



DiTex

DIGITALE TECHNOLOGIEN ALS ENABLER

EINER RESSOURCENEFFIZIENTEN KREISLAUFFÄHIGEN B2B-TEXTILWIRTSCHAFT

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

Kreislauffähige Business-Hemden für den B2B-Bereich

Ergebnisse der textiltechnologischen und
spektroskopischen Untersuchungen

Impressum

Autor/innen:

Dr. Kim Hecht (Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH)
Serge Lang (Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH)
Dr. Anja Gerhardts (Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH)
Barbara Boldrini (Hochschule Reutlingen)
Martina Gerbig (Hochschule Reutlingen)
Kai Nebel (Hochschule Reutlingen)

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 Business-Hemden 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 Kriterien Recyclingfähigkeit und Leasing-Eignung eine zentrale Rolle. Zur Beurteilung der Qualität wurden 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 die DiTex-Business-Hemden 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, business shirt, bedlinen) were designed for application in the textile service and tested 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 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. This document contains a summary of the textile technological and spectroscopical results for business shirts.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Methoden	7
2.1	Grundlagen Textilprüfungen	7
2.2	Grundlagen Spektroskopie	11
3	Ablauf der Qualitätsuntersuchungen	14
4	Ergebnisse	15
4.1	Textilprüfungen	15
4.1.1	Prototyp (Neuzustand)	15
4.1.2	Anwendungsphase	19
4.2	Spektroskopische Eigenschaften	22
5	Zusammenfassung und Ausblick	24
6	Literaturverzeichnis	25
7	Anhang	26
7.1	Kurzbeschreibung relevanter Prüfmethode(n)	26
7.1.1	Komforteigenschaften	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die wichtigsten Bereiche für die optische Spektroskopie des elektromagnetischen Spektrums (Quelle: Hochschule Reutlingen).....	11
Abbildung 2: Mehrfachstreuung in stark streuenden Systemen (Quelle: Hochschule Reutlingen)	11
Abbildung 3: Vorgehensweise zur Durchführung der Qualitätsuntersuchungen.	14
Abbildung 4: Auswahl der Proben der DiTex-Business-Hemden aus dem Praxistest	14
Abbildung 5: Zugfestigkeit des Gewebes nach DIN EN ISO 13934-1 mit zunehmender Anzahl an Waschzyklen (Abweichung von Norm: die Mittelwerte für die Proben aus den Waschversuchen ergeben sich aus 3 statt 5 Messungen). Es wurden jeweils 3 Proben je Waschbedingung untersucht (horizontale Achse).....	21
Abbildung 6: REM-Aufnahmen der Gewebeoberfläche im Neuzustand sowie nach 15 und 100 industriellen Wiederaufbereitungszyklen	22
Abbildung 7: FTIR (oben) und UV-VIS-NIR (unten) der Polizei-Hemd Prototypen. Quelle: Hochschule Reutlingen.....	23
Abbildung 8: UV-Vis Mittelwertspektren der Polizeihemden (schwarz: Neuzustand, blau: 1 Zyklus, rot: 100 Zyklen). Quelle: Hochschule Reutlingen	24

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.	13
Tabelle 2: Ergebnisse der Qualitätsprüfungen am Gewebe der DiTex Businesshemden in Anlehnung an HQS 703.	15
Tabelle 3: Ergebnis der Konfektionsprüfung am konfektionierten DiTex-Hemd nach HQS 703.	16
Tabelle 4: Prüfergebnisse zu Höchstzugkraft nach DIN EN ISO 13934-1 für eine Gewebeprobe im Neuzustand sowie nach der Pflege gemäß DIN EN ISO 15797 (Finishertrocknung):	17
Tabelle 5: Thermophysiologische Kennzahlen des Gewebes der Hemden (Neuzustand) bestimmt über das Hautmodell nach DIN EN ISO 11092. Die Soll-Werte beruhen auf Erfahrungswerten aus der Praxis.....	17
Tabelle 6: Hautsensorische Eigenschaften des Gewebes 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.	18
Tabelle 7: Ergebnis der Konfektionsprüfung der DiTex-Hemden aus der Anwendungsphase.....	20

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
B2B	business-to-business
bzw.	beziehungsweise
HQS	Hohenstein Qualitätsstandards
PES	Polyester
rPES	recyceltes Polyester
s.	siehe
u. A.	unter Anderem
u. U.	unter Umständen
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 Gebrauchstauglichkeit eine entscheidende Rolle – und das auch unter industriellen Pflegebedingungen. In DiTex wurde neben diesen Kriterien der Einsatz von Primärrohstoffen betrachtet und dieser möglichst niedrig gehalten, um negative Umweltauswirkungen zu reduzieren.



Auf Basis dieser Überlegungen wurde in DiTex ein klassisches Businesshemd entworfen, das im betrieblichen Alltag in verschiedenen Branchen und Tätigkeitsbereichen getragen wird und im Rahmen des Praxistests exemplarisch im Polizei-Innendienst erprobt wurde. Bei der Materialauswahl wurde auf ein gängiges Mischgewebe zurückgegriffen. Das Hemd besteht aus einem robusten Köpergewebe aus 62 % Baumwolle kbA und 38% rPES. Die Nähfäden, Knöpfe und der Klettverschluss bestehen aus 100% rPES und müssen vor dem Recycling nicht entfernt werden. Ein sogenanntes Detrimming zum Entfernen von Zutatennur wird nur für den im Brustbereich angebrachten reflektierenden Druck „POLIZEI“ sowie für die silbernen Zierknöpfe im Schulterbereich für die Epaulette erfordert.

Die Gebrauchstauglichkeit der DiTex-Textilien wurde über verschiedene textiltechnologische Prüfungen und Untersuchungen der Komfoteigenschaften analysiert. Ergänzend dazu wurden spektroskopische Untersuchungen an der textilen Fläche durchgeführt, über die Veränderungen der Oberfläche und Zusammensetzung detektiert werden können eine Qualitätskontrolle erfolgen kann. Im Folgenden werden die verwendeten Prüf- bzw. Untersuchungsmethoden kurz vorgestellt; darüber hinaus sind detaillierte Prüfabläufe und -bedingungen im Anhang beschrieben. Daran anschließend werden die Ergebnisse 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-Businesshemd ist der HQS 703. 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. 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. Von Relevanz für das weiße Business-Hemd ist die Hypochlorit-Bleichechtheit nach DIN EN 20105 – N01, um eine mögliche Vergilbung des Gewebes unter oxidativen Bedingungen zu analysieren.

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.

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 DiTex-Hemden wurde der AATCC-Glättestandard Nr. 124 (Fläche) verwendet.

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. 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 Feuchtedurchgangsindex 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 abzupuffern. F_d (Feuchteausgleichszahl) beschreibt die Pufferwirkung gegenüber Wasserdampf, K_f (Pufferkennzahl) beschreibt die Pufferwirkung gegenüber flüssigem Schweiß.
- Über das Wasserrückhaltevermögen ΔG wird ausgedrückt, wieviel flüssiges Wasser von der textilen Fläche aufgenommen bzw. rückgehalten werden kann.

Der **thermophysiologische 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 thermophysiologischen 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_B 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.
- Die Steifigkeit eines Textilstreifens wird über die Kenngröße s beschrieben. Eine hohe Steifigkeit ist in der Regel mit einem unangenehmen Komfortgefühl verbunden.

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.

Weißqualität

Die Weißqualität wird von der Qualität der Textilien und insbesondere den Wasch- und Trocknungsbedingungen beeinflusst. Die Weißqualität lässt sich mithilfe von Spektralphotometern ermitteln, die die spektrale Reflexion von Proben bei definierter Messgeometrie und Normlichtart messen. Aus den spektralen Daten lassen sich verschiedenen Kennzahlen der Weißmetrik berechnen. Zur Beschreibung der DiTex-Hemden wurden zum einen der Weißgrad nach Ganz/Griesser (W-GG) herangezogen, der ein Zahlenmaß für den vom menschlichen Auge empfundenen Weißeindruck darstellt. Daneben wurde der Grundweißwert (Y-420) ermittelt, der den Weißgrad nach Abzug von UV-Anteilen der Lichtquelle darstellt und somit Effekte durch optische Aufheller (Fluoreszenz) ausblendet. Des Weiteren wurde die Farbtonabweichungszahl (FAZ) bestimmt, welche die Farbtonabweichung vom Neutralweiß des Weißstandards beschreibt. W-GG, Y-420 und FAZ sind typische Kennzahlen zur Beschreibung der Weißqualität von Textilien.

Rasterelektronenmikroskopie (REM)

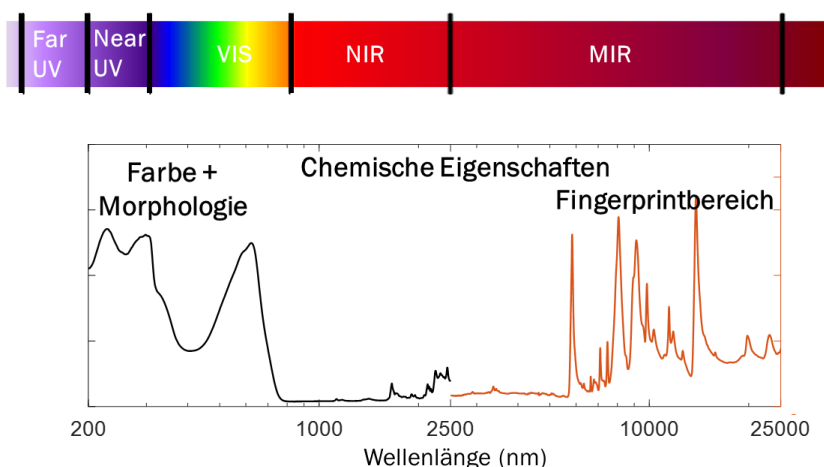
Ein vergrößertes Abbild der Textiloberfläche lässt sich mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie erhalten. Bei der Untersuchung wird die textile Oberfläche mithilfe eines fokussierten Elektronenstrahls abgerastert. Die Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Oberfläche geben Aufschluss über die Eigenschaften 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 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).

In einem absorbierenden und streuenden System kann das einkommende Licht, oft durch mehrere Streuereignisse, 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.

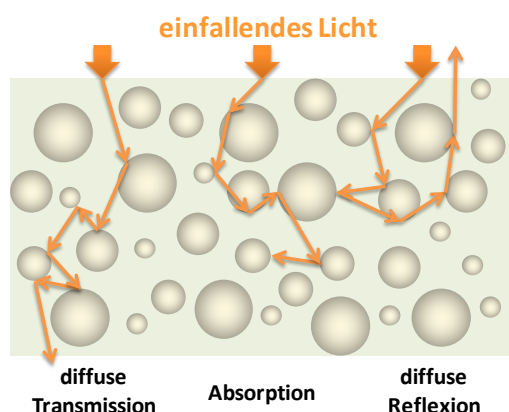


Abbildung 2: Mehrfachstreuung in stark streuenden Systemen

(Quelle: Hochschule Reutlingen)

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 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.

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 2.500 – 25.000 nm (Wellenzahlbereich 4000 - 500 cm^{-1}). Hier werden Molekülschwingungen aktiviert. Besonders wichtig ist in MIR der Bereich zwischen 1.300 – 1.000 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 in 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. Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse an den Prototypen erlaubte zudem, kleinere Optimierungen am Design noch vor Beginn des Praxistests durchzuführen. 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.

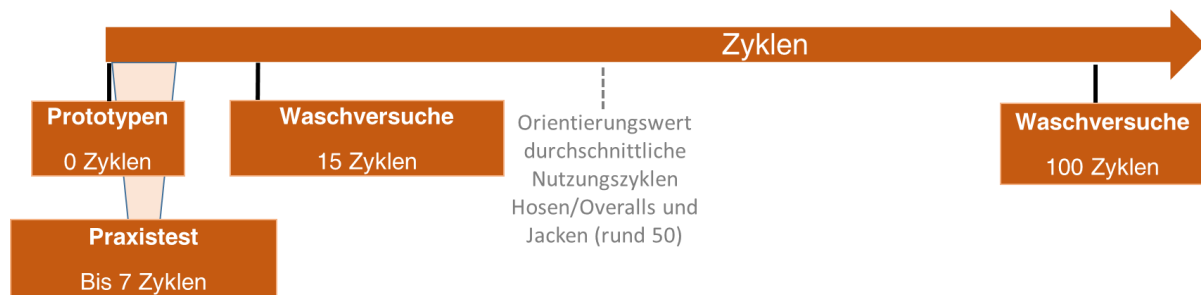


Abbildung 3: Vorgehensweise zur Durchführung der Qualitätsuntersuchungen

Auf Basis von Literaturdaten wird für Shirts im Leasing-Bereich von durchschnittlich 40 Nutzungszyklen ausgegangen, Hosen/Overalls und Jacken werden nach etwa 50 Nutzungszyklen ausgewechselt [Witteveen 2022]. Eine eigene Kategorie für Hemden wird in dem Bericht für die European Textile Service Association (ETSA) nicht aufgeführt [EcoForum 2015]. Es wird angenommen, dass Hosen/Overalls und Jacken überwiegend aus Geweben gefertigt werden, während für Shirts ein deutlicher Anteil an Maschenware zum Einsatz kommt. Vor diesem Hintergrund wird für das DiTex-Hemd aus Mischgewebe von durchschnittlich 50 Nutzungszyklen in der Praxis ausgegangen.

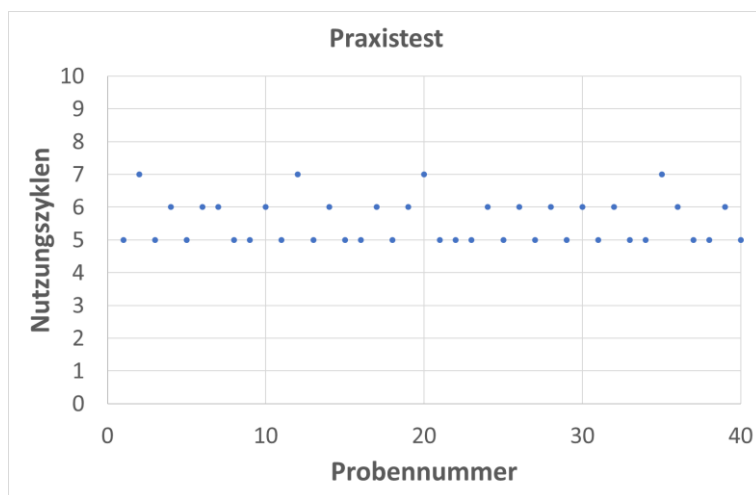


Abbildung 4: Auswahl der Proben der DiTex-Business-Hemden aus dem Praxistest

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, wurden zusätzlich Waschversuche durchgeführt. Dabei waren die Textilien nicht im Gebrauch, d.h. eine Gebrauchsbelastung fand nicht statt. Das „Hochwaschen“ erfolgte auf 15 und 100 Zyklen.

Die Hemden waren mit rund 1.000 Textilien in der Anwendung.

Anlehnend an die DIN EN ISO 2859-1 wurde ein Probenumfang von ca. 80 Textilien nach der Anwendung im Vergleich zur Neuware abgemustert und spektroskopisch analysiert. An einzelnen Teilen wurden zusätzlich Textilprüfungen durchgeführt, deren Ergebnisse mit den spektroskopischen Daten abgeglichen wurden. Im Detail wurden 40 Hemden nach dem Praxistest (bis 7 Nutzungszyklen), weitere 29 Hemden nach 15 Waschzyklen sowie 28 Hemden nach 100 Waschzyklen untersucht.

4 Ergebnisse

4.1 Textilprüfungen

4.1.1 Prototyp (Neuzustand)

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

Tabelle 2: Ergebnisse der Qualitätsprüfungen am Gewebe der DiTex Businesshemden in Anlehnung an HQS 703

Prüfkriterien	Ergebnis	Anforderungen HQS 703 an Gewebe	
Farbechtheiten			
Hypochlorit-Blechechtheit DIN EN 2015-N01	Farbtonänderung Note 4-5	Farbtonänderung ≥ 4	
Mechanische Eigenschaften			
Höchstzugkraft DIN EN ISO 13934-1	Kette: 880 N Schuss: 284 N	Normale Beanspruchung Kette ≥ 350 N Schuss ≥ 260 N	Hohe Beanspruchung Kette ≥ 450 N Schuss ≥ 375 N
Pillneigung DIN EN ISO 12945-2 (nach 5 Pflegezyklen DIN EN ISO 15797)	5000 Touren: Note 2	Bis 5000 Touren: Note $\geq 3-4$	
	7000 Touren: Note 2	Bis 7000 Touren: Note ≥ 3	
Scheuerfestigkeit DIN EN ISO 12947-2	6.000 Touren	≥ 15.000 Touren	
Pflegeeigenschaften			
Maßbeständigkeit DIN EN ISO 5077 (nach 5 Pflegezyklen DIN EN ISO 15797, Finishertrocknung)	Längs: -3,0 % Quer: -3,0 %	PES/CO: $\leq \pm 2,5$ % CO: $\leq \pm 3,0$ %	
Selbstglättung DIN EN 15487 (nach 3 Pflegezyklen DIN EN ISO 15797)	SA 3	$\geq SA 3,5$ ($< 50\%$ CO)	
Bekleidungsphysiologie			
Tragekomfortnote (Neuzustand) aus thermophysiologicalen Kenndaten Prüfbedingungen DIN EN ISO 11092	Schulnote 1,8 $R_{et} = 2,50$ m^2Pa/W $R_{ct} = 0,017$ m^2K/W	Schulnote $\leq 2,5$	

Grün: Anforderung nach HQS 703 erfüllt, orange: leichte Abweichung von HQS 703, rot: deutliche Abweichung von HQS 703

Das Gewebe zeigt eine hohe Hypochlorit-Bleichechtheit und lässt bei sachgemäßer Wäsche keine frühzeitige Vergilbung erwarten. Die gemessene Höchstzugkraft in Kett- und Schussrichtung liegt oberhalb der Anforderungen, die im HQS 703 für normale Beanspruchung definiert sind. Im Hinblick auf die Zugfestigkeit eignet sich das Gewebe somit für den Einsatz im Innendienst oder ähnlichen Tätigkeitsbereichen, für die keine starke mechanische Beanspruchung zu erwarten ist. Unter abrasiver Belastung lassen sich für das Gewebe Defizite beobachten. Das Gewebe hält den Anforderungen an die Scheuerfestigkeit nicht stand und zeigt eine deutliche Pillbildung („Knötchenbildung“) unter Scheuereinwirkung. Dies kann dazu führen, dass das Gewebe unter Gebrauchsbelastung reißt oder aufgrund eines unvorteilhaften Oberflächenbilds frühzeitig aussortiert wird. Im Bereich der Pflege ergeben sich leichte Abweichungen vom HQS 703, wobei die Eigenschaften insgesamt als akzeptabel eingestuft werden können. Mit einer Tragekomfortnote von 1,8 ist das Tragegefühl für das Gewebe als positiv zu bewerten.

Tabelle 3: Ergebnis der Konfektionsprüfung am konfektionierten DiTex-Hemd nach HQS 703.

Prüfkriterium	Ergebnis Pflege nach DIN EN ISO 15797 (Finishertrocknung)			Anforderungen HQS 703 nach 30 Zyklen
	5 Zyklen	25 Zyklen	50 Zyklen	
Verarbeitung, Veränderung aufgrund Schnittgestaltung (visuell)	4-5	4-5	4-5	≥ 4*
Aussehen/Funktion Zutaten (visuell)	4-5	4 (silberne Knöpfe stumpf, verkratzt oder fehlen)	4 (silberne Knöpfe stumpf, verkratzt oder fehlen)	≥ 4*
Aussehen, Warenbild, Farbe (visuell)	4-5	4-5	4-5	≥ 4*
Griff (haptisch)	4-5	4-5	4-5	≥ 4*

*Veränderung nach 5-stufiger Bewertungsskala 1: sehr stark, 2: stark, 3: deutlich, 4: gering, 5: keine

Um nicht nur das Gewebe, sondern auch das konfektionierte Hemd als Ganzes hinsichtlich der Leasing-Eignung zu untersuchen, wurden Waschtests nach DIN EN ISO 15797 durchgeführt. In der anschließenden Konfektionsprüfung ließ sich visuell nach bis zu 50 Zyklen nahezu keine Veränderung des allgemeinen Warenbilds feststellen. Auch die Haptik blieb nach bis zu 50 Zyklen nahezu unverändert. Einzig im Bereich der Zutaten zeigten sich Auffälligkeiten für die silbernen Knöpfe im Schulterbereich, die stumpf und/oder verkratzt waren und z. T. fehlten. Diese wurden daher im Praxistest von Weishäupl durch alternative Metallknöpfe ersetzt, welche in Waschversuchen nach DIN EN ISO 15797 weniger starke Veränderungen zeigten.

Zugfestigkeit

Ergänzend zu den Prüfungen am Neumaterial gemäß HQS 703 wurden Wasch- und Trocknungsversuche unter Normbedingungen am Prototyp (DIN EN ISO 15797) durchgeführt, um den Einfluss der industriellen Pflege auf die Festigkeit des Gewebes zu untersuchen. Tabelle 4 enthält die

Werte der Zugfestigkeit eines Gewebes, das im Neuzustand sowie nach 10, 25 und 50 Pflegezyklen geprüft wurde. Überraschenderweise zeigt sich nach der Pflege zunächst eine leichte Zunahme der Zugfestigkeit, bevor die Werte wieder langsam mit steigender Zyklenzahl abnehmen. Dies wird auf zwei gegenläufige Effekte zurückgeführt: Auf der einen Seite bedingt das Waschen und Trocknen einen gewissen Verschleiß des Materials, der zu einer Abnahme der Festigkeit führt. Auf der anderen Seite bewirkt der Schrumpf infolge des Pflegeprozesses eine kompaktere Struktur von Gewebe, Garn bzw. Faser, was zu einer verbesserten Festigkeit beitragen kann. Die vergleichsweise hohen Festigkeitswerte nach 50 Zyklen sprechen für eine hohe Strapazierfähigkeit des Körpergewebes.

Tabelle 4: Prüfergebnisse zu Höchstzugkraft nach DIN EN ISO 13934-1 für eine Gewebeprobe im Neuzustand sowie nach der Pflege gemäß DIN EN ISO 15797 (Finishertrocknung)

Probe	Anzahl Pflegezyklen nach DIN EN ISO 15797 (Finishertrocknung)	Höchstzugkraft in N	
		Kette	Schuss
1	0	880	284
	10	923	283
	25	905	322
	50	895	306

Tragekomfort – thermophysiologische und hautsensorische Kennzahlen

Zur Bewertung des Tragekomforts wurde das Gewebe hinsichtlich der thermophysiologischen und hautsensorischen Eigenschaften untersucht. Die Untersuchungsergebnisse sind in Tabelle 5 und Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 5: Thermophysiologische Kennzahlen des Gewebes der Hemden (Neuzustand) bestimmt über das Hautmodell nach DIN EN ISO 11092. Die Soll-Werte beruhen auf Erfahrungswerten aus der Praxis.

Stationäre thermophysiologische Kennzahlen			Instationäre thermophysiologische Kennzahlen			
R_{ct} in m^2K/W	R_{et} in m^2Pa/W	i_{mt}	F_d	F_1 in $g\ m^{-2}\ h^{-1}\ mbar^{-1}$	K_f	ΔG in %
0,017	2,50	0,40	0,55	20,3	0,89	44,41

Soll: $R_{ct} < 0,04\ m^2K/W$ (Alltagswäsche), $R_{et} < 6\ m^2Pa/W$ (Sportbekleidung),
 $F_1 > 19\ g/m^2\ h\ mbar$, $F_d \geq 0,40$,
 $K_f > 0,78$, ΔG so niedrig wie möglich

Eine der wichtigsten Größen zur Beschreibung der Bekleidungsphysiologie von Textilien ist der Wasserdampfdurchgangswiderstand R_{et} , die sogenannte Atmungsaktivität, die den Widerstand der textilen Fläche gegenüber Wasserdampf darstellt. Die Atmungsaktivität des Gewebes liegt mit 2,50

m^2Pa/W deutlich unter dem oberen Grenzwert von $6 m^2Pa/W$, der allgemein für Sportbekleidung gilt. Das Gewebe ist somit in der Lage, dampfförmigen Schweiß effektiv von der Haut an die Umgebung abzugeben. Auch die sogenannte Wärmeisolation bzw. der Wärmedurchgangswiderstand R_{ct} liegt unterhalb des oberen Grenzwerts, an dem sich in der Praxis für Alltagswäsche orientiert wird. Zur Bewertung der allgemeinen Performance des Gewebes ist daneben der Wasserdampfdurchgangsindex i_{mt} eine wichtige Kennzahl, da dieser den Einfluss der Textildicke eliminiert und somit einen direkten Vergleich von verschiedenen Konstruktionen bzw. Zusammensetzungen unabhängig von der Textildicke erlaubt. Der i_{mt} für das Gewebe liegt mit 0,4 im oberen Bereich der Werte, die allgemein für Oberbekleidung erzielt werden und kann als gut eingeordnet werden. R_{et} , R_{ct} und i_{mt} gelten für stationäre Bedingungen, d. h. bei konstantem Wärme- und Feuchtefluss und einer Feuchteabgabe in Form von Wasserdampf, und sind daher für Anwendungen bei geringer körperlicher Belastung wie im Praxistest der Hemden (Polizei-Innendienst) von Relevanz. Auch instationäre Bedingungen wie bei Schweißimpulsen bei starker körperlicher Anstrengung wurden für das Gewebe betrachtet. Aus der Feuchteausgleichszahl F_d sowie dem Schweißtransport F_1 und der Pufferkennzahl K_f lässt sich ableiten, dass das Gewebe Wasserdampf (F_d) bzw. flüssigen Schweiß (ΔG , F_1 , K_f) aufnimmt, zwischenspeichert und nach außen abtransportiert. Ein plötzlicher Feuchteanstieg im Mikroklima zwischen Haut und Textil lässt sich hierüber abpuffern.

Tabelle 6: Hautsensorische Eigenschaften des Gewebes 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 Kennzahlen				
Benetzungsindex i_B in s	Klebekraftindex i_K in 1/cN	Oberflächenindex i_o	Kontaktpunktzahl n_K	Steifigkeit s
13,57	10,83	3,28	1592	20,2

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

Die hautsensorischen Eigenschaften beschreiben das Empfinden des Trägers durch das Textil auf der Haut und sind für körpernahe Kleidung wie das Business-Hemd von Relevanz in Hinblick auf den Tragekomfort. Bis auf die Kontaktpunktzahl n_K , die etwas größer ist als der Sollwert, liegen alle Kennzahlen im Soll-Bereich. Das Gewebe ist gut benetzbar (i_B) und nimmt Feuchtigkeit auf. Die Werte für Steifigkeit s und Oberflächenindex i_o („Haarigkeit“) lassen ein angenehmes Trageempfinden erwarten. Aufgrund der vergleichsweise hohen Anzahl an Kontaktpunkten auf der Haut (n_K) kann der Träger das Textil auf schweißnasser Haut als klamm/feucht empfinden. Ein unangenehmes Trageempfinden durch das Ankleben des Textils auf der Haut lässt sich nicht erwarten (i_K).

Einordnung der Ergebnisse

Die Anforderungen nach HQS 703 bzgl. der Leasing-Eignung konnten vom DiTex-Hemd nur teilweise erfüllt werden. Im Hinblick auf den Tragekomfort schneidet das Gewebe positiv ab – sowohl die hautsensorischen als auch thermophysiologicalen Eigenschaften sind in der Gesamtheit als gut zu bewerten. Die Pflegeeigenschaften, für die sich leichte Abweichungen vom HQS 703 ergaben, sind als akzeptabel einzuordnen. Im Bereich der mechanischen Eigenschaften zeigte sich eine ausreichend

hohe Zugfestigkeit für Tätigkeiten unter normalen Beanspruchungen, während deutliche Defizite unter Scheuerbelastung beobachtet wurden (Scheuerfestigkeit, Pillingneigung). Diese Abweichungen führten zu keinen Auffälligkeiten im visuellen Gesamtbild der Hemden nach bis zu 50 Pflegezyklen. Es bedarf weiterer Untersuchungen darüber, inwieweit die Gebrauchsbelastung das visuelle Warenbild sowie die Festigkeit des Gewebes beeinflusst.

4.1.2 Anwendungsphase

Es wurden 40 Hemden aus dem Praxistest (bis 7 Zyklen) sowie 29 (15 Zyklen) bzw. 28 Hemden (100 Zyklen) nach Waschversuchen unter industriellen Bedingungen (Betrieb MEWA) auf gebrauchsb- oder/und waschbedingte Veränderungen im Vergleich zum Neuzustand abgemustert.

Insgesamt zeigte die textile Oberfläche visuell wenig Veränderungen und eine gute Beständigkeit. Haptisch war das Gewebe nach der Anwendung etwas fester als das Neumaterial, was auf den leichten Schrumpf zurückgeführt wird. Aufgeraute Bereiche bzw. Pilling ließen sich nur vereinzelt für Hemden aus dem Praxistest beobachten. Aufgrund der geringen Nutzungszyklen (bis 7 Zyklen) bedarf es hier weiterer Untersuchungen unter Praxisbedingungen, um den Einfluss der Gebrauchsbelastung zu analysieren und ggf. geeignete Anwendungsbereiche festzulegen. Das deutlich hellere bzw. „weißere“ Erscheinungsbild der Textilien im Vergleich zum Neumaterial ist mit dem Einsatz von optischen Aufhellern im gewerblichen Waschprozess verbunden, die in der Praxis routinemäßig verwendet werden, um den Weißseindruck der Textilien aufrecht zu erhalten.

In lokal begrenzten Bereichen zeigte das Gewebe deutliche Auffälligkeiten. So ließen sich für viele Proben im unteren Rückenbereich Risse parallel zur Längsachse beobachten, wobei die Anzahl der betroffenen Proben sowie das Ausmaß der Gewebeschädigung mit steigender Anzahl an Zyklen zunahm. Der untere Rückenbereich war zudem oftmals verzogen, „ausgeleiert“ und ausgedünnt. Die Schadensursache konnte im Rahmen des Projekts nicht eindeutig geklärt werden. Da ein Großteil der Proben eine beschädigte Saumnaht angrenzend an die Gewebeschäden auswies, könnte ein prozessbedingter Fehler zum Schaden beigetragen haben. Neben dem unteren Rückenbereich war der Schulterbereich um die Metallknöpfe von Gewebeschäden betroffen, wobei sich dies vor allem nach 100 Zyklen zeigte. Es wird angenommen, dass der Schaden durch die mechanische Beanspruchung hervorgerufen wurde, den die Metallknöpfe, vor allem beim Rotieren in der Waschtrommel, auf das Gewebe ausüben.

Die Verarbeitung hielt der industriellen Wäsche überwiegend stand. Lediglich im Bereich der Brusttasche kam es vermehrt zu losen, heraustretenden Fäden. Im Bereich der Zutaten zeigte sich, dass die Metallknöpfe nach der Wäsche matter erschienen und nach 100 Zyklen deutliche Kratzer aufwiesen. Für einen Großteil der Proben lösten sich zudem einzelne Knöpfe nach 100 Zyklen, wobei sowohl die Metallknöpfe im Schulterbereich als auch die PES-Knöpfe an Ärmel und Knopfleiste betroffen waren. Der reflektierende Polizei-Aufdruck blieb für nahezu alle Proben beständig.

Als Gebrauchsspuren sind neben dem Pilling bzw. aufgerauten Bereichen nicht auswaschbare Verfleckungen (gelb/braun und blau/schwarz) zu nennen, die für einen Teil der Hemden aus dem Praxistest (11 von 40 Proben) beobachtet wurden. Dies zeigt, dass insbesondere für weiße Textilien Gebrauchsspuren in Form von Verfleckungen einen relevanten Einfluss auf die Einsatzdauer haben.

Tabelle 7: Ergebnis der Konfektionsprüfung der DiTex-Hemden aus der Anwendungsphase

Kriterien	Praxistest: (bis 7 Zyklen, 40 Proben)	Waschversuche (15 Zyklen, 29 Proben)	Waschversuche (100 Zyklen, 28 Proben)
Verarbeitung, Veränderung aufgrund Schnittgestaltung (visuell)	Überwiegend keine/wenig Veränderung Einzelne Proben: Fäden lösen sich (6 Proben)	Leichte Veränderungen für ca. die Hälfte der Proben Auffälligkeiten: Saumnaht hinten beschädigt, Fäden lösen sich (z.B. Brusttasche)	Leichte Veränderungen für ca. die Hälfte der Proben Auffälligkeiten: Saumnaht hinten beschädigt, Fäden lösen sich (z.B. Brusttasche)
Aussehen und Funktion Zutaten (visuell)	Überwiegend wenig Veränderung Alle Proben: Metallknöpfe matt Einzelne Proben: Klettmaterial rau (2 Proben), Polizei-Aufdruck matt (1 Probe)	Überwiegend wenig Veränderung Alle Proben: Metallknöpfe matt, leicht verkratzt	Auffälligkeiten für einen Großteil der Proben Alle Proben: Klettmaterial rau, Metallknöpfe matt/zerkratzt Weiteres: Metallknöpfe fehlen (15 Proben), PES-Knöpfe fehlen (11 Proben), Polizei-Druck matt u. beschädigt (1 Probe)
Aussehen, Warenbild, Farbe (visuell)	Einzelne, lokale Auffälligkeiten für einen Großteil der Proben Gewebeschäden im unteren Rücken- und/oder Schulterbereich (11 Proben), Saumnaht hinten verzogen/ausgeleiert (27 Proben), Rückenbereich zu lang (8 Proben), Pilling/aufgeraute Bereich im Krageninnenbereich (5 Proben), kleine Verfleckungen (11 Proben) Alle Proben: „weißer“ als Neuware	Einzelne, lokale Auffälligkeiten für einen Großteil der Proben Gewebeschäden im unteren Rückenbereich (21 Proben), Schäden bzw. Löcher im Bereich Schulter/ Brusttasche (2 Proben) Alle Proben: „weißer“ als Neuware	Einzelne, lokale Auffälligkeiten für alle Proben Gewebeschäden im unteren Rücken- und/oder im Schulterbereich Ca. 2/3 der Proben: Saumnaht hinten verzogen/ausgeleiert, Rückenbereich zu lang Alle Proben: „weißer“ als Neuware
Griff (haptisch)	Alle Proben: etwas fester als Neuware	Alle Proben: etwas fester als Neuware	Alle Proben: etwas fester als Neuware

Mechanische Eigenschaften

Um mögliche Veränderungen des Gewebes mit Zunahme der Pflegezyklen zu detektieren, wurden einzelne Proben nach den Waschversuchen hinsichtlich ihrer textiltechnologischen Eigenschaften überprüft. Als Maß für die Festigkeit des Gewebes wurde die Höchstzugkraft nach DIN EN ISO 13934-1 gemessen, wobei jeweils 3 Proben nach 15 und 100 Zyklen geprüft wurden. In Kettrichtung verloren die Proben nach den Waschversuchen im Vergleich zum Neuzustand an Festigkeit, wobei eine leichte Abnahme mit steigender Anzahl an Pflegezyklen auftrat (15 Zyklen: im Mittel -3%, 100 Zyklen: im Mittel -7%). Ähnlich wie nach den Waschversuchen nach DIN EN ISO 15797 (s. Tabelle 4) lag die Höchstzugkraft des Prototyps in Schussrichtung unterhalb der Werte, die für die Proben aus den Waschversuchen erhalten wurden. Vergleicht man die Proben aus den Waschversuchen, trat eine leichte Abnahme der Zugfestigkeit zwischen 15 und 100 Zyklen auf. Die vergleichsweise stabilen Werte zwischen 15 und 100 Zyklen zeigen eine hohe Stabilität des Gewebes an und lassen keinen gravierenden Materialabbau erkennen. Die Zunahme der Werte in Schussrichtung im Vergleich zum Neuzustand könnten mit einem stärkeren Schrumpf des Gewebes in Schussrichtung oder einer Verdichtung des Schussgarns in Folge der Wäsche zusammenhängen, was zu einer erhöhten Festigkeit des Gewebes beitragen kann.

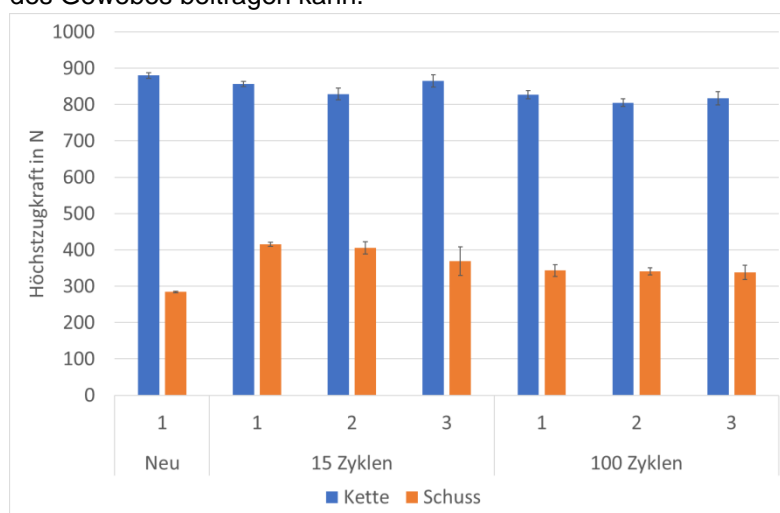


Abbildung 5: Zugfestigkeit des Gewebes nach DIN EN ISO 13934-1 mit zunehmender Anzahl an Waschzyklen (Abweichung von Norm: die Mittelwerte für die Proben aus den Waschversuchen ergeben sich aus 3 statt 5 Messungen). Es wurden jeweils 3 Proben je Waschbedingung untersucht (horizontale Achse).

Oberflächeneigenschaften

Die Gewebeeoberfläche wurde mithilfe von REM auf waschbedingte Veränderungen untersucht. In Abbildung 6 ist die für ein Köpergewebe typische Struktur zu erkennen. Mit zunehmender Zahl an Pflegezyklen treten vermehrt Fasern aus dem Verbund heraus, sodass die Oberflächenstruktur etwas an Kompaktheit verliert. Insgesamt weist die Oberfläche nach bis zu 100 Pflegezyklen keine gravierenden Veränderungen auf.

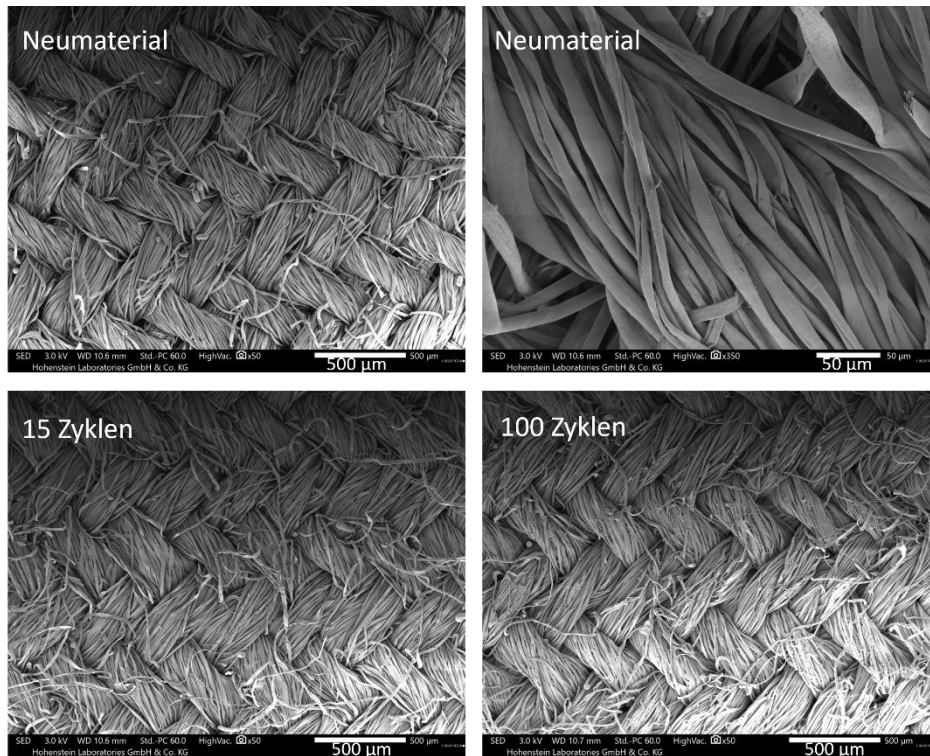


Abbildung 6: REM-Aufnahmen der Gewebeoberfläche im Neuzustand sowie nach 15 und 100 industriellen Wiederaufbereitungszyklen

4.2 Spektroskopische Eigenschaften

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.

Da die Polizei-Hemden aus einer Mischung aus recyceltem Polyester und Bio-Baumwolle (62%/38%) bestehen, setzen sich die Spektren aus einer Kombination der charakteristischen Peaks und Absorptionsbanden für die funktionellen Gruppen beider Materialien zusammen:

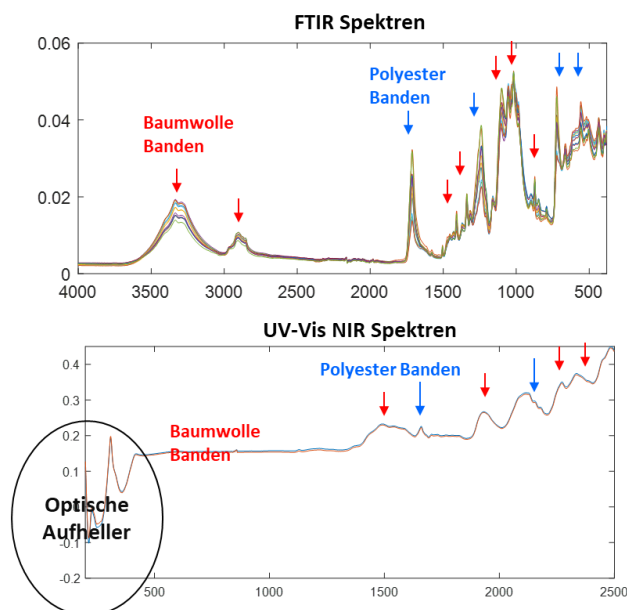
Baumwolle:

- Hydroxylgruppen (OH) in Cellulose: breite Bande bei ca. 3300 cm^{-1} .
- C-H-Streckungen von Methyl- und Methylen-Gruppen: zwischen 2850 und 2970 cm^{-1} .
- C=O-Streckung in Acetylgruppen: 1740 cm^{-1} .
- C-O-Streckung in Pyranose-Ringen: zwischen 1000 und 1150 cm^{-1} .

r-PET:

- 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} .



**Abbildung 7: FTIR (oben) und UV-Vis-NIR (unten) der Polizei-Hemd Prototypen.
Quelle: Hochschule Reutlingen**

Eine Bestimmung des Weißgrades in VIS-Bereich ist aufgrund von optischen Aufhellern nicht möglich,

Die Messung der Polizeihemden in der Wäscherei vor Ort war aufgrund der Corona-Einschränkungen nicht möglich. Die Hemden wurden deshalb am Ende der Praxisphase (40 Stück, die nur eine geringe Anzahl von Nutzungszyklen (4-7) aufwiesen) und nach zwei separaten Hochwaschprozessen (29 Stück, 15 Waschzyklen; 28 Stück, 100 Waschzyklen) im Labor an der Hochschule Reutlingen untersucht.

Alle Proben wurden dreimal in drei verschiedenen Punkten gemessen. Im mittleren und nahen Infrarotbereich wurden keine signifikanten Veränderungen der Spektren festgestellt. Dieses Ergebnis legt nahe, dass keine Materialverluste aufgrund der Nutzung und dem Waschprozess stattgefunden haben. In UV-Vis Bereich wurde festgestellt, dass es nach einem Pflegezyklus zu Veränderungen des Weißgrades kam. Diese Veränderungen erwiesen sich als stabil, und es traten keine weiteren signifikanten Veränderungen während der folgenden Pflegezyklen auf (siehe Abbildung 8). Im Bereich 420 - 610 nm ist die Änderung des Weißgrades zu erkennen.

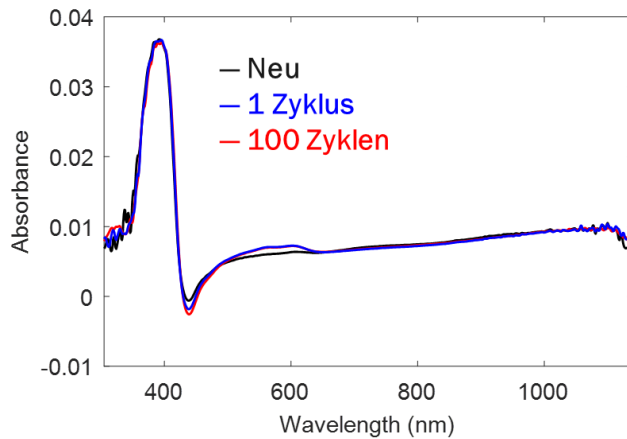


Abbildung 8: UV-Vis Mittelwertspektren der Polizeihemden (schwarz: Neuzustand, blau: 1 Zyklus, rot: 100 Zyklen). Quelle: Hochschule Reutlingen

Die Veränderungen des Weißgrades nach einem Pflegezyklus, sichtbar auch nach visueller Inspektion, können hauptsächlich auf die Anwendung von optischem Aufheller in dem Waschmittel zurückzuführen sein. Es wurden keine Oberflächenveränderungen nachgewiesen, selbst nach 100 Pflegezyklen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Insgesamt ergibt sich für das DiTex-Businesshemd ein gemischtes Gesamtbild. Im Hinblick auf die Auswahl des Gewebes aus 62 % kba / 38 % rPES sind die guten thermophysiologicalen und hautsensorischen Eigenschaften hervorzuheben, die für ein angenehmes Tragegefühl sorgen. Das Gewebe hat eine ausreichende Zugfestigkeit für Anwendungen unter normaler Beanspruchung und zeigt nach bis zu 100 Pflegezyklen unter industriellen Bedingungen keinen gravierenden Festigkeitsverlust. Auch die spektroskopischen Daten lassen keinen Materialabbau, sondern eine gute Beständigkeit erkennen. Dies spiegelt sich im Warenbild der Gewebeoberfläche wider, welche visuell nach 100 Pflegezyklen wenig Veränderungen über große Bereiche aufweist. Auf der anderen Seite traten insbesondere nach 100 Zyklen lokale Gewebeschädigungen auf, deren Ursache nicht genau identifiziert werden konnte und die vermutlich z.T. mit der Wahl der Zutaten (Silberknöpfe Schulter) zusammenhängen. Daneben zeigten sich deutliche Defizite bei Einwirkung einer Scheuerbelastung (Scheuerfestigkeit, Pillneigung). Um die Relevanz der einzelnen Prüfkriterien und ggf. mögliche Einschränkungen für den spezifischen Anwendungsbereich festzulegen, sind weitere Forschungsarbeiten notwendig, welche den Einfluss der Gebrauchsbelastung auf das Warenbild analysieren.

6 Literaturverzeichnis

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.

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

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

EcoForum, Report to ETSA - Assessment of global warming potential of two textile services, 2015.

7 Anhang

7.1 Kurzbeschreibung relevanter Prüfmethoden

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: $T_a = 25\text{ °C}$; $\varphi_a = 30\%$ 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: $T_a = 35\text{ °C}$; $\varphi_a = 30\%$ 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 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: $T_a = 20\text{ °C}$; $\varphi_a = 65\text{ \% r.F.}$

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

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

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 Bildanalysesystems spezifische Kennzahlen bzgl. der Oberflächenstruktur ermitteln lassen (z.B. Hoch- und Tiefpunkte) und die Kontaktpunktzahl (Musterfläche 12,25 cm²) 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: $T_a = 20\text{ °C}$; $\varphi_a = 65\%$ 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 cm x 10 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: $T_a = 20\text{ °C}$; $\varphi_a = 65\%$ r.F.

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



DiTex

DITEX-KREISLAUFWIRTSCHAFT.DE