

Beschreibung zum Forschungsantrag

1. Forschungsthema

Entwicklung eines fasersensorbasierten ganzheitlichen echtzeitfähigen Textil-Membran-Monitoring-Systems (MeMo)

2. Wirtschaftliche Relevanz, insbesondere für KMU

2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Aufgrund der bedarfsgerecht sowohl über die textile Verstärkungsstruktur als auch die Beschichtung gezielt einstellbaren Gebrauchseigenschaften besitzen textile Membranen ein breites Anwendungsspektrum. In typischen Nutzungsszenarien als tragender und lastaufnehmender Bestandteil in der textilen Architektur, z. B. stützenfreie Dächer von Hallen bzw. Stadien, großvolumige Verbrauchsmedienspeicher, wie Biogasanlagen, oder flexible Katastrophenschutzsysteme insb. für den Hochwasser- und Starkwindschutz, treten komplexe, extern eingeleitete sprunghafte oder wechselnd dynamische Belastungen auf, z. B. Wind-/Schneelasten, Innendruck, Temperatur. Bekannt ist, dass in Textilmembranen, insb. aufgrund der anisotropen Verbundeigenschaften in Kombination mit den sich überlagernden externen Belastungen, eine Vielzahl an sich über die Lebensdauer sukzessiv ausbreitende Degradationen auftreten [1 – 3]. Hierzu zählen vor allem Faserrisse und Delaminationen in der Fläche. Derartige Degradationen stehen in direktem Zusammenhang mit der Spannungsverteilung in den Membranen - lokale Strukturschäden führen zu lokalen Spannungsspitzen. Somit ermöglicht eine Analyse der Spannungsverteilung der Membranfläche auch eine Ermittlung des Integritätszustandes (Information zu Verteilung und Art von Strukturschädigungen).

Die Bewertung der aktuellen Last-, Beanspruchungs- und Integritätslage basiert bisher nahezu ausschließlich auf der subjektiven Einschätzung weniger, hochspezialisierter Sachverständiger bei einer jährlichen Begleichung bzw. Inspektion der Membranbauten. Der Sachverständige nimmt punktuell den Spannungszustand auf und entscheidet subjektiv anhand von Erfahrungswerten, ob ein Nachspannen der Membran erforderlich ist. Häufig wird diese Maßnahme angeordnet, ohne dass die realen Spannkraftverluste und deren Ursachen bekannt sind. Die Membran wird lediglich wieder in die „richtige“ Form gebracht. Dabei ist in der Regel unklar, inwieweit die textile lastabtragende Verstärkungsstruktur im Membrankern geschädigt ist. Diese unbefriedigende Analyse des IST-Zustandes hat u. a. auch für den Bereich der Biogasanlagen erhebliche Konsequenzen [4, 5]. So kommen in Ermangelung geeigneter Verfahren zur Zustandsbestimmung von Membranbauten und aufgrund der hier vorliegenden spezifischen Sicherheitsgefahr (Gasaustritt und Explosionsgefahr) Vorschriften zur Anwendung, nach denen die Membranen in festen Zeitabständen zu erneuern sind, wobei die Fristen sehr kurz bemessen sind [4]. Dadurch wird die theoretisch erwartbare Nutzungsdauer höherwertiger Produkte um bis zu 70 % verkürzt. Neben dem damit verbunden ökonomischen Desaster, sind die einhergehende durchaus vermeidbare Rohstoffverschwendung und das anschließende Entsorgungsproblem nicht hinnehmbare Aspekte, die für die gesamte Branche ein erhebliches Problem darstellen.

Als weiteres Beispiel für die derzeit defizitäre Analyse der IST-Situation bei großflächigen Dachkonstruktionen aus textilen Membranen sei hier das Membrandach des Dresdener Hauptbahnhofes aufgeführt. Abbildung 2-1 zeigt, wie dieses nach nicht einmal drei Jahren im Winter 2009/2010 unter Schneelast infolge eines unbekannten Spannungszustandes plötzlich großflächig aufgerissen ist. Seit dem Schaden bilden sich immer wieder Risse in dem 25 000 Quadratmeter großen Membrandach [6, 7].



Abbildung 2-1: Membrandach vom Dresdener Hauptbahnhof unter Schneelast (links) und dadurch verursachter großflächiger Riss (rechts) [6, 7]

Hinsichtlich der Relevanz des Vorhabens sind auch die zukünftig infolge des Klimawandels verstärkt auftretenden Extremwetterereignisse zu berücksichtigen [8, 9]. Ein gezielter Hochwasser- und Starkwindschutz erfordert verstärkt flexibel einsetzbare Lösungen, für die Membranbauten aufgrund ihrer geometrischen Skalierbarkeit und geringen Aufbauzeiten prädestiniert sind. Insb. auch in derartigen Einsatzbereichen mit hoher Personengefährdung ist ein strukturelles Versagen derartiger Schutzlösungen nicht hinnehmbar.

Die Motivation für den vorliegenden Projektantrag liegt daher in der Lösung des bestehenden Problems der Wirtschaft, dass ein aus nicht frühzeitig erkannten Degradationen resultierender vollständiger Integritätsverlust der Membranbauten mit unkalkulierbaren wirtschaftlichen bzw. existenziellen Risiken für Endanwender und Zulieferer verbunden ist. Die Vermeidung dieser Risiken erfordert eine umfassende Degradationserkennung und somit ein ganzheitliches echtzeitfähiges Textil-Membran-Monitoring-System der vollflächigen Spannungsverteilung (MeMo-System). Dieses ist zur Ermittlung orts aufgelöster in situ Messinformationen bei größtmöglicher Kompatibilität zum Herstellungsprozess und zur Struktur der Textilmembran fadenförmig bzw. textilbasiert auszuführen. Damit wird für Membranbauten ein, in vielen Branchen, wie der Automobilindustrie [10], dem Windenergiesektor [11] und dem Bauwesen, bereits erkennbarer digitaler, kosten- und sicherheitstechnisch motivierter Trend zur Implementierung von in situ Sensorlösungen zur Strukturüberwachung aufgegriffen. Neben der beschriebenen wirtschaftlichen Relevanz ist das angestrebte FuE-Ziel auch explizit volkswirtschaftlich/ gesellschaftlich motiviert, insb. in den Bereichen Klima/Energie (→ höhere Energieausbeute insb. bei Biogasanlagen), Sicherheit (→ Personen- und Objektschutz) und Ressourceneffizienz (→ Materialeinsparung insb. durch längere Laufzeiten und gezielte Reparaturen).

2.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Im Segment der Technischen Textilien, zu dem auch die Textilmembranen zählen, wurden in 2021 allein in Deutschland 2,5 Mrd. € Umsatz generiert [12]. Global wies der Bereich der architektonischen Membranen bereits 2019 einen Gesamtumsatz von 750 Mio. USD bei stetigem Wachstum auf [13]. Neben dem textilen

Markt ist auch der Elektronikmarkt für das neuartige MeMo-System relevant, da neben den funktionalen textilen Komponenten auch elektronische Lösungen notwendig sind. Die Verschmelzung von mechanisch tragenden Strukturen, wie Textilmembranen, mit integrierten textilen Sensorlösungen generiert insbesondere in sicherheitskritischen Anwendungen eine besonders hohe (volks-)wirtschaftliche Relevanz. Die weltweite Wachstumsrate für sensorische Anwendungen hat sich seit 2010 mehr als verdoppelt, der jährliche Umsatz beträgt derzeit 205 Mrd. € und die Wachstumsdynamik wird konstant stabil prognostiziert [14].

Die hohe (volks-)wirtschaftliche Relevanz bei textilbasierter Architektur bedingt hierbei vor allem auch, dass im Schadensfall Regressionsforderungen an die Hersteller bzw. Lieferanten zurückgeführt werden. Darüber hinaus führen die Schäden zu Vertrauensverlusten in die Produktsicherheit bis hin zu Sach- oder Personenschäden, was es zu verhindern gilt. Die genannten Punkte stellen für die Unternehmen ein schlecht kalkulierbares, wirtschaftliches Risiko dar bzw. hält textile KMU davon ab als Produzenten für diesen Markt aufzutreten. Der vorliegende Forschungsantrag umfasst die Entwicklung in situ messender, bei der textilen Flächenbildung in Textilmembranen integrierter, material- und prozesskompatibler zu Netzwerken zusammengeschalteter Sensoren sowie deren echtzeitfähige algorithmische Datenauswertung. Durch die damit realisierbare frühzeitige Erkennbarkeit struktureller Defekte in Membranbauten, sowohl zum Zeitpunkt der Entstehung als auch vorausschauend im Sinne eines Predictive Maintenance, wird eine ereignisorientierte Einleitung essentieller mobiler Wartungs- oder Reparaturmaßnahmen (wie gezieltes lokales Verstärken und/o-der Nachspannen der Membran, schnelle Schneeberäumung durch Endanwender) vor Eintreten von Folgeschäden (primär: Riss- bzw. Delaminationsfortpflanzung, sekundär: u.a. Wasserschäden, Schäden durch Einsturz) und damit zur Vermeidung wesentlich kostenaufwändigerer Instandsetzungsmaßnahmen herangezogen. Tabelle 2-1 quantifiziert in Abstimmung mit Experten der Branche wesentliche Teile dieses Kosteneinsparungspotenzials durch das MeMo-System [4, 15].

Tabelle 2-1 Kostenvergleich: Membran ohne und mit MeMo am Beispiel eines Membrandachs einer Biogasanlage

Kostenposition	Kosten pro Membran	
	konventionell	MeMo-Membran
Textiles Grundmaterial (z. B. PES) + Beschichtungs- und Veredelungsmittel	12.000,00 €	12.000,00 €
Lohnkosten (Herstellung)	2.000,00 €	2.500,00 €
MeMo-System	/	4.000,00 €
Verbrauchsmaterial, Konfektionierung, Montage	25.000,00 €	27.000,00 €
Gesamtherstellkosten (Fertigung, Material, Lohn, Entwicklung)	39.000,00 €	45.500,00 €
Wartungsintervalle pro Jahr	1	0,25
Kosten Wartung und Instandsetzung (kleine Defekte) pro Intervall	3.500,00 €	3.500,00 €
Reparaturkosten großer Defekt (Annahme: 1mal pro Lebenszyklus)	10.000,00 €	entfällt durch MeMo
Versicherungsbeitrag pro Jahr (perspektivisch mit MeMo-System weniger)	2.000,00 €	2.000,00 €
Gesamtwartungskosten (Produktlebenszyklus 20 Jahre)	120.000,00 €	57.500,00 €
Gesamtkosten Membran	159.000,00 €	103.000,00 €

Die angestrebte, hochautomatisierte Fertigung und Integration der Sensoren generiert nur geringe Mehrkosten im Vergleich zu den generierbaren, erheblichen Einsparungen bei der Nutzung der Membranen mit

MeMo-System. Hierbei sind Aspekte, wie höhere Nutzungsanteile (z. B. weniger Standzeiten durch Reduzierung der Wartungsintervalle bei Biogasanlagen) und potentiell längere Gesamtlebensdauern der Membrane mit MeMo-System, noch gar nicht berücksichtigt. Textile KMU profitieren somit doppelt: sowohl durch höherwertigere, umsatzstärkere Zwischenprodukte mit potenziell auch höheren Margen (aufgrund innovativer hochtechnologischer Systeme) als auch aufgrund verstärkter Nachfrage nach derartigen Membrankonstruktionen infolge geringerer Gesamtkosten für Endanwender. Die verstärkte Nachfrage wird zusätzlich gestützt durch die Bereitstellung von Lösungen, mit denen Endanwender anhand objektiver mit dem MeMo-System ermittelbarer Daten eine anwendungsspezifisch korrekte Nutzung und Wartung der Membranen ggü. Versicherern nachweisen können.

Das MeMo-System sowie dessen einzelne Komponenten sind entlang der Wertschöpfungskette ein zukunftsicheres Anwendungsfeld in einem großen Marktumfeld. Aufgrund des hohen technischen Innovationspotenzials generiert es für den KMU-geprägten deutschen Wirtschaftszweig der Textiltechnik die erhebliche Chance, sich in diesem Markt national und international zu behaupten und neue Marktanteile zu erschließen. Unmittelbar profitieren hier vorhabensrelevante Unternehmen die (Funktions-)Garne (ca. 40 KMU) bzw. textile Flächen (ca. 120 KMU im Bereich technische Weberei und Wirkerei) herstellen sowie Unternehmen der Textilveredlung (ca. 95 KMU) und technischen Konfektion (ca. 170 KMU) [12]. Ebenfalls profitieren weitere Branchen, wie textilmembranauslegende Ingenieur- und Architekturbüros, Mess- und Sensortechnikhersteller sowie Endanwender von den angestrebten Ergebnissen des Vorhabens. Die Ingenieur- und Architekturbüros im Bereich der Textilmembranauslegung (ca. 50) nehmen in der späteren Nutzung der Projektergebnisse eine zentrale Stellung mit korrelierendem Umsatzwachstum ein, indem sie neben der eigentlichen Textilmembranauslegung auch das sensorische MeMo-System für spezifische Konstruktionen und Bauwerke dimensionieren. Für Unternehmen aus dem Bereich der vorhabensspezifischen Mess- und Sensortechnik (ca. 80 KMU) ergeben sich mit der Fertigung funktionalisierter in situ Sensorlösungen für das innovative Marktsegment der Membranbauten-Überwachung neue Geschäftsfelder für Messsystemlösungen zur dezentralen Messdatenerfassung, -analyse und -visualisierung. Den Endanwendern (alleine in Deutschland viele Tausend aus dem Bau- und Energiebereich sowie im Katastrophen- und Umweltschutz) eröffnet sich mit dem zu entwickelnden MeMo-System die Möglichkeit, die Gebrauchsfähigkeit daraus hergestellter Produkte über den projektierten Einsatzzeitraum von bis zu 25 Jahren zu evaluieren und damit sicherzustellen, dass ein Strukturversagen frühzeitig und zuverlässig erkannt wird und damit ereignisorientierte Wartungsmaßnahmen schnell und gezielt eingeleitet werden können.

Es wird geschätzt, dass mindestens 50 Unternehmen einen direkten Nutzen aus den FuE-Ergebnissen erlangen werden. Die angestrebten Forschungsergebnisse sind voraussichtlich mittelfristig wie folgt nutzbar: in den Hauptfachgebieten Werkstoffe/Materialien (KB), Mess-/ Sensortechnik (GD) und den Nebenfachgebieten Sicherheitstechnik (C), Umwelttechnik (FB) sowie in den Wirtschaftszweigen der Textilherstellung (13), Informationstechnologie (63), Kunststoffwarenherstellung (22) und im Hochbau (41).

3. Wissenschaftlich-technischer Ansatz

3.1 Stand der Forschung und Entwicklung

3.1.1 Textile Membranen

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, werden mit textilen Membranen anspruchsvolle und komplexe geometrische Architekturen realisiert. Dies führt in Abhängigkeit der Geometrie sowie wechselnden extremen Belastungen zu äußerst komplexen Lastverteilungen in den Membranbauten. Je nach adressierter Anwendung der Membran und den zu erwartenden Belastungen werden hauptsächlich polymerbeschichtete Gewebekonstruktionen in Leinwandbindung (Gewebetyp 1; leichtere Membranen) oder Panamabindung (Gewebetyp 2-5; schwere, starke Membranen) eingesetzt, wobei größere Flächen und höhere Standzeiten der textilen Bauwerke den Einsatz einer Membran mit Panamabindung erfordern [16]. Die Polymerbeschichtung schützt die kraftaufnehmenden Polyester- (PES) oder Glasfaser- (GF) Gewebe vor äußeren Einflüssen und ermöglicht die stoffschlüssige Verbindung der Membranzuschnitte zu Membranfeldern. Übliche Kombinationen aus Verstärkungsgewebe und Beschichtung sind Polytetrafluorethylen (PTFE) Beschichtungen auf Glasfasergeweben und Weich-Polyvinylchlorid (PVC-P) auf PES-Geweben. PES-Gewebe mit PVC-Beschichtung und oberflächenversiegelndem PVDF-Deckstrich finden aufgrund ihres günstigen Preis-Leistungsverhältnisses am häufigsten Einsatz. Wichtig für viele Einsatzmöglichkeiten ist die hohe Dehnfähigkeit dieser Membranen von bis zu 10 % bei gleichzeitig hoher Lastaufnahme [17].

Die Beschreibung des Materialverhaltens der Membranwerkstoffe ist äußerst komplex [18 – 20]. Neben nichtlinearen, inelastischen und orthotropen Materialeigenschaften, die von der Bindung bzw. Struktur der Verstärkungsgewebe und der Beschichtung abhängen, beeinflussen auch die webprinzipbedingten Ondulationen der Verstärkung das anliegende Spannungsverhältnis zwischen Kett- und Schussrichtung und führen zu veränderlichen Poissonzahlen und E-Moduln in diesen Richtungen [21, 22]. Zudem variieren die mechanischen Eigenschaften temperatur- und alterungsbedingt, wobei auch hier eine Abhängigkeit von der Belastungsgeschichte vorliegt. Ein Echtzeitmodell zur realistischen Darstellung des Membranverhaltens muss demnach neben der aktuell anliegenden Last auch die oben genannten Einflussfaktoren berücksichtigen, was das Modell äußerst komplex macht. Umfassende Lösungsansätze hierzu sind bislang nicht bekannt.

Die stetige Gefahr einer Schadensentstehung und -ausbreitung in Kombination mit dem gegenwärtigen Fehlen einer umfassenden in situ Membranüberwachung (siehe 3.1.2) erfordert aus wirtschaftlichen (auch versicherungstechnischen) sowie personenschutzspezifischen Gründen aktuell eine regelmäßige kostenintensive Inspektion durch akkreditierte Prüfstellen. Die Inspektionsintervalle können allerdings durch die im Projekt zu entwickelnden aus integrierten lokalen Sensoren zusammengeschalteten Sensornetzen mit elektrischen Zuleitungen inklusive der Entwicklung von Algorithmen zur Sensordatenanalyse signifikant verlängert, ereignisorientierte Reparatur- und Wartungsmaßnahmen initiiert, Folgeschäden minimiert und die Sicherheit der Bauwerke über die Standzeit erhöht werden.

3.1.2 Faser-/ textilbasierte Lösungen zur Strukturüberwachung

Im Folgenden werden die aus einer internationalen Literatur- und Patentrecherche eruierten FuE-Arbeiten zur in situ Strukturüberwachung von Faserkunststoffverbund (FKV)-Bauteilen diskutiert. Diese Lösungen sind primär aufgrund erheblich verschiedener Dehnungsniveaus nicht 1:1 vom FKV (Dehnung bis ca. 2 %) auf Membranen (Dehnung bis ca. 10 %) übertragbar, werden aber aufgrund ähnlicher technologischer, mess- und verbindungstechnischer Prinzipien sowie des höheren FuE-Reifegrades trotzdem präsentiert.

Piezoresistive Sensoren: Die Entwicklung fadenförmiger piezoresistiver Sensoren zur Erfassung von Beanspruchungszuständen im FKV-Bauteil ist national, international und auch am ITM ein wichtiger Forschungsschwerpunkt (siehe Abschnitt 3.2). Bei diesem Funktionsprinzip bewirkt eine steigende Zugbeanspruchung eine Erhöhung des elektrischen Widerstands. So werden fadenförmige aufgestickte drahtbasierte Dehnungssensoren zur Beanspruchungsüberwachung von FKV-Komponenten in Windenergieanlagen eingesetzt (FiberCheck GmbH, LSE GmbH [23]). Aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit sind Carbonfasern (CF) ebenfalls für eine direkte Erfassung mechanischer Zugbeanspruchungen geeignet. In [24 – 27] wurde aufgezeigt, dass durch elektrische Kontaktierung der gesamten CF-Verstärkungsstruktur eine globale Zugspannungsanalyse möglich ist. Individuelle CF-basierte Dehnungssensoren wurden unter anderem am ITA der RWTH Aachen [28, 29] sowie am ITM der TU Dresden [30 – 34] zur Bauteilüberwachung von FKV-Strukturen sowie von CF-verstärktem Textilbeton für einfache Lastszenarien entwickelt. Ähnliche Zielstellungen wurden im IGF-Projekt 19070 N/1 am DITF verfolgt [35]. Hier wurden jedoch großflächig auf die textile Lage bzw. das FKV-Bauteil aufgedruckte piezoresistive Sensorlösungen untersucht. Eine direkte Anbindung an die lastabtragenden textilen Verstärkungsstrukturen im Verbund ist hier jedoch nicht gegeben, sodass die vorliegenden Beanspruchungszustände nur indirekt und damit potentiell fehlerbehaftet erfassbar sind. Die im Projekt angestrebten fadenförmigen Sensoren können demgegenüber direkt bindungstechnisch in die Verstärkungsstruktur und damit formschlüssig eingearbeitet werden. Mithilfe weiterer textilen Verfahren, wie der Flechttechnologie, können die Sensoren hinsichtlich ihres elastischen Arbeitsbereiches in weiten Grenzen eingestellt werden [36]. So kann der Dehnbereich der Sensoren sowie die daraus resultierende elektrische Messgröße voraussichtlich genau auf den Dehnbereich der Membran angepasst werden, wobei ein aussagekräftiges elektrisches Messsignal sichergestellt werden kann.

Faseroptische Sensoren (FOS): FOS werden in kommerziellen Strukturüberwachungssystemen für FKV-Bauteile (z. B. HBM GmbH, FOS4X GmbH) in vereinzelten Anwendungsfeldern eingesetzt [37, 38] und forschungsseitig untersucht (z. B. am STFI e. V. für Textilbeton) [39]. Das Messprinzip basiert auf der Bestimmung spannungsinduzierter Wellenlängenverschiebungen eingekoppelten Lichts mittels eingepprägter Bragg-Gitter. Der wesentliche Nachteil von FOS ist die stark eingeschränkte textiltechnische Verarbeitbarkeit infolge sehr hoher Biegesteifigkeiten, die Krümmungsradien > 25 mm erfordert. Deshalb werden FOS gegenwärtig aufwendig manuell durch Einlegen in den Lagenaufbau oder Aufkleben auf das fertige Bauteil prozessiert, woraus erhebliche Kosten resultieren bzw. die Reproduzierbarkeit eingeschränkt ist.

Piezoelektrische Sensoren: Piezoelektrische Mehrkomponentengarne wurden u. a. am TITK entwickelt und deren Eignung zur Patientenüberwachung und zum Energy Harvesting [40 – 42] sowie zur FKV-Rotorblatt-

schwingungsüberwachung eruiert [43]. Ebenfalls entwickelte das DITF gewebebasierte piezoelektrische Biegesensorik als Teil einer Verstärkungsstruktur für das Bauteilmonitoring von FKV (IGF-Projekt 19551 N). Der wesentliche Nachteil des Sensorprinzips liegt jedoch in der nur auf dynamische Beanspruchungsänderungen determinierten Messfähigkeit, da quasistatische Lasten nicht erfasst werden können.

Die vorgestellten Lösungen zur Strukturüberwachung mittels textiltechnisch integrierter Sensorik sind nur für die Erfassung geringer Dehnungen in hochfesten und -steifen FKV konzipiert [44]. Bisher ungelöst und damit eine große Herausforderung für die Entwicklung neuer piezoresistiver fadenförmiger Sensoren und daraus aufgebauter Sensornetzwerke ist vor allem die Gewährleistung eines zuverlässigen Sensorsignales bei Dehnungen bis 10 %. Erste Ansätze, wie die flechttechnische Einbringung einer definierten Strukturdehnung [36] lassen einen erfolgreichen Einsatz derartiger Sensoren erwarten. Für die Entwicklung und Umsetzung von Sensorlösungen zur Erfassung des Beanspruchungszustands der bei geringen Steifigkeiten hochdehnbaren textilen Membranen besteht allerdings ein hoher Forschungsbedarf, insbesondere hinsichtlich einer textiltechnisch schädigungsfreien Weiterverarbeitung sowie einer langzeitstabilen Nutzung in Textilmembranen (u. a. gute Haftungseigenschaften).

Ebenfalls erfolgt seit ca. 20 Jahren eine vertiefte Forschung zu textilen Sensorlösungen für Smart Textiles-Anwendungen [45 – 48]. So wurden u. a. am TITV und am ITA intelligente Sensorfäden zur Belastungskontrolle von Bändern und Seilen (IGF-Projekt 14107 BG, BMBF-Projekt Smart Rope (16SV3469) und am DITF leitfähige Garne für Smart Textiles (IGF-Projekt 15712 N) entwickelt. Die bei Smart-Textiles ggü. textilen Membranen signifikant divergierenden Lastszenarien- und resultierenden Beanspruchungsprofile sowie die bei der Beschichtung der Membranen auftretenden thermisch/ chemischen Belastungen der Sensoren und deren Kontaktierungsvarianten [46, 47] schließen eine Übernahme der dort erprobten Sensor-Technologien für das zu entwickelnde MeMo-System weitgehend aus.

Der analysierte Stand der Forschung und Entwicklung zeigt, dass die sensorische Überwachung von Technischen Textilien ein wichtiger FuE-Zweig darstellt. Die Funktionalisierung textiler Membranen mit mehrdimensionalen Sensornetzwerken für eine Gewinnung von vollflächig orts aufgelösten Informationen zu überlagerten Beanspruchungszuständen und zum aktuellen Integritätszustand ist derzeit aufgrund der beschriebenen hohen Komplexität weitestgehend unbekannt und steht daher der industriellen Praxis nicht zur Verfügung. Erste Ansätze zur Übertragung derartiger sensorischer Lösungen auf Textilmembranen wurden dennoch bereits am ITM verfolgt und weisen jedoch noch erhebliche Defizite auf, wie Hysteresen bei höherer elastischer Dehnfähigkeit (siehe Abschnitt 3.2).

3.1.3 FEM-Modellierung von textilen Membranen

Die Berechnung von Membrangeometrien basiert zumeist auf der Finite-Elemente-Methode (FEM). Auf den Membranbau zugeschnittene Software-Lösungen berücksichtigen die großen Verformungen der Membranstrukturen in Form geometrisch nichtlinearer Berechnungen [49]. Das nichtlineare Materialverhalten wird in kontinuumsmechanischen Materialmodellen berücksichtigt [50 – 53]. Eine irreversible Verformung tritt u. a. aufgrund relativer Faser-zu-Faser-Bewegungen schon sehr früh in der Belastungsphase

auf [53]. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Mikrostruktur und dem makroskopischen mechanischen Verhalten wurde mit ersten mesoskopischen Modellen für beschichtete Textilien nachgewiesen [54, 55]. Je nach Konstruktion sind Schädigungen unterschiedlich relevant. Zur Implementierung dieser Ansätze in Modelle zur Ableitung des weiteren Schädigungsverhaltens besteht hoher Forschungsbedarf.

3.1.4 Echtzeit-Datenauswertung über heuristische Methoden

Der im Projekt verfolgte Ansatz der echtzeitfähigen Verknüpfung von Sensordaten mit den vorliegenden globalen Spannungs- und Integritätszuständen der Textilmembran erfordert den Einsatz mathematischer Methoden, die bei der Anwendung mit vergleichsweise wenigen Rechenschritten auf möglichst kostengünstigen Recheneinheiten ein Ergebnis generieren. Echtzeitfähigkeit bedeutet in diesem Kontext die Fähigkeit zur Analyse anwendungsrelevanter Lastfalländerungen (starke Windböen mit signifikanten Änderungen im Bereich größer als 1 s [56]). Aufgrund dessen sowie multiplen Abhängigkeiten von Einflussfaktoren sind primär multivariate heuristische Methoden prädestiniert. Dazu werden im Stand der Technik zunächst Strukturen prüfende Ansätze, wie (multivariate) Regressionsanalysen, und Interpolationsverfahren [57] betrachtet, bei denen der grundsätzlich mathematisch/physikalische Zusammenhang bereits bekannt ist und somit zumeist einfachere Trainings-/Parametrisierungsansätze verwendbar sind. Zusätzlich existieren Strukturen entdeckende Ansätze, bei denen die Art der Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsvariablen noch unbekannt sind. Diese Ansätze sind flexibler in der Anwendbarkeit, häufig auch generalisierbarer bei der Übertragung auf weitere zunächst noch unbekannte Probleme, erfordern jedoch auch einen größeren Trainings-/Parametrisierungsaufwand. Verfahren zu diesen Ansätzen sind künstliche neuronale Netze (KNN) [57 – 60], Bayessche Netze, wie Hidden-Markov-Modelle (HMM) [61], oder spezifische moderne Mustererkennungsalgorithmen, z. B. Support-Vector-Machine (SVM) [62 – 65].

Im Rahmen der Entwicklung einer komplett neuen Gesamtmethodik im Forschungsvorhabens sind die Eignung dieser Ansätze problemspezifisch für mehrere Teilrechenschritte zu evaluieren, jeweils spezifische Vorzugslösungen hinsichtlich Rechenzeit, -genauigkeit und Generalisierbarkeit zu identifizieren und im MeMo-System zu implementieren. Eine weitere forschungsseitige Herausforderung besteht in der prüf-, messtechnischen und FEM-gestützten Bereitstellung von Datensätzen (Ein- und Ausgangsparameter) zur Parametrisierung bzw. Optimierung der einzelnen Teilrechenschritte.

3.2 Eigene Vorarbeiten und Kompetenzen

Zur Realisierung anforderungsgerechter textiler Verstärkungsstrukturen mit integrierten textilbasierten Sensorlösungen verfügt das ITM über ein breit gefächertes Basiswissen zur Entwicklung und textiltechnologischen Fertigung bedarfsgerechter textilbasierter Sensoriken. Für hochsteife FKV-Strukturen [30, 66 – 68] erfolgten im Kontext des SFB 639-A2 und des DFG-Projektes CH 174/17-2 elementare Untersuchungen zur Entwicklung integraler piezoresistiver CF-Sensoren zur Strukturüberwachung von GFK mit Thermoplast-Matrix. Anhand der Ergebnisse konnte ein reproduzierbares Übertragungsverhalten der CF-Sensoren bei elementarer Beanspruchung (Zug, Druck) auf einem am ITM entwickelten Dauerprüfstand jedoch nur bis zu Dehnungen von $\varepsilon \leq 1,0 \%$ nachgewiesen sowie Grundlagen zur Realisierung großflächiger, in der

Ebene integrierter Sensorstrukturen bei der Fertigung textiler Verstärkungsstrukturen für FKV-Bauteile geschaffen und Lösungen zur messtechnischen Kompensation des Temperaturganges erarbeitet werden. In den abgeschlossenen IGF-Projekten 17529BR und 18901BR wurde ein anwendungsnahes Verfahren zur Integration textilbasierter Sensoren auf CF-Basis zur kontinuierlichen Erfassung von Normalspannungszuständen ebenfalls in steifen FKV-Strukturen entwickelt. Auch wurde eine Inter- und Extrapolation der sensorisch aufgenommenen Beanspruchungszustände über die gesamte Fläche des entwickelten Funktionsdemonstrators über die Entwicklung verschiedener Neuronaler Netze erfolgreich umgesetzt (siehe Abbildung 4-2), was für das hier beantragte Vorhaben eine gute Basis bildet.

Sensorische in situ Systeme zur Textilmembranüberwachung wurden bisher am ITM im Rahmen des ZIM Projektes ZF4008327TS8 in Kooperation mit verschiedenen Unternehmen aus der Membranherstellung und -auslegung erarbeitet und ein System zur sensorischen Überwachung der Integritätszustände textiler Membranstrukturen entwickelt. Hierbei konnten unter Berücksichtigung einer grundlegenden Charakterisierung der Membran textilintegrierbare Sensoren entwickelt werden, die jedoch aufgrund einer einsetzen- den plastischen Dehnung ein nur bedingt langzeitstabiles Messsignal generieren. Weiterhin wurde hier lediglich eine diskrete Abnahme lokaler Membranzustände fokussiert, was einen erheblich geringeren Informationsgehalt und damit Anwendungsnutzen generiert und somit auch hier Forschungsbedarf offenlässt. Auch das IGF-Projekt 19296BR hat sich explizit mit der Analyse von textilverstärkten Membranen und deren sensorische Überwachung auseinandergesetzt. Hier wurden textile Sensoren mithilfe der Sticktechnologie jedoch lediglich in die Fügezonen der Membran integriert, die Membran dort lokal überwacht sowie die Sensorsignale FEM-simulationsgestützt ausgewertet [69].

Im IGF-Projekt 19827 BR wurden maßgeschneiderte gewebte und beschichtete Orkanschutzflächen und Orkanschutzsysteme für Gebäude gegen Starkwindereignisse auf Basis der ORW-Technik bindungstechnisch entwickelt, umgesetzt und erprobt [70]. Diese wurde mittels mathematischer und FEM-Modellierung ausgelegt und weisen durch ein elastisches Dehnungsverhalten eine windlastinitiierte Porosität auf. Durch eine kinematische Kopplung eines Gewebemodells auf der Mikroskala und eines Modells der Beschichtung wurde die gewebeverstärkte Membran modelliert. Auch im Rahmen des IGF-Projektes 17241 BR wurde ein makroskopisches FEM-basiertes Schalenmodell für die Simulation eines textilen Membrandaches mit kraftflussgerechter Gestaltung zielführend eingesetzt. Für die Versagensmodellierung textiler Membranen sind jedoch noch Entwicklungen zur Berücksichtigung von Versagensmechanismen (z. B. durch Schub initiierte Delamination), nichtlinearem Verhalten und großen Verformungen notwendig. In allen textilmembranorientierten Projekten konnten bereits grundlegende Kompetenzen auf dem Gebiet der uni- und biaxialen Membranprüfung erarbeitet werden [71, 72].

3.3 Abgeleiteter Forschungsbedarf

Die Entwicklung eines ganzheitlichen echtzeitfähigen Textil-Membran-Monitoring-Systems (MeMo-System), mit dem die Spannungsverteilung vollflächig und auch spezifische Strukturschädigungen unmittelbar sowie vorausschauend im Sinne eines Predictive Maintenance erkannt werden können, erfordert ggü. dem

Stand der Forschung und Entwicklung sowie den eigenen Vorarbeiten umfangreiche textiltechnologische und messtechnische Forschungsaktivitäten. Diese beziehen sich primär auf die folgenden Defizite: aktuell fehlen fadenförmige, hochgradig membrankompatible, reproduzierbar und präzise bis 10 % Dehnung messfähige Sensoren sowie automatisierte technologische Lösungen zu deren schädigungsfreier, textiltechnischer Integration in Verstärkungsstrukturen und zur effektiven, robusten Zusammenschaltung zu Sensornetzwerken für geometrisch variable Textilmembranen, die durch überlagerte Lastszenarien beansprucht sind. Ebenfalls fehlt gegenwärtig eine intelligente, auf die Spezifika von Textilmembranen mit integrierten Sensornetzwerken angepasste Algorithmik, die aus den Informationen der in situ Sensoren den globalen Spannungszustand sowie den aktuellen Integritätszustand (Information zu Verteilung und Art von Strukturschädigungen) in Echtzeit ermittelt.

3.4 Arbeitshypothese

Die Forschungseinrichtung geht von der Arbeitshypothese aus, dass mittels textiler Flächenbildungsverfahren, insbesondere der Webtechnik, hochgradig material- und prozesskompatible fadenförmige Sensoren in Textilmembranen integrierbar und zu Netzwerken zusammenschaltbar sind sowie, dass deren Sensorsignale mittels heuristischer/ algorithmischer Datenauswertung in Echtzeit eine vollflächige Spannungs- und Integritätszustandserfassung ermöglichen.

Die textiltechnisch orientierten Ziele umfassen daher zunächst die Entwicklung piezoresistiver fadenförmiger Sensoren, die schädigungsfrei in die textile Trägerstruktur integrierbar sind und dort die mechanischen Eigenschaften nahezu nicht beeinflussen (z. B. mittels vergleichbarer Moduli). Hinzu kommt die Forderung nach einer präzisen und reproduzierbaren Messfähigkeit im anwendungsrelevanten Messbereich (elastische Sensordehnung im Dehnungsbereich von Textilmembranen bis 10 %). Da dies für bisherige Sensorlösungen nicht vollständig erzielt werden konnte, sind vielversprechende flechtbasierte Lösungen mit definierten Steigungswinkeln zur Einbringung einer definierten Strukturdehnung (vgl. Abschnitt 3.1.2, Piezoresistive Sensoren) zu untersuchen. Ebenfalls ist eine langzeitstabile Anbindung der Sensoren an die Textilmembran (formschlüssig über gezielte Bindungsvarianten und/ oder stoffschlüssig über maßgeschneidertes Grenzschichtdesign) erforderlich. Die gezielte Zusammenschaltung der fadenförmigen Sensoren zu textilbasierten Sensornetzwerken erfolgt über niederohmige Zuleitungen mit bindungstechnisch zu arrangierenden richtungsselektiven Sensorbereichen. In der Entwicklung der Gewebearbeiten sind dafür sowohl die strukturellen Anforderungen an die Membran, die Anforderungen an die Integration der Sensoren mit Kontaktstellen und die Absicherung einer ebenen Oberfläche für die Beschichtung sicherzustellen.

Die messtechnisch orientierten Zielstellungen umfassen zunächst Aspekte der Verbindungstechnik. Hierbei wird eine automatisierte Möglichkeit zur Direktkontaktierung der Zuleitungen bzw. der Sensoren simultan an der Webmaschine untersucht. Weitere messtechnische Zielstellungen liegen im Bereich der algorithmischen Sensordatenauswertung. Hierfür ist ein nutzerfreundliches KMU-taugliches Tool (inklusive Graphical User Interface - GUI) als Bestandteil des MeMo-Systems zu entwickeln, das für spezifisch vorzugebende Membranparameter (Geometrie und Struktur) und einzulesende Sensorsignale, automatisiert den aktuellen

Spannungs- und Integritätszustand visualisiert und kritische Werte identifiziert. Dieses Tool besteht intern aus einer mehrstufigen Algorithmik (Abbildung 4-1). Bedingt durch den Anspruch der Echtzeitfähigkeit, sind hierbei insb. schnelle heuristische Methoden, wie künstliche neuronale Netze oder multivariate Regressionsansätze zu betrachten. Neben der Echtzeitfähigkeit sind diese Methoden hinsichtlich der Präzision der Datenaufbereitung (gegenüber Referenzmethoden, wie FEM oder messtechnisch erfassten Werten), der Generalisierbarkeit hinsichtlich nicht spezifisch antrainierter Szenarien sowie der Robustheit gegenüber Störeinflüssen zu bewerten. Der Nachweis der notwendigen Stabilität der in situ Sensorik erfolgt anhand anwendungsnaher komplexer mechanischer und thermischer Expositionen.

Quantitativ werden die Zielwerte in Tabelle 3-1 angestrebt.

Tabelle 3-1 Quantitative Zielwerte

Zielwerte der fadenförmigen Dehnungssensoren:	
Messbereich (Angabe als Dehnung)	0 ... 10 %
Messunsicherheit (Angabe als Dehnung)	< 0,25 %
Strukturell/mechanische Zielwerte des Sensornetzwerkes	
Relative Beeinflussung der Membranmoduli durch Sensoren	< 3 %
Max. Beeinflussung der Verstärkungsstrukturdicke in den Sensorbereichen	< 0,2 mm
Messtechnische Zielwerte des MeMo-Systems	
Ortsauflösungsvermögen (mittels Algorithmik):	100 Spannungswerte / m ²
Echtzeitfähigkeit	Informationsgenerierung alle 1 s
Langzeitmessfähigkeit	≥ 10 ⁴ Beanspruchungszyklen
Präzision der Spannungsverteilungsermittlung	Max. 5 % Abweichung zur FEM
Zuverlässigkeit zur Fehlerdetektion (insb. Riss und Delamination)	> 95 %

Die technische Realisierbarkeit dieser qualitativen und quantitativen Zielstellungen erfolgt im Projektverlauf anhand von Funktionsmustern (FM) sowie einem Funktionsdemonstrator (FD) (Abbildung 3-1) und wird für den erfolgreichen Ergebnistransfer in KMU-gerechten Handlungsanweisungen dokumentiert.

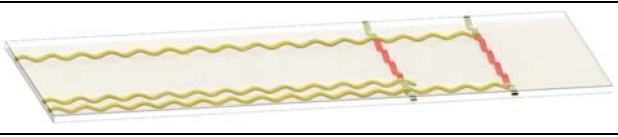
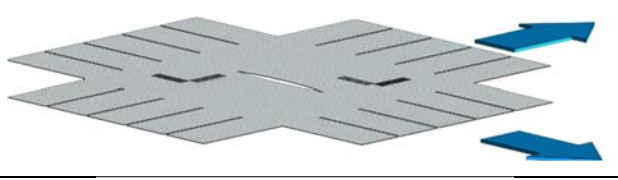
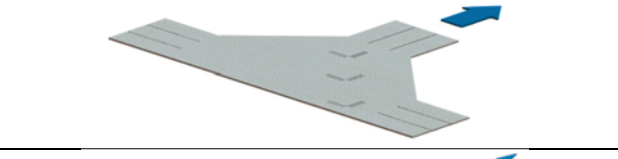

Muster	Beschreibung	Schematische Darstellung
FM1	Muster zur Sensorintegration in Kett- und Schussrichtung; Integrierte Zuleitungen .. gelb Sensoren .. rot	
FM 2	Muster zur Spannungsermittlung im ebenen Zustand mit mehreren Sensoren, ohne (FM 2a) und mit (FM 2b) definiert eingebrachten Fehlstellen	
FM 3	Muster zur Spannungsermittlung mit diversen Geometrien	
FD	Funktionsdemonstrator (FD) in höherer Skalierung mit gekrümmter Ebene	

Abbildung 3-1: FM und potentieller FD zur Evaluierung des MeMo-Systems mit steigendem Komplexitätsgrad

4. Lösungsweg und Qualifikation der Forschungseinrichtung

4.1 Bearbeitungsschritte und Personaleinsatz

AS 1 Präzisierung der Anforderungen und Festlegung der Funktionselemente

In Zusammenarbeit mit den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses (PA), wie Paproth Ingenieurleistungen und Textilbau, werden gebrauchtsrelevante Anforderungsprofile, Prüfbedingungen und Bewertungskriterien an das zu entwickelnde MeMo-System definiert bzw. präzisiert, die aus konkreten Membrankonstruktionen für den jeweiligen Einsatzbereich abgeleitet werden. Zusätzlich werden gemeinsam mit dem PA Einsatzfelder mit industrierelevantem Verwertungspotenzial festgelegt und ein FD aus nachfolgenden Anwendungsbeispielen abgeleitet:

1. Strukturelement für vorgespannte wandelbare Membranbauten (Tragluftdach o. ä.),
2. Strukturelement einer Gasspeichermembran für Biogasanlagen oder
3. Strukturelement eines flexiblen Hochwasser- oder Orkanschutzsystems.

Im diesem AS werden folgende weitere Teilarbeitsschritte unter Einbeziehung des PA durchgeführt:

1. Festlegung und Präzisierung der Struktur- und Prozessparameter (textile Struktur: ein-/ zweilagiges Gewebe aus PES mit Beschichtung aus PVC-P; Beschichtungstechnik: Rakel oder Foulard; Sensorbassismaterial: besilbertes Polyamid, Isaohm[®], pseudoelastische Formgedächtnislegierung),
2. Spezifikation der FM und des FD (Abbildung 3-1) hinsichtlich Material, Geometrie sowie der zugehörigen Bewertungskriterien (ggfs. Präzisierung der Angaben in Tabelle 3-1) und Teststrategien,
3. Bewertung und Klassifizierung praxisrelevanter Strukturschädigungen von Textilmembranen,
4. Konzeptionierung und Bewertung geeigneter Signalschnittstellen im Bereich der Membranperipherie,
5. Zusammenfassung der Ergebnisse in einem Anforderungskatalog als Basis für die folgenden AS.

AS 2 FEM-basierte Auslegung und Spannungsanalysen sensorintegrierter Membranstrukturen

Ziel ist die Ermittlung der vollflächigen Beanspruchungszustände der Textilmembranen zur Auslegung für initiale Sensornetzwerklayouts (diese werden iterativ mit den AS 4 und AS 7 weiterentwickelt) sowie die Ermittlung von Eingabeparametern für die Algorithmik in AS 7. Aufbauend auf Vorarbeiten sowie mittels beratender Unterstützung des PA (technet und Textil Bau) wird dafür ein kontinuumsmechanisches Modell zur Abbildung der nichtlinearen, anisotropen Strukturmechanik der Textilmembranen entwickelt und in weit verbreiteter, kommerzieller Simulationssoftware (z. B. Ansys, LS-Dyna) implementiert. Notwendige Materialparameter werden zunächst einer ITM-internen Datenbank entnommen und im Laufe des Projektes aktualisiert (Charakterisierung in AS 6). Zunächst erfolgt mit dem erstellten Modell eine Auswertung des Dehnungs- und Spannungszustandes der ebenen FM 2 und 3 im biaxialen Zugversuch und ein Abgleich mit der in AS 6 ermittelten Dehnungsverteilung. Das Modell wird mit diesem Vergleich validiert. Das validierte Modell dient dann der Auslegung der in die Gewebe zu integrierenden Sensornetze eingesetzt, die vor allem in Bereichen mit zu erwartenden hohen Dehnungen eingebracht werden sollen. Simulationsgestützt werden die situationsspezifischen Spannungsverteilungen für die algorithmische Auswertung in AS 7 (Variante 1) bereitgestellt. Das Modell wird um ein Versagenskriterium erweitert. Mit dem verbesserten Modell

werden so lokale Strukturschädigungen und deren Einfluss auf die Beanspruchungsverteilung bei definierten Lasten ermittelt, die ebenfalls Eingabeparameter für AS 7 sind.

AS 3 Entwicklung hochdehnbarer, membrankompatibler fadenförmiger Sensoren

Ausgehend von den Ergebnissen der AS 1-2 werden in Zusammenarbeit mit dem PA (u. a. Gustav Gerster, thoenes) anforderungsgerechte fadenförmige Sensoren entwickelt, die einerseits prozess- und membrankompatibel sind und andererseits eine kontinuierliche beanspruchungskorrelative Charakteristik für Dehnungen bis 10 % aufweisen (mit weitestgehend linearer, hysteresefreier und langzeitstabiler Sensorkennlinie). Die derzeit auf dem Markt erhältlichen Sensormaterialien aus z. B. Polyamid, Drähte aus Konstantan basierten Legierungen oder pseudoelastische Formgedächtnislegierungen eignen sich grundsätzlich für die Entwicklung von fadenförmigen Sensoren, allerdings erreichen diese ohne weitere strukturgebende textile Verarbeitung nicht vollumfassend die hier adressierten Anforderungen, wie in Abschnitt 3.1.2 bereits erläutert. Für den AS 2 ergeben sich daher folgende Arbeitsschritte:

- Zur Vergrößerung des elastischen Dehnungsvermögens sind Varianten zur definierten Einbringung von Strukturdehnung mit Flechtkonstruktionen aus fadenförmigem Sensor und strukturgebendem Zusatzgarn zu erarbeiten (insb. Variation von Steigungswinkel und Materialkombinationen) und zu analysieren,
- Für eine dauerhaft adhäsive Verbindung zur Membranbeschichtung sind die Sensoren mit entsprechenden Oberflächeneigenschaften zu versehen (chemische(r) Haftvermittlerauftragung auf Silan- oder Polymerbasis bzw. Aufrauhung) und die Wirkung vergleichend zu analysieren (via Pull-out-Test),
- Analyse der Modulkompatibilität zwischen Membran und Sensorgarn (nach DIN EN ISO 6892-1),
- Messtechnische Erfassung des elastischen Dehnungsvermögens und korrelierender Widerstandsänderung für Dehnungen bis 10 % (mehrzyklische elektromechanische Charakterisierung via Zugprüfungen),
- Überprüfung und Sicherstellung der textiltechnischen Weiterverarbeitbarkeit (in AS 4).

Anhand der Gesamtheit der ermittelten Prüfergebnisse und abgeleiteten Kennwerte erfolgt eine vergleichende gewichtete Evaluierung (gemäß Anforderungskatalog aus AS 1) aus der dann eine Vorzugslösung des fadenförmigen Sensors für den Einsatz in den folgenden AS abgeleitet wird.

Meilenstein M1: „Anforderungsgerechter fadenförmiger Dehnungssensor entwickelt und evaluiert“

AS 4 Layout- und Bindungsentwicklung, Sensorverarbeitungsanalyse, maschinenbauliche Anpassungen und textile Umsetzung der Verstärkungsstrukturen mit Sensornetzwerken

Für die in AS 3 entwickelten Vorzugslösungen der Sensorgarne werden zunächst auf Basis der Ergebnisse aus AS 2 textiltechnologisch, primär mittels Webtechnik (Greiferwebmaschine), realisierbare Sensornetzwerklayouts für einfache Teststrukturen sowie die Funktionsmuster erarbeitet. Die Teststrukturen dienen insb. zur Bereitstellung der Datenbasis (mechanisch, elektrisch, thermisch und gekoppelt) für die darauf aufbauenden AS 2 und AS 7 und sind bedarfsgerecht iterativ auszulegen und anzufertigen. Die primären Kriterien der Layoutentwicklung sind die orts- und richtungsspezifisch definierte Ausprägung der messenden Sensorbereiche bei minimaler Länge von Sensoren und Zuleitungen (z. B. durch Mehrfachnutzung von Zuleitungen und schaltungstechnische variable Ansteuerung bei der Nutzung) sowie die Gewährleistung der

Kurzschlussfreiheit. Gezielt variiert wird die Sensordichte im Netzwerk (für FM2, FM3 und Teststrukturen). Diese Layouts werden bindungstechnisch in Kooperation mit dem PA (u. a. Mehler Technologies, Verseidag-Indutex, C. Cramer) entwickelt (z. B. mit 3DWeave®), wobei weitere Aspekte berücksichtigt werden, wie die Analyse der gegenläufigen Effekte der eher gestreckten Sensoreinarbeitung (potenziell präziseres Übertragungsverhalten) gegenüber einem höheren Ondulationsgrad (höhere formschlüssige Einarbeitung und damit Kraftübertragung). Auch wird die gezielte Anordnung der gestreckten und ondulierenden Sensoranordnung zur Trennung der Mess- und Krafteinleitungsbereiche untersucht. Ebenfalls werden, so es die Layouts erfordern, bindungstechnische Varianten zur Kreuzung von Funktionsfäden (Sensor oder Zuleitung) zur Sicherstellung einer stabilen elektrischen Kopplung entwickelt. Weitere zu berücksichtigende und gemäß Anforderungskatalog aus AS 1 zu bewertende Aspekte umfassen die Auswirkungen der Sensornetzintegration auf die strukturmechanischen Eigenschaften (AS 6) und die Oberflächengüte der Gewebe (mittels optischer Analysen → insb. relevant für die homogene Beschichtung).

Ebenfalls erfolgen iterativ mit AS 3 praktische Versuche zur Sensorverarbeitbarkeit im textilen Prozess und eine visuelle Bewertung hinsichtlich möglicher Sensor- und Maschinenschädigungen. Bei Bedarf sind Maschinenanpassungen an den Garnführungselementen (z. B. größere Radien) abzuleiten und umzusetzen. Bei der webtechnischen Umsetzung werden die Einflüsse der technologischen Parameter (Fadenzugkräfte, Fachgeometrie mit Position einzelner Schäfte, Fachschusszeitpunkt) auf die anforderungsgerechte Einarbeitung der Sensor- und Leiterfäden optisch untersucht und optimale Parameter ermittelt (Kriterium: maximale Übereinstimmung mit Layout- und Bindungsvorgaben).

Abschließend werden alle textilen Strukturen mit integrierten Sensornetzwerken webtechnisch gefertigt und in AS 5 weiterprozessiert. Vergleichende Untersuchungen erfolgen auch mittels der Sticktechnik.

AS 5 Entwicklung von elektromechanischen Kontaktierungslösungen sowie Beschichtung

Zunächst sind anwendungsgerechte Lösungen für eine robuste industriegerechte Kontaktierung der Sensoren, Zuleitungen und Auswertehardware in der Peripherie der Textilmembran zu entwickeln bzw. zu adaptieren. Hierfür werden bevorzugt am ITM etablierte Verfahren des Lötens oder gekoppelten Lötens mit Crimpen untersucht und auf die Eignung für die neuen Sensorgarnkonstruktionen untersucht (Ermittlung des Übergangswiderstandes ohne und mit mechanischer Belastung). Zusätzlich wird in Zusammenarbeit mit dem PA (u. a. ATN und dresden elektronik ingenieurtechnik) ein Konzept für eine automatisierte Kontaktierung an der Webmaschine mit einem ortsfesten ansteuerbaren Manipulator entwickelt. Der Manipulator nutzt als Werkzeug eine ansteuerbare Löteinheit (und ggf. eine automatisierte Crimpvorrichtung). Dieses Setup wird konstruktiv entwickelt, automatisierungstechnisch mit der Webmaschine synchronisiert und umgesetzt. Der Funktionsnachweis (ggf. noch bei reduzierter Maschinengeschwindigkeit) erfolgt durch Ermittlung der elektromechanischen Kontakteigenschaften analog zur manuellen Variante.

Anschließend erfolgen die textilchemische Ausrüstung (auf Base-Coater am ITM) und soweit benötigt die Konfektionierung der Membranzuschnitte (Zuschnitt-/ Füge-technik am ITM) der Teststrukturen und FM.

Meilenstein M2: „Anforderungsgerechte Sensornetzwerke entwickelt“

AS 6 Charakterisierung der Textilmembranen mit integrierten textilbasierten Sensornetzwerken

In AS 6 erfolgen umfassende textilphysikalische, elektrische, mechanische und thermische Charakterisierungen der Teststrukturen und FM. Die Prüfparameter werden soweit quantifizierbar mittels statistischer Versuchsplanung (DOE) definiert, sodass relevante Lastkombinationen und Strukturvarianten mit einer minimalen Anzahl an notwendigen Versuchen abdeckt werden. Variiert werden folgende Einflüsse:

- Expositionsdauer: zyklische Versuche; auch Langzeitversuche bis 10^4 Zyklen,
- Expositionsrichtung: in Faserlängsrichtung (gemäß typischem Biaxialprüfregime) sowie senkrecht zur Membranfläche (zur Simulation von Lasten, wie Schnee, Wind; z. B. mittels andrückenden Stempeln),
- ohne und mit gezielt eingebrachten Strukturschädigungen (Faserriss durch z. B. gezieltes Anschneiden; Delamination durch lokales Beschichten der Textilstruktur mit Trennmittel oder Einlegen dünner Trennfolien mit am ITM erprobten Methodiken; siehe u.a. [73 – 75]) sowie mittig eingebrachter Fügezone,
- Temperatur durch definiert temperierbare Prüfumgebungen (z. B. mit steuerbaren IR-Strahlern).

Die zugehörigen Zielgrößen werden in folgenden Prüfungen [76, 77] ermittelt:

1. Ermittlung der textilphysikalischen Eigenschaften (E-Moduln und Poissonzahlen in Abhängigkeit der Prüfparameter) durch Biaxialzugprüfungen ohne/mit integrierten Sensornetzwerken;
2. Ermittlung elektromechanischer Eigenschaften der Membranen mit integrierten Sensornetzwerken unter zugmechanischer Beanspruchung in Biaxialzugprüfungen mit simultaner Widerstandserfassung sämtlicher Sensornetzwerkelemente und begleitender Dehnungsverteilungsanalyse z. B. mittels optischer Extensometer, DMS- oder ARAMIS®-Messtechnik.

Die ermittelten Prüfergebnisse, abgeleiteten Kennwerte und parameterabhängige Kennwertverläufe bilden die Basis für die FEM-Modellierung in AS 2 sowohl als Eingangsparameter als auch zur Modellvalidierung sowie für die algorithmische Datenauswertung in AS 7. Über eine Hauptkomponentenanalyse werden die erhobenen Datensätze geclustert und für die in AS 7 zu entwickelnden Algorithmen aufbereitet.

AS 7 Entwicklung von Algorithmen zur vollflächigen Membranzustandserfassung

Die aus AS 6 resultierende Datenbasis wird unter Einbeziehung der Ergebnisse des AS 2 mit dem Ziel analysiert, aus den lokalen Sensorsignalen über die Ermittlung von lokalen Dehnungen und lokalen Spannungen echtzeitfähig globale Spannungsverteilungen der Textilmembran abzuleiten (vgl. Abbildung 4-1) und weiterhin gezielte Informationen zum Integritätszustand und zu den einwirkenden Lasten zu ermitteln.

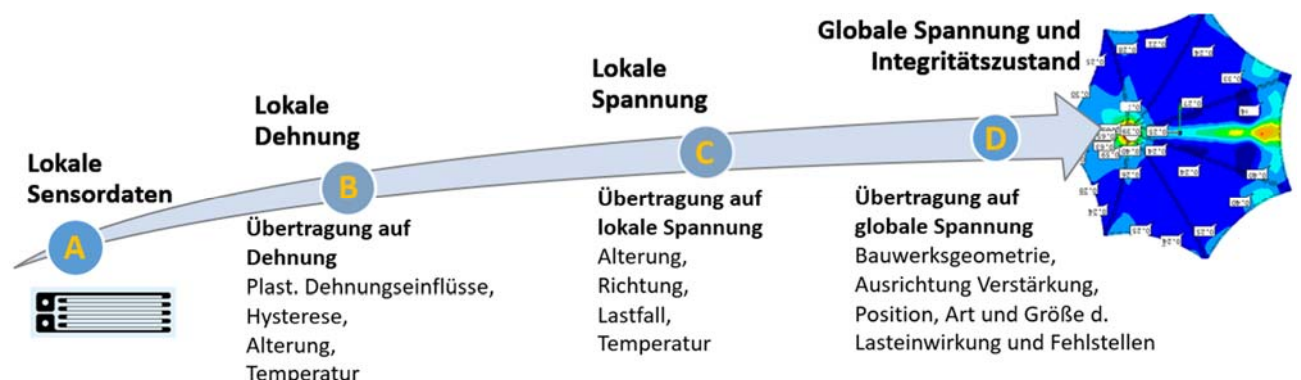


Abbildung 4-1: Algorithmische Datenauswertekette inkl. Angabe material-, struktur- und lastspezifischer Einflüsse

Zunächst wird mittels eines übertragungs- und einflusspezifisch angepassten Algorithmus (vorzugsweise multivariate Regressionsanalyse oder KNN) die elektromechanische Wandlung der lokalen Sensorsignale auf die lokalen Dehnungswerte abgebildet ($A \rightarrow B$). Diese bewusste Trennung des Sensorübertragungsverhaltens vom Rest der Algorithmik hat den Vorteil, dass bei zukünftigen Sensorweiterentwicklungen nur dieser Teil angepasst werden muss.

Anschließend werden zwei Varianten algorithmischer Auswerteketten verfolgt. Bei Variante 1 (Var 1) wird die diskrete Struktur eines FEM-Modells durch ein großes (Var 1a - mit vielen Ausgängen) oder viele kleine (Var 1b) KNN nachgebildet. Diese(s) KNN wandeln/t direkt die lokalen, aus den Sensordaten abgeleiteten, Dehnungsinformationen in die globalen Spannungsverteilungen (Abbildung 4-1: $B \rightarrow D$) unter Berücksichtigung der Einflüsse um. Um hier die situationsspezifischen Spannungsverteilungen bereitstellen zu können, ist dieser Ansatz auf die Ergebnisse der FEM-Modellierung (aus AS 2) angewiesen. Diese Methodik wurde am ITM für ein strukturintegriertes Sensornetzwerk in einem FKV-Rotorflügel bereits erfolgreich validiert (Abbildung 4-2 zeigt die hohe Übereinstimmung der Spannungsverläufe) und ist auf die spezifischen Bedingungen von Textilmembranen (hohe Dehnungen, nichtlineares Materialverhalten etc.) zu übertragen.

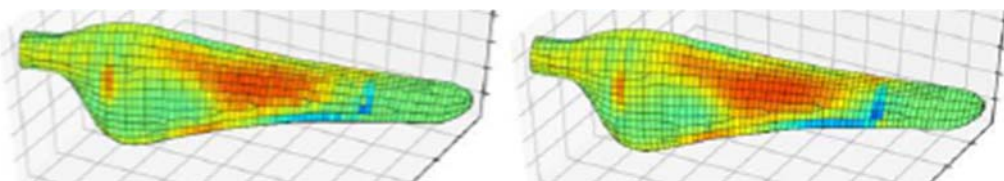


Abbildung 4-2: Exemplarische Ergebnisse aus [60]; rechts: FEM-basierte Referenzdaten einer Spannungsverteilung bei Last; links: auf trainierten (mehreren) KNN und aktuellen Sensorsignalen basierende Spannungsverteilung

In der Variante 2 werden die Schritte $B \rightarrow C$ und $C \rightarrow D$ (vgl. Abbildung 4-1) getrennt und gezielt eine weitestgehend FEM-freie Methodik adressiert, was allgemein die spätere Nutzbarkeit insb. in KMU erhöht. Hierbei werden für den Schritt $B \rightarrow C$ aufgrund des mathematisch ähnlichen Problems wie bei $A \rightarrow B$ ebenfalls Methoden auf Basis der multivariaten Regressionsanalyse oder KNN favorisiert. Für den Schritt $C \rightarrow D$ werden primär 2D-Interpolationsmethoden verfolgt, bei denen die Ausgangsdaten (also die globale Spannungsverteilung) nicht explizit vorgegeben werden muss und somit auf Referenz-FEM-Daten verzichtet werden kann. Mathematisch ist für $C \rightarrow D$ ebenfalls ein KNN-basierter Ansatz prädestiniert.

Zum Parametrisieren bzw. Antrainieren der diversen Algorithmen werden die Ein- und Ausgangsparameter aus AS 6 (skaliert) bereitgestellt und mathematische Standardansätze über zugängliche etablierte Bibliotheken und Befehle (mit Python bzw. Matlab) verwendet (u. a. [60, 78 – 80]).

Die Ermittlung der Informationen primär zum Integritätszustand (Verteilung und Art von Strukturschädigungen) aber auch zu den einwirkenden Lasten erfolgt durch typische Ansätze zur Lösung eines derartigen inversen Problems (z. B. Invertierung des Prozessschrittes D, Abbildung 4-1; gezielte Eingangsparametervariation bis größtmögliche Übereinstimmung (Matching) vorliegt). Da hier auch gegenseitige Beeinflussungen von Strukturschädigungen und Lasten vorliegen, ist zu ermitteln, inwieweit diese Einflüsse (Strukturschädigungen und Lasten) separierbar sind. Deshalb werden ebenfalls Methoden der dynamischen Filterung, wie Hoch- und Tiefpassfilter, ggf. gekoppelt mit Klassifizierungsmethoden wie SVM (vgl. Abschnitt

3.1.4) untersucht und auf ihr Klassifizierungspotential hin analysiert. Die zugrundeliegende Annahme ist, dass einzelne Effekte dynamisch verschiedene Charakteristiken haben (z. B. erfolgen Strukturschädigungen häufig sprunghaft oder langsam zunehmend; Windlasten variieren stetig).

Für die Gesamtheit der zu betrachtenden Algorithmen ist die Echtzeitfähigkeit, Präzision der Datenaufbereitung (im Abgleich mit den aus den AS 2 und AS 6 bereitgestellten Daten), Generalisierbarkeit hinsichtlich nicht spezifisch antrainierter Szenarien sowie Robustheit gegenüber Störeinflüssen zu bewerten (gemäß Anforderungskatalog aus AS 1). Entlang der algorithmischen Datenauswertekette sind jeweils Vorzugslösungen in Abstimmung mit dem PA (u.a. FhG IOSB und dresden elektronik ingenieurtechnik) zu identifizieren und als KMU-taugliches Tool (inklusive GUI) im MeMo-Gesamtsystem vorzugsweise in äußerst kostengünstige Kleincomputer, wie Raspberry Pi, zu implementieren. Aufgrund der Open-Source-Charakteristik, des sehr umfangreichen Funktionsumfangs sowie der guten Implementierbarkeit auch in derartige Kleinrechner wird als Programmierplattform vorzugsweise die Sprache Python verwendet.

Die Gesamtmethodik ermöglicht auf Basis der in AS 4 gezielt beim Layout variierten Sensordichte ebenfalls eine membranspezifische Aussage zur minimal notwendigen Anzahl an Sensoren im Netzwerk bei hinreichendem Informationsgehalt. Diese Zusammenhänge sind KMU-gerecht zu systematisieren.

Meilenstein M3: „Algorithmen zur vollständigen Membranzustandsüberwachung funktionsfähig“

AS 8 Realisierung und Erprobung des anwendungsnahen Funktionsdemonstrators

Gemäß den zuvor entwickelten technischen Lösungen und identifizierten Vorzugslösungen sowie auf Basis der Vorgaben aus AS 1 wird der anwendungsnahe Funktionsdemonstrator ausgelegt, umgesetzt, mit in AS 1 definierten Lastszenarien beaufschlagt und so der Funktionsnachweis des MeMo-Systems hinsichtlich der auch in AS 1 präzisierten Bewertungskriterien erbracht. Für das Nachstellen definierter, realer Lastwechsel ist hier ein Prüfstand mit der Möglichkeit zur variablen mechanischen Lasteinbringung (z.B. variable Massen oder motor-/pneumatikgetriebene Lasten) sowie zur Temperaturvariation (z.B. steuerbare IR-Strahler) zu entwickeln und umzusetzen.

AS 9 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, KMU-gerechte Verfahrensanweisung, Übertragbarkeit

Zur Bewertung der Fertigungsaufwände für anwendungsspezifische MeMo-Systeme wird abschließend eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Prozesskostenanalyse gemäß der Methode Total Cost of Ownership unter Berücksichtigung der gegenwärtig in der Praxis relevanten Inspektions- und Wartungskosten sowie statistischen Schadenskosten durchgeführt. Dies erfolgt in enger Abstimmung insb. mit den Endanwendungsnahen PA-Mitgliedern, wie Textilbau und Paproth Ingenieurdienstleistungen.

Des Weiteren fließen die Projektergebnisse in praxisgerechte Dimensionierungs-/ Gestaltungsrichtlinien für Textilmembranen mit integriertem MeMo-System (insb. für die auslegenden Ingenieurbüros) sowie Anweisungen zur Nutzung des KMU-tauglichen Analysetool (insb. für Endanwender) ein. Diese Informationen werden in einer KMU-gerechten Verfahrensanweisung in iterativer Abstimmung mit den im PA-involvierten KMU zusammengeführt, in der auch alle notwendigen Technologieparameter aufbereitet sind. Somit werden insbesondere KMU in die Lage versetzt, die erzielten FuE-Ergebnisse auch für verschiedene andere

Material-/ Strukturkombinationen und Geometrievarianten zeitnah nach Projektende in die industrielle Praxis zu überführen.

Ebenfalls erfolgt eine konzeptionelle Übertragbarkeitsanalyse sowohl auf andere textiltechnologische Verfahren für Membranen (insb. Gelegetechnik) als auch auf andere Verbundwerkstofftypen (wie FKV und Textilbeton), um perspektivisch die textiltechnische Wertschöpfung noch weiter zu steigern. Insb. die hochgradig generalisierbare Algorithmik, aber auch die automatisieren, flexiblen technologischen Lösungen versprechen eine schnelle Übertragbarkeit in diese weiteren Bereiche.

AS 10 Berichtlegung (Zwischen- und Abschlussberichte)

4.2 Qualifikation der Forschungseinrichtung

Das ITM der TU Dresden besitzt langjährige, umfassende Erfahrungen und tiefgehende Kompetenzen vor allem in den Bereichen Verarbeitung von Hochleistungsgarnen mittels verschiedener textiltechnischer Fertigungsverfahren, integrale Fertigung komplexer Strukturen für den Einsatz in Verbundstrukturen (wie FKV und Textilmembranen) sowie Prüftechnik und rechnergestützte Modellierungs- und Simulationstechniken (auf Basis FEM und maschinellen Lernens (u. a. [60, 80, 81])). Die am ITM verfügbare Textilmaschinen, z. B. Flecht- und Webmaschinen sowie Anlagen zur Textilbeschichtung, bilden eine sehr gute Grundlage für die Entwicklung innovativer Textilstrukturen insb. mit Funktionsintegration. Zur Beschichtung und Konfektionierung von Textilmembranen liegt Erfahrung/Ausstattung (Base-Coater, Zuschnitt-/Schweißsysteme) vor. Das ITM verfügt somit über alle projektrelevanten Kompetenzen sowie Anlagentechniken.

4.3 Arbeitsdiagramm

Die Angaben zum Personaleinsatz sind detailliert in der Begründung zum Finanzierungsplan enthalten.

Arbeitspakete		Q I	Q II	Q III	Q IV	Q V	Q VI	Q VII	Q VIII	Σ M	
1	Präzisierung der Anforderungen									2	
2	FEM-Analysen									16	
3	Entwicklung fadenförmiger Sensoren									7	
4	Entwicklung funktionalisierter Textilien									9	
5	Verbindungstechnik und Beschichtung									6	
6	Charakterisierung									12	
7	Entwicklung echtzeitfähiger Algorithmen									8	
8	Funktionsdemonstrator: Realisierung/Erprobung									3	
9	Wirtschaftlichkeitsanalyse/Verfahrensanweisung									22	
10	Berichtlegung									2	
MS1: Anforderungsgerechter fadenförmiger Dehnungssensor entwickelt											
MS2: Anforderungsgerechte Sensornetzwerke entwickelt											
MS3: Algorithmen zur vollständigen Membranzustandsüberwachung funktionsfähig											
	Personaleinsatz FE 1 (ITM)	Q I	Q II	Q III	Q IV	Q V	Q VI	Q VII	Q VIII	Σ PM	
1	HPA A Textiltechnik/Elektrotechnik	21 x 0,7							3x0,6	16,5	
2	HPA A Maschinenbau/Simulation	-	16 x 0,3						-	4,8	
3	HPA B Labortechnik	-	10 x 0,2				-				2,0
4	HPA C Mechatronik/Elektronik	-	16 x 0,4					-			6,4
5	HPA E Textiltechnik	-	13 x 0,4				-	3x0,4	-	6,4	
6	HPA F SHK	-	21 x 0,25							5,25	

5. Umsetzbarkeit und Transfer der Ergebnisse

5.1 Aussagen zur voraussichtlichen industriellen Umsetzung der F&E-Ergebnisse nach Projektende

Die Erschließung des Bereichs „Intelligente Strukturen“ ist ein wesentlicher Entwicklungstrend der deutschen Textil- und Verbundwerkstoffbranche. Vorwettbewerbliche Prozess- und Produktinnovationen in diesem Bereich eröffnen gute Voraussetzungen für die Schaffung bzw. Erhaltung eines technologischen Vorsprungs deutscher KMU gegenüber dem internationalen Wettbewerbsfeld. Die Bereitstellung von aus kosten- und sicherheitstechnischen Aspekten geforderten Lösungen zur Umsetzung funktionalisierter Textilmembranen mit in situ Sensorik zur kontinuierlichen Strukturüberwachung sind dazu ein wesentlicher Beitrag. Mit dem Basiswissen aus dem Forschungsvorhaben können die KMU entlang der Wertschöpfungskette durch die Entwicklung und Umsetzung entsprechender Produkte auf die steigende Nachfrage der Endanwender nach derartigen Lösungen reagieren. Das mit den Projektergebnissen verbesserte Materialverständnis erlaubt zudem die weitere Verbesserung bestehender textilbasierter Strukturen und somit gezielten Materialeinsparung (Themen: Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz).

Durch das im Projekt gemeinsam mit Firmen im PA (Funktionsgarne: 3, Weber/ Hersteller technischer Membrane/ Konfektionäre: 5, Simulation/ Software- und Algorithmenentwicklung: 2; Messelektronik/ Kontaktierung: 2, Endanwender: 2) generierte technisch/ technologische Know-how werden die auf die Fertigung Technischer Textilien spezialisierten und als potenziellen Nutzerkreis adressierten KMU entlang der gesamten Wertschöpfungskette (insb. Garn-, Textilflächenbildung, Membrankonfektionäre, Messtechnik, Auslegung/Software) in die Lage versetzt, die Projektergebnisse direkt zu nutzen und unmittelbar umzusetzen. Aufgrund der Nutzbarkeit bestehender textiler Fertigungstechnologien sind für die Umsetzung der Forschungsergebnisse in KMU nahezu keine besonderen Investitionen notwendig. Eine Ausnahme ist die Umsetzung einer automatisierten elektrischen Kontaktierung an der Webmaschine, die in den KMU voraussichtlich 3.000 € Kosten verursachen wird. Durch erhebliche Einsparungen ggü. der manuellen Alternative wird eine Amortisierung bereits nach einem Jahr prognostiziert.

Durch die fortlaufende inhaltliche Einbeziehung von KMU und anderer Industriepartner über die Projektbearbeitungsdauer werden sowohl das Erreichen der Forschungsziele als auch der zeitnahe Ergebnistransfer in die industrielle Praxis ermöglicht. Die in AS 9 mit dem PA iterativ erstellte KMU-gerechte Verfahrensanweisung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sowie der über die projektbegleitenden Treffen realisierte Erfahrungsaustausch sind zusätzliche Maßnahmen zur Förderung des Transfers und der Anwendung der Ergebnisse in KMU.

In Summe wird ein unmittelbarer Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft bzw. in konkrete Produkte nach Projektende z. B. im Rahmen weiterführender ZIM- bzw. BMBF-Forschungsprojekte als ökonomisch sowie technologisch erfolgsversprechend eingestuft. Daher bestehen sehr gute wissenschaftlich-technische Voraussetzungen und wirtschaftliche Erfolgsaussichten, dass die entwickelten neuartigen Textilmembranen mit dem MeMo-System bereits drei bis vier Jahre nach Projektende am Markt etabliert

sind. In ca. fünf Jahren wird erwartet, dass auch neue Anwendungsfelder, wie endlosfaserverstärkte FKV- und Textilbetonsysteme in den zugehörigen Branchen (wie Automobil-, Luftfahrt- und Baubranche) durch die Einführung gezielt angepasster integrierter textilbasierter Sensorlösungen und Auswertelgorithmen kommerziell erschlossen werden können.

5.2 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

5.2.1 Geplante spezifische Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Tabelle 5-1: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Zeitraum
Diskussion der Forschungsergebnisse	Direkter Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Ergebnisvorstellung und -diskussion in Arbeitskreisen der AiF-Mitgliedsvereinigung	3 PA-Sitzungen	I/2023, I/2024 IV/2024
		Sitzung des Arbeitskreises „Technische Textilien“ des FKT	ab III/2023
Laufende Information	Präsentation des Projektstandes	Rundschreiben an PA	halbjährlich
Bilaterale Beratungen mit Firmenvertretern	Fachdiskussion und Beratung zur Erweiterung des PA	Gespräche in der FE bzw. bei Firmen oder auf Fachtagungen	fortlaufend
Wissenschaftliche Publikationen	Projektbekanntmachung sowie regelmäßige Publikation der Forschungsergebnisse im Internet bzw. in Fachzeitschriften	TUD-Forschungsinformationssystem Jahresbericht der FE Melliand / Technische Textilien	ab III/2023 II/2024 IV/2023
Vorträge, Poster	Präsentation der erzielten Forschungsergebnisse auf Fachtagungen und Messen	TensiNet Symposium 2023 Sensoren und Messsysteme 2024	II/2023 II/2024
Ergebnisvorstellung auf Fachmessen	Ergebnisinformation für ein breites Fachpublikum	Techtextil 2024 ADD-ITC 2024	II/2024 IV/2024
Demonstratorfertigung und -vorstellung	Ergebnisdiskussion (Demonstrator verbleibt an FE)	zur 3. PA-Sitzung, bei Institutsbesichtigungen, auf Fachmessen	IV/2024
Ergebnistransfer durch Wissensvermittlung	Wiss. Qualifizierung des Personals bzw. Nachwuchspersonals (Multiplikatoreffekt)	Mitwirkung von Doktoranden, SHK Studienarbeiten (bspw. Diplom- und Masterarbeiten)	fortlaufend

5.2.2 Geplante spezifische Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Tabelle 5-2: Transfermaßnahmen nach Ende der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort / Rahmen	Zeitraum
Ergebnisdokumentation	Ergebnisaufbereitung für Industrie	Abschlussbericht	I/2025
Wissenschaftliche Publikationen	Abschlussveröffentlichung	Technische Textilien	I/2025
	Ergebnisveröffentlichung im Internet bzw. in Fachzeitschriften	Homepage des FKT, Tensinews	ab I/2025
Ergebnisvorstellung auf Messen bzw. in Netzwerken	Ergebnisinformation und -transfer für ein breites Fachpublikum	TensiNet Symposium 2025 ADD-ITC 2025	II/2025 IV/2025
		z. B. MFD e.V., Bayern Innovativ	ab III/2025
Vorstellung Demonstrator auf Messen	Ergebnistransfer anhand eines Technologie-Demonstrators	Hannover Messe, Techtextil	ab II/2025
Direkter Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Schnelle zielführende Umsetzung der Forschungsergebnisse	Eintägiger Workshop „Sensorüberwachung von Verbundwerkstoffen“	IV/2025
Vermittlung wiss. Erkenntnisse und Methoden	Ergebnistransfer in die Lehre (Vorlesung/Praktika)	Technische Textilien, Funktionsintegrativer Leichtbau, Simulation Verfahren & Prozesse	ab III/2025

6. Durchführende Forschungseinrichtung

Forschungseinrichtung (FE1): Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik (ITM) TU Dresden, Hohe Str. 6, 01069 Dresden,

Leiter der FE: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif

Projektleiter: Dr.-Ing. Andreas Nocke

- [1] MICHEL, J.; MENGES, G.: *Alterungsverhalten von Verbindungen - Gewebe/Gewebe aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe unter natürlicher Bewitterung nach mehrjährigem Einsatz im Bauwerk*. Fraunhofer IRB Verlag, 1984.
- [2] MICHEL, J.; MINTE, J.; MENGES, G.: *Verbindungselemente PVC-beschichteter Polyestergewebe unter zyklischer Beanspruchung*. Kurzberichte aus der Bauforschung (1983)24, S. 991-993
- [3] SCHULZ, U.; et al.: *Einfluss der Freibewitterung bei Membranwerkstoffen und ihren Verbindungen*. Kurzberichte aus der Bauforschung. Kurzberichte aus der Bauforschung 198829, S.319ff.
- [4] PAPROTH, M.: *Expertengespräch: Technische, wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen von Textilmembranen im Biogasbereich*. Kommunikation per E-Mail / Dresden/Flensburg, ab 25.01.2025
- [5] Ludwig: *Technische Regel für Anlagensicherheit – Sicherheitstechnische Anforderungen an Biogasanlagen (TRAS 12)*. [https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE-Technische-Regel-fuer-Anlagensicherheit-TRAS-120--Sicherheitstechnische-Anforderungen-an-Biogasa/\\$file/Le-sefassTRAS120.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE-Technische-Regel-fuer-Anlagensicherheit-TRAS-120--Sicherheitstechnische-Anforderungen-an-Biogasa/$file/Le-sefassTRAS120.pdf), (08.02.2022)
- [6] Sächsische Zeitung: *Einigung beim Hauptbahnhof-Dach*. <https://www.saechsische.de/bahn-einigt-sich-im-streit-um-hauptbahnhof-dach-3823220.html>, (30.11.2021)
- [7] Dresdener Neuste Nachrichten: *Deutsche Bahn einigt sich im Streit um das Dach vom Hauptbahnhof Dresden*. <https://www.dnn.de/Dresden/Lokales/Deutsche-Bahn-einigt-sich-im-Streit-um-das-Dach-vom-Hauptbahnhof-Dresden>, (30.11.2021)
- [8] DEUTSCHLÄNDER, T.; DALELANE, C.: *Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit*. 2012. (www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/extremereignisse/abschlussbericht-2012.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- [9] mmq/dpa: *Extremwetterschäden in Deutschland summieren sich auf 110 Milliarden Euro*. <https://www.spiegel.de/wirtschaft/europa-vergleich-deutschland-mit-hoechsten-extremwetterschaeden-binnen-40-jahren-a-46d1620f-09fc-4291-ba38-8ab1e092f711>, (08.02.2022)
- [10] SCHMIDT, H. (HRSG.): *„Forensic Engineering“ am Beispiel geschädigter Membrantragwerke – Essener Membranbau-Symposium – Berichte aus dem Bauwesen*. Aachen: Shaker, 2012. – ISBN 9783844013481
- [11] HÄRTER, H.: *Sensorfäden überwachen stark beanspruchte Bauteile*. Elektronik Praxis
- [12] Statistische Bundesamt Wiesbaden: *Mit jeder Faser intelligent – 2021 Die deutsche Textil- und*

- [13] MORE, A.: *Architectural Membrane Market Report 2021-2024: Comprehensive Growth Insights, Current Industry Trends, Future Business Prospects, Upcoming Demand Analysis, Key Strategic Developments and Market Features*. https://www.theexpresswire.com/pressrelease/Architectural-Membrane-Market-Report-2021-2024-Comprehensive-Growth-Insights-Current-Industry-Trends-Future-Business-Prospects-Upcoming-Demand-Analysis-Key-Strategic-Developments-and-Market-Features_14755795, (21.12.2021)
- [14] Sensorik Sachsen: *Sensor Trendmonitor – Analyse in Bezug zum Innovationscluster SenSa*. 31.05.2021
- [15] JÄGER, M.: *Expertengespräch: Kostenpositionen für Membranbauten*. Kommunikation per E-Mail / Hamburg, Dresden, 04.02.2022
- [16] RAU, L.: *Expertengespräch Membraneigenschaften und -belastungen (Mehler Technologies)*. Telefonat / Dresden/Hückelhoven, 14.12.2021
- [17] SEIDEL, M.: *Textile Hüllen – Bauen mit biegeweichen Tragelmenten*. Berlin: Ernst & Sohn, 2008. – ISBN 9783433600207
- [18] UHLEMANN, J.; STRANGHÖNER, N.: *Einfluss fiktiver elastischer Konstanten von textilen Gewebemembranen in der Tragwerksanalyse von Membranstrukturen*. Stahlbau 82(2013)9, S. 643-651
- [19] UHLEMANN, J.: *Elastic Constants of Architectural Fabrics for Design Purposes*. Duisburg-Essen: Universität Duisburg-Essen: Dissertation, 2015
- [20] UHLEMANN, J.; STRANGHÖNER, N.: *Steifigkeitskennwerte von Gewebemembranen*. Stahlbau 86(2017)4, S. 357-365
- [21] BRIDGENS, B. N.; GOSLING, P. D.: *Interpretation of results from the MSAJ "Testing Method for Elastic Constants of Membrane Materials"*. Tensinet Symposium: Tensile Architecture: Connecting Past and Future (2010)
- [22] Shouhui Chen; Xin Ding; Raul Fanguero; Honglei Yi; Jing Ni: *Tensile behavior of PVC-coated woven membrane materials under uni- and bi-axial loads*. Journal of Applied Polymer Science 107(2008)3, pp. 2038-2044
- [23] WOLF, P.; et al.: *Gestickte Dehnungssensoren*. <http://www.fibercheck.de/technologie.html>, (2021-12-07T13:37:47.140Z)
- [24] C N Owston: *Electrical properties of single carbon fibres*. J. Phys. D: Appl. Phys. 3(1970)11, p. 1615

- [25] SCHUELER, R.; JOSHI, S. P.; SCHULTE, K.: *Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping*. Composites Science and Technology 61(2001)6, S. 921-930
- [26] SALVADO, R.; LOPES, C.; SZOJDA, L.; ARAÚJO, P.; GORSKI, M.; VELEZ, F. J.; CASTRO-GOMES, J.; KRZYWON, R.: *Carbon fiber epoxy composites for both strengthening and health monitoring of structures*. Sensors (Basel, Switzerland) 15(2015)5, pp. 10753-10770
- [27] MARTINS, A. T.; ABOURA, Z.; HARIZI, W.; LAKSIMI, A.; KHELLIL, K.: *Structural health monitoring for GFRP composite by the piezoresistive response in the tufted reinforcements*. Composite Structures 209(2019)7, S. 103-111
- [28] QUADFLIEG, T.; STOLYAROV, O.; GRIES, T.: *Carbon rovings as strain sensors for structural health monitoring of engineering materials and structures*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 51(2016)7, S. 482-492
- [29] GOLDFELD, Y.; RABINOVITCH, O.; QUADFLIEG, T.; FISHBAIN, B.; GRIES, T.: *Smart textile reinforced concrete sensory structures*. Smart textile reinforced concEWSHM-7th European Workshop on Structural Health Monitoring 2014
- [30] HÄNTZSCHE, E.; MATTHES, A.; NOCKE, A.; CHERIF, C.: *Characteristics of carbon fiber based strain sensors for structural-health monitoring of textile-reinforced thermoplastic composites depending on the textile technological integration process*. Sensors and Actuators A: Physical 203(2013)3, S. 189-203
- [31] HAENTZSCHE, E.; MUELLER, R.; HUEBNER, M.; RUDER, T.; UNGER, R.; NOCKE, A.; CHERIF, C.: *Manufacturing technology of integrated textile-based sensor networks for in situ monitoring applications of composite wind turbine blades*. J. Phys. D: Appl. Phys. 25(2016)10, S.105012 f.
- [32] HAENTZSCHE, E.; MUELLER, R.; BARDL, G.; NOCKE, A.; CHERIF, C.: *Warp Knitted Textile-Based Sensors for In-Situ Structural Health Monitoring of Wind Turbine Blades*. J Fashion Technol Textile Eng s2(2016)
- [33] HAENTZSCHE, E.; ONGGAR, T.; NOCKE, A.; HUND, R. D.; CHERIF, C.: *Multi-layered sensor yarns for in situ monitoring of textile reinforced composites*. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 254(2017), S.42012 f.
- [34] HAENTZSCHE, E.; FRAUENDORF, M.; NOCKE, A.; CHERIF, C.; REICHARDT, M.; BUTLER, M.; MECHTCHERINE, V.: *Multifunctional components from carbon concrete composite C 3 – integrated, textile-based sensor solutions for in situ structural monitoring of adaptive building envelopes*. Textile Research Journal 88(2018)23, S. 2699-2711

- [35] SCHNEIDER, R.: *Entwicklung von textilbasierten Sensoren für die Überwachung von mechanischen Verformungen und Schädigungen in textilen Verbundwerkstoffen (IGF 19070 N/1) – Abschlussbericht*. Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf, 2018
- [36] MERSCH, J.; GÓMEZ, C.; VASILEV, A.; NOCK, A.; CERIF, C., GERLACH, G.: *Stretchable and Compliant Textile Strain Sensors*. IEEE Sensors Journal 21(2021)22, S. 25632-25640
- [37] HAQUE, M. E.; ZAIN, M. F. M.; HANNAN, M. A.; JAMIL, M.; JOHARI, H.: *Recent application of structural civil health monitoring using WSN and FBG*. World Applied Sciences Journal 20(2021)4, S. 585-590
- [38] LI, H.-N.; LI, D.-S.; SONG, G.-B.: *Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*. Engineering Structures 26(2004)11, S. 1647-1657
- [39] BREMER, K.; WEIGAND, F.; ZHENG, Y.; ALWIS, L. S.; HELBIG, R.; ROTH, B.: *Structural Health Monitoring Using Textile Reinforcement Structures with Integrated Optical Fiber Sensors*. Sensors (Basel, Switzerland) 17(2017)2,
- [40] LUND, A.; JONASSON, C.; JOHANSSON, C.; HAAGENSEN, D.; HAGSTRÖM, B.: *Piezoelectric polymeric bicomponent fibers produced by melt spinning*. J. Appl. Polym. Sci. 126(2012)2, S. 490-500
- [41] NILSSON, E.; LUND, A.; JONASSON, C.; JOHANSSON, C.; HAGSTRÖM, B.: *Poling and characterization of piezoelectric polymer fibers for use in textile sensors*. Sensors and Actuators A: Physical 201(2013), S. 477-486
- [42] LUND, A.; RUNDQVIST, K.; NILSSON, E.; YU, L.; HAGSTRÖM, B.; MÜLLER, C.: *Energy harvesting textiles for a rainy day: woven piezoelectrics based on melt-spun PVDF microfibrils with a conducting core*. npj Flex Electron 2(2018)1, S.5310 f.
- [43] SmarterWorld: *Windrotor-Monitoring: Faserbasierte Sensoren ermöglichen präzise Funktionsvorhersagen*. <https://www.smarterworld.de/smart-generation/wind/faserbasierte-sensoren-ermöglichen-praezise-funktionsvorhersagen.126132.html>, (2021-12-07T14:17:44.604Z)
- [44] ONGGAR, T.; HÄNTZSCHE, E.; HUND, R.-D.; CHERIF, C.: *Multilayered Glass Filament Yarn Surfaces as Sensor Yarn for In-situ Monitoring of Textile-reinforced Thermoplastic Composites*. Fibers Polym 20(2019)9, S. 1945-1957
- [45] Forschungskuratorium Textil e. V.: *Smart Textiles – Licht, Wärme, Daten aus der Faser*. 25.07.2019. (www.textilforschung.de/uploads/2016-11-14-15-12-22-40-1.pdf)
- [46] GONÇALVES, C.; FERREIRA DA SILVA, A.; GOMES, J.; SIMOES, R.: *Wearable E-Textile Technologies: A Review on Sensors, Actuators and Control Elements*. Inventions 3(2018)1, S.14 f.

- [47] JANSEN, K. M. B.: *Smart textiles: how electronics merge into our clothing*. 2019 20th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), Hannover, Germany, 3/24/2019 - 3/27/2019. – ISBN 978-1-5386-8040-7, pp. 1-4
- [48] SINGHA, K.; KUMAR, J.; PANDIT, P.: *Recent Advancements in Wearable & Smart Textiles: An Overview*. Materials Today: Proceedings 16(2019), S. 1518-1523
- [49] GOSLING, P. D.; BRIDGENS, B. N.; ALBRECHT, A.; ALPERMANN, H.; ANGELERI, A.; BARNES, M.; BARTLE, N.; CANOBBIO, R.; DIERINGER, F.; GELLIN, S.; LEWIS, W. J.; MAGEAU, N.; MAHADEVAN, R.; MARION, J. M.; MARSDEN, P.; MILLIGAN, E.; PHANG, Y. P.; SAHLIN, K.; STIMPFLE, B.; SUIRE, O.; UHLEMANN, J.: *Analysis and design of membrane structures: Results of a round robin exercise*. Engineering Structures 48(2013), S. 313-328
- [50] DINH, T. D.; REZAEI, A.; LAET, L. de; MOLLAERT, M.; VAN HEMELRIJCK, D.; VAN PAEPEGEM, W.: *A new elasto-plastic material model for coated fabric*. Engineering Structures 71(2014), S. 222-233
- [51] DINH, T. D.; REZAEI, A.; PUYSTIENS, S.; VAN CRAENENBROECK, M.; CARBONEZ, K.; LAET, L. de; MOLLAERT, M.; VAN HEMELRIJCK, D.; VAN PAEPEGEM, W.: *A study of tension fabric membrane structures under in-plane loading: Nonlinear finite element analysis and validation*. Composite Structures 128(2015), S. 10-20
- [52] JEKEL, C. F.; VENTER, G.; VENTER, M. P.: *Modeling PVC-coated polyester as a hypoelastic nonlinear orthotropic material*. Composite Structures 161(2017), S. 51-64
- [53] MOTEVALLI, M.; UHLEMANN, J.; STRANGHÖNER, N.; BALZANI, D.: *Geometrically nonlinear simulation of textile membrane structures based on orthotropic hyperelastic energy functions*. Composite Structures 223(2019), S.110908 f.
- [54] YANG, Y.; ZENG, P.; PINDER, M. J.: *Capturing the multiscale effects in the response of coated woven fabrics*. Composite Structures 136(2016), S. 566-581
- [55] DINH, T. D.; REZAEI, A.; DAELEMANS, L.; MOLLAERT, M.; VAN HEMELRIJCK, D.; VAN PAEPEGEM, W.: *A hybrid micro-meso-scale unit cell model for homogenization of the nonlinear orthotropic material behavior of coated fabrics used in tensioned membrane structures*. Composite Structures 162(2017), S. 271-279
- [56] FORTUNIAK, K.; WIBIG, J.; PAWLAK, W.: *Turbulence characteristics, short time wind gusts and wind pulsations in urban location*. http://meteo.geo.uni.lodz.pl/kf/publikacje_kf_PDF/t2011_19th_ICB_Fortuniak_Wibig_Pawlak.pdf

- [57] SMITHIES, N. J.: *Advancing the analysis of architectural fabric structures, neural networks and uncertainty*. Newcastle University: Dissertation. URL: <https://theses.ncl.ac.uk/jspui/handle/10443/3056>
- [58] COLASANTE, G.; GOSLING, P. D.: *Including Shear in a Neural Network Constitutive Model for Architectural Textiles*. Procedia Engineering 155(2016)5, S. 103-112
- [59] CHESNOKOV, A.; MIKHAILOV, V.; DOLMATOV, I.: *Application of Artificial Neural Networks for Membrane Damage Detection in a Bending-Active Construction*. 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 11.11.2020 - 13.11.2020. – ISBN 978-1-7281-8840-9, S. 347-352
- [60] BISCHOFF, P.: *Entwicklung eines neuronalen Netzes für garnbasierte In-Situ-Beanspruchungssensoren zur Strukturanalyse großdimensionierter FKV-Bauteile*. Dresden: Technische Universität Dresden: ITM, 2020
- [61] FINK, G. A.: *Mustererkennung mit Markov-Modellen – Theorie - Praxis - Anwendungsgebiete*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2003. – ISBN 3519004534
- [62] BORNN, L.; FARRAR, C. R.; PARK, G.; FARINHOLT, K.: *Structural Health Monitoring With Autoregressive Support Vector Machines*. Journal of Vibration and Acoustics 131(2009)2, S.91 f.
- [63] GUI, G.; PAN, H.; LIN, Z.; LI, Y.; YUAN, Z.: *Data-driven support vector machine with optimization techniques for structural health monitoring and damage detection*. KSCE J Civ Eng 21(2017)2, S. 523-534
- [64] VITOLA, J.; POZO, F.; TIBADUIZA, D. A.; ANAYA, M.: *A Sensor Data Fusion System Based on k-Nearest Neighbor Pattern Classification for Structural Health Monitoring Applications*. Sensors (Basel, Switzerland) 17(2017)2,
- [65] ABE, S.: *Support Vector Machines for Pattern Classification*. London: Springer London, 2005. – ISBN 9781852339296
- [66] HENGSTERMANN, M.; HASAN, M. M. B.; SCHEFFLER, C.; ABDKADER, A.; CHERIF, C.: *Development of a new hybrid yarn construction from recycled carbon fibres for high-performance composites. Part III: Influence of sizing on textile processing and composite properties*. Journal of Thermoplastic Composite Materials 34(2021)3, S. 409-430
- [67] HAENTZSCHE, E.; MUELLER, R.; RUDER, T.; NOCKE, A.; CHERIF, C.: *Integrative Manufacturing of Textile-Based Sensors for Spatially Resolved Structural Health Monitoring Tasks of Large-Scaled Composite Components*. MSF 825-826(2015), S. 571-578

- [68] MOUNTASIR, A.; HOFFMANN, G.; CHERIF, C.; KUNADT, A.; FISCHER, W.-J.: *Mechanical characterization of hybrid yarn thermoplastic composites from multi-layer woven fabrics with function integration*. Journal of Thermoplastic Composite Materials 25(2012)6, S. 729-746
- [69] WINGER, H.; DÖBRICH, O.; SAEED, H.; GEREKE, T.; NOCKE, A.; CHERIF, C.: *Monitoring the Joint Area of Composite Membrane Materials*. Applied Sciences 9(2019)10, S.2068 f.
- [70] KERN, M.; PHAM, M. Q.; DÖBRICH, O.; ROTHE, S.; GEREKE, T.; HOFFMANN, G.; KYOSEV, Y.; KRZYWINSKI, S.; CHERIF, C.; TROMMER, K.; MEYER, M.; EIPPER, T.; HILDEBRAND, V.; SIEGMUND, S.; TROMMER, G.: *Orkanschutzsystem mit lastangepasster Porenöffnung / Development and testing of a protection system against heavy winds with load-adapted pore sizes*. Technische Textilien/Technical Textiles 63(2020)4-5, S. 148-151
- [71] CHERIF, C.; KRZYWINSKI, S.; DIESTEL, O.; SCHULZ, C.; LIN, H.; KLUG, P.; TRÜMPER, W.: *Development of a process chain for the realization of multilayer weft knitted fabrics showing complex 2D/3D geometries for composite applications*. Textile Research Journal 82(2012)12, S. 1195-1210
- [72] WENDT, E.; KRZYWINSKI, S.: *Uniaxiale und biaxiale Prüfverfahren zur Bestimmung des Deformationsverhaltens technischer Textilien / Uniaxial und biaxial tensile tests to determine the deformation behavior of technical textiles*. Technische Textilien/Technical Textiles 54(2011)5-6, S. 258-261
- [73] ASHIR, M.; BARDL, G.; HAHN, L.; NOCKE, A.; CHERIF, C.: *Mechanical characterization of carbon fiber-reinforced plastics with defined defects*. Fibres & Textiles in Eastern Europe 26(2018), S. 126-132
- [74] BARDL, G.; NOCKE, A.; CHERIF, C.; KUPKE, R.; KLEIN, M.; HEUER, H.: *Zerstörungsfreie Fehlerdetektion in Carbonfaser-Gelegen und CFK mit hochfrequenter Wirbelstrom-Messtechnik*. Technische Textilien 57(2014)5, S.198ff.
- [75] CHERIF, C.: *Prozessintegrierte Qualitätssicherung mit hochfrequenter Wirbelstrom-Messtechnik entlang der Prozesskette zur FKV-Herstellung – Abschlussbericht, IGF-Projekt 184028 BG*. ITM, 2017
- [76] Norm MSAJ/MTeil 02 (1995). TESTING METHOD FOR ELASTIC CONSTANTS OF MEMBRANE MATERIALS
- [77] Norm Deutsche Norm DIN EN 17117-1 (2018). Mit Kautschuk oder Kunststoff beschichtete Textilien - mechanische Prüfverfahren unter biaxialen Spannungszuständen - Teil 1: Zugsteifigkeitseigenschaften

- [78] GEIGER, C.: *Numerische Verfahren zur Lösung unrestringierter Optimierungsaufgaben*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999. – ISBN 9783642585821
- [79] PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A.; MICHEL, V.; THIRION, B.; GRI-SEL, O.; BLONDEL, M.; PRETTENHOFER, P.; WEISS, R.; DUBOURG, V.; VANDER-PLAS, J.; PASSOS, A.; COURNAPEAU, D.; BRUCHER, M.; PERROT, M.; DU-CHESNAY, E.: *Scikit-learn: Machine Learning in Python*. Journal of Machine Learning Research 12(2011), S. 2825-2830
- [80] MALIK, S.: *Analysis and modelling of air permeability and yarn crimp of woven barrier fabrics using artificial neural network*. Dresden: Technische Universität Dresden: ITM, Dissertation, 2017
- [81] FAROOQ, A.: *Development of Prediction Systems Using Neural Networks for Intelligent Spinning Machines*. Dresden: Technische Universität Dresden: ITM, Dissertation, 2010