle mit Werten zu den Diagrammen in Kapitel 4.3.1 – ungefärbte Baumwolle und Polyester beschichtet mit Tanninsäure und Eisen(III)-chlorid

Versuchsbedingungen	Material	Ausgangszustand	UPF-Wert *vor* Beschichtung	UPF-Wert *nach* Beschichtung
TA (0,3 Gew.-%) mit Eisen(III)-chlorid	CO	ungefärbt	5	214
	PES		12	24

Anhang A5: Übersichtstabelle mit Werten zu den Diagrammen in Kapitel 4.3.2 – ungefärbte und gefärbte Baumwolle und Polyester beschichtet mit Tanninsäure und Eisen(II)-sulfat einschließlich Waschtest

Versuchsbedingungen	Material	Ausgangszustand	UPF-Wert *vor* Beschichtung	UPF-Wert *nach* Beschichtung	UPF-Wert *nach* 1.WT mit ECE 4 g/L
TA (10 Gew.-%) mit Eisen(II)-sulfat	CO	ungefärbt	5	324	401
		gefärbt	55	332	423
	PES	ungefärbt	12	74	68
		gefärbt	37	75	69

Anhang A6: Übersichtstabelle mit Werten zu den Diagrammen in Kapitel 4.4.1 – ungefärbte Baumwolle und Polyester beschichtet mit Polydopamin unter konstantem Rühren mit Kontakt zum Rührfisch einschließlich Waschtests

Versuchsbedingungen	Material	Ausgangszustand	UPF-Wert *vor* Beschichtung	UPF-Wert *nach* Beschichtung	UPF-Wert *nach* 1.WT mit ECE 4 g/L	UPF-Wert *nach* 2.WT mit ECE 4 g/L	UPF-Wert *nach* 1.WT mit Ecosurf 1 g/L	UPF-Wert *nach* 2.WT mit Ecosurf 1 g/L
PDA-Beschichtung unter konstantem Rühren mit Kontakt zum Rührfisch	CO	ungefärbt	5	81	101	110	138	82
	PES		12	28	33	28	29	30

Anhang A7: Übersichtstabelle mit Werten zu den Diagrammen in Kapitel 4.4.2 – ungefärbte Baumwolle und Polyester beschichtet mit Polydopamin ohne Rühren einschließlich Waschtest

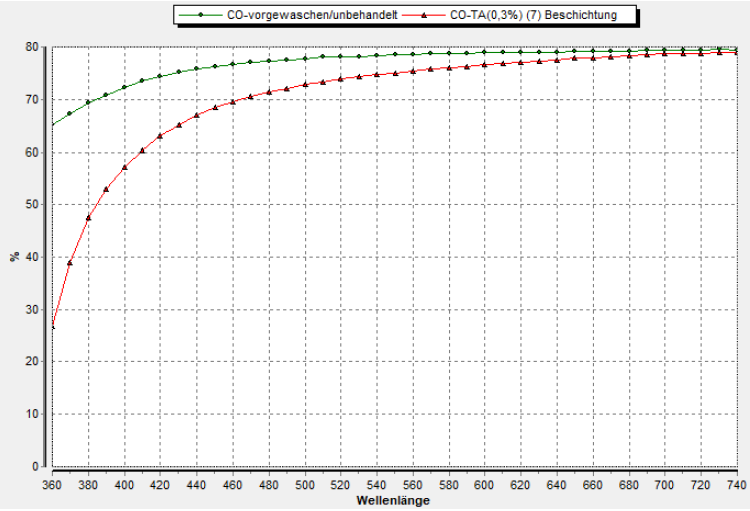
Versuchsbedingungen	Material	Ausgangszustand	UPF-Wert *vor* Beschichtung	UPF-Wert *nach* Beschichtung	UPF-Wert *nach* 1.WT mit ECE 4 g/L
PDA-Beschichtung ohne Rühren	CO	ungefärbt	5	22	20
	PES		12	17	15

Anhang A8: Übersichtstabelle mit Werten zu den Diagrammen in Kapitel 4.4.3 – ungefärbte und gefärbte Baumwolle mit Polydopamin unter konstantem Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch

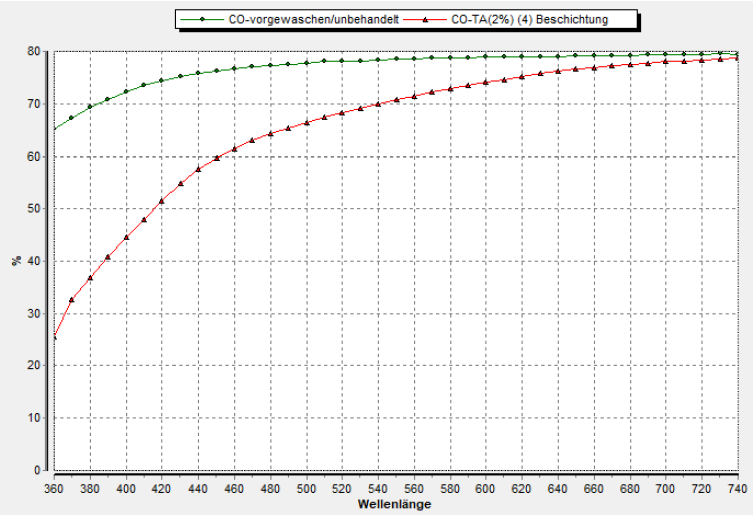
Versuchsbedingungen	Material	Ausgangszustand	UPF-Wert *vor* Beschichtung	UPF-Wert *nach* Beschichtung
PDA-Beschichtung unter konstantem Rühren ohne direkten Kontakt zum Rührfisch	CO	ungefärbt	5	33
		gefärbt	55	67

Anhang B – Abbildungen

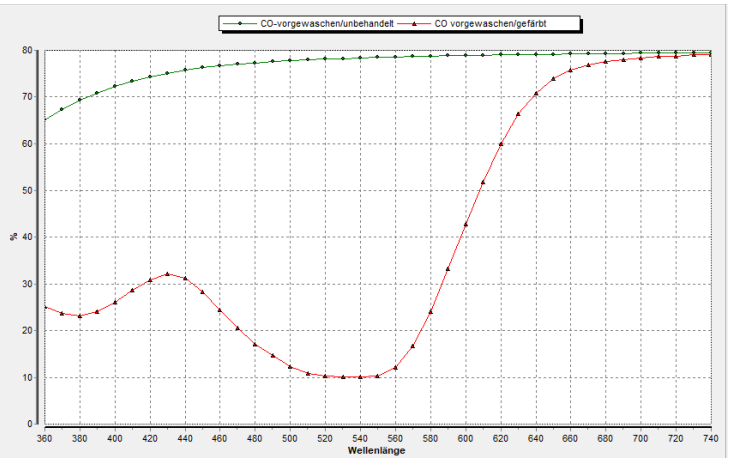
Anhang B1: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Baumwolle (grün) und ungefärbter, mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure beschichteter Baumwollprobe (rot).



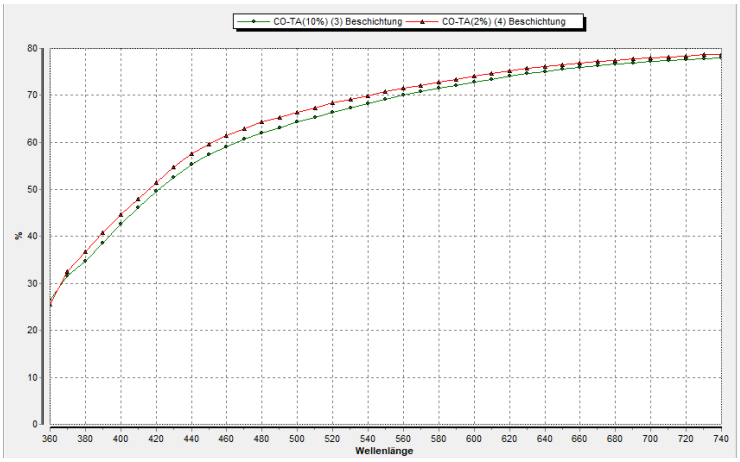
Anhang B2: UV/Vis-Remissionsspektrum von ungefärbter Baumwolle (grün) und ungefärbter, mit 2 Gew.-% Tanninsäure beschichteter Baumwollprobe (rot).



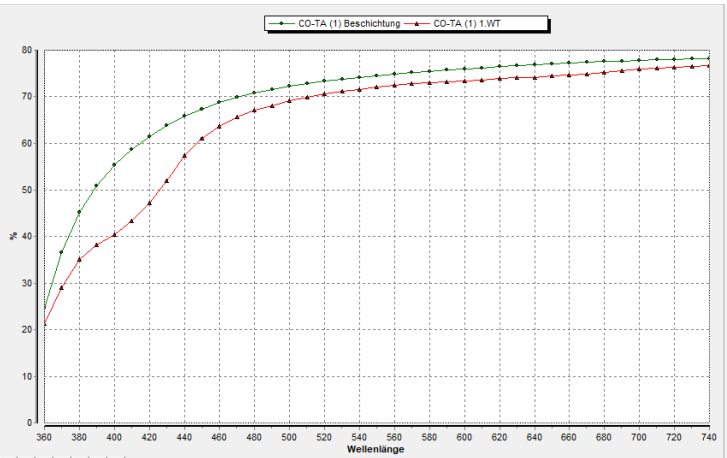
Anhang B3: UV/Vis-Remissionsspektrum von ungefärbter Baumwolle (grün) und gefärbter Baumwolle (rot).



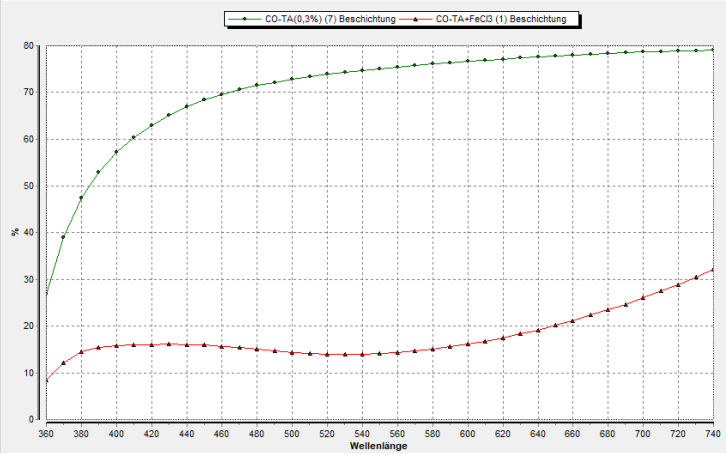
Anhang B4: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter, mit 2 Gew.-% Tanninsäure beschichteter Baumwollprobe (rot) und 10 Gew.-% Tanninsäure beschichteter Baumwollprobe (grün).



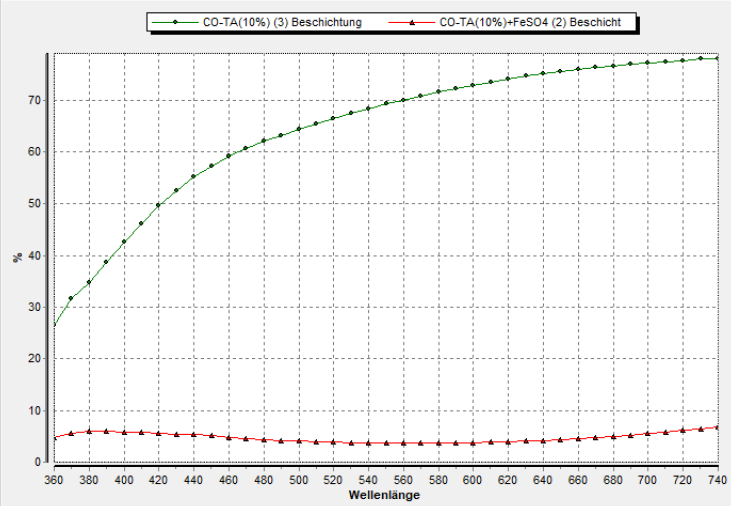
Anhang B5: UV/Vis-Remissionsspektrum der mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure beschichteten Baumwollprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE.



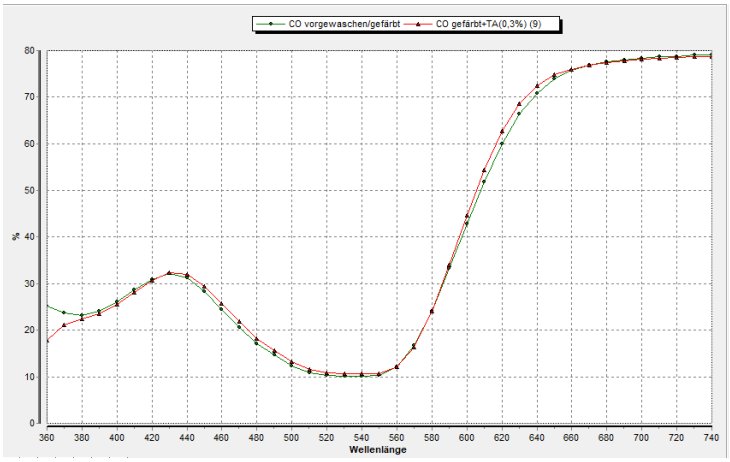
Anhang B6: UV/Vis Remissionsspektrum ungefärbter Baumwollprobe beschichtete mit Tanninsäure 0,3 Gew.-% (grün) und Tanninsäure in Kombination mit Eisen(III)-chlorid (rot).



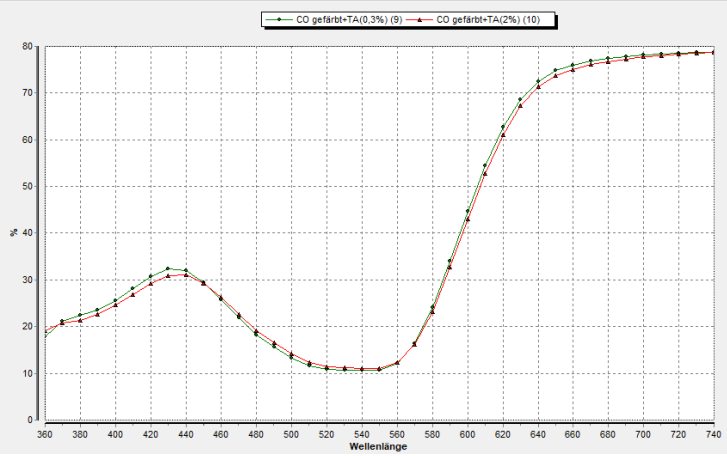
Anhang B7: UV/Vis-Remissionsspektrum der mit 10 Gew.-% Tanninsäure beschichteten Baumwollprobe (grün) und 10 Gew.-% Tanninsäure in Kombination mit Eisen(II)-sulfat (rot).



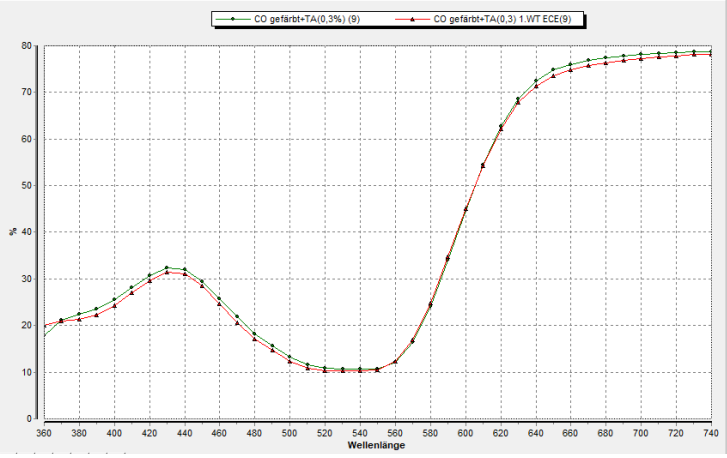
Anhang B8: UV/Vis-Remissionsspektrum gefärbter Baumwollproben vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure (rot).



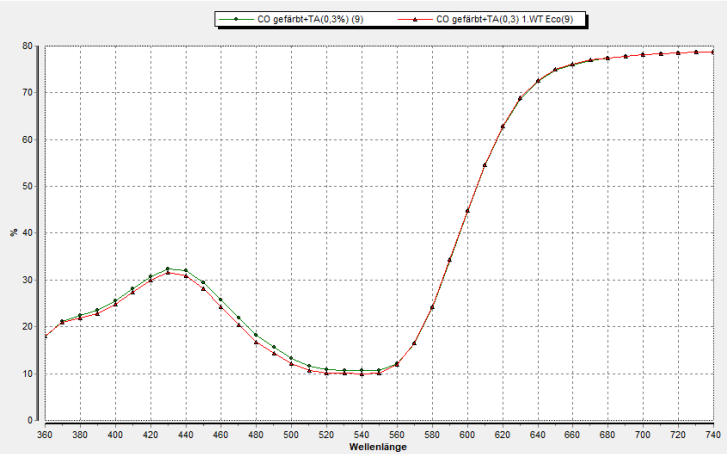
Anhang B9: UV/Vis-Remissionsspektrum gefärbter, mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure beschichteter Baumwollprobe (grün) und 2 Gew.-% Tanninsäure beschichteter Baumwollprobe (rot).



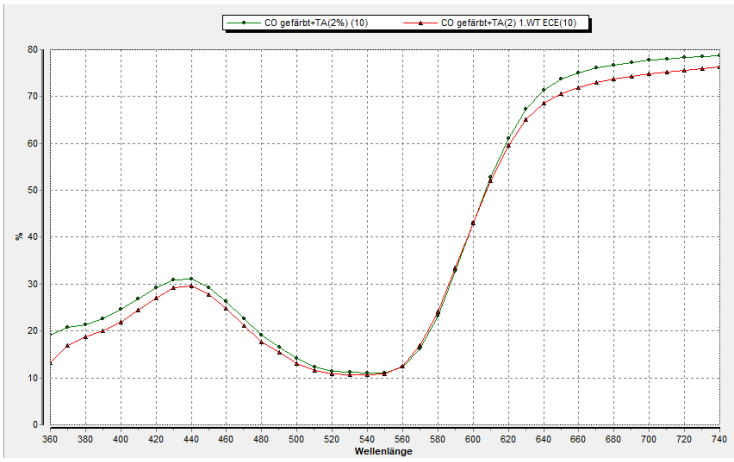
Anhang B10: UV/Vis-Remissionsspektrum gefärbter und mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure beschichteter Baumwollprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE.



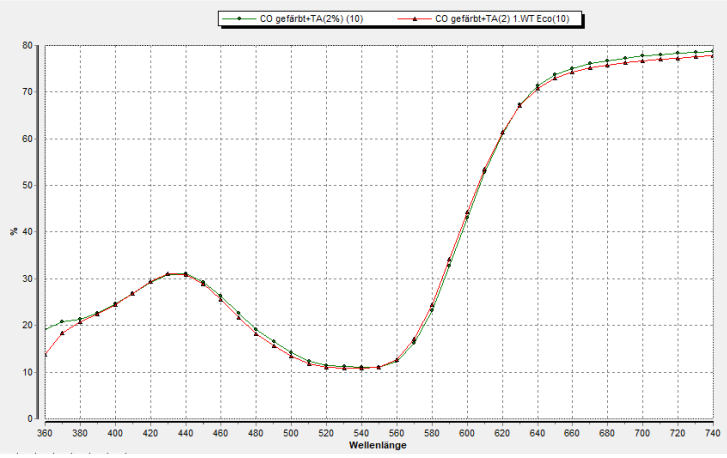
Anhang B11: UV/Vis-Remissionsspektrum gefärbter und mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure beschichteter Baumwollprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit Ecosurf.



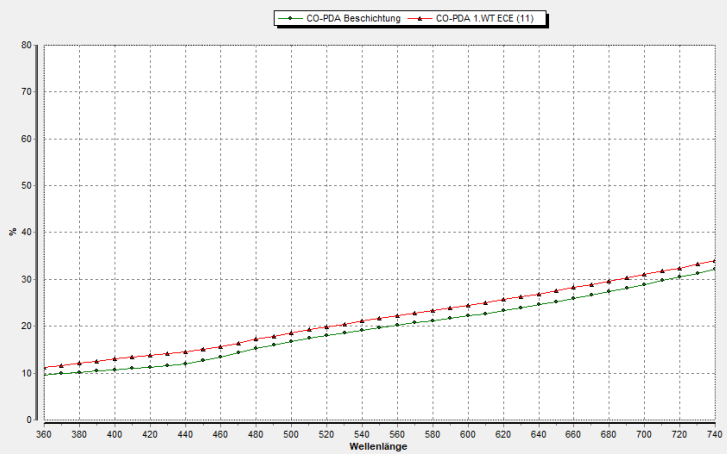
Anhang B12: UV/Vis-Remissionsspektrum gefärbter und mit 2 Gew.-% Tanninsäure beschichteter Baumwollprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE.



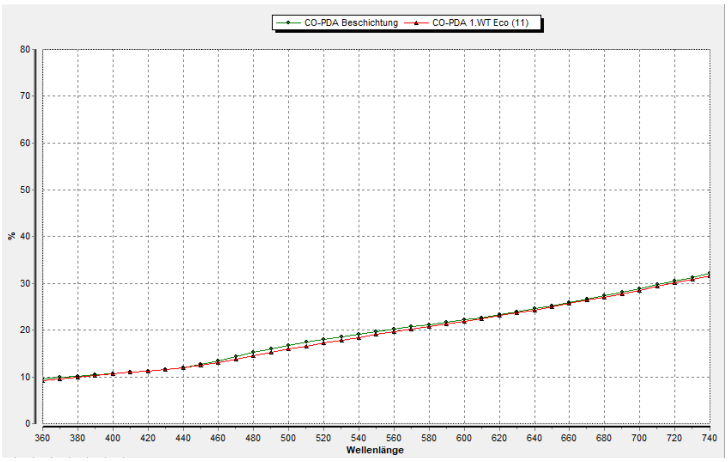
Anhang B13: UV/Vis-Remissionsspektrum gefärbter und mit 2 Gew.-% Tanninsäure beschichteter Baumwollprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit Ecosurf.



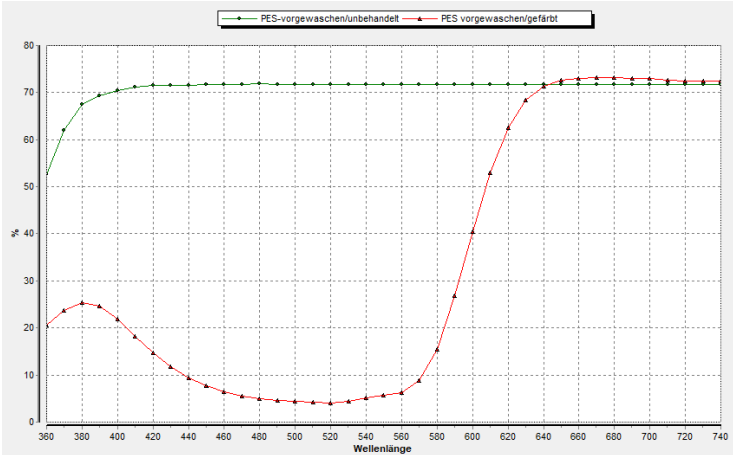
Anhang B14: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter und mit PDA unter Rühren und direktem Kontakt zum Rührfisch beschichteter Baumwollprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE.



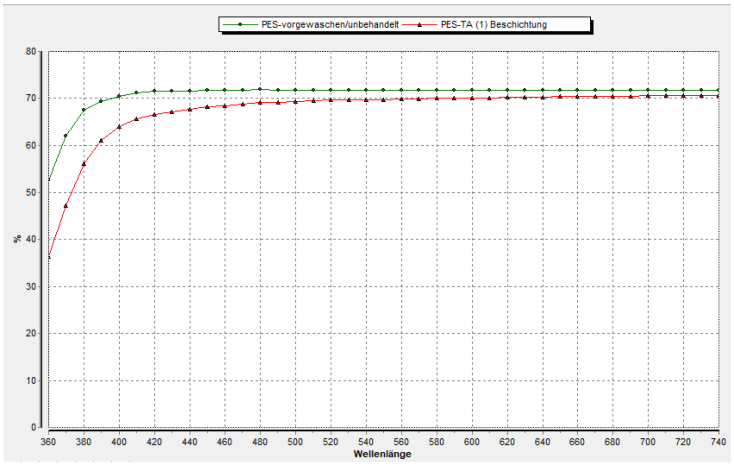
Anhang B15: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter und mit PDA unter Rühren und direktem Kontakt zum Rührfisch beschichteter Baumwollprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit Ecosurf.



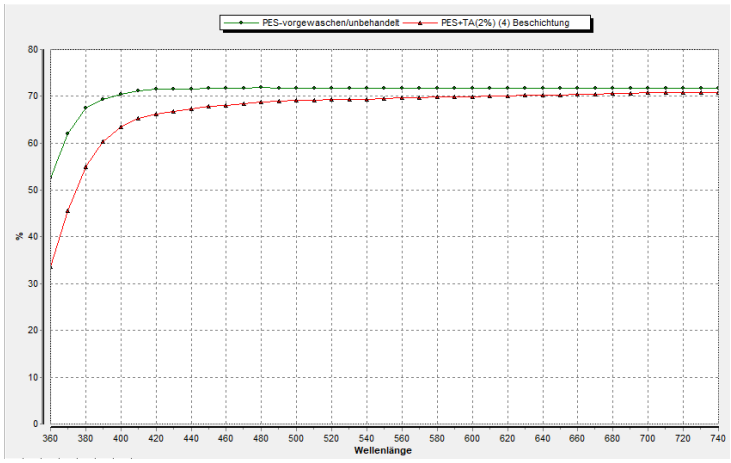
Anhang B16: UV/Vis-Remissionsspektrum von ungefärbtem Polyester (grün) und gefärbtem Polyester (rot).



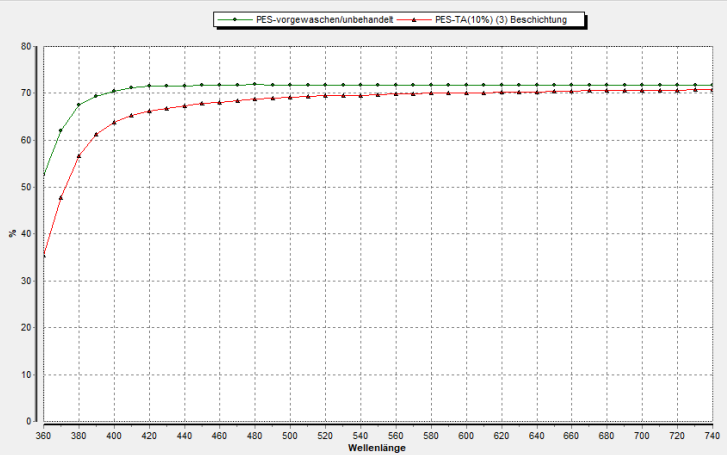
Anhang B17: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Polyesterproben vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit 0,3 Gew.-% Tanninsäure (rot).



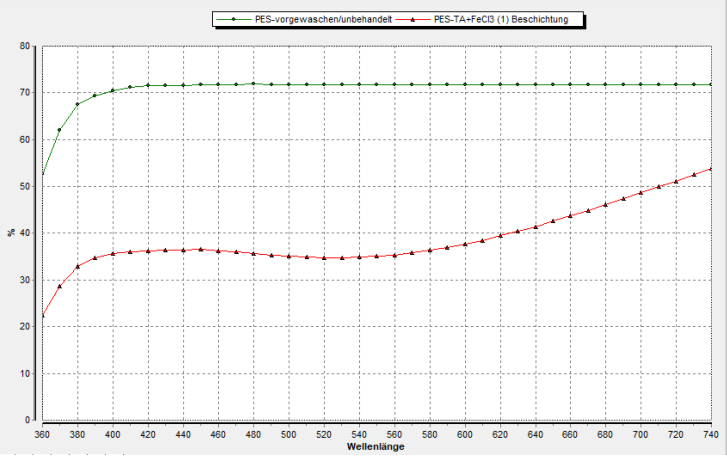
Anhang B18: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Polyesterproben vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit 2 Gew.-% Tanninsäure (rot).



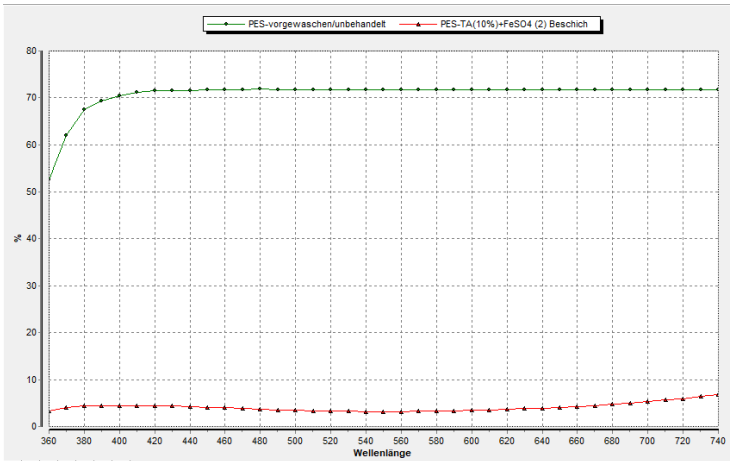
Anhang B19: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Polyesterproben vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit 10 Gew.-% Tanninsäure (rot).



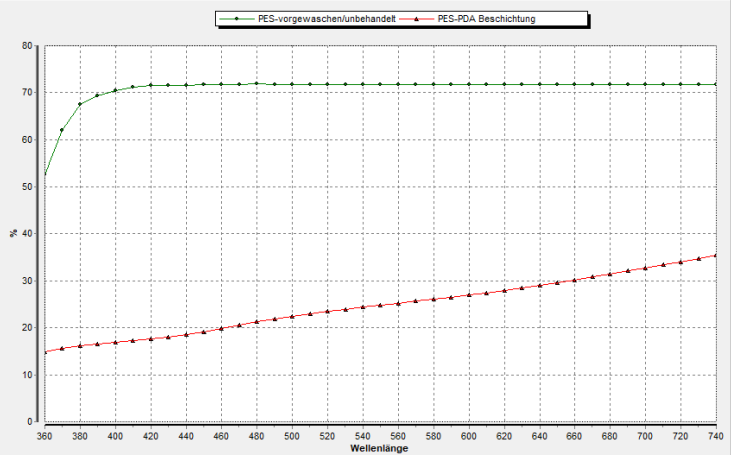
Anhang B20: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Polyesterproben vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit Tanninsäure in Kombination mit Eisen(III)-chlorid (rot).



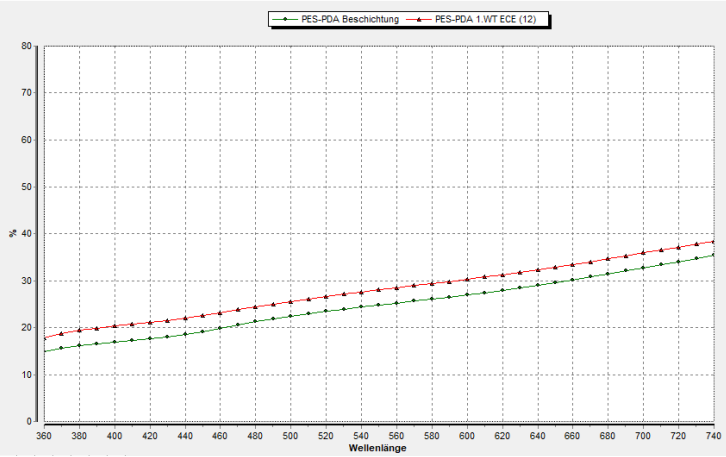
Anhang B21: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Polyesterproben vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit Tanninsäure in Kombination mit Eisen(II)-sulfat (rot).



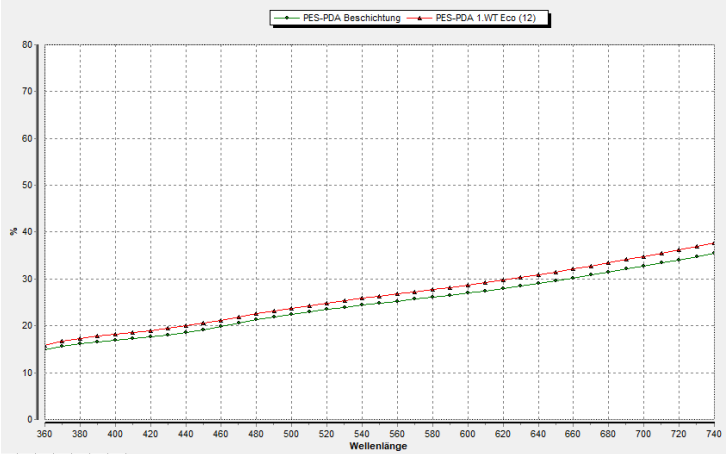
Anhang B22: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter Polyesterprobe vor der Beschichtung (grün) und nach der Beschichtung mit PDA unter Rühren sowie direktem Kontakt zum Rührfisch (rot).



Anhang B23: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter und mit PDA unter Rühren und direktem Kontakt zum Rührfisch beschichteter Polyesterprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit ECE.



Anhang B24: UV/Vis-Remissionsspektrum ungefärbter und mit PDA unter Rühren und direktem Kontakt zum Rührfisch beschichteter Polyesterprobe vor und nach dem ersten Waschtest mit Ecosurf.



Selbstständigkeitserklärung

Selbstständigkeitserklärung zu meiner Bachelorarbeit:

„Entwicklung und Charakterisierung UV-schützender Textilien durch funktionelle biobasierte Beschichtungen auf Basis von Tanninsäure und Polydopamin“

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Quellen werden korrekt angegeben. Ich versichere, dass alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen unter Angabe der Quellen gekennzeichnet wurden.

Ich versichere ferner, dass der Inhalt der Textdatei der digitalen Fassung identisch mit der eingereichten schriftlichen Ausfertigung ist.

Hamburg, den 19.08.2026

Ort, Datum	Unterschrift