



DiTex

DIGITALE TECHNOLOGIEN ALS ENABLER

EINER RESSOURCENEFFIZIENTEN KREISLAUFFÄHIGEN B2B-TEXTILWIRTSCHAFT

Kim Hecht, Serge Lang, Anja Gerhardts, Barbara Boldrini,
Martina Gerbig, Kai Nebel

Kreislauffähige Poloshirts für den B2B- Bereich

Ergebnisse der textiltechnologischen und
spektroskopischen Untersuchungen

Impressum

Autor/innen:

Dr. Kim Hecht (HIT)
Serge Lang (HIT)
Dr. Anja Gerhardts (HIT)
Barbara Boldrini (HSRT)
Martina Gerbig (HSRT)
Kai Nebel (HSRT)

Der vorliegende Beitrag entstand im Forschungsprojekt „DiTex – Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft.“ Das Projekt ist Teil der Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ und wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert im Förderschwerpunkt Forschung für Nachhaltigkeit (FONA).

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

FONA
Forschung für Nachhaltigkeit

ReziProK
Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft –
Innovative Produktkreisläufe

Projektkoordination

Dr. Frieder Rubik, Projektleitung
Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW) GmbH, gemeinnützig
Potsdamer Str. 105
D-10785 Berlin
Tel. +49-6221-64 91 66
Fax +49-30-882 54 39
frieder.rubik@ioew.de
www.ioew.de



| i | ö | w

INSTITUT FÜR
ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Zitiervorschlag:

Hecht, K., Lang, S., Gerhardts, A., Boldrini, B., Gerbig, M., Nebel, K. (2023): Kreislauffähige Poloshirts für den B2B-Bereich – Ergebnisse der textiltechnologischen und spektroskopischen Untersuchungen.

Berlin, Juni 2023

DiTex

DITEX-KREISLAUFWIRTSCHAFT.DE

Verbundpartner:

WILHELM WEISHÄUPL

WILHELM WEISHÄUPL
Hans Peter Weishäupl e.K.
Schwanthalerstrasse 49
D-80336 München



Dibella GmbH
Hamalandstraße 111
D-46399 Bocholt



Hochschule Reutlingen
Fakultät Textil und Design
Alteburgstraße 150
D-72762 Reutlingen

HOHENSTEIN ●

Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH
Schloss Hohenstein
D-74357 Boennigheim



ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
gGmbH
Wilckensstr. 3
D-69120 Heidelberg

Externer Dienstleister:



circular.fashion UG (haftungsbeschränkt)
Skalitzer Strasse 97
D-10999 Berlin, Germany

Assoziierter Partner:



MEWA Textil-Service AG & Co. Management OHG
John-F.-Kennedy-Straße 4
D-65189 Wiesbaden

Für nähere Informationen zum Projekt: www.ditex-kreislaufwirtschaft.de

Zusammenfassung

Der jährlich steigende Konsum von Textilien und die hohe Anzahl an wechselnden Kollektionen („Fast Fashion“) haben gewaltige Auswirkungen auf die Umwelt und werden zunehmend kritisch diskutiert. Ein Lösungsansatz zur Verringerung des ökologischen Fußabdrucks und zur Schonung der Ressourcen stellt die textile Kreislaufführung mit funktionierenden Recyclingkanälen dar. DiTex untersucht diesen Ansatz im B2B-Geschäftsbereich anhand von drei verschiedenen Produktlinien (Poloshirt, Polizei-Hemd, Bettwäsche). Die Miettextilien wurden von den Praxispartnern in Zusammenarbeit mit den Forschungspartnern designt und in der Anwendung unter Praxisbedingungen erprobt. Für das Design spielten neben der Funktionalität die Aspekte Recyclingfähigkeit und Leasing-Eignung eine zentrale Rolle. Zur Beurteilung der Qualität wurden umfangreiche Textilprüfungen und spektroskopische Untersuchungen im Neuzustand sowie im Verlauf der Anwendung durchgeführt. Dabei sollten mögliche Veränderungen der Textilien während der Nutzungsphase detektiert und die Eignung der Textilien für den Einsatz im B2B-Bereich bewertet werden. Das vorliegende Dokument fasst die Ergebnisse der Textilprüfungen und spektroskopischen Untersuchungen für das DiTex-Poloshirt zusammen.

Abstract

Increased consumption of textiles and the growing number of new collections per year (“fast fashion”) have a huge impact on the environment. A potential solution for this problem is a circular economy with working recycling channels, which can help to reduce the environmental footprint and to save resources. The project DiTex analyzes the concept of a textile circular economy for the B2B business sector. In the project, three different products (polo shirt, police shirt, bed linen) were designed by the industry partners and tested as leasing clothing in practice. In the design process, recyclability as well as the suitability for leasing played a key role next to the functionality of the textiles. The field test of the project was accompanied by a variety of textile technological tests and a broad spectroscopical analysis of new and used textile items in order to assess potential changes of quality during the service life and to evaluate the quality and suitability of the textiles for leasing. The results of the quality tests for the polo shirts are summarized in this document.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Methoden	6
2.1	Grundlagen Textilprüfungen.....	6
2.2	Grundlagen Spektroskopie	9
3	Ablauf der Qualitätsuntersuchungen	13
4	Ergebnisse	14
4.1	Textilprüfungen	14
4.1.1	Prototyp (Neuzustand)	14
4.1.2	Anwendungsphase	17
4.2	Spektroskopische Untersuchungen	20
5	Zusammenfassung	22
6	Literaturverzeichnis	23
7	Anhang	24
7.1	Kurzbeschreibung relevanter Prüfmethoden.....	24
7.1.1	Komforteigenschaften	24

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die wichtigsten Bereiche für die optische Spektroskopie des elektromagnetischen Spektrums. Quelle: Hochschule Reutlingen)	10
Abbildung 2: Mehrfachstreuung in stark streuenden Systemen. Quelle: Hochschule Reutlingen)	10
Abbildung 3: Vorgehensweise zur Durchführung der Qualitätsuntersuchungen in der Anwendungsphase.....	13
Abbildung 4: Rasterelektronische Aufnahmen der Maschenware des DiTex-Poloshirts im Neuzustand sowie nach Gebrauch/Pflege unter industriellen Bedingungen.	19
Abbildung 5: FTIR (oben) und UV-Vis-NIR (unten) der Poloshirt Prototypen. Quelle: Hochschule Reutlingen)	20
Abbildung 6: UV-Vis Mittelwertspektren der Poloshirts (schwarz: Neuzustand, rot: 100 Waschzyklen) (Quelle: Hochschule Reutlingen).....	21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Spektrometer und die verwendeten Einstellungen. Mit λ = Wellenlänge, res = Auflösung, t_{int} = Integrationszeit, $\tilde{\nu}$ = Wellenzahl und n = Anzahl an Spektren.	12
Tabelle 2: Ergebnisse der Qualitätsprüfungen an der Maschenware der DiTex Poloshirts in Anlehnung an HQS 704	14
Tabelle 3: Ergebnisse der Konfektionsprüfung am konfektionierten DiTex Poloshirts nach HQS 704.....	15
Tabelle 4: Thermophysiologische Kennzahlen der Maschenware des Poloshirts (Neuzustand) bestimmt über das Hautmodell nach DIN EN ISO 11092. Die Soll-Werte beruhen auf Erfahrungswerten aus der Praxis.	16
Tabelle 5: Hautsensorische Kennzahlen der Maschenware nach 3 Pflegezyklen nach DIN EN ISO 15797. Die Wiederaufbereitung unmittelbar vor der Untersuchung erfolgte, um einen definierten bzw. vergleichbaren Zustand der Textiloberfläche, welche die Ergebnisse beeinflusst, für alle Proben herzustellen.....	17
Tabelle 6: Ergebnis der Konfektionsprüfung der DiTex-Poloshirts aus der Anwendung: Praxistest (61 Shirts) und Hochwaschen (25 Shirts).....	18
Tabelle 7: Berstfestigkeit der Maschenware der DiTex-Poloshirts mit zunehmender Anzahl an Nutzungszyklen nach DIN EIN ISO 13938-2	19
Tabelle 8: Übersicht der Farbechtheiten und Anforderungen an textile Flächengebilde nach HQS 704 Polos und Shirts.	24

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
B2B	business-to-business
bzw.	beziehungsweise
HQS	Hohenstein Qualitätsstandard
PES	Polyester
rPES	recyceltes Polyester
s.	siehe
z. B.	Zum Beispiel

1 Einleitung

Das Ziel von DiTex war es, die textile Kreislaufführung anhand von drei verschiedenen Produktlinien für den B2B-Bereich zu erproben. An das Design der Textilien wurden dabei besondere Anforderungen gestellt. So müssen Miettextilien in einer Kreislaufwirtschaft so konstruiert sein, dass sie einfach recycelt werden können. Für eine möglichst lange Nutzungsdauer spielt daneben die Qualität und Langlebigkeit eine entscheidende Rolle – und das auch unter industriellen Bedingungen. Um negative Umweltauswirkungen zu reduzieren, wurde in DiTex neben diesen Kriterien der Einsatz von Primärrohstoffen betrachtet und dieser möglichst niedrig gehalten.



Auf Basis dieser Überlegungen wurde in DiTex ein Poloshirt entworfen, welches in verschiedenen Anwendungsbereichen zum Einsatz kommt und hier exemplarisch im Rettungsdienst verwendet wurde. Sowohl die Maschenware als auch das Nähgarn und die Zutaten (Knöpfe) bestehen aus 100 % rPES. Es handelt sich somit um ein PES-Monomaterial, das ein ideales System für das Recycling darstellt und von dem eine hohe Beständigkeit zu erwarten ist. Weitere konstruktionsspezifische Details sind im Produkt-Datenblatt enthalten.

Die Qualität der DiTex-Textilien wurde über verschiedene textiltechnologische Prüfungen und Untersuchungen der Komfoteigenschaften analysiert. Ergänzend dazu wurden spektroskopische Untersuchungen an der textilen Fläche durchgeführt, welche Veränderungen der Oberfläche und Zusammensetzung detektieren und somit zur Qualitätskontrolle genutzt werden können. Im Folgenden werden die verwendeten

Prüf- bzw. Untersuchungsmethoden kurz vorgestellt; darüber hinaus sind detaillierte Prüfabläufe und -bedingungen im Anhang beschrieben. Daran anschließend werden der Ablauf und die Ergebnisse der Qualitätsuntersuchungen diskutiert und eine Zusammenfassung mit Ausblick gegeben.

2 Methoden

2.1 Grundlagen Textilprüfungen

Basis für die Textilprüfungen sind die Hohenstein Qualitätsstandards (HQS) 701ff, welche Anforderungen an Leasing-Textilien sowie geeignete Prüfverfahren spezifisch für verschiedene Anwendungsbereiche definieren [Hohenstein 2017]. Als Grundlage für die Untersuchungen dient das Textil im Neuzustand und Anforderungen werden an das textile Flächenmaterial, die verschiedenen Zutaten sowie das konfektionierte Gesamttextil gestellt. Die Pflege der Textilien (z. B. zur Bewertung der Pflegeeigenschaften) erfolgt nach genormten Prüfverfahren gemäß DIN EN ISO 15797, welche die Industriewäsche simulieren. Maßgeblich für das DiTex-Poloshirt ist der HQS 704. Für die Qualitätsuntersuchungen im Projekt wurde der Fokus auf die Bewertung des Flächenmaterials gelegt. Im Folgenden wird eine kurze Zusammenfassung der verschiedenen Prüfverfahren gegeben. Weitere Details zu den Prüfbedingungen sind im Anhang zu finden.

Farbechtheiten

Farbechtheiten beschreiben die Widerstandsfähigkeit der Farbe von Textilien. Diese kann gegen verschiedenen Umgebungs- bzw. Prozessbedingungen geprüft werden, die für Textilien in der Praxis relevant sind und im jeweiligen Prüfverfahren simuliert werden. Die Messprobe wird hierzu in der Regel mit einer spezifischen wässrigen Lösung befeuchtet oder gewaschen. Ggf. wird die Messprobe einer definierten Beanspruchung ausgesetzt, z.B. künstlicher Strahlung (Lichtechtheit). Die zu beobachtende Farbänderung der Messprobe im Vergleich zur unbehandelten Probe wird visuell durch Vergleich mit Paaren von Graumaßstäben (nach DIN EN ISO 105 – A02 und –A03) oder instrumentell bestimmt. Bei einzelnen Prüfungen werden Begleitgewebe zusammen mit der Messprobe behandelt und zusätzlich deren Anbluten untersucht. Weitere Details zu den Prüfbedingungen sind in den jeweiligen Normen der Farbechtheiten enthalten, für die eine Übersicht im Anhang zu finden ist (s. Tabelle 8).

Auch bei hohen Farbechtheiten können Farbveränderungen bei häufiger Pflege je nach individueller Prozessbedingung nicht ausgeschlossen werden. Erfahrungswerte zeigen jedoch, dass textile Flächengebilde in der Regel über eine hohe Anzahl von Pflegezyklen stabil bleiben, wenn sie nach rund 25 Pflegezyklen keine gravierende Veränderung des Warenbilds und der Farbe zeigen und gute mechanische Eigenschaften ausweisen [Hohenstein 2017]. Daher werden farbige Textilien, die als Oberstoff eingesetzt werden, nicht nur auf Farbechtheiten geprüft, sondern laut HQS zusätzlich mindestens 25 Pflegezyklen und einer visuellen Abmusterung unterzogen, um die Leasing-Eignung zu bewerten.

Mechanische Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften beschreiben die Beständigkeit von textilen Flächengebilden gegenüber mechanischer Beanspruchung. Die mechanischen Eigenschaften lassen sich über verschiedene Prüfverfahren analysieren:

Zugfestigkeit: Die Zugfestigkeit von textilen Flächengebilden wird als ein typisches Maß für die mechanische Beständigkeit von Geweben angegeben. Das Verfahren lässt sich auch auf andere Flächengebilde mit elastischen Eigenschaften anwenden. Die Zugfestigkeit kann über die Höchstzugkraft (und Höchstzugkraft-Dehnung) nach dem Streifen-Versuch gemäß DIN EN ISO 13934-1 ermittelt werden. In dem Prüfverfahren wird ein Messstreifen definierter Größe mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit gedehnt, bis er bricht. Dabei werden die Höchstzugkraft (maximale Zugkraft) und Höchstzugkraft-Dehnung (Dehnung bei Höchstzugkraft) aufgezeichnet.

Berstfestigkeit: Für Maschenware wird in der Regel die Berstfestigkeit als ein Maß für die mechanische Beständigkeit angegeben. Sie kann über das Prüfverfahren DIN EN ISO 13938-2 ermittelt werden. Dabei wird eine Messprobe auf eine dehnbare Membran gespannt, auf deren Unterseite der Luftdruck mit konstanter Geschwindigkeit erhöht wird. Dies führt zum Aufwölben von Membran und Messprobe, bis ein Bersten der Messprobe erreicht wird. Der Berstdruck und die Berstwölbung werden aufgezeichnet.

Scheuerbeständigkeit: Die Scheuerbeständigkeit beschreibt, wie stabil ein textiles Flächengebilde gegen die Einwirkung einer Scheuerbelastung ist. Sie kann mithilfe des Martindale-Verfahrens nach DIN EN ISO 12947-2 bestimmt werden. Hierbei wird eine kreisrunde Messprobe unter definierter Belastung gegen ein Standardgewebe als Scheuermittel bewegt. Dies erfolgt translatorisch in Form einer Lissajous-Figur. Der Probenhalter ist dabei zusätzlich drehbar um die Achse senkrecht zur Probenebene. Die Scheuerbeanspruchung wird bis zur Zerstörung der Probe durchgeführt, wobei der Zustand der Messprobe nach festgelegten Untersuchungsintervallen überprüft wird. Das Intervall (d.h. die entsprechende Anzahl der Scheuertouren), bei dem die Messprobe noch intakt ist, wird aufgezeichnet.

Pillneigung: Pills sind kleine, kugelförmige Gebilde, die auf der textilen Oberfläche entstehen können. Sie bilden sich, wenn Fasern aus der textilen Oberfläche heraustreten und verknäueln. Die

Beständigkeit von textilen Flächengebilden gegenüber Pillbildung kann über ein modifiziertes Martindale-Verfahren nach DIN EN ISO 12945-2 bestimmt werden. Dabei wird eine kreisförmige Messprobe bei definierter Belastung gegen ein Scheuermittel des gleichen Materials in Form einer Lissajous-Figur bewegt. Die Probe ist leicht um die Achse senkrecht zur Probenebene drehbar. Nach festgelegten Intervallen erfolgt eine visuelle Bewertung der Pillbildung.

Pflegeeigenschaften

Maßänderung: Die Maßänderung von Textilien wird nach einer festgelegten Anzahl von Wasch- und Trocknungszyklen nach DIN EN ISO 5077 bestimmt. Sie ergibt sich aus der Differenz der Maße vor und nach der Behandlung, bezogen auf die Ausgangsmaße.

Selbstglättung Fläche: Das Aussehen der Glätte beschreibt die Ebenheit von textilen Flächengebilden, die visuell nach einer definierten Anzahl von Wasch- und Trocknungszyklen gemäß DIN EN ISO 15487 bewertet wird. Zur Abmusterung der Poloshirts wurde der AATCC-Glättestandard Nr. 124 (Fläche) verwendet

Verdrehen der Fläche: Das Verdrehen der Nähte (konfektionierte Ware) bzw. Fläche (Flächengebilde) beschreibt einen Schrägverzug zwischen verschiedenen Stoffbahnen bzw. innerhalb des Flächenmaterials, der nach einer definierten Anzahl von Wasch- und Trocknungsprozessen gemäß DIN EN ISO 16322-2 bzw. DIN EN ISO 16322-3 ermittelt wird.

Thermophysiologische und hautsensorische Eigenschaften („Komfort“)

Thermophysiologie: Unter den thermophysiologischen Eigenschaften werden das Feuchtigkeits- und Wärmemanagement von Textilien verstanden. Dieses lässt sich über das sogenannte Hautmodell untersuchen, das die Wärme- und Feuchteabgabe der menschlichen Haut simuliert. Bei der Messeinrichtung handelt es sich um eine elektrisch beheizbare, poröse Sintermetallplatte, der Wasser zugeführt wird. Sie befindet sich in einer Klimakammer, in der sich Temperatur, Feuchtigkeit und Luftbewegung einstellen lassen, sodass verschiedene Umgebungsbedingungen simuliert werden können. Stationäre Messungen simulieren „normale“ Tragebedingungen, unter denen die Feuchtigkeitsabgabe von der Haut über Wasserdampf erfolgt und eine konstante Wärme- und Feuchtigkeitsabgabe stattfindet. Auch Schweißimpulse bei körperlicher Anstrengung können über instationäre Hautmodellmessungen nachgestellt werden kann. Die Messeinrichtung ist in der DIN EN ISO 11092 beschrieben. Mit dem Hautmodell lassen sich spezifische thermophysiologische Kennzahlen ermitteln:

- Der Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} („Wärmeisolation“) gibt an, inwieweit ein Textil den (trockenen) Wärmefluss von der Haut drosselt und isolierend wirkt.
- Der Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} („Atmungsaktivität“) beschreibt den Widerstand des Textils gegen Wasserdampf, der die textile Fläche passiert.
- Der Feuchtedurchgangssindex i_{mt} bezieht die Atmungsaktivität auf die Wärmeisolation und eliminiert den Einfluss der Textildicke (dickere Textilien sind weniger atmungsaktiv). Der Wert ist konstruktionsspezifisch und errechnet sich aus der Gleichung $i_{mt} = R_{ct}/R_{et} \cdot 60 \text{ Pa/K}$. Es können Werte zwischen 0 und 1 erreicht werden. Je höher der Wert, desto besser die Thermophysiologie.
- Die Kurzzeit-Wasserdampfaufnahmefähigkeit F_i stellt die Wasserdampfaufnahmefähigkeit der textilen Fläche unter normalen Tragebedingungen dar. Sie wird aus der Gewichtszunahme der textilen Fläche im konstanten Wasserdampfstrom bestimmt.
- Pufferwirkung: Die Pufferwirkung beschreibt das Vermögen, das Mikroklima zwischen Haut und Textil bei Schweißimpulsen physiologisch angenehm zu halten (Temperatur, Feuchte) und die spontane Feuchtigkeitszunahme bei Anstrengung abzuf puffern. F_d

(Feuchteausgleichszahl) beschreibt die Pufferwirkung von Wasserdampf, K_f (Pufferkennzahl) beschreibt die Pufferwirkung von flüssigem Schweiß.

- Über das Wasserrückhaltevermögen ΔG wird ausgedrückt, wieviel flüssiges Wasser von der textilen Fläche aufgenommen bzw. rückgehalten werden kann.

Der **thermophysio-logische Tragekomfort** von textilen Flächengebilden ergibt sich aus der Gesamtheit der verschiedenen Kennzahlen. In einer vergangenen Forschungsarbeit [Hohenstein 1982] wurde ein Bewertungssystem für verschiedene Flächengebilde auf Basis von Schulnoten entwickelt, in das die verschiedenen Kennzahlen einfließen. Als messtechnisch signifikant können Unterschiede in der Note TK_T von 0,3 und mehr bewertet werden. Subjektiv wahrgenommen werden Unterschiede in den Werten von mehr als 0,5.

Hautsensorik: Neben den thermophysio-logischen haben die hautsensorischen Eigenschaften von Textilien einen Einfluss auf das Komfortgefühl, insbesondere dann, wenn sich das Textil im direkten Kontakt mit der Haut befindet. Die Hautsensorik beschreibt das Empfinden, das durch das Textil auf der Haut ausgelöst wird (z.B. Kratzen). Folgende materialspezifische Kenngrößen können zur Beschreibung der hautsensorischen Eigenschaften herangezogen werden:

- Der Klebeindex i_k beschreibt, wie stark ein Textil auf der schweißnassen Haut anklebt. Je kleiner der Index, desto angenehmer das Komfortgefühl.
- Der Benetzungsindex i_o stellt die Sorptionsgeschwindigkeit von Wasser in die textile Fläche dar. Je kleiner der Index, desto angenehmer das Empfinden (weniger „Kleben“) auf der Haut.
- Der Oberflächenindex i_o beschreibt, inwieweit sich ein Textil auf der Haut rau/kratzig oder zu glatt („seifig“) anfühlt.
- Die Kontaktpunktzahl n_k stellt die Zahl der Kontaktpunkte zwischen Textil und Haut n_k dar. Je kleiner die Anzahl der Kontaktpunkte, desto angenehmer das Komfortgefühl.
- Steifigkeit s eines Textilstreifens

Der **hautsensorische Komfort** ergibt sich aus der Gesamtheit der verschiedenen, materialspezifischen Kennzahlen der Hautsensorik. In einem vergangenen Forschungsprojekt [Hohenstein 1990] wurde ein Bewertungssystem auf Basis von Schulnoten entwickelt, in das die verschiedenen Kennzahlen einfließen – die hautsensorische Komfortnote TKH . Die Genauigkeit liegt bei 0,3 (Standardabweichung). Subjektiv empfunden werden Unterschiede von 0,5 und mehr.

Rasterelektronenmikroskopie (REM)

Ein vergrößertes Abbild der Textiloberfläche lässt sich mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie erhalten. Bei der Untersuchung wird die textile Oberfläche mithilfe eines fokussierten Elektronenstrahls abgerastert. Die Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Oberfläche geben Aufschluss über die Eigenschaften der Probenoberfläche (z.B. Topographie) und erlauben, ein vergrößertes Bild mit einer hohen Schärfentiefe und Auflösung im Nanometerbereich zu erzeugen.

2.2 Grundlagen Spektroskopie

Die optische Spektroskopie umfasst ein vielfältiges Forschungsgebiet, das die Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie untersucht. Diese spektroskopischen Verfahren erstrecken sich über ein breites Frequenzspektrum, von UV/VIS-Bereich bis Mittel-Infrarot (s. Abbildung 1) und bieten dadurch umfassende Erkenntnisse über die molekulare, supramolekulare und morphologische Beschaffenheit von Materialien.

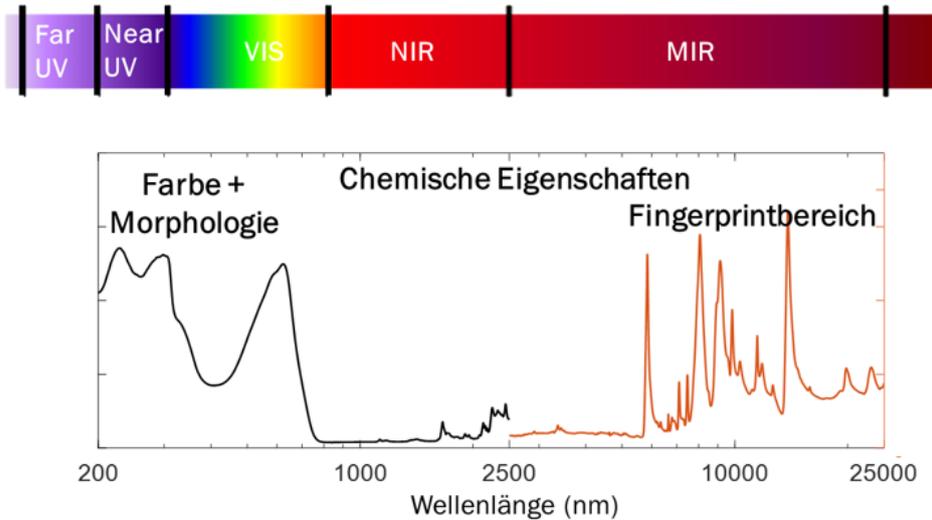


Abbildung 1: Die wichtigsten Bereiche für die optische Spektroskopie des elektromagnetischen Spektrums (Quelle: Hochschule Reutlingen)

Textilien sind heterogene, meist gefärbte und stark lichtstreuende Materialien. Die Lichtausbreitung in solchen festen Systemen wird von zwei Prozessen bestimmt: Lichtabsorption und Lichtstreuung. Ursache der Streuung sind Unterschiede in dem Brechungsindex innerhalb Komponenten einer festen Phase oder zwischen fester Phase und Medium (z. B. Luft).

Wie in Abbildung 2 dargestellt, kann das einkommende Licht ein absorbierendes und streuendes System, oft durch mehrere Streuevents, durchdringen (diffuse Transmission), absorbiert werden (Absorption) oder wieder aus der Eintrittsoberfläche austreten (diffuse Reflexion). Die Absorption elektromagnetischer Wellen gibt Aufschluss über die chemische Zusammensetzung, das gestreute Licht über die Morphologie.

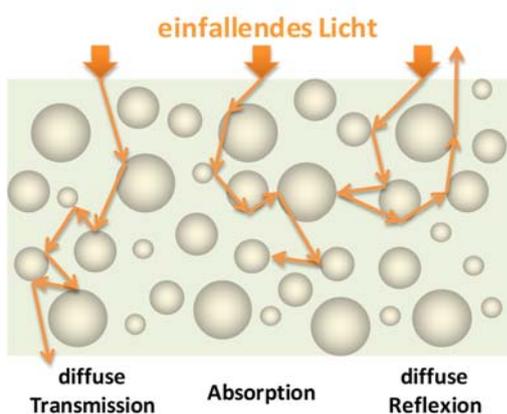


Abbildung 2: Mehrfachstreuung in stark streuenden Systemen (Quelle: Hochschule Reutlingen)

chromophoren Gruppen (farbgebende Strukturgruppen). Diese findet im Bereich von 200 bis 800 Nanometer (nm) Wellenlänge statt. In festen Systemen wie Textilien, sind die Farbinformationen und Streuungseffekte im UV-Vis-Bereich stark überlappend. Damit ist nicht nur die Beurteilung von Farbe und Farbechtheit möglich, sondern auch durch Veränderungen in der Materialstruktur die Qualität von Oberflächen.

Die Anwendung von spektroskopischen Messmethoden In der textilen Analytik bietet im Vergleich zu Standard-Textilprüfungen gewisse Vorteile: die optische Spektroskopie ist eine zerstörungsfreie Analysetechnik, ist schnell und effizient und kann zur Analyse einer Vielzahl von textilen Eigenschaften eingesetzt werden, wie Zusammensetzung, Struktur, Farbe, Feuchtigkeitsgehalt usw.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Kombination von UV-Vis-, Nahinfrarot- (NIR) sowie Mittelinfrarot- (MIR) Spektroskopie angewendet.

UV-Vis-Spektroskopie

Die UV-Vis-Spektroskopie (auch Elektronenspektroskopie genannt) befasst sich mit der Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit sogenannten

NIR und MIR Spektroskopie

Die IR-Spektroskopie teilt sich in den nahen und mittleren IR-Bereich auf. Die Wellenlänge des mittleren Infrarots erstreckt sich von 2500 - 25000 nm (Wellenzahlbereich 4000 - 500 cm^{-1}). Hier werden Molekülschwingungen aktiviert. Besonders wichtig ist in MIR der Bereich zwischen 1300 - 1000 cm^{-1} , der sogenannte Fingerprint-Bereich. Der Fingerprint-Bereich ist charakteristisch für jede Verbindung, wodurch es möglich wird, verschiedene Substanzen anhand ihrer individuellen spektralen Signaturen zu identifizieren und zu analysieren.

Der NIR-Bereich schließt direkt an den sichtbaren Bereich an und umfasst Wellenlängen von 800 - 2500 nm. In diesem Bereich absorbieren Obertöne und Kombinationsschwingungen.

Durch die starke Überlappung von Kombinations- und Obertönen zeigen NIR-Spektren sehr breite Banden.

Für die Auswertung der Spektren ist eine univariate Analyse nicht mehr ausreichend. Es werden daher geeignete rechnerische Auswerteverfahren benötigt, die das Selektivitätsproblem statistisch lösen. Dazu werden multivariate Verfahren eingesetzt.

Multivariate Datenanalyse

Die multivariate Datenanalyse ist eine statistische Methode zur Untersuchung von komplexen Datensätzen. Mit Hilfe der multivariaten Datenanalyse können Zusammenhänge zwischen Variablen identifiziert, Muster erkannt und Schlussfolgerungen gezogen werden. Dies kann dazu beitragen, verborgene Strukturen oder Trends in den Daten aufzudecken. Mit der Hilfe von Algorithmen wie PCA (Principal Component Analysis; Hauptkomponentenanalyse) lassen sich die Spektren mit den Qualitätsparametern korrelieren.

Dabei werden verschiedene Datenvorverarbeitungen der Spektren eingesetzt, um aus der Messung des Gesamtspektrums die Streuinformation möglichst genau von der Absorptionsinformation zu trennen.

Verwendete Spektrometer

In der textilen Analytik wird üblicherweise die Reflexionsspektroskopie eingesetzt. Dabei wird der Lichtstrahl auf die Probe geführt und dort aufgrund der rauen Oberfläche reflektiert.

Die Vermessung der Proben erfolgte mit verschiedenen Spektrometern.

Für präzise spektrale Untersuchungen der Prototypen im Labor wurden Hochleistungs-Desktopspektrometer-Geräte eingesetzt, um genaue und reproduzierbare Ergebnisse zu gewährleisten.

- Perkin Elmer FTIR Spektrometer Frontier mit UATR-KRS5 Messeinheit (4000-450 cm^{-1} , 2.5-22 μm)
- Perkin Elmer UV/Vis/-NIR Spektrometer Lambda 1050 mit 150 mm Spectralon® Ulbrichtkugel (nur NIR Bereich, 900-2500 nm)

Die Untersuchungen an Prototypen dienten zur Optimierung der Messparameter und Messgeometrie, zur Bestimmung der Wiederholbarkeit und Messgenauigkeit der Geräte und zur Charakterisierung und Ermittlung des spektralen Fingerprints der ausgewählten Textilien.

Um die spektroskopischen Messungen in Echtzeit während der Praxisphase direkt vor Ort in den Wäschereien durchführen zu können, wurden 3 verschiedene mobile Spektrometer angewendet, die zusammen in Sinne der Datenfusion den kompletten optischen Bereich von 300 nm bis 15 μm abdecken können:

- Prozess-Ulbrichtkugel Avasphere mit integrierter Halogenbeleuchtung der Firma Agilent gekoppelt mit Prozessspektrometer NIR Bereich (Tec5 PGS, 300-1100 nm)
- FTNIR Mikrospektrometer Neospectra SILab (1300-2500 nm)

- FTIR Handheld Spektrometer 4300 mit Diamant ATR Messkopf der Firma Agilent (4000-650 cm^{-1} , 2.5-15 μm)

Die mobilen Geräte sind tragbar, einfach zu bedienen und erfordern keine aufwändige Laborumgebung.

In Tabelle 1 sind die Spektrometer und die für die jeweilige Messung verwendeten Parameter dargestellt. Bei der MIR- Messung wird eine Mehrfachbestimmung durchgeführt. Hierfür wird jeweils dreimal hintereinander die Probe an verschiedenen Punkten vermessen.

Tabelle 1: Übersicht über die verwendeten Spektrometer und die verwendeten Einstellungen. Mit λ = Wellenlänge, res = Auflösung, t_{int} = Integrationszeit, $\tilde{\nu}$ = Wellenzahl und n = Anzahl an Spektren.

UV/Vis/NIR (Prototypen)

Spektrometer: Perkin Elmer® Lambda 1050 mit Ulbrichtkugel 150 mm Spectralon

Messanordnung: diffuse Reflexion

λ / nm	res / nm	t_{int} / s
200–2500	2	0,52

MIR (Prototypen)

Spektrometer: Perkin Elmer® Frontier FT-IR mit ATR Accessory

Messanordnung: abgeschwächte Totalreflexion

$\tilde{\nu}$ / cm^{-1}	res / cm^{-1}	n
450-4000	4	16

UV-Vis (Praxistest)

Spektrometer: UV-Vis Spektrometer Tec5 PGS + Prozess-Integrationskugel Avasphere

Messanordnung: diffuse Reflexion

λ / nm	res / nm	t_{int} / ms	n
300-1100	1	1,5	100

NIR (Praxistest)

Spektrometer: FTNIR Neospectra Micro SiLab

Messanordnung: quasi diffuse Reflexion

λ / nm	res / nm	t_{int} / s
1300-2500	5	2

MIR (Praxistest)

Spektrometer: FTIR Handheld Agilent 4300 mit ATR Kristall

Messanordnung: abgeschwächte Totalreflexion

$\tilde{\nu}$ / cm^{-1}	res / cm^{-1}	n
650-4000	4	16

3 Ablauf der Qualitätsuntersuchungen

Die Qualitätsuntersuchungen an den DiTex-Textilien erfolgten zum einen an den Prototypen im Neuzustand, sodass bereits vor dem Praxistest eine erste Einordnung zur Leasing-Eignung formuliert werden konnte. Es wurden im Anschluss kleinere Optimierungen am Design durchgeführt, welches dann im Praxistest erprobt wurde. Weitere Qualitätsuntersuchungen wurden während und nach Abschluss der Anwendungsphase durchgeführt und zielten darauf ab, mögliche gebrauchts- und waschbedingte Veränderungen am Textil zu detektieren und die allgemeine Performance der Textilien unter Praxisbedingungen zu bewerten. Die Vorgehensweis zur Durchführung der Untersuchungen ist in Abbildung 3 gezeigt.



Abbildung 3: Vorgehensweise zur Durchführung der Qualitätsuntersuchungen in der Anwendungsphase

Auf Basis von Literaturdaten wird für Shirts im Leasing-Bereich von durchschnittlich 40 Nutzungszyklen ausgegangen [Witteveen 2022]. Aufgrund des Designs der DiTex-Poloshirts wurde eine

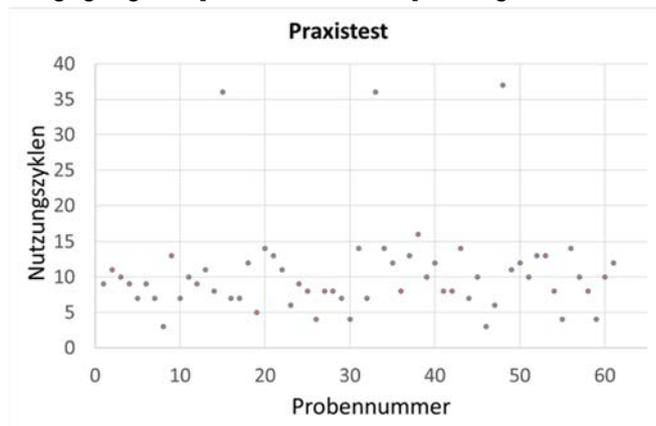


Abbildung 1: Auswahl der Proben der DiTex-Poloshirts aus dem Praxistest

vergleichsweise hohe Beständigkeit antizipiert und von mindestens 50 Nutzungszyklen in der Praxis ausgegangen. Durch Verzögerungen im Praxistest, hauptsächlich Corona-bedingt, konnte diese Zahl an Nutzungszyklen nicht erreicht werden. Um die Eignung der Textilien unter Praxisbedingungen dennoch möglichst gut bewerten zu können, wurde nach Abschluss des Praxistests ein kleiner Teil der Textilien „hochgewaschen“, d. h. es wurden weitere Pflegezyklen unter Praxisbedingungen durchlaufen. Dabei waren die Textilien nicht im Gebrauch, d.h. eine Gebrauchsbelastung fand nicht statt. Das „Hochwaschen“ erfolgte daher über die erwarteten Nutzungszyklen hinaus auf 100 Zyklen.

Jede Produktlinie war mit rund 1.000 Textilien in der Anwendung. Anlehnend an die DIN EN ISO 2859-1 wurde ein Probenumfang von mindestens 80 Textilien im Vergleich zur Neuware abgemustert und spektroskopisch analysiert. Konkret verteilte sich dies auf 61 Textilien nach dem Praxistest (bis 37 Nutzungszyklen) und weitere 25 Textilien nach dem Hochwaschen auf 100 Zyklen. Zusätzliche spektroskopische Daten wurden während des Praxistests nach etwa 15 Zyklen mithilfe des mobilen IR-

Spektrometers generiert, dessen Eignung zur Qualitätskontrolle vor Ort in der Praxis bewertet werden sollte. An einzelnen Teilen wurden zusätzlich Textilprüfungen durchgeführt, deren Ergebnisse mit den spektroskopischen Daten in Relation gestellt wurden.

4 Ergebnisse

4.1 Textilprüfungen

4.1.1 Prototyp (Neuzustand)

Die Untersuchung des Prototyps erfolgte am Neumaterial bzw. nach der Pflege nach DIN EN ISO 15797 (Finishertrocknung). Die Ergebnisse der Qualitätsprüfungen an der textilen Fläche sind in Tabelle 2 zusammengefasst; das Ergebnis der Konfektionsprüfung des konfektionierten Textils ist in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Qualitätsprüfungen an der Maschenware der DiTex Poloshirts in Anlehnung an HQS 704

Prüfkriterien	Ergebnis	Anforderungen HQS 704 an Maschenware
Farbechtheiten		
Schweißechtheit, Reibecktheit, Waschechtheit, Hypochlorit-Waschechtheit, Hypochlorit-Blechechtheit, Bleichechtheit Peroxid, Kombinierte Trockenhitze fixier-Waschechtheit, Licht-/Schweißechtheit	Licht-/Schweißechtheit: Farbtonänderung Note 4 Alle anderen: Farbtonänderung Note 4-5	Farbtonänderung Schweißechtheit und Licht-/Schweißechtheit $\geq 4-5$ Alle anderen: Farbtonänderung ≥ 4
Mechanische Eigenschaften		
Berstfestigkeit DIN EN ISO 13938-2	> 800 kPa	≥ 600 kPa
Pillneigung DIN EN ISO 12945-2 (nach 5 Pflegezyklen DIN EN ISO 15797)	5000 Touren: Note 3-4	Bis 5000 Touren: \geq Note 3
	7000 Touren: Note 3-4	Bis 7000 Touren: \geq Note 2-3
Pflegeeigenschaften		
Maßbeständigkeit DIN EN ISO 5077 (nach 5 Pflegezyklen DIN EN ISO 15797, Finishertrocknung)	Längs: +6% Quer: -10,5%	+3 % bis -5 %
Selbstglättung DIN EN 15487 (nach 3 Pflegezyklen DIN EN ISO 15797)	SA 5	\geq SA 3,5 ($<$ 50% CO)
Verdrehen der Nähte ISO 16322-2 (nach 5 Pflegezyklen DIN EN ISO 15797)	2,0 %	$\leq 6,0$ %
Bekleidungsphysiologie		
Tragekomfortnote (Neuzustand) aus thermophysiologischen Kenndaten Prüfbedingungen DIN EN ISO 11092	Schulnote 2,7 $R_{et} = 3,03$ m ² Pa/W $R_{ct} = 0,020$ m ² K/W	\leq Schulnote 2,5

Grün: Anforderung nach HQS 704 erfüllt, orange: leichte Abweichung von HQS 704, rot: deutliche Abweichung von HQS 704

Die Maschenware der Poloshirts erfüllt den Großteil der abgeprüften Anforderungskriterien des HQS 704. Hervorzuheben sind die hohe mechanische Festigkeit (Borstfestigkeit und Pillneigung) und Farbbeständigkeit der Maschenware. Eine gravierende Abweichung zeigt sich einzig im Bereich der Maßbeständigkeit, was mit der Trocknung im Finisher (hängend) in Verbindung gebracht wird, welche zu einem deutlichen Verzug der Maschenware führt. Ergänzend zu den Laboruntersuchungen wurde die Maßbeständigkeit unter Praxisbedingungen untersucht (anlehnend an DIN EN ISO 5077, DIN EN ISO 3759), wobei die Prüflinge im Tumbler getrocknet wurden (Praxispartner MEWA, 75°C Wäsche, Tumbler 100°C). Nach 5 Zyklen ergab sich hierüber ein Schrumpf (Mittelwert) von 4,2% (Richtung Maschenstäbchen) und 5,6% (Richtung Maschenreihe). Diese Werte liegen im Bereich bzw. knapp unterhalb der Anforderungen an die Maßbeständigkeit nach HQS 704 (max. 5% Schrumpf). Die Maschenware zeigt ein gutes Selbstglättungsverhalten und eine geringe Neigung zum Verdrehen der Fläche/Nähte. Leichte Abweichungen vom Standard ergeben sich für die Tragekomfortnote, welche aus verschiedenen bekleidungsphysiologischen Kennzahlen errechnet wird. Die Abweichung ist hauptsächlich mit der geringen Wasserdampfaufnahme ($F_i = 0 \text{ g/m}^2$) der Maschenware in Verbindung zu bringen. Die Werte der Atmungsaktivität (R_{et}) und Wärmeisolation (R_{ct}) liegen in einem Bereich, der für Sportbekleidung (Richtwert Praxis $R_{et} < 6 \text{ m}^2\text{Pa/W}$) bzw. Alltagswäsche (Richtwert Praxis $R_{ct} < 0,040 \text{ m}^2\text{K/W}$) als gut und geeignet gilt. Eine detaillierte Analyse der bekleidungsphysiologischen Kennzahlen folgt weiter unten.

Nach bis zu 50 Pflegezyklen nach DIN EN ISO 15797 können am konfektionierten Textil visuell keine bzw. wenig Veränderungen für Warenbild, Aussehen und Farbe sowie die Verarbeitung bzw. Schnittgestaltung beobachtet werden. Auch haptisch (Griff) sind keine wesentlichen Veränderungen festzustellen. Im Bereich der Zutaten lässt sich ein leichtes Ausfransen des Ärmelbündchens beobachten. Insgesamt ergibt sich für das konfektionierte Textil nach bis zu 50 Pflegezyklen ein guter bis sehr guter Gesamteindruck. Es ist daher davon auszugehen, dass die Maschenware auch weiteren Pflegezyklen standhält.

Aufgrund des insgesamt positiven Gesamteindrucks wurde das Design der Poloshirts ohne weitere Anpassungen für den Praxistest freigegeben.

Tabelle 3: Ergebnisse der Konfektionsprüfung am konfektionierten DiTex Poloshirts nach HQS 704

Prüfkriterium	Ergebnis			Anforderungen HQS 704 nach 30 Zyklen
	Pflege nach DIN EN ISO 15797 (Finishertrocknung)			
	5 Zyklen	25 Zyklen	50 Zyklen	
Verarbeitung, Veränderung aufgrund Schnittgestaltung (visuell)	Note 4-5	Note 4-5	Note 4-5	≥4*
Aussehen/Funktion Zutaten (visuell)	Note 4-5	Note 4 Bund am Ärmel franst aus	Note 4 Bund am Ärmel franst aus	≥4*
Aussehen, Warenbild, Farbe (visuell)	Note 4-5	Note 4-5	Note 4-5	≥4*
Griff (haptisch)	Note 4-5	Note 4-5	Note 4-5	≥4*

* Veränderung nach 5-stufiger Bewertungsskala 1: sehr stark, 2: stark, 3: deutlich, 2: gering, 1: keine.

Tragekomfort – thermophysiologicalische und hautsensorische Eigenschaften

Zur Bewertung des Tragekomforts wurde die Maschenware hinsichtlich der thermophysiologicalischen und hautsensorischen Eigenschaften untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 4 und Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 4: Thermophysiologicalische Kennzahlen der Maschenware des Poloshirts (Neuzustand) bestimmt über das Hautmodell nach DIN EN ISO 11092. Die Soll-Werte beruhen auf Erfahrungswerten aus der Praxis.

Stationäre thermophysiologicalische Kennzahlen				Instationäre thermophysiologicalische Kennzahlen		
R_{ct} in m^2K/W	R_{et} in m^2Pa/W	i_{mt}	F_i in g/m^2	F_d	K_f	ΔG in %
0,020	3,03	0,40	0,00	0,63	0,98	34,18

Soll: $R_{ct} < 0,04 m^2K/W$ (Alltagswäsche), $R_{et} < 6 m^2Pa/W$ (Sportbekleidung),
 $i_{mt} > 0,15$, F_i so hoch wie möglich,
 $F_d \geq 0,40$, $K_f > 0,78$,
 ΔG so niedrig wie möglich

Die Atmungsaktivität R_{et} ist eine der wichtigsten Kennzahlen, die die bekleidungsphysiologicalischen Eigenschaften von Flächenmaterialien beschreiben. Sie stellt die Wasserdampfdurchlässigkeit der textilen Fläche dar, d.h. inwieweit Wasser, das auf der Haut verdunstet, durch das Textil an die Umgebung abgeführt werden kann. Für die Maschenware liegt der R_{et} -Wert bei $3,03 m^2Pa/W$. Der Wert entspricht den Anforderungen, die allgemein für Sportbekleidung gelten ($< 6 m^2Pa/W$). Auch der R_{ct} -Wert der Wärmeisolation ist mit $0,020 m^2K/W$ als für Alltagswäsche geeignet einzustufen ($< 0,040 m^2K/W$). Der Wasserdampfdurchgangsindex i_{mt} liegt mit $0,4$ im oberen Bereich der Werte für Oberbekleidung und kann als gut eingestuft werden. Auffällig ist hingegen die geringe Aufnahmefähigkeit des Flächenmaterials für Wasserdampf ($F_i = 0 g/m^2$). Dies wird auf die hydrophoben Eigenschaften der Maschenware aus 100% rPES zurückgeführt, die nahezu keine Absorption von Wasserdampf ermöglichen. Dies kann dazu beitragen, dass sich nicht abgeführter Wasserdampf über der Haut staut und ein negatives Tragegefühl durch aufgestaute Feuchte und Wärme erzeugt wird. Insbesondere kommt dies bei enger Passform zum Tragen, d.h. wenn die Bewegung der Luftschicht zwischen Haut und Textil erschwert ist und hierdurch beim Schwitzen ein Feuchtestau hervorgerufen werden kann.

Neben stationären (R_{et} , R_{ct} , F_i) wurden auch instationäre thermophysiologicalische Kennzahlen bestimmt, die das Trageempfinden bei Schweißimpulsen während erhöhter körperlicher Anstrengung beschreiben, wie sie typischerweise beim Einsatz im Rettungsdienst auftreten kann. Die Pufferwirkung gegenüber Wasserdampf F_d ist mit einem Wert von $0,63$ als gut einzustufen, genauso wie die Pufferwirkung gegenüber flüssigem Schweiß, die mit einem K_f -Wert von $0,98$ vergleichsweise hoch liegt. Instationäre Schweißimpulse können durch die Maschenware gut abgepuffert werden. Aufgrund der hydrophoben Eigenschaften der PES-Faser ist anzunehmen, dass dies nicht über das Quellverhalten der Faser erreicht wird, sondern über eine effektive Kapillarwirkung der Garne und/oder die Textilkonstruktion (Fläche). Zwischen einzelnen Fasern und innerhalb des Garns entstehen Kapillarkräfte, die flüssiges Wasser und Wasserdampf aufnehmen können und durch die textile Fläche abtransportieren. Die Kapillarwirkung wird auch durch weitere konstruktionsspezifische Parameter, z.B. Garnkonstruktion (Drehung, Garnfeinheit) und Legung der Maschenware, beeinflusst, die die Kapillargröße bestimmen. (Mecheels, 1991)

Im Bereich der hautsensorischen Eigenschaften, die das Empfinden des Textils auf der Haut beschreiben, zeigt sich, dass die Maschenware trotz der Zusammensetzung aus reinem Polyester eine gute Benetzbarkeit aufweist (Benetzungsindex i_B). Flüssiger Schweiß kann demnach schnell von der Haut abtransportiert werden, was hautsensorisch als angenehm empfunden wird. Der Klebekraftindex

i_K als Maß für ein Ankleben des Textils auf der schweißnassen Haut ist mit 7,64 als gut zu bewerten. Die Kontaktpunktzahl n_K liegt mit 1551 etwas höher als empfohlen. Durch die vergleichsweise hohe Auflagefläche (viele Kontaktpunkte) kann sich die Maschenware daher klamm/feucht auf schweißnasser Haut anfühlen und vom Träger beim Schwitzen als unangenehm empfunden werden. Der Oberflächenindex i_O liegt mit einem Wert von 4,41 im empfohlenen Bereich (nicht kratzig, aber auch nicht „seifig“/glatt), ähnliches gilt für die Steifigkeit der Maschenware ($s = 9,4$).

Tabelle 5: Hautsensorische Kennzahlen der Maschenware nach 3 Pflegezyklen nach DIN EN ISO 15797. Die Wiederaufbereitung unmittelbar vor der Untersuchung erfolgte, um einen definierten bzw. vergleichbaren Zustand der Textiloberfläche, welche die Ergebnisse beeinflusst, für alle Proben herzustellen.

Hautsensorische Eigenschaften				
Benetzungsindex i_B in s	Klebekraftindex i_K in 1/cN	Oberflächenindex i_O	Kontaktpunktzahl n_K	Steifigkeit s
2,51	7,64	4,41	1551	9,4

Soll: $i_B < 270$,
 $5 < i_K < 15$ (>15 „klebend“, <5 „kitzelnd“),
 $3 < i_O < 15$ (<3 „seifig“, >15 „kratzig“),
 $n_K < 1500$,
 $5 \leq s$ (Maschenware) ≤ 27 (<5 „lappig“, >27 „unangenehm steif“)

Einordnung der Ergebnisse

Insgesamt ergibt sich aus den textiltechnologischen Untersuchungen ein positiver Gesamteindruck für das DiTex-Poloshirt. Mit Ausnahme der Maßbeständigkeit bei Finishertrocknung wurden keine bzw. nur geringe Abweichungen von den abgeprüften Anforderungskriterien nach HQS 704 beobachtet. Bei geeigneter Wahl des Trocknungsverfahrens (Empfehlung: Tumbler Trocknung) ist die Maschenware grundsätzlich als leasingtauglich einzustufen. Auch für die Zutaten und das konfektionierte Gesamttextil ergaben sich im Rahmen der Prototypen-Untersuchung keine gravierenden Auffälligkeiten. Die leichten Defizite (Tragekomfort, Licht-/Schweißechtheit) sollten im Designprozess des konfektionierten Textils beachtet bzw. weiter optimiert werden. So können unvorteilhafte thermophysiologische Eigenschaften der Maschenware durch eine unpassende Passform weiter verstärkt werden.

4.1.2 Anwendungsphase

Es wurden 61 Textilien aus dem Praxistest (bis 37 Zyklen) sowie 25 Textilien nach dem Hochwaschen (100 Zyklen) auf gebrauchts- und/oder waschbedingte Veränderungen im Vergleich zum Neuzustand abgemustert. Der überwiegende Anteil der Proben zeigte visuell keine bzw. wenig Veränderungen im allgemeinen Warenbild und Aussehen (inkl. Farbe) sowie Griff (Haptik) der Maschenware. Die textile Fläche erwies sich in der Praxis als beständig. Für einzelne Proben aus dem Praxistest (10) wurden lokal leichte Gebrauchsspuren beobachtet. So zeigten einige Proben eine aufgeraute Oberfläche und Pillbildung im unteren Rückenbereich, welche beispielsweise durch Reibung an der Stuhllehne oder das Einstecken des Shirts in die Hose mechanisch stärker belastet wird. Auch in der Knopfleiste (innen) und im Bauchbereich zeigten einzelne Proben leichtes Pilling. Im Bereich der Zutaten ließ sich für alle Proben eine leichte Wellung des Emblems beobachten. Der Ärmelbund leiert aus und zeigt kleine Defekte für Einzelteile im Praxistest, was mit Zunahme der Pflegezyklen (Hochwaschen) vermehrt

auftritt. Deutliche Defizite ließen sich im Bereich der Verarbeitung feststellen, die ausnahmslos keine 100 Pflegezyklen standhielt.

Tabelle 6: Ergebnis der Konfektionsprüfung der DiTex-Poloshirts aus der Anwendung: Praxistest (61 Shirts) und Hochwaschen (25 Shirts)

	Praxistest (bis 37 Zyklen)	Hochwaschen (100 Zyklen)
Verarbeitung, Veränderung aufgrund Schnittgestaltung (visuell)	Überwiegend keine/wenig Veränderung (52 Proben) Einzelne Proben: Nähte Ärmelbund ausgefranst, Nähte springen punktuell auf	Starke Veränderung für alle Proben Auffälligkeiten: Nähte Ärmelbund ausgefranst, Saumnaht geöffnet, Ärmel-Rumpf-Naht springt auf
Aussehen und Funktion Zutaten (visuell)	Überwiegend keine/wenig Veränderung (55 Proben) Alle Proben: leichte Wellung Emblem Einzelne Proben: Ärmelbund ausgeleierte, Defekte in Masche	keine/wenig Veränderung für rund die Hälfte der Proben (12) Alle Proben: leichte Wellung Emblem Einzelne Proben: Ärmelbund ausgeleierte und/oder aufgeribbelt. Einzelne Knöpfe fehlen, Lochbildung Emblem-Rand
Aussehen, Warenbild, Farbe (visuell)	Überwiegend keine/wenig Veränderung (60 Proben) Einzelne Proben: lokal leichtes Pilling als Gebrauchsspur (Knopfleiste innen, unterer Rückenbereich), Lochbildung	keine/wenig Veränderung für alle Proben
Griff (haptisch)	keine/wenig Veränderung für alle Proben Einzelne Proben: leicht aufgeraut	keine/wenig Veränderung für alle Proben

Mechanische Eigenschaften

Um eine mögliche Veränderung der mechanischen Eigenschaften im Verlauf der Anwendung festzustellen, wurden verschiedene textiltechnologische Prüfungen exemplarisch an einzelnen Proben durchgeführt.

Im Folgenden wird exemplarisch die Berstfestigkeit nach DIN EN ISO 13938-2 als Maß für die mechanische Beständigkeit der Maschenaware dargestellt. Im Rahmen der Prüfbedingungen ist keine Abnahme der Festigkeit bis zu 100 Pflegezyklen zu verzeichnen. Auch für die Prüfergebnisse der Scheuerfestigkeit und Pillingneigung zeigten sich keine signifikanten Veränderungen mit Zunahme der Pflegezyklen (nicht dargestellt). Das Flächenmaterial bleibt somit auch unter industriellen Pflegebedingungen stabil. Dies ist auf die hohe Beständigkeit der Polyesterfaser zurückzuführen, die sich auch unter industriellen Pflegebedingungen nach 100 Pflegezyklen nicht abbaut.

Tabelle 7: Berstfestigkeit der Maschenware der DiTex-Poloshirts mit zunehmender Anzahl an Nutzungszyklen nach DIN EIN ISO 13938-2

Anzahl Pflegezyklen	0 (Prototyp)	16	37	100
Berstdruck	> 800 kPa (Maximaldruck erreicht, kein Bersten)			

Oberflächeneigenschaften

Auch die Oberfläche der Maschenware, die mithilfe von Rasterelektronenmikroskopie untersucht wurde, zeigt keine gravierende Veränderung mit Zunahme der Pflegezyklen (s. Abbildung 4). Sowohl das Fasermaterial als auch die Garn- und Flächenkonstruktion bleiben bis zu 100 Zyklen beständig.

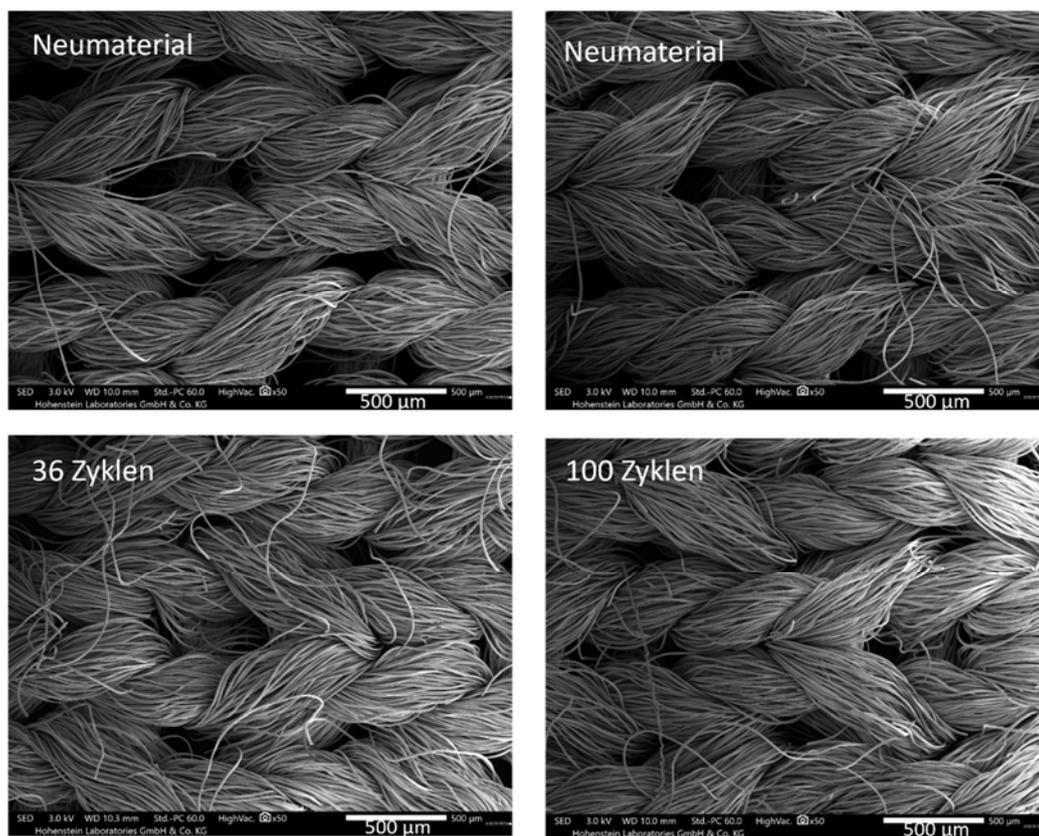


Abbildung 4: Rasterelektronische Aufnahmen der Maschenware des DiTex-Poloshirts im Neuzustand sowie nach Gebrauch/Pflege unter industriellen Bedingungen

4.2 Spektroskopische Untersuchungen

Prototypen

Die NIR spektroskopischen Untersuchungen der Prototypen sind gut reproduzierbar zeigen eine deutliche spektrale Signatur. Die Unterschiede zwischen den Spektren sind in dem Offset und in einer Varianz der Intensitäten. Das liegt an der Messtechnik (kleine Messoberfläche, große lokale Inhomogenität der Probe) und nicht an den globalen spektralen Eigenschaften der untersuchten Materialien.

Das Infrarotspektrum und Nahinfrarotspektrum zeigen charakteristische Absorptionsbanden, die den funktionellen Gruppen von Polyester entsprechen.

Das sichtbare Spektrum (VIS-Spektrum) zeigt die charakteristische Absorptionsbande, die mit den spezifischen Farbpigmenten in Verbindung stehen (siehe Abbildung10):

MIR:

- C-H-Streckungen von Methyl- und Methylen-Gruppen: zwischen 2850 und 2970 cm^{-1} .
- C=O-Streckung in Estergruppen: bei etwa 1725 cm^{-1} .
- C-O-C-Streckung in Estergruppen: bei 1100-1250 cm^{-1} .
- Aromatische C=C-Streckung: bei 1600 cm^{-1} .

NIR:

- Overtone -Streckungen und -Kombinationen der C-H, C=O und O-H Bindungen

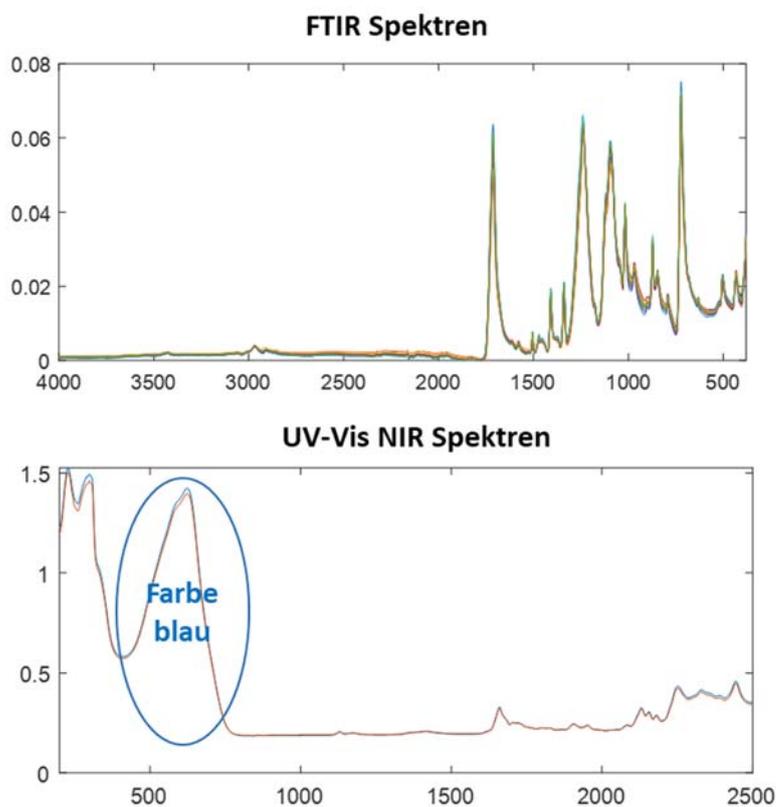


Abbildung 5: FTIR (oben) und UV-Vis-NIR (unten) der Poloshirt Prototypen (Quelle: Hochschule Reutlingen)

Praxisphase

Ausgewählte Muster der Poloshirts wurden vor Ort in der Wäscherei gemessen (11 Stücke, mit 3 bis 15 Nutzungszyklen). Außerdem wurden die Poloshirts im Labor an der Hochschule Reutlingen sowohl am Ende der Praxisphase, (61 Poloshirts, mit 3 bis 37 Lebenszyklen), als auch nachdem sie einem Hochwaschprozess unterzogen wurden, (25 Poloshirts, 100 Waschzyklen) spektroskopisch untersucht.

Jedes Poloshirt wurde dreimal in drei verschiedenen Punkten gemessen: In den Mittelinfrarot- und Nahinfrarot-Spektren wurden keine signifikativen Veränderungen der Textilien festgestellt. Eine fehlende Veränderung in diesen Bereichen deutet darauf hin, dass keine signifikanten Degradationsprozesse der Materialien stattgefunden haben. In den UV-Vis Spektren wurden jedoch leichte Veränderungen im roten Bereich, angrenzend zum sichtbaren Nahinfrarot (s-NIR) beobachtet (siehe 4). Man kann deutlich die Änderung der Spektren ab 770 nm. erkennen.

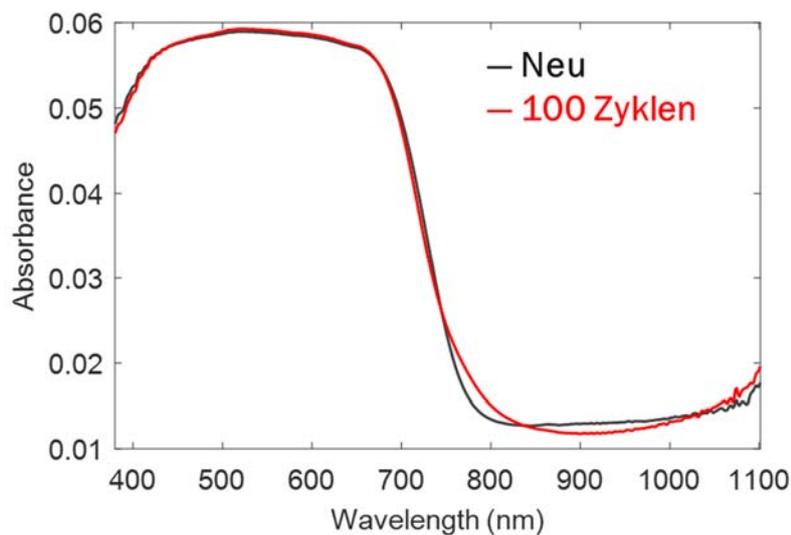


Abbildung 6: UV-Vis Mittelwertspektren der Poloshirts (schwarz: Neuzustand, rot: 100 Waschzyklen) (Quelle: Hochschule Reutlingen)

Die beobachteten Veränderungen der Spektren im roten Bereich können auf oxidative oder photochemische Reaktionen zurückzuführen sein, die durch den Einfluss von Waschmitteln, Sonneneinstrahlung oder anderen Faktoren hervorgerufen werden. Diese Veränderungen können zu einer leichten Verschiebung des Farbspektrums führen. Die Änderung der Form der Spektren können aber auch durch Veränderungen in der Textur der Materialoberfläche verursacht sein. Beide Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen der technologischen Untersuchungen von HIT überein.

5 Zusammenfassung

Die umfangreichen textiltechnologischen Prüfungen ergaben, dass die Maschenware aus 100% rPES eine hohe Farbbeständigkeit und mechanische Festigkeit ausweist. Dies spiegelt sich auch in den spektroskopischen Untersuchungen wider, die keine gravierende Veränderung der Zusammensetzung im Verlauf der Anwendung erkennen lassen. Das Flächenmaterial ist bis 100 Zyklen äußerst beständig und eignet sich in dieser Hinsicht auch für die industrielle Pflege. Bei geeigneter Wahl des Trocknungsverfahrens (Tumbler) weist das Material daneben akzeptable bzw. gute Pflegeeigenschaften auf. Leichte Defizite zeigen sich im Bereich des Tragekomforts. Während die Kennzahlen für Atmungsaktivität und Wärmeisolation als gut und für die Anwendung geeignet bewertet werden können, zeigt das Material nahezu keine Aufnahmefähigkeit für dampfförmigen Schweiß. Auch die vergleichsweise hohe Anzahl an Kontaktpunkten (n_K) im Bereich der hautsensorischen Kennzahlen kann zu einem unangenehmen Tragegefühl („Kleben“) beim Schwitzen führen. Diese leichten materialbedingten Defizite spiegeln sich sehr deutlich im Feedback der Tragenden wider, die von schnellem Schwitzen, geringer Atmungsaktivität und Geruchsbildung nach körperlicher Anstrengung berichten. Das Tragegefühl wird in der Praxis nicht nur von den thermophysiologicalen und hautsensorischen Kennzahlen des Flächenmaterials beeinflusst. Auch Ventilationseffekte, die sich aus dem Luftaustausch an Kleidungsöffnungen (z. B. Kragen, Ärmel) am konfektionierten Textil ergeben, spielen eine wesentliche Rolle. Für ein angenehmes Trageempfinden müssen daher auch Schnitt und Passform der Kleidung mit betrachtet werden. Es wird angenommen, dass die kleine/schmale Passform, die auch im Feedback (vgl. Vogel et al. 2022) bemängelt wurde, das unangenehme Trageempfinden verstärkt hat.

Deutliches Optimierungspotential für das konfektionierte Textil besteht im Bereich der Verarbeitung, welche den Waschtests in der Praxis nach 100 Zyklen nicht standhalten konnte.

6 Literaturverzeichnis

Hohenstein Qualitätsstandard 701ff – Anforderungskataloge zum Einkauf von leasinggeeigneten Textilien, 2017.

AIF-Forschungsvorhaben 4827, Abschlussbericht des Bekleidungsphysiologischen Institutes Hohenstein e. V., Universelle Beschreibung des Tragekomforts in Abhängigkeit von Kleidung und den darin verwendeten Textilien sowie variablen Randbedingungen von Klima und Arbeit, 1982

AIF-Forschungsvorhaben 7169, Abschlussbericht des Bekleidungsphysiologischen Institutes Hohenstein e. V., Quantifizierung, Messung und Bewertung des hautsensorischen Tragekomforts von Textilien durch ein Vorhersagemodell, 1990.

M. Witteveen, K. Hecht, Arbeitspapier DiTex – Nutzungsdauer von Arbeitskleidung und Bettwäsche im Textilservice – Marktzahlen und Übertragbarkeit auf Ditex-Textilien, 2022.

J. Mecheels, Körper – Klima – Kleidung, Grundzüge der Bekleidungsphysiologie, Berlin: Schiele & Schön, ISBN 3 7949-0531-8, 1991.

C, Vogel, M. Müller, S. Bofinger (2022): Bewertung kreislauffähiger B2B-Textilien in der Nutzung. IÖW: <https://www.ditex-kreislaufwirtschaft.de/app/download/9159880114/Bewertung+kreislauff%C3%A4higer+B2B-Textilien+in+der+Nutzung.pdf?t=1684756007> (Zugriff am 12.6.2023)

7 Anhang

7.1 Kurzbeschreibung relevanter Prüfmethoden

Tabelle 8: Übersicht der Farbechtheiten und Anforderungen an textile Flächengebilde nach HQS 704 Polos und Shirts

Farbechtheiten	Prüfverfahren		Anforderung nach HQS 704		
			Anbluten		Farbton- veränderung
			Unifarbene Verarbeitung	Kontrast- verarbeitung	
Schweißechtheit	DIN EN ISO 105 E04	Sauer	≥ 3-4	≥ 4	≥ 4-5
		alkalisch	≥ 3-4	≥ 4	≥ 4
Reibecktheit	DIN EN ISO 105 – X12	Trocken	≥ 4	≥ 4-5	-
		Nass	≥ 3	≥ 3-4	-
Waschechtheit	In Anlehnung an DIN EIN ISO 105 – C06 / E2S mit Flottenverhältnis 1:5		≥ 4	≥ 4-5	≥ 4
Hypochlorit- Waschechtheit	DIN 54016		≥ 4	≥ 4-5	≥ 4
Hypochlorit- Bleichechtheit	DIN EN 20105 – N01		-	-	≥ 4
Bleichechtheit Peroxid	DIN EN ISO 105 – N02		≥ 4	≥ 4-5	≥ 4
Kombinierte Trockenhitze-fixier- -Waschechtheit	Fixotest 5 Min., 190°C + DIN EN ISO 105 C10		≥ 3-4	≥ 4	≥ 4
Licht- /Schweißechtheit	DIN EN ISO 105 – B07		-	-	≥ 4-5

7.1.1 Komforteigenschaften

Thermophysiologie

Mithilfe des Hautmodells, beschrieben in DIN EN ISO 11092, lassen sich spezifische thermophysiologische Kennzahlen für Textilien ermitteln:

Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} („Wärmeisolation“): Der Wärmedurchgangswiderstand ist definiert als die Temperaturdifferenz zwischen der Ober- und Unterseite der textilen Fläche, dividiert durch den Wärmefluss entlang des Temperaturgradienten (je Flächeneinheit). Er wird unter stationären Bedingungen ermittelt.

Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} („Atmungsaktivität“): Der Wasserdampfdurchgangswiderstand ist definiert als die Differenz des Wasserdampfpartialdrucks zwischen der Ober- und Unterseite der textilen Fläche, dividiert durch den Verdampfungswärmefluss entlang des Partialdruckgradienten (je Flächeneinheit). Er wird unter stationären Bedingungen ermittelt.

Kurzzeit-Wasserdampfaufnahmefähigkeit F_i : Die Kurzzeit-Wasserdampfaufnahmefähigkeit wird in Kombination mit dem Wasserdampfdurchgangswiderstand auf dem „schwitzenden“ Hautmodell bestimmt. Nach Konditionierung (24h, 35 °C, 40% r.F.) und Wägung des Trockengewichts G_t der Messprobe wird diese für 1 h einem zeitlich konstanten Wasserdampfstrom im Hautmodell ausgesetzt und erneut gewogen (Feuchtgewicht G_f). F_i ist die Differenz zwischen G_f und G_t (hochgerechnet auf 1 m² textiler Fläche).

Pufferwirkung: Die Pufferwirkung kann aus der dampfförmigen Phase (erhöhter Wasserdampfpartialdruck) und der flüssigen Phase (flüssiger Schweiß) über instationäre Messungen des Hautmodells ermittelt werden.

Pufferwirkung von Wasserdampf – Feuchteausgleichskennzahl F_d :

Prüfgerät: Thermoregulationsmodell der menschlichen Haut (Hautmodell)

Prüfbedingungen: s. Standard-Prüfvorschrift BPI 1.2 :2010-12^A

Prüfklima: $T_a = 25^\circ\text{C}$; $\varphi_a = 30\%$ r.F.

Mittel aus 3 Einzelmessungen an 3 verschiedenen Probenabschnitten pro Muster. Die Genauigkeit der Feuchteausgleichskennzahl F_d ist 8% (Variationskoeffizient).

Pufferwirkung von flüssigem Schweiß – Pufferkennzahl K_f , Schweißtransport F_1 bzw. F , Schweißaufnahme G_2

Prüfgerät: Thermoregulationsmodell der menschlichen Haut (Hautmodell)

Prüfbedingungen: s. Standard-Prüfvorschrift BPI 1.2.1 :2010-12^A, Abschnitt 3

Prüfklima: $T_a = 35^\circ\text{C}$; $\varphi_a = 30\%$ r.F.

Mittel aus 3 Einzelmessungen an 3 verschiedenen Probenabschnitten pro Muster. Die Genauigkeit der Pufferkennzahl K_f ist 0,02 (Standard-Abweichung), des Schweißtransportes F_1 19,4 g/m²h und der Feuchtigkeitsaufnahme G_2 0,3 g.

Aus F_1 kann unter der Annahme definierter Klimabedingungen (z.B. 25°C, 50 % r.F.) die Menge des flüssigen Schweißes F (in g) ermittelt werden, die von der Haut über das Textil abtransportiert wird (pro m² Fläche und pro Stunde).

Wasserrückhaltevermögen ΔG (in %): Die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens erfolgt analog zu DIN 53814. Nach Konditionierung einer Messprobe (23 x 23 cm²) für 24 h (bei 20 °C und 65 r.F.) und anschließender Wägung wird diese in destilliertes Wasser eingelegt (2 min.) und danach mithilfe einer Zentrifuge geschleudert (23 s, 2800 Umdrehungen/min.). Die Probe wird erneut in destilliertes Wasser eingelegt (3 min.) und geschleudert (23 s). ΔG stellt die prozentuale Gewichtszunahme (bezogen auf Anfangszustand) zwischen End- und Anfangszustand nach dieser Prozedur dar.

Mittel aus 3 Einzelmessungen an 3 verschiedenen Probenabschnitten pro Muster. Die Messgenauigkeit beträgt 7,5% (Variationskoeffizient).

Hautsensorik

Folgende materialspezifische Kenngrößen können zur Beschreibung der hautsensorischen Eigenschaften herangezogen werden:

Klebeindex i_K - Klebewirkung auf schweißfeuchter Haut: Der Klebeindex beschreibt, wie stark ein Textil auf der schweißnassen Haut anklebt. Die Bestimmung des Klebeindex erfolgt mithilfe einer Sinterglasplatte, deren poröse Oberfläche die menschliche Haut simuliert und in der Rauigkeit vergleichbar ist. Nach Benetzung der Sinterglasplatte mit destilliertem Wasser wird das zu untersuchende Textil horizontal über die Oberfläche gezogen, während die dafür notwendige Zugkraft zeitlich aufgezeichnet wird. Das Mittel der Messwerte in Längs- und Querrichtung geht in die Bestimmung des Klebeindex ein. Je kleiner die Klebewirkung (und i_K), desto besser ist das Komfortempfinden. Idealerweise sollte er unter 15 liegen (Erfahrungswert).

Prüfbedingungen: s. BPI 3.1^A

Prüfklima: $T_a = 20^\circ\text{C}$; $\varphi_a = 65\% \text{ r.F.}$

Mittel aus 10 Einzelmessungen pro Muster. Messgenauigkeit 1,2 (Standard-Abweichung).

Benetzungsindex i_B – Sorptionsgeschwindigkeit von Wasser in die textile Fläche: Beim Schwitzen werden Textilien hautsensorisch umso angenehmer empfunden, je schneller die Schweißtropfen von der Haut wegtransportiert werden. Die Sorptionsgeschwindigkeit wird bestimmt, in dem ein Wassertropfen definierter Größe aus einer konstanten Höhe (5 cm) auf die Innenseite des Textils getropft wird. Über eine Videoaufnahme des Vorgangs lässt sich der Randwinkel des Wassertropfens verfolgen und das Zeitintervall extrapolieren, nach dem eine vollständige Absorption des Tropfens erfolgt ist. Das Zeitintervall beschreibt den Benetzungsindex, der möglichst klein und erfahrungsgemäß unter 270 liegen sollte.

Prüfbedingungen: s. BPI 3.2^A

Prüfklima: $T_a = 20^\circ\text{C}$; $\varphi_a = 65\% \text{ r.F.}$

Mittel aus 5 Einzelmessungen pro Muster. Messgenauigkeit 10 % (Varianz).

Oberflächenindex i_O : Der Oberflächenindex i_O beschreibt, inwieweit sich ein Textil auf der Haut rau/kratzig oder zu glatt („seifig“) anfühlt. Der Index wird bestimmt aus der Anzahl und Länge von Faserenden, die von der Oberfläche abstehen. Dies erfolgt mithilfe eines Bildanalyse-Systems, das ein vergrößertes Bild des Textilquerschnitts aufnimmt. Als hautsensorisch gut wird ein Oberflächenindex zwischen 3 und 15 bewertet.

Prüfbedingungen: s. BPI 3.3^A

Prüfklima: $T_a = 20^\circ\text{C}$; $\varphi_a = 65\% \text{ r.F.}$

Mittel aus 10 Einzelmessungen pro Muster. Messgenauigkeit 0,63 (Standard-Abweichung).

Zahl der Kontaktpunkte zwischen Textil und Haut n_K : Aus Forschungsarbeiten hat sich gezeigt, dass Textilien sich weniger klebend/klamm auf der Haut anfühlen, wenn ihre Auflagefläche möglichst klein ist. Die Auflagefläche ist abhängig von der Oberflächenstruktur des Textils. Ein Maß für die Auflagefläche stellt die Anzahl der Kontaktpunkte zwischen Haut und Textil dar, welche mithilfe eines Topographen bestimmt werden kann. Der Topograph erstellt ein dreidimensionales Bild der Textiloberfläche, aus dem sich mithilfe eines Bildanalyse-Systems spezifische Kennzahlen bzgl. der Oberflächenstruktur ermitteln lassen (z.B. Hoch- und Tiefpunkte) und die Kontaktpunktzahl (Musterfläche $12,25 \text{ cm}^2$) ermittelt werden kann. Je kleiner die Kontaktpunktzahl, desto besser das hautsensorische Empfinden auf der Haut. Idealerweise sollten Werte unter 1500 erreicht werden.

Prüfbedingungen: s. BPI 3.4^A

Prüfklima: $T_a = 20^\circ\text{C}$; $\varphi_a = 65\% \text{ r.F.}$

Mittel aus 10 Einzelmessungen an 10 verschiedenen Probenabschnitten pro Muster.
Messgenauigkeit 56 (Standard-Abweichung).

Steifigkeit s : Die Steifigkeit wird aus dem Biegewinkel eines Textilstreifens (ca. $2 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$) gegenüber der Vertikalen ermittelt. Je größer der Winkel, desto größer die Steifigkeit s . Es können Werte zwischen

0 (vollständig schlaff) und 90 (vollständig steif) erreicht werden. Die Steifigkeit ergibt sich aus dem Mittelwert in Längs- und Querrichtung sowie vorwärts und rückwärts.

Prüfbedingungen: s. BPI 3.5^A

Prüfklima: $T_a = 20^{\circ}\text{C}$; $\varphi_a = 65\%$ r.F.

Mittel aus 10 Einzelmessungen pro Muster. Messgenauigkeit 2,0 (Standard-Abweichung).



DiTex

DITEX-KREISLAUFWIRTSCHAFT.DE