

TourAtlas

T-EXoSuit

Nachwuchssicherung
Maschinen
Umwelt
Zukunftsprodukt
Innovations-
management
Ressourceneffizienz
Industrie 4.0
Wertschöpfungsketten
Arbeitsorganisation
Landwirtschaft
Wissensmanagement
Chemie
Bau
Textil
Medizin

Zukunft unternehmen!

Unsere Anwendungsfelder



Automotive



BuildTech



InduTech



Luftfahrt



MedTech



MobilTech



SportTech



Windenergie

➤ Über das Forschungsprojekt futureTEX

Das Projekt futureTEX ist ein Gewinner im Programm „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Bis 2021 arbeiten wissenschaftliche Einrichtungen, Unternehmen und Verbände an der Entwicklung wesentlicher Bausteine eines Zukunftsmodells für Traditionsbranchen. Das Projektkonsortium futureTEX verfolgt das Ziel, die führende Position bei der Umsetzung der vierten industriellen Revolution im Textilmaschinenbau und in der Textilindustrie zu erringen und damit beispielhaft bis 2030 das modernste textilindustrielle Wertschöpfungs-

netzwerk Europas aufzubauen. Mit der Entwicklung eines Zukunftsmodells werden die Forschungsschwerpunkte Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft, kundenintegrierte flexible Wertschöpfungsketten, textile Zukunftsprodukte, Wissens- und Innovationsmanagement sowie Arbeitsorganisation und Nachwuchssicherung gemeinschaftlich mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft bearbeitet. Das Konsortium umfasst aktuell über 300 Partner, darunter 70 Prozent aus der Industrie. Das Projekt futureTEX ist Preisträger im Wettbewerb „Ausgezeichneter Ort“ im Land der Ideen 2016.

➤ Abschlussdokumentation Umsetzungsvorhaben T-EXoSuit

Textilbasiertes Exoskelett mit individuell einstellbarem graduellen Bewegungswiderstand und User Interface zur präventiven und rehabilitativen Unterstützung des Bewegungsapparats

Laufzeit: 1. August 2018 – 30. Oktober 2020

T-EXoSuit war eines von insgesamt 28 Umsetzungsvorhaben des Projekts futureTEX im Rahmen des Programms „Zwanzig20 – Partnerschaft für Innovation“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung.

Inhalt

Management Summary	6
Partner	7
Problemstellung und Motivation	9
Beitrag zur Realisierung der futureTEX-Ziele	10
Lösungsansatz	11
Ergebnisse	12
Verwertung und wirtschaftliche Bedeutung	17
Ausblick	18

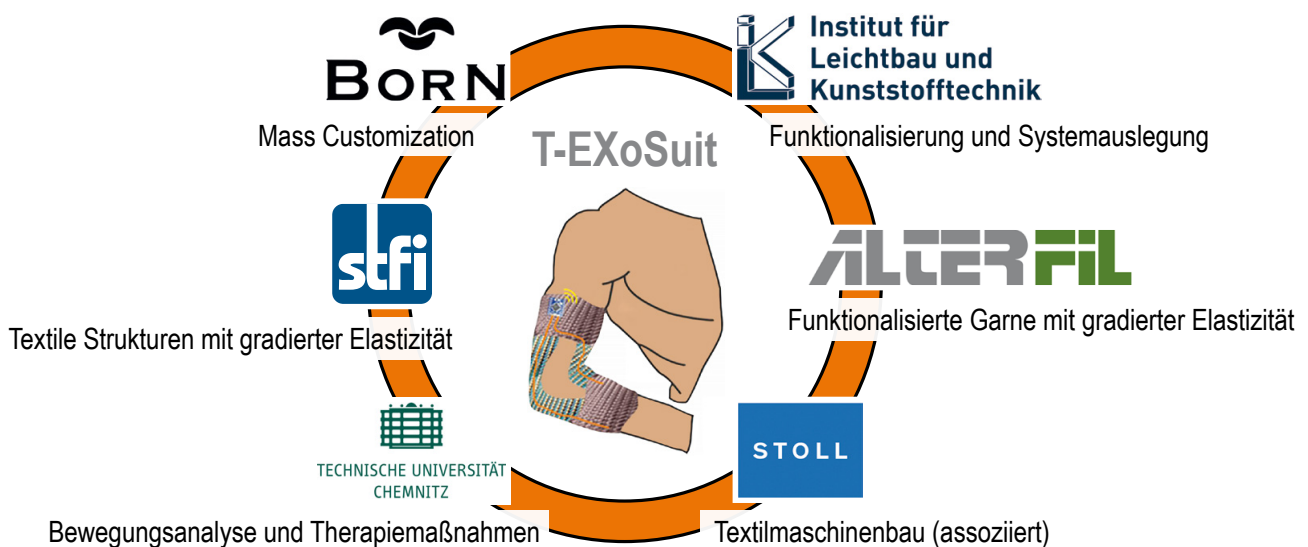


Abbildung 1: Schaubild des Vorhabens mit den involvierten Partnern. Quelle: ILK

➤ Management Summary

Besonders im Bereich des produzierenden Gewerbes gibt es eine Vielzahl von Arbeitsprozessen, bei denen eine ergonomisch ungünstige Haltung und Belastung des menschlichen Körpers nicht verhindert werden kann. Ein Beispiel hierfür sind Montagearbeiten mit drehmomentgesteuerten Akkuschraubern, bei denen es für den Bediener zu unvorhergesehenen, sich stetig wiederholenden und starken Drehbewegungen kommt, die in den Unterarm eingeleitet werden. Aus derartigen Tätigkeiten resultieren für den Menschen kritische Belastungszustände, mit denen meist langwierige Krankheitsbilder einhergehen.

Um diese Ereignisse zu erfassen und auftretende Belastungen in Zukunft signifikant zu reduzieren, wurde in diesem Projekt eine funktionsintegrative Orthese – der T-EXoSuit – entwickelt. Die Hauptaufgabe dieser passiven Orthese besteht dabei darin, die Anwendenden, welche z. B. an Montagearbeitsplätzen tätig sind, vor Überlastungen und somit vor permanenten Krankheiten zu schützen. Neben der Entwicklung dieser Unterstützungsstruktur war die zugehörige Fertigungstechnologie mittels textiler Verarbeitungsprozesse einer der Forschungsschwerpunkte im Rahmen des Projektes. Um diese anspruchsvolle Aufgabe zu bewältigen, hat sich ein interdisziplinäres Team aus den Bereichen der Bewegungswissenschaften, des Leichtbaus, der Textilverarbeitung und Garnherstellung zusammengefunden. Mit der Professur „Forschungsmethoden und Analyseverfahren in der Biomechanik (FAB)“ der TU Chemnitz steht ein kompetenter Partner für die Untersuchung der Bewegungsabläufe beim analysierten Anwendungsfall – Schraubvorgang mit einem Akkuschrauber bei Montagearbeiten – zur Verfügung. Mit dem Sächsischen Textilforschungsinstitut e.V. (STFI), der Alterfil Nähfaden GmbH und der Born GmbH wurde die stricktechnische Gestaltung und Umsetzung des T-EXoSuits in enger Zusammenarbeit durchgeführt. Das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden unterstützte die Partner mit der Modellierung möglicher Maßnahmen zur Bewegungseinschränkung beim ausgewählten Lastfall und entwickelte geeignete Sensoren und Datenauswertungseinheiten, welche die

Erfassung der Bewegungsabläufe ermöglichen und in den T-EXoSuit integriert werden können. Im Verlauf des Vorhabens wurden zunächst relevante Anwendungsfälle definiert, wobei einerseits das Karpaltunnelsyndrom als auch der erwähnte Schraublastfall gezielt analysiert, Grenzen für die Bewegungs- und Geschwindigkeitsprofile abgeleitet und als Zielvorgabe für die zu entwickelnde Orthese festgelegt wurden. Dabei zeigte sich, dass der Schraublastfall einerseits ein exemplarischer Fall ist, der in vielen Branchen auftritt, verbunden mit einem hohen Potenzial für Arbeitsausfälle und langfristige gesundheitliche Schäden. Andererseits stellt er auch eine sehr herausfordernde Aufgabenstellung für die Umsetzung einer dafür geeigneten textilen Orthese dar.

Mit den durchgeführten Arbeiten konnten verschiedene Erkenntnisse und Ergebnisse erarbeitet werden. Hierunter zählen u. a. die Erfassung und Analyse der auftretenden kritischen Bewegungsmuster. Die Erarbeitung steifigkeitsvariabler Garne und Strickstrukturen sowie die stricktechnische Umsetzung von (lokalen) Verstärkungsstrukturen und Integration von geeigneten rutschhemmenden Zonen ermöglichte eine gezielte Einflussnahme auf die Bewegungsfreiheitsgrade. Unterstützend wurde die Abbildung und Reduzierung von realen Bewegungsabläufen und Maßnahmen zu deren Beeinflussung durch ein vereinfachtes Simulationsmodell ermöglicht. Schließlich erlaubte die integrierte Erfassung, Aufbereitung und Auswertung von Bewegungsereignissen direkt am Probanden die stricktechnische Überführung und Umsetzung von lastaufnehmenden textilen Strukturen in eine steifigkeitsvariable volltextile Orthesenstruktur.

Als langfristiges Ziel des Vorhabens T-EXoSuit ist die kundenspezifische Herstellung von angepassten Orthesen zur Bewegungseinschränkung geplant. Der Einsatzbereich des T-EXoSuits ist dabei keinesfalls nur auf den Arbeitssektor beschränkt, sondern schließt rehabilitative Anwendungen im Bereich der orthopädischen Therapien (Medtech) oder auch präventive Aspekte des sportlichen Trainings (Sporttech) mit ein.



BORN GmbH knitwear for fashion & engineering
Poststraße 4 | 37351 Dingelstädt
Ansprechpartner: Michael Schneider, Tino Potzkei
T: +49 36075 5060 | michael.schneider@born-germany.de

BORN GmbH knitwear for fashion & engineering

Die BORN GmbH knitwear for fashion & engineering (Born GmbH) mit Sitz in Dingelstädt/Thüringen gilt als einer der innovativsten Strickwarenproduzenten in Deutschland. Die eigene Forschungs- und Entwicklungsabteilung verfügt über ein Team von Textilingenieuren und Elektrotechnikern, welche in Zusammenarbeit mit Universitäten und Forschungszentren Technische Textilien von morgen entwickeln. Hieraus sind in der Vergangenheit bereits marktführende Produkte u. a. aus den Bereichen der Elektromuskelstimulation oder Healthcare hervorgegangen. Dies zeigt eindrucksvoll, wie komplexe Elektronikbauteile in komplexe Textilien eingestrickt werden können. Ebenso werden die neuesten Entwicklungen durch modernste Strickmaschinen direkt am Standort Dingelstädt „Made in Germany“ produziert, konfektioniert und mit modernster Technik finalisiert. An dieser Stelle kann die Firma BORN auf spezielle Verfahren zum Verschweißen und Beschichten von Textilien zurückgreifen. Aufgrund stetiger Investitionen in neueste Verfahrenstechniken ist das Team aus 40 Mitarbeitern seit Jahren eine wichtige Stütze für Forschungs- und Industriepartner.



Alterfil Nähfaden GmbH
Bahnhofstraße 33 | 09569 Oederan
Ansprechpartner: Gosbert Amrhein
T: +49 37292 26250 | amrhein@alterfil.com

Alterfil Nähfaden GmbH

Die Alterfil Nähfaden GmbH (Alterfil) hat als junges mittelständisches Unternehmen ihren Produktionsstandort in der Region Mittelsachsen. Hier ist die Textilindustrie seit Ende des 19. Jahrhunderts zu Hause. Die ursprüngliche Firmengründung geht auf das Jahr 1909 als Zwirnerei & Nähfadenfabrik Erwin Kabis zurück. Nach der 1990 erfolgten Reprivatisierung des VEB Zwirnerei- und Nähfadenfabrik Oederan wurde 2006 die Alterfil Nähfaden GmbH in ihrer jetzigen Form gegründet. Heute hat sie ihren Hauptabsatzmarkt im Sektor der herkömmlichen sowie Hochleistungs-Nähfäden für die Bekleidungsindustrie in vielen Varianten. Neben den Industriekunden der klassischen Textil- und Bekleidungsindustrie profiliert sich die Firma Alterfil zunehmend im Bereich funktionalisierter Spezialgarne, was durch umfangreiche FuE-Aktivitäten erreicht wurde. Die Produktpalette umfasst auch kundenindividuelle Spezialgarne in unterschiedlichsten Garnqualitäten und -feinheiten. Durch die Entwicklung, die Herstellung und den Vertrieb innovativer Garne konnte sich die Firma Alterfil als verlässlicher, anerkannter Lieferant und



Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)
Postfach 1325 | 09072 Chemnitz
Ansprechpartner: Jens Mählmann
T: +49 371 5274-240 | jens.maehlmann@stfi.de

Partner in der Branche etablieren. Das qualifizierte und motivierte Team umfasst derzeit 43 Mitarbeiter, welche mittels modernster Technik und energieeffizienter Prozesse am Produktionsstandort Deutschland arbeiten. Das Verfahrensangebot der Firma Alterfil besteht aus den Prozessstufen Zwirnerei, Garnfärberei, Beschichten und Spulen. Diese vollstufige Produktion an einem Standort macht das Unternehmen zu einem zuverlässigen Partner mit höchsten Qualitätsansprüchen und ständig neuen innovativen Produkten.

Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.

Das 1992 gegründete Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI) ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung mit 145 Mitarbeitern. Neben der Prüfung und Zertifizierung von Textilien in eigenen akkreditierten Laboreinrichtungen befasst sich das Institut mit anwendungsorientierten verfahrens- und ergebnisbezogenen Forschungs- und Entwicklungsaufgaben vorrangig für technische Bereiche. Das Institut bildet die textile Kette vollstufig ab, d. h. sowohl Garnherstellung als auch die Herstellung von textilen Flächen aus Fasern oder Garnen sowie deren Veredlung kann im eigenen Haus durch die hervorragende Ausstattung mit Labor- und Industriemaschinen erfolgen. Neben diversen Verfahren zur trockenen Vliesstoffherzeugung und thermischen oder mechanischen Verfestigung, der Herstellung von Web- und Maschenwaren stehen Maschinen zum technischen Sticken und Funktionalisieren zur Verfügung. Zur Realisierung von Strickereierzeugnissen sind neben (Klein-)Rundstrickmaschinen insbesondere RR-Flachstrickmaschinen der Firma H. Stoll GmbH & Co., Reutlingen Typ CMS 740 Knit and Wear (E5.2) und ADF 530-32 (E14/12) vorhanden. Im STFI ist die Entwicklung und Fertigung von Mustern im Versuchsmaßstab sowie eine Anlaufproduktion realisierbar. Bei der Entwicklung von Technischen Textilien durch Integration funktionaler Materialien oder durch Verarbeitung von Hochleistungsmaterialien für unterschiedliche Anwendungsbereiche liegen langjährige Erfahrungen vor.



Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik
Holbeinstraße 3 | 01307 Dresden
Ansprechpartner: Prof. Niels Modler, Dr.-Ing. Anja Winkler
T: +49 351 46338074 | anja.winkler@tu-dresden.de

Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik

Das Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der Technischen Universität Dresden beschäftigt sich seit mehr als 25 Jahren mit Forschung rund um das Thema Leichtbau. Hierbei kann es auf umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Entwicklung



TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

Technische Universität Chemnitz, Professur Forschungsmethoden
und Analyseverfahren in der Biomechanik (FAB)
Thüringer Weg 11 | 09126 Chemnitz
Ansprechpartner: Prof. Christian Maiwald, Daniel Koska
T: +49 371 531-32024 | daniel.koska@hsw.tu-chemnitz.de

und Herstellung funktionsintegrativer Leichtbaustrukturen und -systeme verweisen. Die Arbeit am ILK ist geprägt vom Dresdner Modell eines „Funktionsintegrativen Systemleichtbaus in Multi-Material-Design“ und basiert auf einem werkstoff- und produktübergreifenden Ansatz. Dieser umfasst durchgängig die gesamte Entwicklungskette: Werkstoff, Konstruktion, Simulation, Datenanalyse, Prototyp, Test, Qualitätssicherung und Kosten. In diesem Zusammenhang konnte sich das ILK weitreichende Kompetenzen auf den Gebieten der Auslegung, Berechnung, Fertigung und Charakterisierung von funktionsintegrativen Leichtbaustrukturen auch im Bereich der Medizintechnik aufbauen.

Technische Universität Chemnitz, Professur Forschungsmethoden und Analyseverfahren in der Biomechanik

Die Professur Forschungsmethoden und Analyseverfahren in der Biomechanik (FAB) beschäftigt sich im Rahmen der universitären Lehre und Forschung schwerpunktmäßig mit Methoden der biomechanischen Bewegungserfassung und Datenanalyse sowie der Entwicklung geeigneter Messverfahren. Anwendungsbereiche umfassen bewegungswissenschaftliche Fragestellungen in den Bereichen Orthopädie- und Reha-technik, Sporttechnologie, Assistenzsysteme und biomechanische Ergonomie.

➤ Problemstellung und Motivation

Trotz der fortschreitenden Modernisierung von Arbeitsplätzen gibt es im Bereich des produzierenden Gewerbes eine Vielzahl von Arbeitsprozessen, bei denen eine ergonomisch ungünstige Haltung und Belastung des menschlichen Körpers nicht verhindert werden kann. Um diese kritischen Belastungszustände und damit einhergehende Krankheitsbilder in Zukunft zu reduzieren, soll in diesem Projekt eine funktionsintegrative Orthese, der T-EXoSuit, entwickelt werden. Dabei besteht die Haupt-

aufgabe der passiven Orthese darin, die Anwendenden, z. B. an Montagearbeitsplätzen, vor Überlastungen durch eine Reduzierung des Bewegungsausmaßes und der -geschwindigkeit zu schützen. Neben der Entwicklung dieser Unterstützungsstruktur ist die zugehörige Fertigungstechnologie mittels textiler Verarbeitungsprozesse einer der Forschungsschwerpunkte im Rahmen des Vorhabens. Das individualisierte textile Exoskelett T-EXoSuit dient zur dynamischen Unterstützung des menschlichen

Bewegungsapparats. Die Unterstützung soll durch den Einsatz von Textilien mit dehnungsabhängiger Steifigkeit realisiert werden. Diese Textilien sollen an ausgewählte Bewegungsabläufe und den jeweiligen Träger individuell anpassbar sein. Grundlage zur Umsetzung der textilen Orthese bildet die Flachstrickerei. Auf starre Funktionselemente wird nach Möglichkeit verzichtet. Für die Erfassung der Bewegungsabläufe und -muster sind geeignete Sensoren in das Textil zu integrieren, sodass dem Anwender relevante Bewegungsdaten zur Analyse und Bewegungskontrolle zur Verfügung stehen. Bei körperlich beanspruchenden Tätigkeiten besteht sowohl ein Bedarf für Methoden zur Analyse dieser Bewegungen als auch zur Reduktion der auftretenden Beanspruchungen.

Als Modellfall wurde die Belastungsreduktion bei der Verwendung von drehmomentgesteuerten Akkuschraubern in der Montage ausgewählt. Das Rückschlagmoment beim Erreichen der Verschraubungsfestigkeit wird in den Unterarm eingeleitet und kann bei wiederholter Tätigkeit zu gesundheitlichen Beschwerden führen. Diese Torsi-

onsbewegung soll durch den T-EXoSuit, der als eine textile, flachgestrickte Unterarm-Manschette ausgeführt werden sollte, aufgenommen und abgemindert werden. Neben der Strukturelastizität des Gestricks werden gezielt Garnkonstruktionen mit variablen Materialsteifigkeiten eingesetzt. Derzeit sind noch keine Orthesen bekannt, welche die angesprochenen Aufgaben erfüllen können. Besondere Herausforderungen und damit auch die Motivation sind vorrangig die Umsetzung der Krafteinleitung, Lastübertragung und die Bewegungsreduktion, realisiert nur durch eine rein textile Unterstützungsstruktur. Zudem sind die Wechselwirkungen des Textils mit der Haut und der individuellen muskulären Physiologie des Armes derzeit noch nicht derart erforscht, dass allgemeingültige Rückschlüsse und Gestaltungsregeln für eine derartige Orthese ableitbar sind. Für ein besseres Verständnis dieser Zusammenhänge und der Realisierung der Reduktion des Bewegungsausmaßes sollte die Entwicklung des T-EXoSuits viele neue Erkenntnisse und zielführende textiltechnische Ansätze hervorbringen.

➤ Beitrag zur Realisierung der futureTEX-Ziele

Das Vorhaben konzentrierte sich vor allem auf Entwicklungsarbeiten funktioneller Technischer Textilien (TechTex) sowie textiltechnologischer Lösungswege zur Umsetzung steifigkeitsvariabler Verstärkungsstrukturen. Die Integration von Sensoren und elektronischen Komponenten in die textile Fläche wurde durch eine enge Zusammenarbeit aus dem ILK, der Professur für Bewegungswissenschaften der TU Chemnitz, dem Textilmaschinenbau (Stoll) und dem produzierenden Gewerbe (STFI, Alterfil, Born GmbH) gestärkt. Ferner wurde die Entwicklung von Spezialgarnen zusammen mit dem Projektpartner Alterfil vorangetrieben. Die enge Partnerschaft zu den Industrieunternehmen ermöglichte damit auch die Generierung von praxistauglichen Umsetzungen zentraler Forderungen von Industrie 4.0 zur digitalen Abbildung textiler Materialien

und Herstellungsprozesse bis hin zur fertigungstechnisch individuellen bzw. kundenspezifischen Anpassung (Mass Customization).

Das Ziel der technologischen Entwicklung von textilen Strukturen mit variabler Steifigkeit und die Integration von Sensoren in die textile Struktur wurde auf Basis der Flachbettstrickerei verfolgt. Mittels regulärer Strukturen war eine endkonturnahe Fertigung, individuell anpassbar auf Körper- oder Gelenkproportionen, möglich. Neben einer gezielten Beeinflussung der Steifigkeit über lokale Materialanhäufungen und/oder Bindungskonstruktionen wurden hier auch neuartige dehnungsvariable oder in der Endsteifigkeit beeinflussbare (mittels thermischer Aktivierung) Garne entwickelt und eingesetzt.

➤ Lösungsansatz

Eine große Herausforderung für eine zielführende Gestaltung, Auslegung und Umsetzung des T-EXoSuits ist die Kenntnis der Übertragungswege und Zusammenhänge zwischen der Bewegung des Akkuschraubers, der Übertragung der Bewegung auf den Arm und der Wechselwirkungen des Armes mit der Orthese. Um dies zu bestimmen und aufzuklären wurden zunächst Schraubversuche mit unterschiedlichen Probanden und unterschiedlichen Schraubfällen durchgeführt. Daraus konnten kritische Bewegungen und Lösungsvorschläge abgeleitet werden. Anhand einer detaillierten Anforderungsanalyse für die zu entwickelnde Orthese wurden erste Orthesenmuster und unterschiedliche Konfigurationen an textilen Versteifungs- und Zugbandvarianten entworfen und untersucht. Mit einem vereinfachten Ersatzmodell wurden diese Bewegungen in einer Simulationsumgebung (MATLAB) nachgestellt und geeignete Maßnahmen zur Bewegungsreduktion simuliert. Auf Basis der experimentellen und simulativen Daten sind für die Gestaltung der Orthese geeignete Lastpfade definiert worden, welche eine Reduzierung des Auslenkungswinkels und der -geschwindigkeit des Armes erwarten lassen. In enger Abstimmung der Partner wurden die Daten aufgearbeitet und in die textiltechnische Gestaltung von Versuchsmustern des T-EXoSuits übertragen. Da die Fixierung der Orthese auf dem Arm und die realisierbare Kraftübertragung große Herausforderungen für die Funktion des T-ExoSuits darstellen, wurden neben den geeigneten versteifenden Strickmustern auch Fixierungs-, Verschluss-, Rutschhemmungs- und Zuschnittkonzepte entworfen und in Musterorthesen übertragen. Anhand von Untersuchungen mit den Musterorthesen an unterschiedlichen Probanden konnte im realen Schraubfall gezeigt werden, dass ein Effekt der Orthese auf die Bewegung des Armes im Belastungsfall erzielbar ist, dieser aber sehr gering ausfällt. Zudem wurde eine Sensoreinheit entwickelt, mit der es möglich ist, die Schraubbewegung, deren Umfang und die daraus resultierenden Kenngrößen – Auslenkungswinkel und -geschwindigkeit – direkt in der Orthese zu erfassen, auszuwerten und nachträglich die Summe aller Ereignisse in kritische und unkritische Bewegungen zu clustern und darzustellen.

Aus textiltechnischer Sicht wurden die im folgenden aufgeführten Ansätze verfolgt. Das Garn als biegeschlaffes Grundelement textiler Strukturen ist nur bedingt geeignet, Druck- oder Torsionslasten aufzunehmen und zu übertragen. Demgegenüber können jedoch entsprechend

gestaltete bzw. konstruierte Garne teilweise sogar hohe Zugkräfte aufnehmen. Daher wurde im Rahmen des Vorhabens T-EXoSuit ein Ansatz gewählt, bei dem durch kraftliniengerechte Verläufe von speziellen Haltegarnen in der textilen Struktur Zuelemente ausgebildet werden und somit Druck- und Torsionsbelastungen in Zugbelastungen transformiert und aufgenommen werden können. Dabei sollten zudem neuartige Garne entwickelt und eingesetzt werden, die eine graduelle oder gestufte Elastizität aufweisen, um je nach physiologischer und bewegungsanatomischer Anforderung unterschiedliche Bewegungsradien zu ermöglichen. Die Verarbeitung dieser neuartigen Garne stellte eine besondere Herausforderung dar, die aber in einem iterativen Prozess zwischen Entwicklung (STFI und Alterfil), stricktechnischen Verarbeitungsversuchen und Anpassung der Technologie (STFI und Firma Born/Stoll) gelöst werden konnte. Die Integration von faserverstärkten Kunststoffeinsätzen oder die partielle Konsolidierung entsprechender Strukturbereiche z. B. durch thermisch aktivierbare Schmelzgarne, wurde ebenfalls mit betrachtet. Dies ermöglicht, innerhalb der Fläche, den Übergang von gut drapierfähigen, biegeschlaffen, elastischen Bereichen des textilen 3-D-Gebildes bis zu vollständig biegesteifen Strukturelementen, z. B. für Stützfunktionen oder als Ankerpunkte (EXO-Skelett) für elastische Strukturelemente (textile Muskeln und Bänder) ohne Ausbildung von Nähten.

Die Masche als textiles Grundelement ermöglicht durch ihre räumlich geometrische Verformbarkeit eine Elastizität und Dehnungsreserve der Gesamtstruktur auch beim Einsatz von Garnen mit geringer Elastizität, dies wird oft auch als Strukturdehnung von Maschenwaren bezeichnet. Durch Bindungskombinationen und damit einhergehende lokale Materialanhäufungen kann die Elastizität einer textilen Fläche in einem weiten Spektrum variiert bzw. definiert werden. Durch das Einbringen von Schussgarnen oder einer gezielten Flottung mit Garnreserve kann somit die Elastizität beschränkt werden. Weitere versteifende Eigenschaften lassen sich durch den Eintrag von Schmelzgarne erreichen, die nach einer thermischen Aktivierung lokal versteifte Bereiche ermöglichen. Eine gezielte Bindungs- und Materialkombination erlaubt die Herstellung unterschiedlich dichter Strukturen, welche die Steifigkeit zum einen durch eine Materialreserve (Elastizität) bei Zugbelastung oder zum anderen durch eine Blockade (Steifigkeit) bei Schubbelastung gezielt beeinflusst. Durch individuelle Längung oder Kürzung von Steuergarnen,

z. B. durch Materialzugabe (Lösen von Schlingen oder Riegelknoten) oder Materialrückhalt (Abknoten, Abriegeln, Fixieren), können hier z. B. therapeutische Grenzmaße eingestellt werden. Für die Integration von überwachenden Sensoren wurde einerseits der Ansatz verfolgt, im Textil Sensorfasern oder auch flächige Sensoren zur Dehnungserfassung einzusetzen. Zudem wurde in Anlehnung an übliche biomechanische Messungen auch der Ansatz zur

Verwendung von im Textil einlegbaren Sensoreinheiten auf der Basis von Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) fokussiert. Ziel der Sensorik sollte die Erfassung bestimmter Bewegungen, deren Beschreibung und die Ableitung von kritischen oder unkritischen Bewegungsmustern sein. Auf dieser Basis soll in Zukunft eine Bewertung der Arbeitsabläufe und die Verhinderung von Überbelastungen des menschlichen Körpers möglich werden.

➤ Ergebnisse

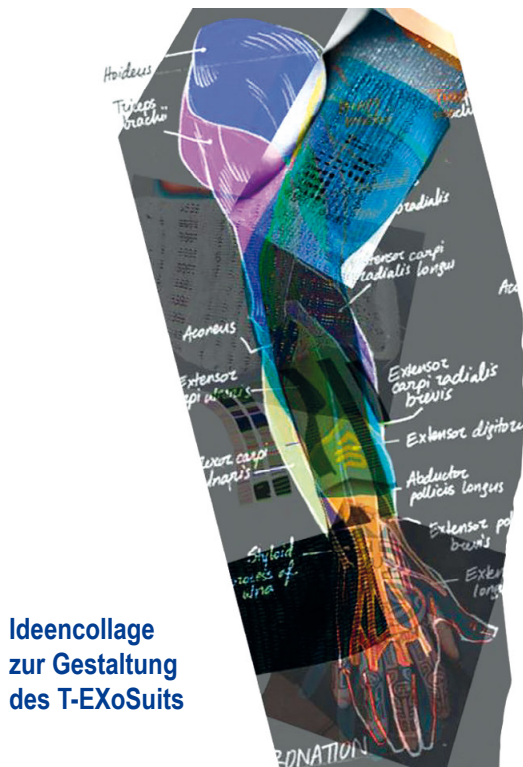
Für die Erarbeitung der Anforderungsanalyse wurden zunächst Bewegungsstudien an realen Arbeitsplätzen durchgeführt und die dabei auftretenden Bewegungen analysiert. Hierfür sind unterschiedliche Probanden und unterschiedliche Schraublastfälle untersucht worden.

Im Speziellen sind weibliche und männliche Probanden an einem Montagearbeitsplatz mit einem für die Montagearbeiten üblichen Akkuschrauber und den folgenden zwei verschiedenen Schraubfällen untersucht worden:

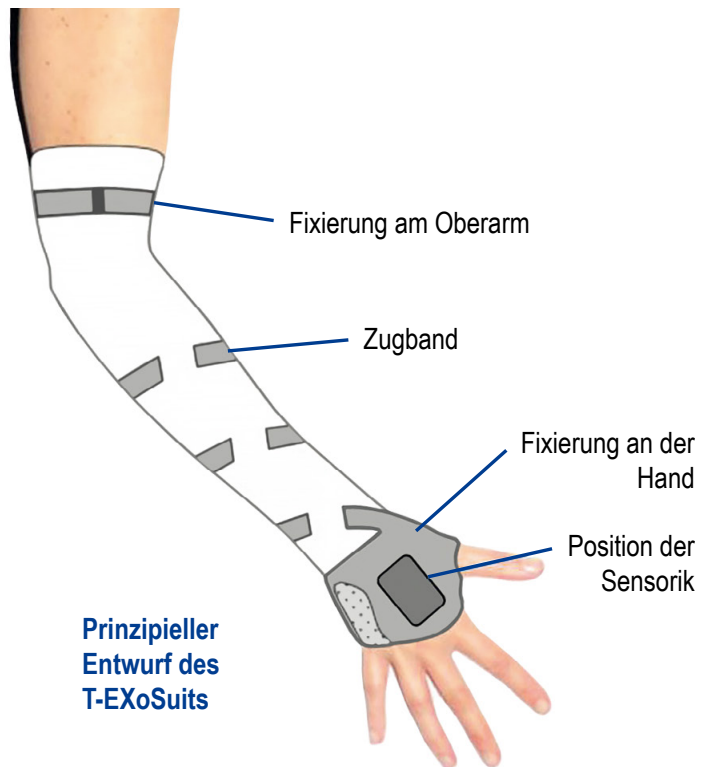
- **Weicher Schraublastfall** – Drehmomentbegrenzung des Akkuschraubers wird zeitlich später erreicht, da das zu verschraubende Bauteil noch ein wenig nachgibt bis das maximale Drehmoment erreicht wird
- **Harter Schraublastfall** – Drehmomentbegrenzung wird schnell erreicht, da zu verschraubende Bauteile nicht nachgiebig sind und somit das maximale Drehmoment schnell erreicht wird

Die Bewegungserfassung erfolgte durch ein auf dem Handrücken positioniertes Gyroskop. Diese Untersuchungen zeigten, dass die Pronationsbewegung, also das Verdrehen des Handgelenkes zum Ellenbogen in Längsrichtung des Armes, die dominierende Belastungsgröße darstellt und vor allem bei weiblichen Probanden größer ist. Durch derartige Bewegungen kann beispielsweise das Krankheitsbild der Epicondylitis (oder auch Tennisarm) hervorgerufen werden, was in der Regel langwierige Folgen und längere Arbeitsausfallzeiten nach sich zieht.

In der anschließenden Anforderungsanalyse an den T-EXoSuit standen daher vorrangig die Reduzierung der Pronationsbewegung und dabei speziell der Bewegungswinkel und die Winkelbeschleunigung im Fokus. In diesem Zusammenhang ist die Ausarbeitung von Zugbandvarianten, die in den späteren T-EXoSuit textiltechnisch integriert werden, als zielführende Methode ausgewählt worden.



Ideencollage zur Gestaltung des T-EXoSuits



Prinzipieller Entwurf des T-EXoSuits

Abbildung 2: Entwürfe für die Gestaltung des T-EXoSuits. Quellen: links STFI, rechts ILK

Die zu verwendenden Zugbänder sollten steifigkeitsvariabel mit einer relativ hohen Anfangssteifigkeit sein, da durch sie der Bewegungsradius bei schnellen Drehbewegungen des Handgelenkes bzw. des Unterarmes eingeschränkt werden sollte. Für die textilen, steifigkeitsvariablen Zugbänder wurden am STFI in enger Kooperation zu Alterfil zunächst unterschiedliche Garne untersucht. Anschließend wurden aus ausgewählten Garnen Zugbandvarianten gestrickt und deren Eigenschaften bestimmt. In der Garnprüfung zeigte sich, dass ausgewählte PBT,

PTT und Elastic-Garne eine geeignete Dehnungs-Zugfestigkeits-Charakteristik aufweisen. Die Prüfung der angefertigten Bänder zeigte wiederum, dass Flachstrickbänder aus PBT und Elastic-Garnen von Alterfil geeignete Eigenschaften aufweisen. Die Integration derartiger Zugbänder und versteifender Strukturen sowie deren Orientierung im Gestrick konnte erreicht werden. Hierbei ist die Realisierung von 45° zum Gestrick verlaufenden Strukturen besonders hervorzuheben.



Abbildung 3: Stricktechnische Realisierung von 45° verlaufenden Strukturen. Quelle: STFI

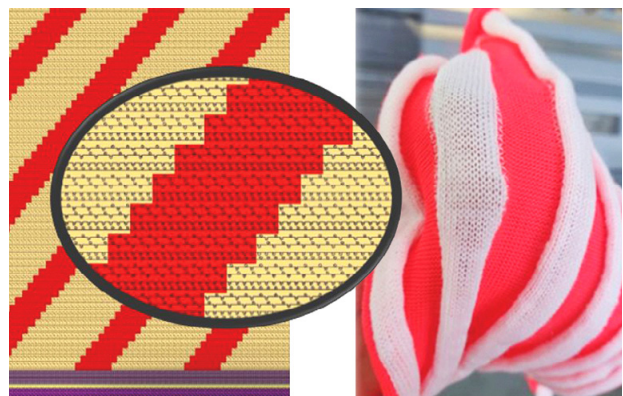


Abbildung 4: Gestrick unterschiedlicher Elastizität. Quelle: STFI

Umfangreiche Versuche zur Rutschhemmung der favorisierten Textilien zeigten, dass gezielt eingebrachte Bereiche mit Kunststoff- bzw. Silikonflächen den größten Effekt aufweisen. Dogskin-Textilien oder eingestrickte Silikonfäden zeigen jedoch nur eine ungenügende Fixierung der Orthese auf dem Arm. Das STFI, Alterfil und die Born GmbH haben in enger Zusammenarbeit mehrere Entwicklungsstufen von Musterorthesen entwickelt und stricktechnisch umgesetzt. Hierbei sind insbesondere die steifigkeitsvariablen Textilien und deren Realisierung, die Erarbeitung von geeigneten Fixier- und Zuschnittskonzepten als auch die Entwicklung von komfortablen Verschlusskonzepten bewerkstelligt worden. Da die Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Textil, Haut

und Muskelgewebe und die daraus resultierenden übertragbaren und einleitbaren Kräfte sowie die resultierenden Steifigkeitsprofile des Gesamtsystems derzeit noch nicht ausgereift und anwendbar sind, wurden am ILK begleitende Messungen an vergleichbaren Arbeitsplätzen durchgeführt. Dadurch konnten die beim Schraubfall auftretenden Bewegungsmuster, Beschleunigungsprofile und auch die auf der Hautoberfläche bzw. auf einem am Arm befestigten Textil auftretenden Dehnungen erfasst und analysiert werden. Aus den auftretenden Dehnungsprofilen wurden geeignete Positionen für die Anordnung der vorher ausgewählten Dehnungssensoren (Stretchsensor, Firma StretchSense) auf textilen Prototypen festgelegt und umgesetzt.

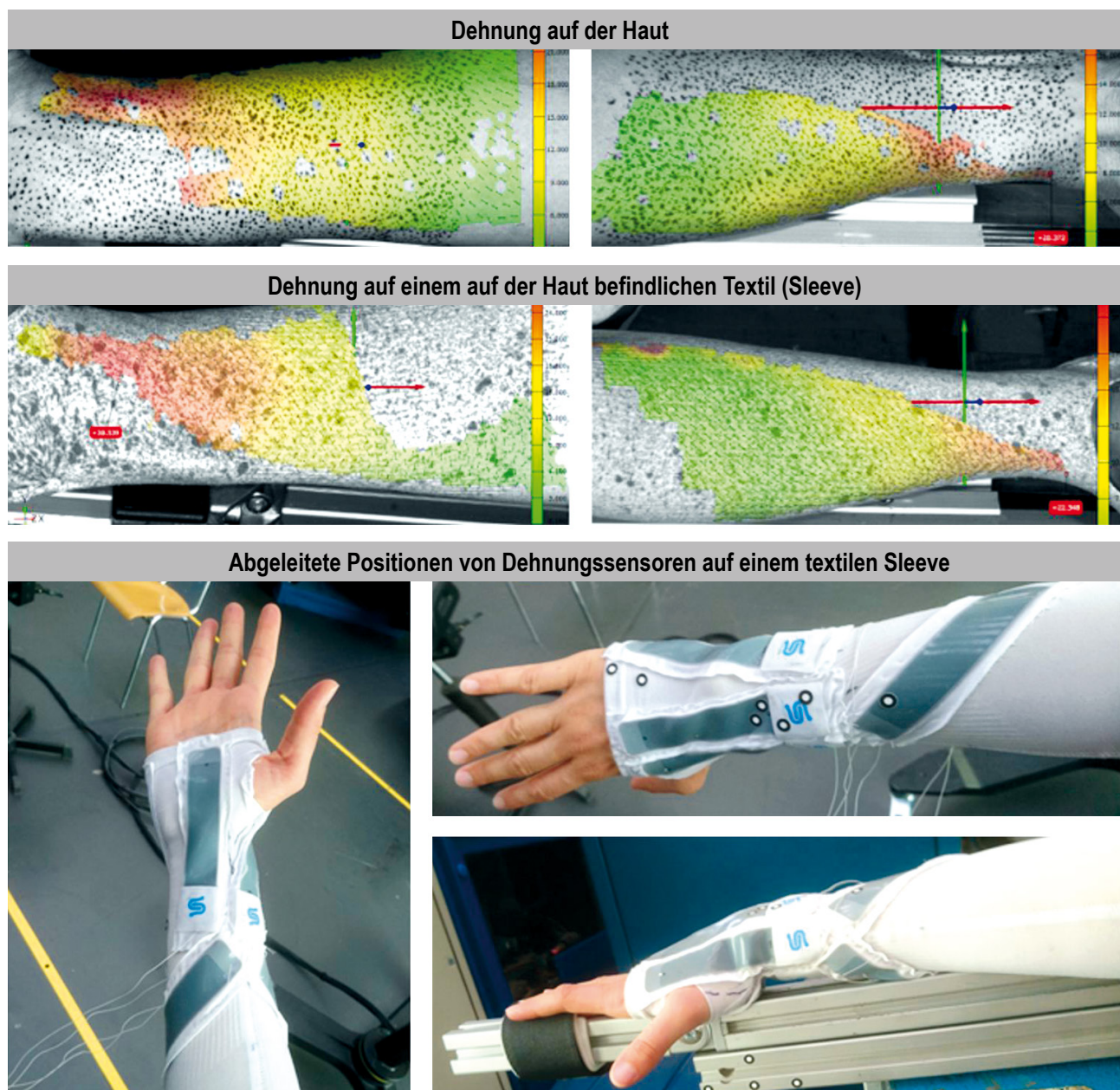
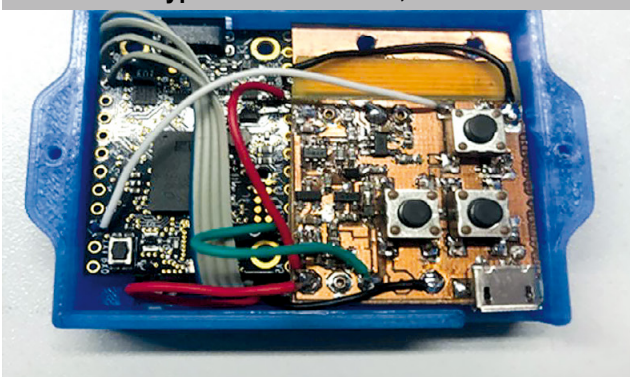


Abbildung 5: Ermittelte Dehnungsprofile bei einer Pronationsbewegung auf der Haut oder auf einem auf der Haut angebrachten und eng anliegendem Textil sowie die Ableitung von Positionen für Dehnungssensoren auf textilen Prototypen zur Überwachung der Dehnung bei Pronations- bzw. Schraubbewegungen. Quelle: ILK

Diese Sensoren erwiesen sich jedoch aufgrund der hohen Anzahl der Sensoren (6 Stück), die zur Erfassung der gesamten Pronationsbewegung notwendig sind, und aufgrund des daraus resultierenden Platzbedarfes sowie einer ungenügenden Reproduzierbarkeit der erfassten Signale in den durchgeführten Versuchen als nicht geeignet für einen Einsatz im T-EXoSuit. Deshalb wurden in Anlehnung an die Bewegungsmessungen Gyroskope und Beschleunigungssensoren weiterverfolgt. Für die Datenerfassung und Vorverarbeitung direkt im T-EXoSuit wurde eine Inertial Measurement Unit (IMU) des Intel tinyTILE boards mit einem 3-Achs-Gyroskop (maximale Winkelgeschwindigkeit $\pm 2000^\circ/\text{s}$, Aufnahmezeitrate 3,2 kHz) und einem 3-Achs-Beschleunigungssensor (maximale Be-

schleunigung $\pm 16g$, Aufnahmezeitrate 1,6 kHz) und interner Stromversorgung genutzt. Das System stellt somit eine eigenständige Messeinheit dar, die auf dem Handrücken positioniert wird. Mit dieser am ILK entwickelten Messeinheit können die Messsignale bereits intern vorverarbeitet werden, so dass nur noch die Daten der Schraubbewegung verarbeitet werden müssen. Momentan werden die Daten noch auf einer SD-Karte gespeichert, die z. B. nach einer Arbeitsschicht oder in einer Pause am Rechner ausgelesen und mit dem entwickelten Auswerteprogramm (MATLAB-basiert) in kritische und unkritische Bewegungsabläufe klassifiziert und die maximalen Beschleunigungen und Auslenkungswinkel der Hand und damit des Armes bestimmt werden können.

Prototypische Messeinheit, in Gehäuse



Prototypische Messeinheit, Position auf Handrücken

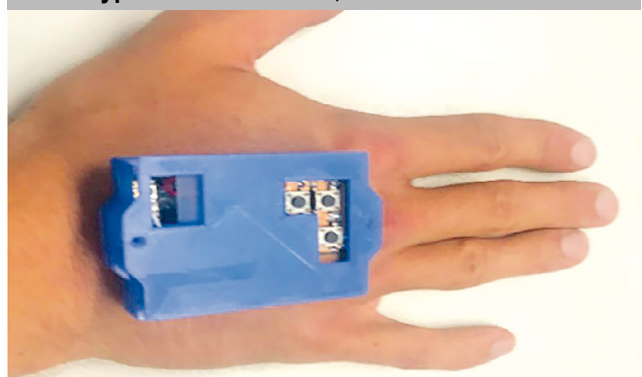


Abbildung 6: Messeinheit zur Erfassung der Schraubbewegung. Quelle: ILK

Neben der Entwicklung der Sensorik wurde aus den Daten der auftretenden Bewegungsmuster ein vereinfachtes Simulationsmodell abgeleitet. Dieses ermöglicht es, geeignete Maßnahmen zur Einschränkung der auftretenden Bewegungen zu simulieren. Hierbei ist ein ingenieur-

mäßiger Ansatz verfolgt worden, so dass nur die mechanische Kopplung aller beweglichen Komponenten in einem Mehr-Komponenten-Modell abgebildet wurde. Elastizitäten der Haut und Muskelaktivität wurden nicht berücksichtigt.

- Verlauf des Zugbandes
- Verknüpfungspunkt-Vektor auf Segment
- Translatorische Federsteifigkeit als Sekante

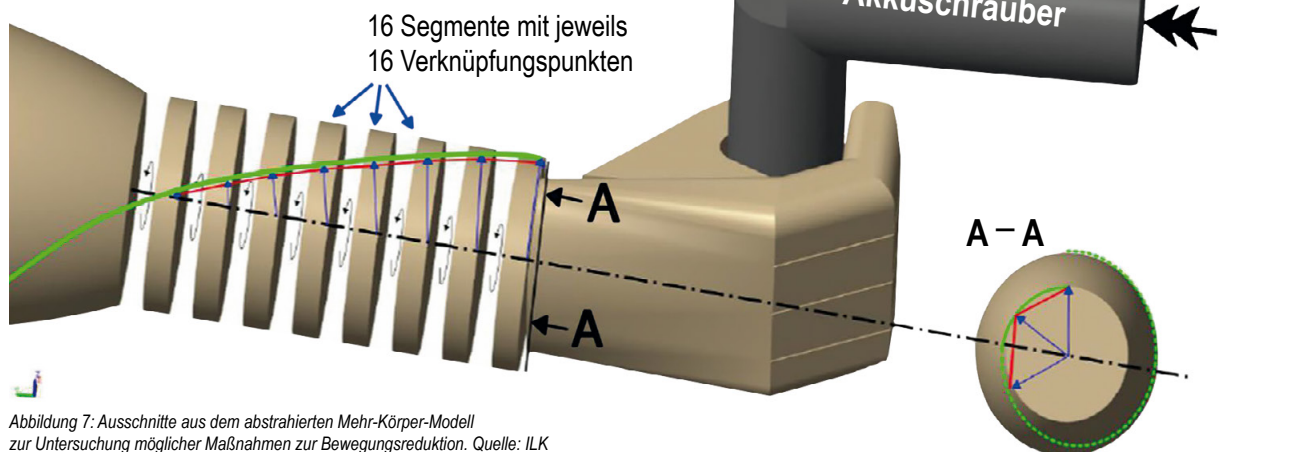


Abbildung 7: Ausschnitte aus dem abstrahierten Mehr-Körper-Modell zur Untersuchung möglicher Maßnahmen zur Bewegungsreduktion. Quelle: ILK

Mit diesem Modell war es möglich, geeignete Verläufe von Zugbändern, die im Textil angeordnet werden sollen und deren Steifigkeitsverläufe vorzugeben, so dass eine gezielte Auslegung des T-EXoSuits möglich wird. Im Rahmen der Projektarbeit zum T-ExoSuit konnte die

Firma BORN eine Vielzahl neuer Erkenntnisse und Daten sammeln. Dabei wurden unterschiedliche prototypische Gestrickmuster unter anderem durch Verwendung neuer Materialien von Alterfil angefertigt.



Abbildung 8: Fertigung der Orthesenmuster bei der Born GmbH. Quelle: Born GmbH

Eine breit ausgelegte Testreihe von verschiedenen Schmelzgarnen mit unterschiedlichen Eigenschaften brachte in den Ergebnissen vielfältige Einsatzmöglichkeiten zur Herstellung von Strickteilen mit integrierten versteiften Intarsien, Flächen oder Streifen innerhalb eines Gestricks. Die Ergebnisse dieser Testreihe ermöglichten es, eine Auswahl von Testorthesen mit eingearbeiteter Stabilisierung aus Schmelzfäden herzustellen und den Projektpartnern zum Test zur Verfügung zu stellen. In einem iterativen Prozess wurde bei der Born GmbH die Passform der Armorthese immer weiter verfeinert, um optimale Trageigenschaften zu gewährleisten. Hierbei wurden verschiedene Verschlussvarianten der Armorthese bemustert und getestet. Im Ergebnis entschied sich das Team für eine individuell anpassbare Variante mit Zugbändern. Somit ist die Möglichkeit gegeben, die Orthese in der Größe zu variieren und für jeden Probanden bzw. Träger in einem gewissen Maß optimal anzupassen.

Eine weitere Herausforderung war eine sichere und rutschhemmende Verbindung zwischen Orthese und Haut. Hier wurden in Zusammenarbeit mit dem STFI die

rutschhemmende Wirkung verschiedener Garne, aber auch verschiedener Beschichtungen geprüft. Für die Anfertigung unterschiedlicher Musterflächen und kompletter Musterorthesen wurde sich letztendlich für eine Beschichtung aus einem Polymer, welches hervorragende Haftungseigenschaften auf der Haut aufweist, entschieden. Die Anfertigung verschiedener Muster diente dem Zweck, Erfahrungen hinsichtlich der Atmungsaktivität der Beschichtung zu gewinnen. Hier besteht weiterhin das Ziel, durch eine optimale Formmusterung der Beschichtung die Luftdurchlässigkeit der Beschichtung maßgeblich zu verbessern. Im Ergebnis konnte eine Orthese angefertigt werden, welche leider nur eine geringe Reduktion des Bewegungsausmaßes bei Montagearbeiten erlaubt. Viel wichtiger sind jedoch die aus den Versuchen mit den eingesetzten neuen Materialien, den neuen Strick- und Fixiermethoden gewonnenen Erkenntnisse, die in Zukunft direkt in neue Produkte der Born GmbH übertragen werden können. An der Professur FAB wurden biomechanische Untersuchungen, angelehnt an reale Montagearbeiten, zur Bewertung der im Projekt entwickelten textilen Orthesen durchgeführt.

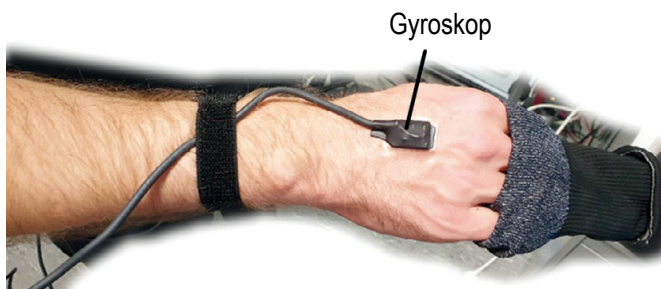


Abbildung 9: Versuche zur Bewertung des Bewegungsausmaßes – links: Arm mit Gyroskop, rechts: Hochgeschwindigkeitsaufnahme der Auslenkung beim Überschreiten des maximalen Drehmoments beim Schraubvorgang. Quelle: FAB

Bei den zur Verfügung gestellten Prototypen konnte nur eine geringe Reduzierung der Belastung bei drehmomentgesteuerten Akkuschraubvorgängen festgestellt werden. Dieser Effekt zeigte sich in beiden untersuchten Bewegungsparametern (Pronationswinkel bzw. Pronationsgeschwindigkeit, gemessen mit einem handfixierten Gyroskop) und kann als Indikator für die Wirksamkeit des entwickelten Konzepts interpretiert werden. Demnach schränkt die Orthese die Drehung im Handgelenk beim

Rückschlag des Akkuschraubers, d. h. bei Erreichen des Zieldrehmoments bei weichen Schraubvorgängen, offensichtlich messbar ein. Jedoch ist dies mit einer sehr hohen Kompression der Orthese am Arm verbunden, so dass gegenwärtig noch Optimierungspotenzial bei der Erhöhung des Tragekomforts des T-EXoSuits besteht. Die Resultate der durchgeführten Studie sollten zudem in weiteren Studien mit erhöhten statistischen Umfängen validiert werden.

➤ Verwertung und wirtschaftliche Bedeutung

Im Rahmen des Vorhabens wurde die Basis für textile Strukturen gelegt, die es ermöglichen, teilweise sogar hochdynamische Bewegungen zu reduzieren bzw. zu beeinflussen. Hierbei sind neuartige Garne und Gestricke entstanden, die für zukünftige Anwendungen ein hohes Potenzial aufweisen. Unterstützt durch die Forschungsarbeiten der involvierten Forschungsinstitute konnten die Entwicklung der Materialien und Prototypen in einem breiten Umfang untersucht und neue Erkenntnisse gewonnen werden. Da die derzeit entwickelte Orthese noch keinen ausreichend hohen Technologiereifegrad und auch noch eine eingeschränkte Funktionalität aufweist, sind über das Vorhaben hinaus weitere Arbeiten der bereits involvierten als auch neuer Partner notwendig. Erst mit einer gezielt angelegten und breit aufgestellten Studie könnte die Wirksamkeit des T-EXoSuits nachgewiesen werden. Für die Professur FAB haben sich vor allem wissenschaftlich

verwertbare Erkenntnisse ergeben. Dabei konnten Aussagen zur Funktionsweise der untersuchten, textilen Orthese und auch aus den erhobenen empirischen Daten Erkenntnisse zur Effektgröße und kumulativen Belastung bei Akkuschraubvorgängen gewonnen werden. Diese können in Zukunft für die ergonomische Bewertung und Gestaltung von relevanten Arbeitsplätzen herangezogen werden. Bislang waren keine objektiven Referenzwerte verfügbar. In diesem Zusammenhang stellen das entwickelte Messprotokoll inklusive der Algorithmen zur automatisierten Erkennung von Schraubvorgängen und die textilintegrierte Sensorik wichtige Bausteine bei der Übertragung der im Labor gesammelten Erkenntnisse auf reale, arbeitsnahe Situationen dar.

Auch für das ILK sind aus den Projektergebnissen vorrangig wissenschaftlich verwertbare Inhalte hervorgegangen,

die in spätere Forschungsprojekte mit einfließen. Hierbei sind insbesondere die Erfahrungen auf dem Gebiet der Charakterisierung von Bewegungs- und Dehnungsprofilen, die Entwicklung der Sensoreinheit und die damit verbundene Messdatenverarbeitung und -auswertung, als auch das entstandene Mehrkörpersimulationsmodell zu erwähnen. Zudem haben die im Konsortium erarbeiteten Kenntnisse zum Verständnis textiler Strukturen und deren Eigenheiten beigetragen, so dass auf diesem Gebiet für zukünftige Projekte eine Basis der Zusammenhänge besteht, die weitergenutzt und weiterentwickelt werden kann.

Das STFI ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung im Freistaat Sachsen, die sich den langjährigen Traditionen sächsischer Textilforschung verpflichtet fühlt. Ein unmittelbarer, unternehmerischer Nutzen (Umsatzsteigerung, Erhöhung der Marktpräsenz) wird sich aus den Ergebnissen des Teilvorhabens für das STFI weder ergeben noch wird dieser angestrebt. Vielmehr stellt die Komplexität des Forschungsprojektes eine Erweiterung der Kompetenzen im Bereich der Herstellung und Entwicklung von Technischen Verstärkungstextilien und Textilien für den Leichtbau im weitesten Sinne dar. Forschungsseitig sind die Erkenntnisse eine Basis für neue Forschungstätigkeiten, insbesondere bei der Erschließung neuer Anwendungsgebiete für den Einsatz von Textilien für medizinische und therapeutische Anwendungszwecke. Bei der industriellen Umsetzung der Erkenntnisse des Projektes ist insbesondere der Wettbewerbsvorteil durch Verbesserung der personellen und technischen Forschungsinfrastruktur für eine positive mittelbare wirtschaftliche Verwertung anzuführen.

Für die Born GmbH und Alterfil ergeben sich aus dem Forschungsvorhaben weitere Impulse für neue Produkte. Letztere kann ihr Produktportfolio um gezielt einstellbare steifigkeitsabhängige Nähgarne erweitern. Dazu hat sich aus der Zusammenarbeit mit der Born GmbH eine gesteigerte Nachfrage nach Schmelzgarnen ergeben, die ein hohes Potenzial für zukünftige Anwendungen darstellen. Für die Born GmbH zeigt sich, dass die Vielzahl der gewonnenen Erkenntnisse im Rahmen des Forschungsprojektes für eine weitere Verbesserung bestehender Produkte genutzt werden können. Somit ergibt sich langfristig ein indirekter wirtschaftlicher Nutzen durch Innovation und gesteigerte Qualität bestehender und neuer Produkte. Besonders die vielfältigen Möglichkeiten der verschiedenen Schmelzfäden von Alterfil als auch die Beschichtungsvarianten zur Rutschhemmung, die Einarbeitung von Zugbändern in Gestricke sowie die bedarfsgerechte Programmierung der Passform von Orthesen finden mit hoher Wahrscheinlichkeit in verschiedenen zukünftigen Entwicklungen ihren Platz.

Die im Vorhaben T-EXoSuit gewonnenen Ergebnisse bieten für alle Partner wissenschaftliche oder wirtschaftliche Verwertungschancen. Die vielfältigen experimentellen, simulativen und auch technologischen Untersuchungen haben neue Erkenntnisse hervorgebracht, die in Zukunft sowohl in neue Forschungsprojekte als auch in neue Produkte bei den Anwendungspartnern mit einfließen werden.

➤ Ausblick

Durch das Vorhaben T-EXoSuit haben sich Kooperationen zwischen Forschungs- und Anwendungspartnern ergeben, die auch langfristig weitergeführt werden. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit aus Bewegungswissenschaftlern, Garnherstellern, Textilforschenden, -herstellenden und -verarbeitenden sowie Leichtbauern hat einen enormen Erkenntnisgewinn auf allen Seiten bewirkt. Die gesetzte

Aufgabenstellung des T-EXoSuits war sehr komplex und konnte nur durch dieses disziplinübergreifende Team angegangen und ergründet werden. Dabei haben sich neue Erkenntnisse im Bereich der Faden- und Gestrickvariation, der Bewegungserfassung, -abstraktion und Übertragung in mechanische Modelle als auch der Anwendung von Sensorik für hochdynamische flexible Systeme ergeben.

Ebenfalls wurde festgestellt, dass die vorhandene Datenbasis für die Entwicklung derartiger Strukturen (T-EXoSuits) noch sehr gering ist. Es liegen kaum Daten zur Beurteilung der Auswirkung von Bewegungsmustern auf die Häufigkeit bzw. das Risiko des entsprechenden Krankheitsbildes vor. Es existieren kaum einfach modifizierbare Modelle, welche die gesamte Physiologie des Menschen in Interaktion mit äußeren Orthesen und dort im Speziellen hinsichtlich der Kraftübertragung von der Orthese in den Körper und deren Weiterleitung im Körper abbilden. Zudem sind aufgrund der komplexen Zusammenhänge zwischen Garn- und Struktureigenschaften keine generellen Aussagen und

Auslegungsmethoden zum Maßschneidern von Gestriken möglich, was ein hohes Potenzial für zukünftige Arbeiten darstellt. Dort ist immer noch eine iterative Vorgehensweise, verbunden mit einem hohen experimentellen Aufwand, der Stand der Forschung und Technik. Für die Entwicklung eines voll funktionsfähigen T-EXoSuits sind bereits viele Schritte getan. Jedoch müssten noch weitere Arbeiten hinsichtlich Tragekomfort, Passform und gezielter Anpassung der integrierten Zugbandvarianten sowie abschließende absichernde Studien zur Aufklärung der Bewegungsbeeinflussung durchgeführt werden.

➤ Impressum

Konsortialführer Projekt futureTEX:

Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)
An-Institut der Technischen Universität Chemnitz
Geschäftsführender Kaufmännischer Direktor:
Dipl.-Ing.-Ök. Andreas Berthel

Postanschrift:

Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)
Postfach 13 25
09072 Chemnitz

Besucheradresse:

Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)
Annaberger Straße 240
09125 Chemnitz

Kontakt:

Projektleitung: Dirk Zschenderlein
E-Mail: dirk.zschenderlein@stfi.de
Tel.: +49 371 5274-283
Fax: +49 371 5274-153
www.futuretex2020.de

Lektorat und Gestaltung:

P3N MARKETING GMBH
Deubners Weg 10
09112 Chemnitz
Tel.: +49 371 243509-00
Fax: +49 371 243509-19
E-Mail: info@p3n-marketing.de

Verbundkoordinator Umsetzungsvorhaben T-EXoSuit:

BORN GmbH knitwear for fashion & engineering
Poststraße 4
37351 Dingelstädt
Ansprechpartner: Michael Schneider, Tino Potzkei
Tel.: +49 36075 5060
E-Mail: michael.schneider@born-germany.de

Autoren:

Michael Schneider, Tino Potzkei
(BORN GmbH knitwear for fashion & engineering)

Jens Mählmann, Teresa Kretsch
(Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI))

Niels Modler, Anja Winkler, Moritz Neubauer, Norman Voigt
(Technische Universität Dresden, Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik)

Christian Maiwald, Tobias Mayer, Daniel Koska
(Technische Universität Chemnitz, Professur Forschungsmethoden und Analyseverfahren in der Biomechanik (FAB))

Gosbert Amrhein
(ALTERFIL Nähfaden GmbH)



02/2021