

**Entwicklung einer Methode zur kontinuierlichen Bauteilüberwachung von Faserverbundwerkstoffen mittels piezoelektrischer Mehrlagengewebe**

*Development of a method for continuous component monitoring of fiber reinforced composite materials through piezoelectric multilayer woven fabrics*

von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

**Paul Christian Hofmann**

aus Heidelberg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Götz T. Gresser

Mitberichterin: Prof. Dr. rer. pol. Dipl.-Ing. Meike Tilebein

Tag der mündlichen Prüfung: 02.06.2022

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung (DITF) Denkendorf  
in Zusammenarbeit mit dem Institut für Textil- und Fasertechnologien (ITFT)  
der Universität Stuttgart



*Marmor, Stein und Eisen bricht,  
aber Faserverbundwerkstoffe dank dieser Arbeit nicht...*

*- frei nach Drafî Deutscher -*



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an den Deutschen Instituten für Textil- und Faserforschung (DITF) Denkendorf.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Götz T. Gresser für das entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit zur Durchführung meiner Dissertation. Frau Prof. Dr. rer. pol. Dipl.-Ing. Meike Tilebein danke ich für die freundliche Übernahme des Koreferats.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen Kollegen in der Gruppe E-Textiles und dem Elektroniklabor für die Kollegialität und die stets innovative Arbeitsatmosphäre, die entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Im Einzelnen bedanke ich mich bei Dr. rer. nat. Michael Haupt, dem Leiter des Bereichs E-Textiles, für die Unterstützung sowie die konstruktive Korrektur des Manuskripts dieser Arbeit. Ganz besonderer Dank gilt Max-Georg Sürth für seine kompetente Unterstützung und seinen fachlichen Rat insbesondere bei elektrotechnischen und messtechnischen Fragestellungen. Außerdem möchte ich mich bei meiner geschätzten Kollegin und Freundin Sarah Kim für unsere zahlreichen fachlichen Diskussionen, die angenehme Zusammenarbeit in zahlreichen Projekten sowie die Unterstützung bei der Bildaufbereitung für diese Arbeit und die Korrektur des Manuskripts dieser Arbeit bedanken.

Dem Leiter des Bereichs Webtechnologien, Dr.-Ing. Hans-Jürgen Bauder, der mit mir stets die Motivation geteilt hat, sensorische Mehrlagengewebe zu entwickeln, danke ich für die Unterstützung bei der Beantragung der notwendigen finanziellen Mittel zur Durchführung dieser Arbeit sowie für die konstruktive Korrektur des Manuskripts meiner Dissertation. Weiter bedanke ich mich bei den übrigen Kollegen aus dem Bereich Webtechnologien für die fruchtbare Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Herstellung der piezoelektrischen Mehrlagengewebe und die stets freundliche Atmosphäre im Webereitechnikum. Ganz besonderer Dank gilt hier Metin Caliskan, der mich insbesondere in meinen ersten Jahren an den DITF in die Bindungslehre eingewiesen und so meine Begeisterung für dreidimensionale Gewebestrukturen geweckt hat. Ohne ihn und unsere zahlreichen Diskussionen wäre die Idee zu meinem Dissertationsthema wahrscheinlich nie entstanden. Weiter danke ich Metin für die kompetente und geduldige Umsetzung der vielen, für das Entstehen dieser Arbeit notwendigen Bindungsvarianten. Seine Erfahrung und seine technische Kompetenz waren maßgeblich für den Erfolg meiner Versuche verantwortlich.

Ferner bedanke ich mich bei der Gruppe Faserverbundtechnik für die freundliche Aufnahme in ihrem Technikum. Besonderer Dank gilt hier Dr.-Ing. Sathis Kumar Selvarayan für seinen fachlichen Rat und die Unterstützung beim Konsolidieren der

Proben sowie bei der mechanischen Bauteilprüfung. Zudem möchte ich mich bei Patrick Kaiser für das gründliche Korrekturlesen des Manuskripts dieser Arbeit bedanken. Auch meinem ehemaligen Kollegen aus dem Bereich Faserverbundtechnik, Hans Christof, gebührt Dank. Er hat im Rahmen seiner Diplomarbeit Grundlagen erarbeitet, auf denen ich mit dieser Arbeit aufbauen konnte.

Ein großes Dankeschön gilt Florian Fritz für die Unterstützung bei der Programmierung der Signalauswertung in Python. Albrecht Dinkelmann danke ich für das Anfertigen von Aufnahmen im Computertomographen und deren Aufbereitung, die für die Fehlersuche im Entwicklungsprozess sehr hilfreich waren und die sensorischen Mehrlagengewebe sehr anschaulich darstellen.

Überdies bedanke ich mich bei meinen Studentinnen Alisa Walch, Sonja Arnold-Keifer und Susi Huynh, die mich im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten bei der Durchführung meiner Dissertation unterstützt haben.

Des Weiteren danke ich meinem ehemaligen Kommilitonen Matthias Schneider für das unkomplizierte und präzise Zuschneiden der Prüfkörper an einer CNC-Fräse am Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart, wodurch mir sehr viel Handarbeit erspart blieb.

Außerdem möchte ich meinem Vater Prof. Dr.-Ing. Thomas Hofmann für den fachlichen Rat rund um die Modellierung der mechanischen Spannungen sowie die Korrektur des Manuskripts dieser Arbeit danken.

In weiten Teilen ermöglicht wurde diese Arbeit durch die Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung.

Stuttgart im Dezember 2021  
Paul Hofmann

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Wissenschaft und Technik.....</b>	<b>7</b>
2.1	Sensortechnologien zur Zustandsüberwachung und deren Integrationsmöglichkeiten in Faser-Kunststoff-Verbunde.....	9
2.2	Messverfahren zur elektrischen Erfassung von Kräften.....	16
2.3	Möglichkeiten der elektrotechnischen Funktionalisierung von Textilien und deren Integrationstiefe .....	31
2.4	Forschungslücke.....	37
<b>3</b>	<b>Zielsetzung, Arbeitshypothesen und Lösungsweg.....</b>	<b>39</b>
<b>4</b>	<b>Technologie- und Strukturanalyse .....</b>	<b>43</b>
4.1	Sensorprinzip .....	45
4.1.1	Materialien und Methoden.....	45
4.1.2	Messung im Ruhezustand (statisch) .....	53
4.1.3	Messung unter zyklischer Last (dynamisch) .....	55
4.1.4	Einfluss der Sensorik auf die mechanischen Bauteileigenschaften des FKV .....	59
4.1.5	Schlussfolgerungen.....	61
4.2	Sensoraufbau.....	62
4.2.1	Einfluss der Sensorlage im Bauteil auf die Sensoreigenschaften .....	63
4.2.2	Einfluss der Faserorientierung in der Funktionsschicht auf die Sensoreigenschaften .....	69
4.2.3	Einfluss der Schichtdicke der Funktionsschicht auf die Sensoreigenschaften .....	73
4.2.4	Einfluss der Bindung der gewebten Elektrode auf die Sensoreigenschaften .....	78
4.2.5	Einfluss der textilen Elektrode auf die Sensorstreuung.....	81
4.2.6	Schlussfolgerungen.....	85
<b>5</b>	<b>Umsetzung und Verifizierung der Erkenntnisse an FKV-Komponenten aus partiell sensorischen Mehrlagengeweben.....</b>	<b>87</b>
5.1	Bindungsentwicklung und Aufbau der Prüfkörper .....	87
5.2	Elektromechanische Charakterisierung der mit sensorischen Mehrlagengeweben verstärkten FKV-Prüfkörper .....	101
5.3	Mechanische Bauteileigenschaften der mit sensorischen Mehrlagengeweben verstärkten FKV-Prüfkörper .....	107
5.4	Schlussfolgerungen.....	108

<b>6</b>	<b>Validierung der mehrlagengewebebasierten Sensoren mittels eines mechanischen Berechnungsmodells.....</b>	<b>111</b>
6.1	Aufbau der Proben.....	113
6.2	Prüfaufbau und -parameter.....	114
6.3	Balkentheorie nach Euler-Bernoulli.....	117
6.4	Ergebnisse.....	122
6.5	Schlussfolgerungen.....	125
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick .....</b>	<b>127</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>131</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>143</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Hauptspannungstrajektoren bei Querbelastung (oben); Biege- und Schubspannungen am geschnittenen Balken unten (i. A. a. [1]).....	2
Abbildung 1-2:	Vereinfachte Darstellung der aus einer äußeren Kraft (F) resultierenden inneren Kräfte (D, Z) am statisch bestimmten Biegebalken .....	3
Abbildung 2-1:	Abgrenzung verschiedener Arten der Bauteilüberwachung .....	8
Abbildung 2-2:	Einflussfaktoren auf die Umsetzung sensorischer FKV.....	9
Abbildung 2-3:	Auf einem Prüfkörper aus GFK aufgeklebter DMS.....	10
Abbildung 2-4:	Schematische Darstellung der Faserorientierung um eine integrierte Sensorkomponente .....	11
Abbildung 2-5:	Schnittbildansicht der Faserorientierung um eine integrierte Sensorkomponente .....	11
Abbildung 2-6:	Querschnittsansicht eines FKV mit auf ein Verstärkungsgewebe aufgestickten Mikrokabeln .....	13
Abbildung 2-7:	Gliederung des Stands der Technik der Sensortechnologien zur kontinuierlichen Bauteilüberwachung und Einordnung dieser Arbeit in selbige (rot) .....	15
Abbildung 2-8:	Schematischer Sensoraufbau und Ersatzschaltbilder kapazitiver, (piezo-)resistiver und piezoelektrischer Sensoren.....	17
Abbildung 2-9:	Direkter piezoelektrischer Effekt (a) unter Krafteinwirkung und inverser piezoelektrischer Effekt (b) bei angelegtem elektrischen Feld (Der Zustand vor Einwirken der Kraft bzw. des elektrischen Felds ist jeweils gestrichelt dargestellt.) (i. A. a. [79, 81]).....	22
Abbildung 2-10:	Schematische Darstellung zweidimensionaler Gittermodelle mit (1) und ohne (2) Symmetriezentrum (Z) im unbelasteten (oben) und im belasteten (unten) Zustand. Außerdem dargestellt: Prinzip des transversalen (a) und des longitudinalen (b) piezoelektrischen Effekts im Gittermodell (i. A. a. [74, 76, 79]).....	25
Abbildung 2-11:	Schematische Darstellung des Prozesses der elektrischen Polarisation: Ausrichtung der Dipole vor (a) während (b) und nach (c) der Durchführung (i. A. a. [82]).....	26
Abbildung 2-12:	Koordinatensystem zur Beschreibung des piezoelektrischen Effekts (i. A. a. [75]).....	27
Abbildung 2-13:	Handelsübliches auf Piezokeramik basierendes Piezoelement (links) und PVDF-basierter Foliensensor (rechts) .....	29

Abbildung 2-14:	Möglichkeiten bzw. „Integrationsstufen“ der elektrotechnischen Funktionalisierung von Textilien .....	32
Abbildung 2-15:	Integrationstiefen von Sensorik bzw. Aktorik in Textilien.....	32
Abbildung 2-16:	Zusammenfassung verschiedener Möglichkeiten zur elektrotechnischen Funktionalisierung von Textilien und Beispiele dazu.....	36
Abbildung 3-1:	Übertragung von Sensorprinzip und -aufbau herkömmlicher Piezoelemente auf eine Gewebestruktur .....	41
Abbildung 4-1:	Übersicht der technologischen und strukturellen Einflussfaktoren auf eine sensorische Verstärkungsstruktur von FKV und der daraus resultierenden grundlegenden Voruntersuchungen dazu .....	44
Abbildung 4-2:	Schematische Darstellung der Proben in Draufsicht mit Druckfinne und Auflager des Dreipunktbiegeversuchs zur Orientierung .....	47
Abbildung 4-3:	Schematische Darstellung der verschiedenen Varianten der hergestellten sensorischen FKV-Proben in Querschnittsansicht.....	49
Abbildung 4-4:	Sensorische FKV-Probe.....	50
Abbildung 4-5:	Ablauf des thermischen Polarisationsprozesses .....	51
Abbildung 4-6:	CT-Scan des piezoelektrischen Bereichs: Elektrodegarn: grün; piezoelektrisches Garn: gelb; Kettgarn und Matrixmaterial: ausgeblendet .....	52
Abbildung 4-7:	Kettschnitt: maximaler (oben) und minimaler (unten) Elektrodenabstand ( $d_P$ ) .....	53
Abbildung 4-8:	Links: Spuren von Überschlägen am Probenrand; rechts: Mit Silikon isolierte Probenkante.....	53
Abbildung 4-9:	Einfluss von Elektrodenabstand und dielektrischem Textilmaterial auf die Kapazität gewebter Kondensatoren .....	54
Abbildung 4-10:	In die dynamische Prüfmaschine eingelegte sensorische Probe .....	55
Abbildung 4-11:	Zusammenhang zwischen Auslenkung (Weg) der Belastungsfinne und der Kapazitätsänderung der sensorischen Proben .....	56
Abbildung 4-12:	Vergleich der Kapazitätsänderung einer sensorischen Probe (Aufbau a) unter Belastungszyklen unterschiedlicher Auslenkung .....	57
Abbildung 4-13:	In die dynamische Prüfmaschine eingelegte piezoelektrische Probe unter Maximallast .....	58

Abbildung 4-14: Belastungsabhängige Ladungsverschiebung einer sensorischen Probe mit Aufbau c) im unpolarisierten und polarisierten Zustand.....	59
Abbildung 4-15: Einfluss des Polarisierungsprozesses auf Proben mit piezoelektrischer Konfiguration (Aufbau c).....	59
Abbildung 4-16: Durchschnittliche Biegespannung beim Dreipunktbiegeversuch der verschiedenen sensorischen Aufbauten und Vergleichsproben ohne integrierten Sensor (nur PET).....	60
Abbildung 4-17: Schematische Darstellung der Proben in Draufsicht mit Druckfinne und Auflager des Dreipunktbiegeversuchs zur Orientierung .....	63
Abbildung 4-18: Schematische Darstellung der hergestellten sensorischen FKV-Proben in Querschnittsansicht mit unterschiedlicher Sensorposition (a-c) .....	65
Abbildung 4-19: Signalkurve einer Beispielprobe für jede Sensorposition .....	66
Abbildung 4-20: Einfluss der Sensorposition auf die Signalstärke .....	67
Abbildung 4-21: Schematische Darstellung der verschiedenen Spannungen und deren Wirkungsrichtung am geschnittenen Biegebalken (vgl. Abbildung 1-1).....	68
Abbildung 4-22: Schematische Darstellung der Biegebalkentheorie nach Abbildung 1-2 mit eingezeichnetem piezoelektrischen Garn an den unterschiedlichen Positionen im Probenquerschnitt in Schussschnittansicht.....	68
Abbildung 4-23: Vergleich der Bruchspannung bei einer PVDF-Sensorlage oberhalb (Aufbau a), in (Aufbau b) und unterhalb (Aufbau c) der neutralen Faser mit der einer Referenzprobe ohne Sensor (nur PET).....	69
Abbildung 4-24: Schematische Darstellung der hergestellten piezoelektrischen FKV-Proben in Querschnittsansicht mit unterschiedlicher Faserausrichtung der Funktionsschicht (a-c) .....	71
Abbildung 4-25: Einfluss der Faserorientierung auf die Signalstärke .....	72
Abbildung 4-26: Vergleich der Bruchspannung von Proben mit einer PVDF-Sensorlage aus piezoelektrischen Schuss- (a), Kett- (b) und piezoelektrischen Schuss- und Kettfäden (c) sowie Referenzproben ganz ohne PVDF (nur PET).....	73
Abbildung 4-27: Schematische Darstellung der hergestellten piezoelektrischen FKV-Proben in Querschnittsansicht mit unterschiedlicher Schichtdicke der Funktionsschicht (a-c).....	75

Abbildung 4-28: Schnittbilder des sensorischen Bereichs der Aufbauten a), b) und c) (von links nach rechts) mit eingefärbtem Elektroden- (grün) und PVDF-Garn (gelb).....	75
Abbildung 4-29: Signalstärke der Proben mit unterschiedlichen Dicken der Funktionsschicht .....	76
Abbildung 4-30: Abnahme der Bruchspannung bei Zunahme der PVDF-Schichtdicke von keiner PVDF-Gewebelage (Referenz) bis drei Lagen (Aufbau c) mit Trendlinie .....	77
Abbildung 4-31: Schematische Darstellung der hergestellten piezoelektrischen FKV-Proben in Querschnittsansicht .....	79
Abbildung 4-32: Nahaufnahmen der rechten Wareseite der untersuchten Elektrodenvarianten in Körper 1/3 (von links nach rechts: 10 SFd/cm, 14 SFd/cm und 18 SFd/cm) .....	80
Abbildung 4-33: Zusammenhang von Schussdichte und elektrisch leitfähigem Garnanteil auf der rechten Wareseite des Elektrodengewebes am Beispiel einer Körper-1/3-Bindung (K1/3) mit eingezeichneter Trendlinie.....	80
Abbildung 4-34: Einfluss des elektrisch leitfähigen Flächenanteils der textilen Elektrodenflächen auf die Signalstärke des Sensors mit eingezeichneter Trendlinie .....	81
Abbildung 4-35: Mikroskopische Schnittbildaufnahmen von jeweils zwei in FKV integrierten Verstärkungsgeweben (Leinwand) mit den beiden Extremen an Ausrichtung zueinander .....	82
Abbildung 4-36: Schematische Darstellung der hergestellten piezoelektrischen FKV-Proben in Querschnittsansicht mit textiler Elektrode (a) und Klebelektrode (b).....	83
Abbildung 4-37: Schematische Darstellung von Aufbau b) in der Draufsicht mit Abmessungen .....	84
Abbildung 4-38: Vergleich der Signalstärke polarisierter Proben mit Elektroden aus leitfähigem Garn (Aufbau a) und Elektroden aus Kupferklebeband (Aufbau b) .....	85
Abbildung 4-39: Bruchspannung der Proben mit dem favorisierten textilen Sensoraufbau mit vergleichbaren Proben mit integriertem Sensorbauteil .....	86
Abbildung 5-1: Dornier Mono-Greiferwebmaschine P2 (rechts) mit Horizontalabzug HTO (links) der Mehrlagengewebe.....	89
Abbildung 5-2: Stäubli-Jacquard-Maschine Unival 100 mit Webharnisch für die Übertragung des Fachhubs auf die einzelnen Kettfäden (links) und den Hubaktoren in der Jacquardmaschine (rechts).....	89

Abbildung 5-3:	Stationäres Abrollgatter mit tangentialem Spulenabzug, Spannungsausgleich und mechanisch einstellbarer Fadenspannung .....	90
Abbildung 5-4:	Beispiel für eine dreidimensionale Visualisierung eines Mehrlagenaufbaus (links) und der zugehörigen Schlagpatrone (rechts) .....	91
Abbildung 5-5:	Schussschnitt des schematischen Ausgangsaufbaus: Sieben einzelne übereinanderliegende Gewebelagen ohne Anbindungspunkte und ihre Funktion .....	92
Abbildung 5-6:	Schussrapport und Gesamtschussdichte des Mehrlagengewebes .....	94
Abbildung 5-7:	Schematische Darstellung des sensorischen Mehrlagengewebes .....	95
Abbildung 5-8:	Schematische Darstellung von Basisbereich, Sensorbereich und Kontaktierungsbereich im Schussschnitt .....	96
Abbildung 5-9:	Schematische Schussschnittansicht und dreidimensionale Darstellung der sensorischen Bereiche der mehrlagigen 3D-Gewebestrukturen mit und ohne Anbindung .....	97
Abbildung 5-10:	Rapport des Mehrlagengewebes vor der Konsolidierung zum FKV .....	99
Abbildung 5-11:	Konsolidierter Rapport eines Mehrlagengewebes mit eingezeichnetem Probenumriss .....	99
Abbildung 5-12:	Kontaktierte und polarisierte, mit sensorischem Mehrlagengewebe verstärkte Probe und ihre Abmessungen .....	100
Abbildung 5-13:	Piezoelektrisches Sensorsignal und aufgebrachte Kraft einer Referenzprobe, aufgebaut aus Einzellagen ohne Anbindung .....	102
Abbildung 5-14:	Einzellagen ohne Anbindung: Vergleich der Signalstärke unpolarisiert – polarisiert .....	102
Abbildung 5-15:	Piezoelektrisches Sensorsignal und aufgebrachte Kraft einer Beispielprobe mit „Layer-to-Layer“-Anbindung .....	103
Abbildung 5-16:	Layer-to-Layer“-Anbindung: Vergleich der Signalstärke unpolarisiert – polarisiert .....	104
Abbildung 5-17:	Piezoelektrisches Sensorsignal einer Beispielprobe mit „Through-Thickness“-Anbindung und aufgebrachte Kraft .....	104
Abbildung 5-18:	„Through-Thickness“-Anbindung: Vergleich der Signalstärke unpolarisiert – polarisiert .....	105
Abbildung 5-19:	Röntgenschnitt des sensorischen Bereichs der „Through-Thickness“-Bindung; Elektrodengarn: grün; PVDF-Garn: gelb; Abbindefäden: blau; restliche Verstärkungsfasern: weiß .....	105

Abbildung 5-20: Abhängigkeit des Sensorsignals von Hub und aufgebracht Kraft am Beispiel einer Messung an einer Probe mit "Layer-to- Layer"-Bindung.....	106
Abbildung 5-21: Vergleich der Bruchspannung der beiden Anbindungsvarianten und der Referenz.....	107
Abbildung 5-22: Vergleich der Signalstärken der drei hergestellten Bindungen....	108
Abbildung 6-1: Schematische Beispieldarstellung von einem Biegebalken mit integrierten piezoelektrischen Sensoren und deren Sensorsignal .....	112
Abbildung 6-2: Darstellung eines gelagerten Balkens und dessen Deformation (grün) durch eine einwirkende Kraft F (i. A. a. [106]).....	112
Abbildung 6-3: Schematische Darstellung des sensorischen Mehrlagengewebes.....	113
Abbildung 6-4: Kontaktierte und polarisierte, mit sensorischem Mehrlagengewebe verstärkte Probe und ihre Abmessungen.....	114
Abbildung 6-5: Belastungsfall 1: Mittige Belastung zwischen den Auflagern, je zwei Sensoren zwischen Druckfinne und Auflager.....	115
Abbildung 6-6: Belastungsfall 2: Belastung außerhalb der Mitte zwischen den Auflagern, vier Sensoren links zwischen Druckfinne und Auflager.....	115
Abbildung 6-7: In die dynamische Prüfmaschine eingelegte sensorische Probe mit vier Sensoren.....	116
Abbildung 6-8: Schematische Darstellung einer senkrecht zur Längsachse belasteten FKV-Probe.....	118
Abbildung 6-9: Schematische Darstellung des 2D-Modells des Biegebalkens ...	118
Abbildung 6-10: Am in Abbildung 6-9 eingezeichneten Schnittpunkt $s_1$ geschnittener Balken mit äußeren und inneren Kräften .....	119
Abbildung 6-11: Schematischer Verlauf von Querkraft und Biegemoment am Biegebalken .....	120
Abbildung 6-12: Spannungsverteilung im Balkenquerschnitt (i. A. a. [108]).....	121
Abbildung 6-13: Sensorsignale der einzelnen Sensoren einer exemplarischen Probe unter dynamischer Belastung im Belastungsfall 1 .....	122
Abbildung 6-14: Darstellung des modellierten Biegespannungsverlaufs (rot) und der durchschnittlichen Schwingweiten der Sensorsignale (blau) im Belastungsfall 1 .....	123
Abbildung 6-15: Sensorsignale der einzelnen Sensoren einer exemplarischen Probe unter dynamischer Belastung im Belastungsfall 2 .....	124

Abbildung 6-16: Darstellung des modellierten Biegespannungsverlaufs (rot) und der durchschnittlichen Schwingweiten der Sensorsignale (blau) im Belastungsfall 2 ..... 124



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der beschriebenen Sensorprinzipien zur Erfassung von Drücken bzw. Kräften [75, 76, 77] .....	21
Tabelle 2:	Übersicht ausgewählter Kennwerte und Eigenschaften der genannten piezoelektrischen Materialien [75, 76, 79, 84, 85, 86, 87] .....	29
Tabelle 3:	Verwendete Garnmaterialien.....	46
Tabelle 4:	Weblayout der hergestellten Gewebe für die Untersuchungen zum Sensorprinzip (vgl. Abbildung 4-3) .....	48
Tabelle 5:	Schnittbilder der drei verschiedenen Sensorvarianten .....	50
Tabelle 6:	Weblayout der hergestellten Gewebe für die Untersuchungen zur Sensorlage im Bauteil auf die Sensoreigenschaften (vgl. Abbildung 4-18).....	64
Tabelle 7:	Layout der hergestellten Gewebe für die Untersuchungen zum Einfluss der Faserorientierung der Funktionsschicht auf die Sensoreigenschaften (vgl. Abbildung 4-24) .....	70
Tabelle 8:	Layout der hergestellten Gewebe für die Untersuchungen zur Schichtdicke der Funktionsschicht auf die Sensoreigenschaften (vgl. Abbildung 4-27) .....	74
Tabelle 9:	Weblayout der hergestellten Gewebe zur Untersuchung des Einflusses der Bindung der gewebten Elektrode auf die Sensoreigenschaften (vgl. Abbildung 4-31) .....	79
Tabelle 10:	Weblayout der hergestellten Gewebe (vgl. Abbildung 4-36) .....	83
Tabelle 11:	Garnmaterialien, Fadendichten und Bindungen der einzelnen Lagen .....	93
Tabelle 12:	Schussmaterial und Bindungen in den einzelnen Lagen der unterschiedlichen Bereiche .....	96
Tabelle 13:	Prüfparameter im dynamischen Dreipunktbiegeversuch.....	101
Tabelle 14:	Prüfparameter der beiden Belastungsfälle im dynamischen Dreipunktbiegeversuch .....	116
Tabelle 15:	Durchschnitt der gemessenen Kapazität ( $\emptyset C$ ) und die Standardabweichungen ( $\sigma$ ) zu Abbildung 4-9 .....	143
Tabelle 16:	Durchschnittliche Schwingweite ( $\emptyset \Delta$ Ladung) der Sensorsignale und Standardabweichung der unpolarisierten und polarisierten Proben aus Abbildung 4-15 .....	143
Tabelle 17:	Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-16.....	143

Tabelle 18:	Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-20 .....	144
Tabelle 19:	Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-23.....	144
Tabelle 20:	Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-25 .....	144
Tabelle 21:	Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-26.....	145
Tabelle 22:	Polarisationsparameter der untersuchten Proben mit unterschiedlichem Elektrodenabstand aus Kapitel 4.2.3 .....	145
Tabelle 23:	Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-29 .....	145
Tabelle 24:	Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-30in Kapitel 4.2.3 .....	146
Tabelle 25:	Daten der Diagramme in Abbildung 4-33 und Abbildung 4-34 ....	146
Tabelle 26:	Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-38 .....	146
Tabelle 27:	Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-39.....	147
Tabelle 28:	Polarisationsparameter der untersuchten Proben mit unterschiedlichem Elektrodenabstand aus Kapitel 5.1 .....	147
Tabelle 29:	Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der unpolarisierten und polarisierten Proben aus Abbildung 5-14.....	147
Tabelle 30:	Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der unpolarisierten und polarisierten Proben aus Abbildung 5-16.....	148
Tabelle 31:	Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der unpolarisierten und polarisierten Proben aus Abbildung 5-18.....	148
Tabelle 32:	Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 5-21.....	148
Tabelle 33:	Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 5-22 .....	148
Tabelle 34:	Durchschnittliche Schwingweite der Signale der einzelnen Sensoren und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 6-14.....	149

Tabelle 35: Durchschnittliche Schwingweite der Signale der einzelnen Sensoren und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 6-16..... 149



## Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$\Delta$		Schwingweite des Messsignals (doppelte Amplitude)
$\epsilon_0$	$(A\ s)\ (V\ m)^{-1}$	elektrische Feldkonstante $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}\ (A\ s)\ (V\ m)^{-1}$
$\epsilon_r$	$(A\ s)\ (V\ m)^{-1}$	Permittivitätszahl; Dielektrizitätszahl
$\epsilon_M$		mechanische Dehnung
$\Theta$	°	Auslenkungswinkel
$\sigma$		Standardabweichung
$\sigma_B$	$N\ mm^{-2}$	Biegespannung
$\sigma_D$	$N\ mm^{-2}$	Biegedruckspannung
$\sigma_M$	$N\ mm^{-2}$	mechanische (Zug-)Spannung
$\sigma_Z$	$N\ mm^{-2}$	Biegezugspannung
$\Phi$	V	Elektrisches Potential
$\rho$	$\Omega\ mm^2\ m^{-1}$	spezifischer Widerstand
$\rho$	$kg\ m^{-3}$	Dichte
$\tau$	$N\ mm^{-2}$	Querschubspannung
A	N	Lagerkraft
A	$m^2$	Fläche
B	N	Lagerkraft
$b^*$	mm	Breite
C	F	Kapazität
d	m	Abstand
$d_P$	m	Elektrodenabstand bei der Polarisierung
$d_P$	$C\ N^{-1}$	piezoelektrischer Koeffizient
$d_{ij}$	$C\ N^{-1}$	piezoelektrischer Koeffizient (richtungsabhängig)
$\underline{d}$		piezoelektrischer Tensor
D	N	Druckkraft
E	$V\ m^{-1}$	elektrische Feldstärke
$E_P$	$V\ m^{-1}$	Polarisationsfeldstärke
F	N	Kraft
$\vec{F}$		Kraftvektor
h	mm	Höhe
I	$mm^4$	Flächenträgheitsmoment
$k_{ij}$		elektromechanischer Kopplungsfaktor
l	m	Länge
M	$N\ m$	Moment
$\vec{n}$		Oberflächennormale
p	Pa	Druck

P	$A s m^{-1}$	elektrische Polarisation
$\vec{P}$		Polarisationsvektor
Q	C	elektrische Ladung
Q	N	Querkraft
R	$\Omega$	elektrischer Widerstand
t	s	Zeit
t <sub>AH</sub>	s	Aufheizphase
t <sub>AK</sub>	s	Abkühlphase
t <sub>P</sub>	s	Polarisationszeit
t <sub>v</sub>	s	Vorlaufzeit
T	°C	Temperatur
T <sub>C</sub>	°C	Curie-Temperatur
T <sub>P</sub>	°C	Polarisationstemperatur
T <sub>R</sub>	°C	Raumtemperatur
T <sub>S</sub>	°C	Schmelzpunkt
U	V	Elektrische Spannung
U <sub>P</sub>	V	Polarisationsspannung
W	$N m$	Widerstandsmoment
W <sub>el</sub>	J	elektrische Arbeit
W <sub>mech</sub>	J	mechanische Arbeit
Z	N	Zugkraft
Ø		Durchschnitt

## Abkürzungen

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
A	Atlasbindung
AU	Willkürliche Einheit (Arbitrary Unit)
BTO	Bariumtitanat
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CFY	Carbon-Filament-Garn (Carbon-Filament-Yarn)
CNT	Carbon-Nanotube
CT	Computertomograph
DMS	Dehnungsmessstreifen
EKG	Elektrokardiographie
FBG	Fiber-Optic Bragg Grating
FKV	Faser-Kunststoff-Verbunde
FRP	fiber-reinforced plastic
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
K	Köperbindung
KFd	Kettfaden
L	Leinwandbindung
LED	Leuchtdiode (light emitting diode)
NDT	non-destructive testing (zerstörungsfreie Werkstoffprüfung)
OPM	Online Process Monitoring
PA 6.6	Polyamid 6.6
PEEK	Poly-Ether-Keton
PET	Polyethylenterephthalat/Polyester
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
Q <sup>+</sup>	Positiver Ladungsschwerpunkt
Q <sup>-</sup>	Negativer Ladungsschwerpunkt
RTM	Resin Transfer Moulding
SD	Schussdichte
SFd	Schussfaden
SHM	Structural Health Monitoring
VAP <sup>®</sup>	Vacuum Assisted Process
Z	Symmetriezentrum
ZfP	Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung



## Zusammenfassung

Eine Form der Beschädigung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) ist die Delamination. Diese Beschädigung ist durch konventionelle, visuelle Prüfung oft nicht zu erkennen. Methoden, wie das zyklische Austauschen der Bauteile oder regelmäßige Inspektionen, sind zeitaufwendig und vor allem teuer. Daher soll in Zukunft Sensorik direkt in solche Bauteile integriert werden, um die Beanspruchung oder den Zustand der Bauteile kontinuierlich im Betrieb zu überwachen (*Condition Monitoring* bzw. *Structural Health Monitoring*). Herkömmliche, elektronische Sensorbauteile, integriert in einem FKV, stellen allerdings einen Fremdkörper in der textilen Verstärkungsstruktur dar und bilden daher eine mechanische Schwachstelle.

Gleichzeitig gewinnen dreidimensionale Mehrlagengewebe als textile Verstärkung im FKV aus mechanischen, aber auch wirtschaftlichen Gründen immer mehr an Bedeutung. Diese Arbeit beschreibt daher die Entwicklung und Charakterisierung einer piezoelektrischen Biegesensorik auf Mehrlagengewebebasis als Teil der gewebten Verstärkungsstruktur von FKV. Weil die Verstärkungsstruktur an sich als Sensor fungiert, entstehen durch diese Sensorik keine negativen Einflüsse auf die mechanischen Bauteileigenschaften durch Fehlstellen in der textilen Grundstruktur.

Durch grundlegende Analysen zu Sensorprinzip und Sensoraufbau wird eine Methode entwickelt, wie textile Mehrlagenstrukturen partiell sensorisch ausgerüstet werden können. Die piezoelektrische Gewebestruktur wird auf eine möglichst gute sensorische Charakteristik bei möglichst geringem Einfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften hin entwickelt und optimiert. Die gewonnenen Erkenntnisse werden dann an verschiedenen Mehrlagengewebebestrukturen umgesetzt, analysiert und verifiziert. Abschließend werden die Sensorsignale der gewebten Piezoelemente an einem mechanischen Berechnungsmodell validiert: Vom Signal der sensorischen Gewebestruktur kann direkt auf die Bauteilbeanspruchung geschlossen werden.

Durch die entwickelte textile Sensortechnologie wird eine kontinuierliche Überwachung von dynamisch belasteten Bauteilen während des Betriebs ermöglicht. So können bspw. künftig mit Hilfe der Sensorik aus einer piezoelektrischen Mehrlagengewebebestruktur eine mögliche Überlast während des Betriebs erkannt, eventuelle Beschädigungen vermieden bzw. detektiert und damit Wartungs-, Reparatur- und Stillstandkosten erheblich reduziert werden.



## **Abstract**

Delamination is one type of failure of fiber-reinforced plastic (FRP) composites. This degradation is often not detectable by conventional, visual inspection. Methods such as the cyclical replacement of components or periodic inspections are time-consuming and, in particular, expensive. Therefore, in future, sensors will be integrated directly into such components in order to continuously monitor the strain or condition of the components during operation (condition monitoring or structural health monitoring). However, conventional electronic sensor components integrated in an FRP represent a foreign object in the textile reinforcement structure and thus create a mechanical weak point.

In parallel, three-dimensional multilayer woven fabrics are gaining more and more importance as textile reinforcements in FRP due to mechanical but also economic reasons. Thus, this work describes the development and characterization of a multilayer woven piezoelectric bending sensor system as part of the woven reinforcement structure of FRP. As the reinforcing structure itself serves as a sensor, this sensor technology avoids negative influences on the mechanical properties of the component caused by faults in the textile structure.

Initially, fundamental investigations on the sensor principle and sensor structure are carried out to develop a technology for partially sensory textile multilayer structures. The piezoelectric woven structure is designed and engineered to achieve an optimum in sensory characteristics with minimal influence on the mechanical properties of the component. The findings obtained are then implemented and verified on different multilayer woven structures. Finally, the sensor signals of the woven piezo elements are successfully validated using a mechanical calculation model: The signal of the sensory fabric structure provides a direct correlation to the component strain.

The developed textile sensor technology enables continuous monitoring of dynamically loaded components during operation. In future, the sensor technology based on a piezoelectric multilayer fabric structure can, e.g., detect a possible overload during operation, prevent or detect possible damage and thus significantly reduce maintenance, repair and machine downtime costs.



# 1 Einleitung und Motivation

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt und erforscht, mithilfe derer eine textile Verstärkungsstruktur auf Mehrlagengewebebasis durch minimale Modifikation als Sensor zur kontinuierlichen Bauteilüberwachung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) verwendet werden kann. Die Zielsetzung ist hierbei, dass diese geringfügige Modifikation der Verstärkungsstruktur möglichst ohne negative Einflüsse auf die mechanischen Bauteileigenschaften des FKV einhergeht. Gleichzeitig soll ein möglichst starkes Sensorsignal erzielt werden. Die Signale der strukturell an sensorischen Mehrlagengeweben umgesetzten und validierten Methode werden schließlich an einem mechanischen Berechnungsmodell verifiziert.

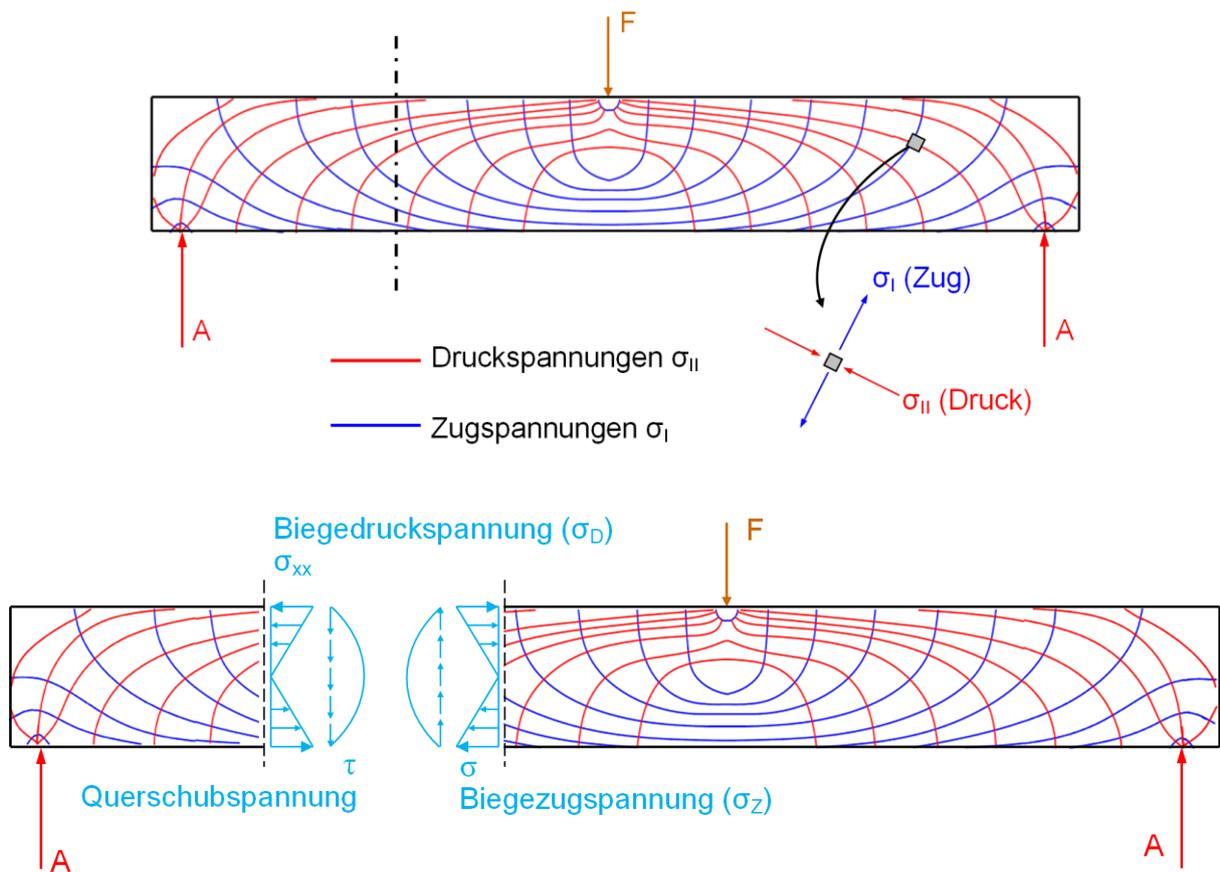
## **Faser-Kunststoff-Verbunde allgemein**

Faser-Kunststoff-Verbunde bieten durch ihre Struktur und Materialkombination ein hohes Leichtbaupotential. Daher ist dieser Werkstoff in vielen Bereichen der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt, aber auch im Maschinen- und Anlagenbau unverzichtbar.

Üblicherweise wird ein solcher Faserverbundwerkstoff gebildet, indem eine oder mehrere Lagen Fasergewebe, Fasergelege oder andere textile Flächengebilde aus Verstärkungsfasern mit einer Kunststoffmatrix verbunden werden. Die mechanischen Eigenschaften lassen sich durch eine geeignete Kombination aus Verstärkungsfasern und Kunststoffmatrix sowie durch deren Faserorientierung und dem Faservolumenanteil gezielt einstellen. Dabei umschließt die Matrix die Verstärkungsfasern und fixiert diese nach der Aushärtung. Idealerweise werden dabei die Fasern nach der (Haupt-) Spannungsrichtung ausgerichtet, damit diese die Belastung aufnehmen und weiterleiten. So werden die mechanischen Eigenschaften der Verstärkungsfasern in hohem Maß lastflussgerecht nutzbar.

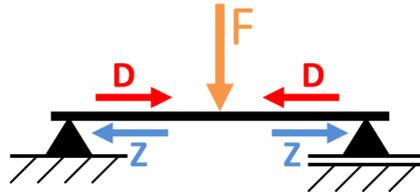
Am Beispiel des statisch bestimmten Biegebalkens funktioniert die Faserverstärkung folgendermaßen: Äußere Kräfte (Belastungen) erzeugen innere Kräfte bzw. Spannungen (Beanspruchungen). In Abbildung 1-1 sind diese durch die Hauptspannungstrajektorien (Linien der Hauptspannungsrichtungen) dargestellt. In Bereichen, in denen

die Querbeanspruchung gleich Null ist, verlaufen diese Linien parallel zur Bauteilachse.



**Abbildung 1-1: Hauptspannungstrajektorien bei Querbelastung (oben); Biege- und Schubspannungen am geschnittenen Balken unten (i. A. a. [1])**

Aber auch in den anderen Bereichen können diese Hauptspannungen umgerechnet werden in Biegespannungen, die parallel zur Bauteilachse verlaufen und in dazu senkrecht verlaufende Spannungen, die gewöhnlich nach der Euler-Bernoulli-Theorie vernachlässigt werden (vgl. Kapitel 6.3), sowie in Schubspannungen (Mohr'scher Spannungskreis) [1]. Die Biegedruck- und Biegezugspannungen können jeweils zu Spannungsergebnissen zusammengefasst werden [2] ( $D$ ,  $Z$  in Abbildung 1-2). Vereinfacht ausgedrückt wirken also oberhalb der neutralen Faser vorwiegend Druck- und unterhalb vorwiegend Zugspannungen, die weitgehend parallel zur Bauteilachse verlaufen. Das bedeutet, die den Kunststoff verstärkenden, kraftaufnehmenden Fasern sollten im Falle des statisch bestimmten Biegebalkens belastungsgerecht nach dessen Bauteilachse ausgerichtet werden.



**Abbildung 1-2: Vereinfachte Darstellung der aus einer äußeren Kraft (F) resultierenden inneren Kräfte (D, Z) am statisch bestimmten Biegebalken**

Mögliche Faserverstärkungen können anorganische Fasern, wie Basaltfasern, Glasfasern oder Kohlenstofffasern sein. Aber auch organische Fasern, z. B. aus Aramid, können ebenso wie Naturfasern verwendet werden. Wichtigste Verstärkungsfasern im Bereich der FKV sind Glas- und Kohlenstofffasern. Damit sind die wichtigste Materialgruppe innerhalb der FKV die glasfaserverstärkten und die kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe (GFK und CFK). Als Matrixmaterial kommen im Bereich der faserverstärkten Kunststoffe vor allem Duomere, wie z. B. Epoxidharze, aber auch Thermoplaste zum Einsatz. [3, 4]

### **Mehrlagengewebestrukturen in Faser-Kunststoff-Verbunden**

Bei richtiger Faserausrichtung lassen sich zwar auch bei aus mehreren Einzellagen von 2D-Geweben oder Gelegen gebildeten FKV gute mechanische Eigenschaften in die Flächenrichtungen erreichen, in Dickenrichtung ist dieser Aufbau dagegen wenig belastbar. Durch spezielle Mehrlagengewebestrukturen lässt sich eine höhere Festigkeit und Steifigkeit in Dickenrichtung erreichen sowie die interlaminae Scherfestigkeit erhöhen. Durch geeignete Mehrlagengewebe wird zudem eine höhere Verschiebefestigkeit der einzelnen Lagen zueinander erreicht. Dadurch werden auch andere mechanische Eigenschaften, wie die Beständigkeit gegen Delamination, die Aufprallbeständigkeit sowie die Energieabsorption bei Impact- und Crash-Beanspruchungen, deutlich verbessert. [5, 6, 7]

Mehrlagengewebe ermöglichen vielfältige Designvariationen und die Verwendung verschiedener Faden- und Bindungsarten in verschiedenen Bereichen des Querschnitts und der Länge des Gewebes. Des Weiteren ist es möglich, den Querschnitt und die Breite durch Hinzufügen und Weglassen von Fäden zu ändern. Die Eigenschaften eines Mehrlagengewebes ähneln eher einer Struktur als einem homogenen Material, da zusätzlich die mechanischen Eigenschaften in verschiedenen Bereichen unterschiedlich sein und anforderungsgerecht eingestellt werden können. [3, 8]

So kann ein 3D-Gewebe bspw. gleich der Bauteil-Endgestalt ähnlich hergestellt werden. Durch die Möglichkeit der endkonturnahen Herstellung der Gewebestruktur können Mehrlagengewebe direkt als Preform genutzt werden. Es entfallen die zeitaufwendigen Arbeitsschritte des Lagen-Zuschneidens, Drapierens und Zusammenlegens

sowie der Arbeitsaufwand durch aufwendiges Ausrichten einzelner Lagen. Zudem fällt weniger Materialabfall durch deren Zuschnitt an. [8]

Bei Bindungsstrukturen mehrlagiger 3D-Geweben wird vor allem zwischen der Anzahl an Faden- bzw. Gewebelagen, die durch die Bindefäden miteinander fixiert werden differenziert. Grundsätzlich kann dies dadurch geschehen, dass die Bindefäden von der obersten bis zur untersten Faden- bzw. Gewebelage und andersherum verlaufen. Hier spricht man von einer „Through-Thickness“-Bindung. Bindet die eine Fadenlage jeweils mit einer benachbarten Fadenlage ab, so bezeichnet man dies als „Layer-to-Layer“-Bindung. [8, 9, 10, 11, 12]

Aufgrund ihrer mechanischen und wirtschaftlichen Vorteile gewinnen dreidimensionale Gewebearchitekturen als Verstärkungsstrukturen bei FKV immer mehr an Bedeutung. FKV-Bauteile mit dreidimensionalen Gewebestrukturen als Verstärkung werden bereits in verschiedenen Bereichen erfolgreich in der Serienproduktion eingesetzt. So besitzt der Supersportwagen Lexus LFA von Toyota eine vordere Crashbox aus einem 3D-Gewebeverbund [13]. In der stark von Gewichtseinsparungen getriebenen Luftfahrtindustrie werden mittlerweile auch hochbelastete und sicherheitsrelevante Bauteile, wie die äußeren Turbinenschaufeln, aus 3D-Gewebestrukturen hergestellt. Das von CFM International für den Airbus A320neo, die Boeing 737 MAX und die Comac C919 entwickelte LEAP-Triebwerk besitzt neben verschiedenen anderen Bauteilen auch Schaufeln mit 3D-Geweben aus Keramikfasern als textile Verstärkungsstruktur [14].

Darüber hinaus ermöglichen Mehrlagengewebe, sensorische Strukturen, wie Sensorgarne oder -fasern, direkt in die Verstärkungs-Preform zu integrieren und so definiert zu positionieren [15].

### **Vorteile und Probleme von Faser-Kunststoff-Verbunden**

Durch eine Faserorientierung in Richtung der Beanspruchung kann bei FKV im Vergleich zu Stahl eine höhere Festigkeit und Steifigkeit trotz geringeren Gewichts erreicht werden. Diese mechanischen Eigenschaften können auf die auftretenden Lastpfade angepasst werden und ermöglichen so eine belastungsoptimierte Bauteilgestaltung. FKV haben den Vorteil einer hohen Schwingungs- und Dauerfestigkeit. Daher haben sich diese Werkstoffe in Bereichen wie der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie oder der Bauindustrie (z. B. Windkraftanlagen) durchgesetzt. [3, 16]

Allerdings birgt der Einsatz von FKV die Gefahr der Delamination von Fasermaterial und Matrixwerkstoff, d. h. des Herauslösen der Verstärkungsfasern aus dem Kunststoff. Dies geschieht in der Regel im Innern des Bauteils und ist durch konventionelle,

visuelle Prüfung nicht erkennbar. Durch die normale Betriebslast wächst diese Schwachstelle an und führt zu einem frühzeitigen Bauteilversagen.

Die Rotorblätter von Windenergieanlagen, beispielsweise, erreichen heute Längen von weit über 60 m. Das Design der Blätter wird immer weiter optimiert, um Kosten und Gewicht zu sparen und die Effizienz zu steigern. Immer wieder kommt es vor, dass Rotorblätter während des Betriebs strukturelle Schäden aufweisen, z. B. durch einen Vogelschlag oder durch die wechselnde Windbelastung. Aber auch während des Herstellungsprozesses können Fehler bzw. Mängel entstehen, die dann im Betrieb zu einem vorzeitigen, abrupten Bauteilversagen führen können.

### **Ausgangssituation**

Die Sicherheit solcher dynamisch belasteten Bauteile wird daher bisher vor allem durch folgende Maßnahmen gewährleistet:

- *Sicherheitszugaben bei der Bauteildimensionierung*

Eine Möglichkeit ist, dass sicherheitsrelevante Bauteile überdimensioniert werden. Eine Überdimensionierung von Bauteilen verursacht allerdings nicht nur mehr Materialkosten, sie bedeutet auch ein Mehrgewicht und widerspricht damit dem Leichtbaugedanken, der die Entwicklung von FKV antreibt.

- *regelmäßige Inspektionen*

Eine andere Möglichkeit ist, dass sicherheitsrelevante Bauteile oder Baugruppen regelmäßigen Inspektionen unterzogen werden müssen. Das heißt aber in der Regel, dass die Maschine während der Wartung steht und nicht genutzt werden kann. Zum Einsatz kommen zerstörungsfreie Werkstoffprüfmethoden (ZfP bzw. NDT: non-destructive testing). Hinzu kommt, dass für die Untersuchung teure Geräte, wie Ultraschall- oder Röntgengeräte, und geschultes Personal benötigt werden.

- *zyklischer Austausch von sicherheitsrelevanten Baugruppen und Verschleißteilen*

Eine weitere Maßnahme zur Gewährleistung der Sicherheit ist der zyklische Austausch von sicherheitsrelevanten Baugruppen und Verschleißteilen. Das heißt, die Teile werden nach einer bestimmten Betriebszeit ausgetauscht. Weil hier aber die tatsächliche Beanspruchung oft nicht bekannt ist, sind große Sicherheitsfaktoren notwendig und der Austausch geschieht i. d. R. viel früher als eigentlich notwendig.

All diese Maßnahmen verursachen zusätzliche Kosten. Daher geht der Trend im Bereich der sicherheitsrelevanten Faserverbundbauteile zur kontinuierlichen Bauteilüberwachung, auch Structural Health Monitoring (SHM) oder Condition Monitoring genannt. Künftig soll daher die erforderliche Sensorik extern auf das Bauteil appliziert bzw. in dieses integriert werden (Leichtbau durch Funktionsintegration). Schäden

können so rechtzeitig erkannt bzw. die tatsächliche Beanspruchung des Bauteils erfasst werden.

Durch eine kontinuierliche Bauteilüberwachung während des Betriebs ergeben sich folgende, vor allem wirtschaftliche Vorteile [17]:

- Verlängerung der Wartungszyklen und Verringerung der Wartungszeiten,
- Übergang von zeitabhängiger zu zustandsabhängiger Wartung,
- Verringerung des Sicherheitsfaktors und somit Reduzierung des Bauteilgewichts,
- Verlängerung der Gesamteinsatzzeit bzw. der Lebensdauer überwachter Systeme.

Der Schwerpunkt der Entwicklungen im Rahmen dieser Arbeit liegt auf dem Condition Monitoring (vgl. Kapitel 2), d. h. der kontinuierlichen Überwachung der Bauteilbelastung. Denn ist die tatsächliche Belastung eines Bauteils bekannt, lassen sich Wartungszeiten individuell und nach Bedarf gestalten. Darüber hinaus lassen sich durch eine kontinuierliche Erfassung der Belastung auf ein Bauteil mögliche Überlastfälle erkennen und umgehend geeignete Maßnahmen (wie z. B. Maschinenstopp) einleiten. Sicherheitsfaktoren bei der Bauteilauslegung oder bei der Länge der vorgeschriebenen Wartungsintervalle werden so verringert oder gar obsolet.

Diese Arbeit legt zudem den Schwerpunkt auf biegebeanspruchte Bauteile, wobei die Sensoren auch zur Erfassung von Impact-Belastungen oder zum Erkennen von Schäden geeignet sind.

## 2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft und Technik

Aufgrund der in Kapitel 1 geschilderten Vorteile einer kontinuierlichen Bauteilüberwachung gibt es bereits einige Anstrengungen FKV mit sensorischen Funktionen auszustatten. Die Intention dabei ist die Überwachung des Bauteilzustands „online“ im Betrieb, aber auch während des Herstellungsprozesses. Die überwachende Sensorik kann verschiedene Zwecke erfüllen (siehe Abbildung 2-1): Unterschieden werden die Prozessüberwachung (Online Process Monitoring (OPM)) während der Herstellung und das Structural Health Monitoring (SHM) sowie das Condition Monitoring (Zustandsüberwachung) während des Betriebs.

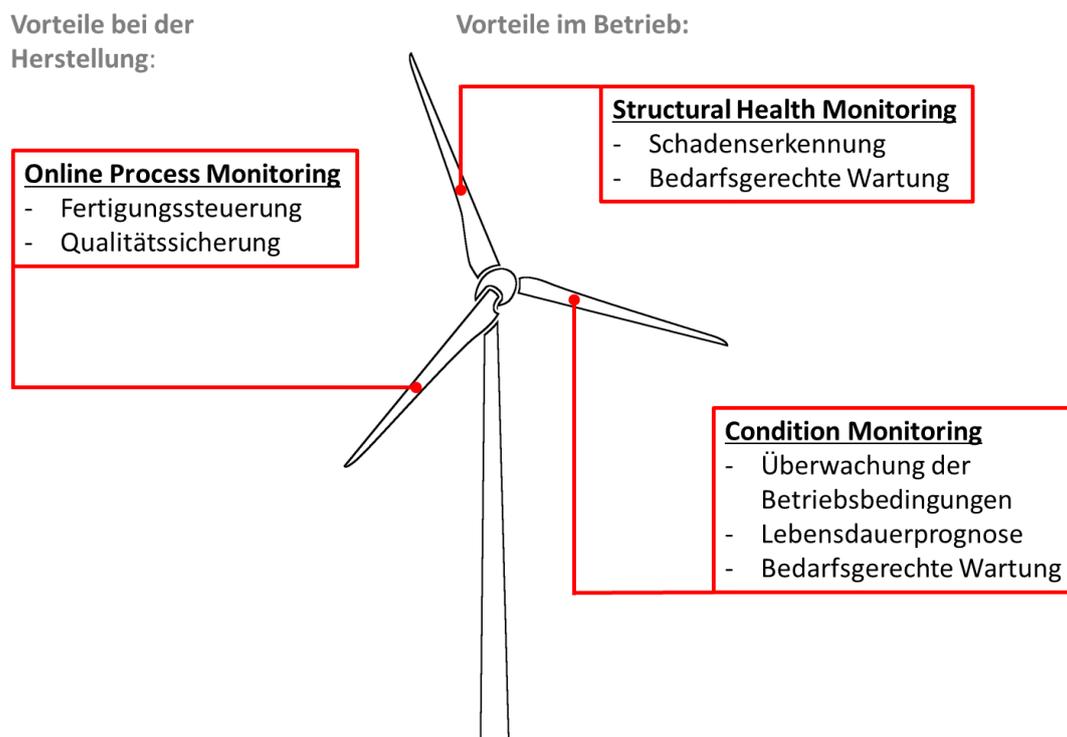
Herstellungsverfahren von FKV reagieren hochsensibel auf eine Vielzahl von Prozess- und Umgebungsparametern. So unterliegt die Qualität des Bauteils infolge der Konsolidierungsbedingungen diversen Schwankungen. Durch *OPM* lässt sich z. B. der Vorgang der Aushärtung des Matrixmaterials im laufenden Prozess überwachen und steuern. Durch die Einhaltung konstanter Infiltrations- und Konsolidierungsbedingungen wird eine gleichbleibende Qualität erreicht. Gleichzeitig lassen sich die Prozesszeiten minimieren. Nur so kann die Prozessstabilität, die Qualität und somit auch die Sicherheit in späteren Anwendungen gewährleistet und verbessert werden. [18, 19]

Beim *SHM* handelt es sich um die Schadenserkennung in Echtzeit während des Betriebs an oder in Bauteilen durch angebrachte oder integrierte Sensorik. Durch das sofortige Erfassen auch kleiner Beschädigungen, wie Delaminationskeime oder feine Risse, lassen sich die Stillstandzeiten durch eine bedarfsgerechte Instandsetzung reduzieren und katastrophale Havarien ganzer Anlagen vermeiden. [18]

Unter *Condition Monitoring* (auch Usage Monitoring) versteht man eine kontinuierliche Zustandsüberwachung einer Anlage oder einzelner Bauteile während des Betriebs durch Analyse physikalischer Größen, wie z. B. Schwingungen oder einwirkende Kräfte. Ziel ist neben der Steigerung der Betriebssicherheit auch die Steigerung der Maschineneffizienz. Weil die genauen Betriebsbedingungen bekannt sind, können Stillstandzeiten durch eine zustandsabhängige statt einer präventiven oder gar reaktiven Wartung reduziert werden. Darüber hinaus können mögliche Überlastfälle

rechtzeitig erkannt und geeignete Maßnahmen, wie z. B. ein Maschinenstopp, eingeleitet und so ggf. mögliche Beschädigungen vermieden werden. [18]

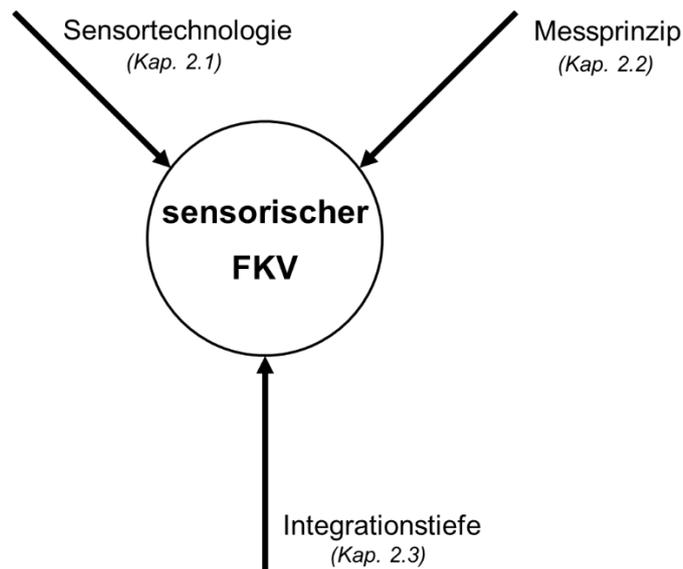
Alle drei Maßnahmen erhöhen die Betriebssicherheit der überwachten Bauteile. Beim OPM werden durch die Überwachung des Herstellungsprozesses herstellungsbedingte Fehler möglichst vermieden, die später zu einem (vorzeitigen) Bauteilversagen führen können. Zielsetzung des SHM ist es entstandene Schäden im Material rechtzeitig zu erkennen und die des Condition Monitoring durch Analyse der Betriebsbedingungen Beschädigungen gar zu vermeiden.



**Abbildung 2-1: Abgrenzung verschiedener Arten der Bauteilüberwachung**

Diese Arbeit legt den Schwerpunkt auf die Erforschung und Entwicklung einer textilen, bauteilintegrierten Sensorik zur Erfassung der Biegebelastung von Faserverbundwerkstoffen. Die sensorische FKV-Struktur ist dabei im Wesentlichen abhängig von drei Einflussgrößen (vgl. Abbildung 2-2). Zum einen ist das die Sensortechnologie und die damit verbundenen Integrationsmöglichkeiten der Sensoren in den FKV (vgl. Kapitel 2.1). Ein maßgeblicher Einflussfaktor auf das sensorische FKV-Bauteil ist das eingesetzte Sensorprinzip bzw. Messverfahren (vgl. Kapitel 2.2). Darüber hinaus ist für die Messqualität und die mechanischen Bauteileigenschaften die Integrationstiefe der Sensorik in die verstärkende Textilstruktur entscheidend, d. h. wie das Verstärkungstextil mit den sensorischen Eigenschaften „funktionalisiert“ wird (vgl. Kapitel 2.3).

In diesem Kapitel wird daher zunächst der Stand der Wissenschaft und Technik zum Thema Technologien und Integrationsmöglichkeiten von Sensorik in FKV zur kontinuierlichen Bauteilüberwachung erörtert (Kapitel 2.1) und gängige Messverfahren zur elektrischen Erfassung von Kräften bzw. Drücken grundlegend beschrieben (Kapitel 2.2), bevor dann auf die verschiedenen „Integrationsstiefen“ der elektrotechnischen Funktionalisierung von Textilien eingegangen wird (Kapitel 2.3).



**Abbildung 2-2: Einflussfaktoren auf die Umsetzung sensorischer FKV**

## **2.1 Sensortechnologien zur Zustandsüberwachung und deren Integrationsmöglichkeiten in Faser-Kunststoff-Verbunde**

Die zuvor beschriebenen Methoden der kontinuierlichen Bauteilüberwachung kommen aufgrund der in Kapitel 1 erläuterten Probleme insbesondere für Bauteile aus FKV in Frage. Daher gibt es einen breitgefächerten Stand der Technik zu sensorisch überwachten FKV. Entscheidend für die Aussagequalität der erfassten Größen ist neben der Sensortechnologie die Art und Weise, wie der Sensor an bzw. in das Bauteil an- bzw. eingebracht ist. Die Möglichkeiten, wie ein Bauteil mit einer sensorischen Funktion ausgestattet werden kann, sind zumeist direkt von der Sensortechnologie abhängig. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die verschiedenen Integrationsmöglichkeiten von unterschiedlicher Sensorik zur kontinuierlichen Bauteilüberwachung in FKV und gliedern diese.

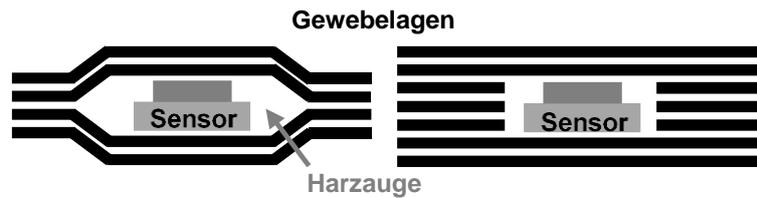
Stand der Technik ist es, Sensoren zur Bauteilüberwachung auf der Bauteiloberfläche anzubringen, also die Applikation, z. B. durch Aufkleben, von Dehnungsmess-

streifen (DMS) [20, 21] (siehe auch Abbildung 2-3) oder Ultraschallsensoren und -aktoren (Piezoelemente) zur Schallemissionsprüfung [22, 23, 24]. Allerdings ist die Applikation von Sensorik nicht überall möglich, z. B. aus Platzgründen, aus aerodynamischen Gründen oder weil die empfindliche Sensorik zu großen Umweltbelastungen ausgesetzt wäre. Außerdem ist es dabei nicht unbedingt möglich, den am meisten beanspruchte Bereich des Bauteils zu überwachen.

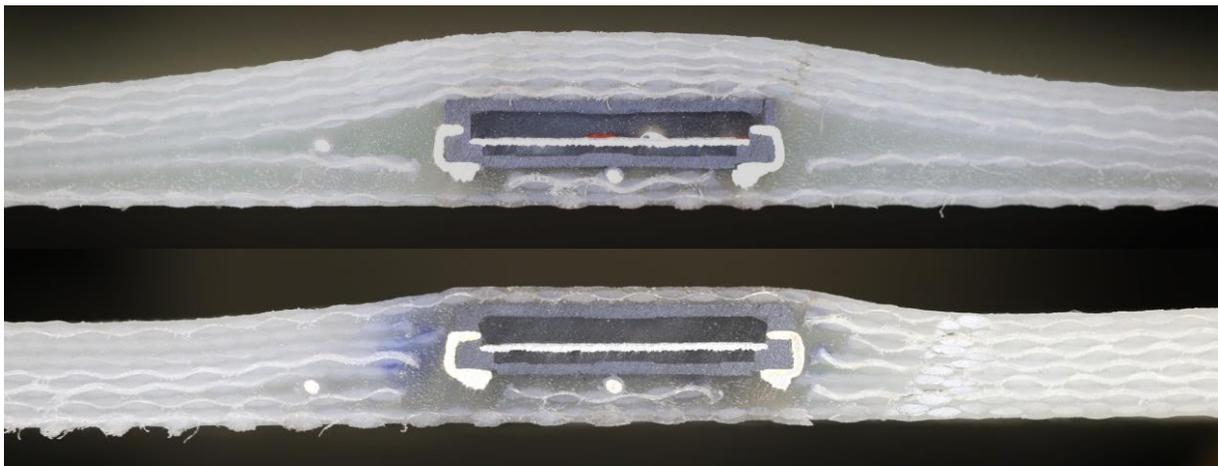


**Abbildung 2-3: Auf einem Prüfkörper aus GFK aufgeklebter DMS**

Daher gibt es Bestrebungen, Sensorik in Form von handelsüblichen, elektronischen Bauteilen, wie Piezoelementen, in die Faserverbund-Komponente zu integrieren (Sensorintegration) [25, 26, 27, 28]. Auch wenn es Bemühungen gibt, diese Sensoren so klein und flexibel wie möglich zu gestalten, werden doch Fremdkörper in die textile Struktur eingefügt, was u. U. Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften des FKV haben kann. Die verstärkenden Fasern werden an der Integrationsstelle entweder umgelenkt oder gar unterbrochen. Durch diese Störung sind die Verstärkungsfasern zum einen nicht mehr optimal in Kraftflussrichtung ausgerichtet (vgl. Kapitel 1) und zum anderen entstehen verstärkungsfaserfreie Bereiche, in denen sich das Matrixmaterial ansammelt, z. B. Harz (Harzaugen oder Harztaschen) (vgl. Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5). Die Materialübergänge stellen zudem Trennflächen dar, an denen Spannungsspitzen entstehen, die zu Schwachstellen im FKV-Bauteil führen. An diesen Stellen können sich bspw. Delaminationskeime bilden. Hinzu kommt, dass bei der Infiltration ein Fremdkörper umströmt wird, wodurch Lunker entstehen können, die sich ebenfalls nachteilig auf die Bauteilfestigkeit auswirken.



**Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Faserorientierung um eine integrierte Sensorkomponente**



**Abbildung 2-5: Schnittbildansicht der Faserorientierung um eine integrierte Sensorkomponente**

Daher gibt es auch Anstrengungen, Sensoren in Form von Folien [26, 29] oder dünnen Filmen [30, 31, 32] zu integrieren. Auch wenn die Faserumlenkung dadurch deutlich geringer ausfällt, bleiben die Materialgrenzflächen kritisch bzw. sind durch die zumeist größere Fläche der Foliensensoren bedingt gar noch kritischer.

FKV werden von Fasern verstärkt. Daher ist es naheliegend neben den verstärkenden Fasern sensorische Fasern zu verwenden oder die verstärkenden Fasern, so einzusetzen, dass diese sensorisch wirken.

Eine verbreitete Methode ist der Einsatz von faseroptischen Sensoren zur Überwachung der Bauteilbeanspruchung (z. B. Fiber-optic Bragg Grating (FBG)) [33, 34, 35]. Dabei werden lichtleitende Fasern in die Faserverbundstruktur integriert, bspw. durch Aufsticken oder Aufnähen auf das Fasergewebe bzw. -gelege [36] oder durch Mitverweben in der textilen Struktur des FKV [16]. Das Messprinzip dieser Sensoren ist, dass das reflektierte Lichtsignal in diesen Fasern durch die durch äußere Einflüsse (z. B. Impact [37], Druck [38] oder Dehnung [36]) hervorgerufene Verformung verändert wird und diese Änderungen erfasst werden [39]. Diese Methode hat jedoch die Nachteile, dass sie zum einen mit hohen Kosten für die Messtechnik verbunden ist, und zum

anderen, dass die optischen Sensorfasern i. d. R. dicker sind, als die sie umgebenden Verstärkungsfasern [40]. Das führt dazu, dass sich das Verstärkungstextil bzw. die Fasern um die Sensorfaser legen müssen. Durch diese Störung sind die Verstärkungsfasern nicht optimal in Krafftflussrichtung ausgerichtet und es entstehen verstärkungsfaserfreie Bereiche, in denen sich das Matrixmaterial ansammelt (vgl. Abbildung 2-6), was zu den bereits erwähnten Problemen führt.

Eine weitere Möglichkeit ist die Integration von piezoresistiven Sensorgarnen, wie Carbon-Filament-Garn (CFY) [15] oder spezielle Kern-Mantel-Garne aus Glas- (im Kern) und Stahlfasern (im Mantel) [41]. Diese Stapelfasergarne sind schwach elektrisch leitend und verändern unter Zugbelastung ihren elektrischen Widerstand. Integriert in einen FKV können so die Zugbelastung erfasst und kritische Belastungsfälle erkannt werden.

Weitere aus dem Stand der Technik bekannte Sensorgarne sind z. B. leitfähig beschichtete Kunststoffgarne, die unter Zugbelastung ihren elektrischen Widerstand ändern. In [42] wird ein silberbeschichtetes PEEK-Garn (Polyether-Ether-Keton) beschrieben, das unter Dehnung seinen elektrischen Widerstand verändert und somit sensorische Eigenschaften besitzt. Ähnliche Eigenschaften besitzt das in [43] und [44] beschriebene Garn. Hier handelt es sich um ein mit einem mit Ruß gefüllten Polymer beschichtetes Polyethylen-Monofilament, das ebenfalls unter Zug seinen elektrischen Widerstand verändert.

Auch piezoelektrische Keramikfasern aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) werden zum SHM in FKV-Strukturen integriert [45, 46]. Allerdings handelt es sich hier nicht um voll textile Lösungen, sondern um Hybridstrukturen. Als Elektroden werden dabei jeweils unter und über die PZT-Fasern Aluminiumfolie [46] bzw. leitfähig bedruckte Polymerfolien [45] in den FKV integriert. Die PZT-Fasern besitzen jedoch einen viel dickeren Durchmesser (250  $\mu\text{m}$ ) als die verstärkenden Kohlenstofffasern (< 10  $\mu\text{m}$ ) und lassen sich zudem aufgrund ihrer Sprödigkeit kaum textil verarbeiten. Hinzu kommt, dass aufgrund der integrierten Elektrodenflächen vergleichsweise riesige Materialgrenzflächen erzeugt werden, die wiederum eine Fehlstelle in der Bauteilstruktur darstellen.

Ein verbreiteter Kunststoff für die piezoelektrische Funktionsschicht von Druck- bzw. Impact-Sensoren ist Polyvinylidenfluorid (PVDF) [26, 29]. PVDF ist ein thermoplastisches, teilkristallines Polymer. Das für sensorische Anwendungen ausschlaggebende Merkmal ist, dass es unter bestimmten Bedingungen sehr gute piezoelektrische Eigenschaften besitzt [47] (vgl. Kapitel 2.2). Aus PVDF lassen sich durch Schmelzspinnen piezoelektrische Fasern herstellen. [3, 48]

Daher gibt es neben den bereits beschriebenen Prinzipien von Sensorfasern auch Entwicklungen in Richtung piezoelektrischer Sensorfasern. In [49] wird bspw. ein

Zweifach-Zwirn aus handelsüblichen silberbeschichteten Polyamid-6.6-Filamentgarnen (Statex Shieldex®) beschrieben, wobei eines der beiden verzwirnten Garne mit einem PVDF-basierten Polymer umhüllt wurde. Die beiden Shieldex®-Garne fungieren dabei als Sensorelektroden, die Beschichtung als piezoelektrische Funktionsschicht.

Weitere Beispiele sind piezoelektrische Bi-Komponentenfasern [50, 51, 52, 53]. Hier wird in einem Schmelzspinnprozess eine Kern-Mantelfaser hergestellt. Die Faser besteht bspw. aus einem durch Versetzung mit Ruß [50] oder Carbon-Nanotubes (CNT) [53] leitfähig gemachtem Polymer im Kern als innere Elektrode und im Mantel PVDF als piezoelektrische Funktionsschicht. Die äußere Elektrode wird dann z. B. durch metallisches Beschichten [52] bzw. durch Beschichten mit leitfähigen Polymeren [54] der Fasern nach dem Streckprozess erreicht oder durch leitfähiges Beschichten [51] bzw. Bedrucken [55] der aus den Bi-Komponentenfasern hergestellten textilen Fläche. Insbesondere die getrennte Kontaktierung von innerer und äußerer Elektrode ist bei diesen Sensoren jedoch sehr aufwendig [52].

All diese Sensorfasern und -garne haben den gemeinsamen Nachteil, dass sie, durch ihren Aufbau bedingt, deutlich dicker als die sie umgebenden Verstärkungsfasern sind, was zu den bereits beschriebenen Nachteilen führt. Die Auswirkung vergleichsweise dickerer Fasern auf eine Faserverbundstruktur ist im Schnittbild in Abbildung 2-6 veranschaulicht. Außerdem müsste für eine orts aufgelöste Messung jede Sensorfaser einzeln kontaktiert werden.



**Abbildung 2-6: Querschnittsansicht eines FKV mit auf ein Verstärkungsgewebe aufgestickten Mikrokabeln**

Eine andere Herangehensweise Faserverbundstrukturen sensorisch wirken zu lassen, ist die Verwendung ‚sensorischer‘ Matrixsysteme. Eine Möglichkeit ist es ‚sensorische‘ Polymere als Matrixwerkstoffe zu verwenden. Wie bereits erwähnt, besitzt PVDF unter bestimmten Umständen piezoelektrische Eigenschaften [47] (vgl. Kapitel 2.2). Kohlenstofffasern sind verbreitete Verstärkungsfasern und elektrisch leitfähig. Daher sind sie als Elektrodenmaterial geeignet. Glas- und Aramidfasern sind elektrische Isolatoren und können daher als Isolator bzw. Dielektrikum verwendet werden. Folglich ist die Verwendung der textilen Verstärkungsstruktur als Teil der Sensorik eine logische

Konsequenz. In [56] wird eine sensorische FKV-Struktur beschrieben, bei der PVDF als Matrixwerkstoff und Kohlenstofffasergewebe als Elektroden verwendet werden. Als Separator zwischen den Elektroden dient Aramidgewebe.

Ähnliche sensorische FKV werden in [57], [58] und [59] beschrieben. Allerdings wird in diesen Arbeiten das als Matrixwerkstoff verwendete Epoxidharz mit Piezokeramik-Partikeln als ‚sensorisches‘ Additiv gefüllt. Die Faserverbundstruktur wirkt damit ebenfalls als piezoelektrischer Sensor. Andere Arbeiten beschreiben ähnliche sensorische FKV, die aus mit CNT gefüllten Matrixwerkstoffen bestehen. Als Sensorsignal wird dabei der veränderte elektrische Durchgangswiderstand unter Belastung [60, 61] bzw. bei Beschädigung [62, 63, 64] gemessen. Nichtsdestotrotz schränken diese Methoden entweder die Flexibilität bei der Auswahl des Matrixsystems ein oder man läuft Gefahr, durch die Füllstoffe die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Faserverbundstruktur zu verändern.

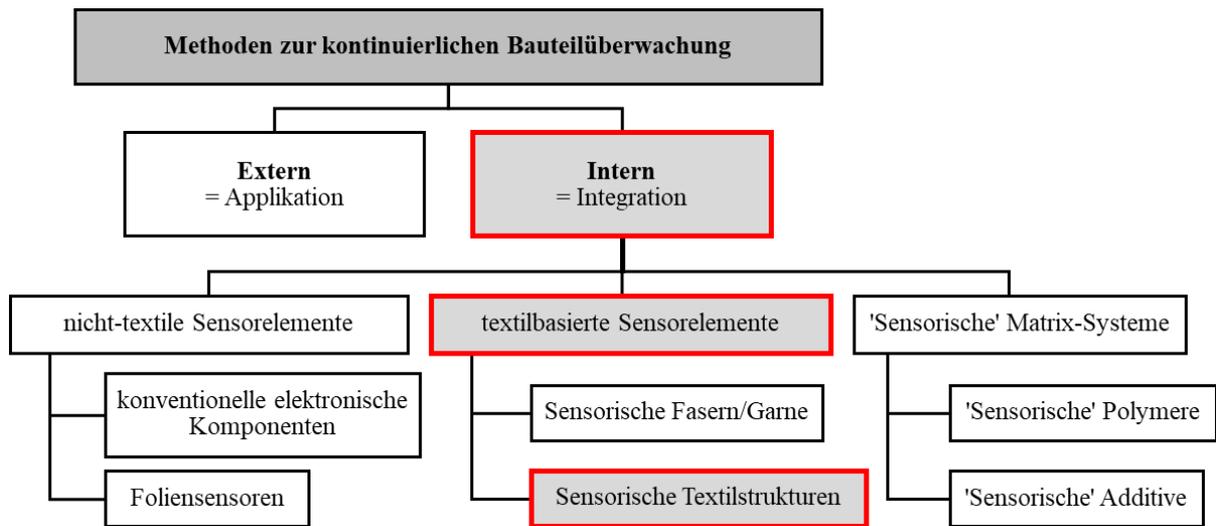
Kohlenstofffasern besitzen ein piezoresistives Verhalten unter Zugbelastung [65]. Das bedeutet, sie verändern ihren elektrischen Widerstand unter Zugbeanspruchung. Im Fall von CFK ist es daher möglich, die textile Verstärkungsstruktur an sich als Belastungssensor oder Schadensdetektor zu verwenden. Verschiedene Arbeiten untersuchen die sensorischen Eigenschaften von CFK-Strukturen bezüglich Biegebeanspruchungen [66] bzw. die Eignung solcher Strukturen zur Schadenserkenkung [66, 67]. Dieses Prinzip wurde auch an FKV aus 3D-Gewebestrukturen als Verstärkungstextil untersucht [68]. Bei dieser Methode ist man allerdings auf CFK-Strukturen beschränkt und für eine orts aufgelöste Messung ist eine aufwendige Kontaktierung der einzelnen Kohlenstofffaser-Rovings erforderlich [68] bzw. wird eine aufwendige (extern aufgebrachte) Elektrodenstruktur benötigt [69, 70]. Hinzu kommt, dass der elektrische Widerstand der Kohlenstofffasern stark temperaturabhängig ist, weshalb beim Einsatz solcher Sensoren zusätzlich eine Temperaturfehlerkompensation erforderlich ist [65, 71].

Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern und der elektrischen Isolation von Glasfasern ist der textile Aufbau von Kondensatoren naheliegend. Ähnlich wie bei den Beispielen zum piezoelektrischen Sensorprinzip gibt es auch bei in FKV integrierten Kondensatoren einen breit gefächerten Stand der Technik zu Hybridstrukturen. Entweder mit textilem Separator aus feinem Glasfasergewebe und metallisierter Kunststoffolie als Elektroden [72, 73] oder mit textilen Kohlenstofffaserelektroden und hauchdünnen Polymerfilmen als Isolatoren dazwischen [74]. Ein piezoelektrischer Aufbau wird in [75] beschrieben. Hier befindet sich ein PVDF-basiertes Nanovlies zwischen zwei dünnen Aluminiumplatten. Das Ziel dieser Arbeiten ist allerdings meist nicht die sensorische Überwachung von Faserverbundstrukturen. Vielmehr geht es hierbei um die kurzfristige Energiespeicherung bzw. -bereitstellung bei

Leichtbauanwendungen. Dementsprechend gibt es im Stand der Technik auch in FKV integrierte hybride Superkondensatorstrukturen mit Elektroden aus Kohlenstoffasergeweben und einer Polymermembran als Separator [76]. Diese Hybridstrukturen verfügen, wie die piezoelektrischen Hybridstrukturen, ebenfalls über große Materialgrenzflächen aufgrund der in den Faserverbund eingefügten Folien und die damit verbundenen Nachteile.

Im Bereich der in den FKV integrierten Superkondensatoren gibt es zudem bereits Anstrengungen, diese Strukturen voll textil aufzubauen. So wird in [77] ein Superkondensator beschrieben, der aus zwei Kohlenstoffasergeweben als Elektroden und einem Glasfasergewebe als Separator und einem elektrolythaltigen Polymer als Matrixwerkstoff aufgebaut ist. Auch dieser Aufbau dient lediglich der Speicherung von elektrischer Energie. Durch den volltextilen Aufbau ist der Superkondensator aber in der Lage mechanische Belastungen aufzunehmen und weiterzuleiten.

Der im Rahmen dieses Kapitels geschilderte Stand der Technik ist in Abbildung 2-7 zusammengefasst und gegliedert.



**Abbildung 2-7: Gliederung des Stands der Technik der Sensortechnologien zur kontinuierlichen Bauteilüberwachung und Einordnung dieser Arbeit in selbige (rot)**

## 2.2 Messverfahren zur elektrischen Erfassung von Kräften

Wie im vorangegangenen Kapitel dargelegt, gibt es im Stand der Technik verschiedene Sensortechnologien, die bereits in FKV integriert werden. Für die Entwicklung einer sensorischen Verstärkungsstruktur von FKV ist es notwendig, sich mit den verschiedenen Messverfahren zur Erfassung von mechanischen Belastungen, also auf das Bauteil einwirkende Kräfte bzw. Drücke, zu befassen und die Vor- und Nachteile dieser Messmethoden gegenüberzustellen.

Die Messung von Drücken und Kräften stehen in einem engen Zusammenhang. Der Druck  $p$  ist als Kraft  $F$  pro Fläche  $A$  definiert [78]:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Bei Drucksensoren wird das Prinzip angewandt, einen Druck auf eine definierte Fläche einwirken zu lassen und diesen damit in eine Kraft umzuformen. Daher wird bei der Druckmessung im Prinzip eine Kraftmessung durchgeführt. Diese Kraft, einwirkend auf eine definierte Fläche, gibt dann ein Maß für den Druck. [78]

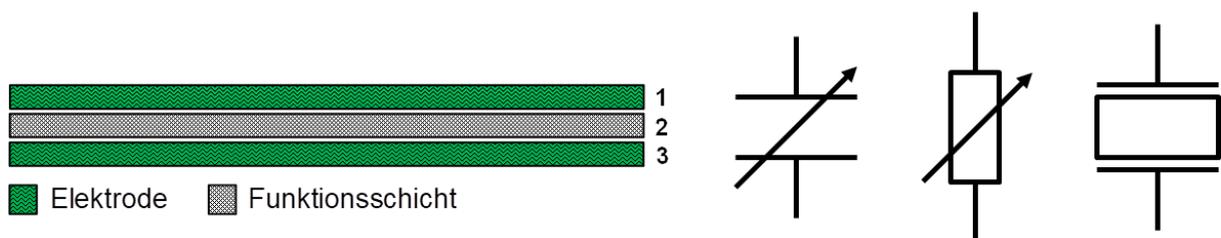
Kraft- und Drucksensoren sind damit nach dem gleichen Prinzip aufgebaut. Im nachfolgenden werden die hierfür verbreitetsten elektrischen Messverfahren genauer beschrieben.

### Kraft- und Drucksensoren allgemein

Neben der mechanischen Erfassung von (Druck-)Kräften können diese auch elektrisch gemessen werden. Wirkprinzip der klassischen, mechanischen Erfassung von (Druck-)Kräften ist die Übertragung einer mechanischen Verformung auf eine Anzeige (z. B. Manometer). Bei der elektronischen Erfassung von (Druck-)Kräften wird diese mechanische Verformung durch Sensoren erfasst, die durch elektrische Wirkprinzipien die mechanische Verformung in ein elektrisches Signal umwandeln. [78, 79]

Für die quantitative bzw. qualitative Messung von physikalischen Größen werden Sensoren benötigt. Das Wort „Sensor“ kommt von dem lateinischen Wort „sensus“ (auf Deutsch: Sinn) und bedeutet Fühler. Sensoren wandeln eine zeitvariable, i. d. R. nicht elektrische, Messgröße in ein elektrisches Signal um. Das vom Sensor erzeugte elektrische Messsignal steht dabei in einem eindeutigen, oft linearen, Zusammenhang mit der Messgröße. Es wird zwischen aktiven und passiven Sensoren unterschieden. Passive Sensoren benötigen für die Umwandlung eine äußere Hilfsspannung, aktive Sensoren kommen ohne aus. [79, 80, 81, 82]

Verbreitete Methoden zur elektronischen Erfassung von (Druck-)Kräften sind das kapazitive, das (piezo-)resistive und das piezoelektrische Messverfahren. Grundsätzlich sind Sensoren nach den genannten drei Messverfahren dreischichtig aufgebaut (siehe Abbildung 2-8). Während die Schichten 1 und 3 jeweils aus elektrisch leitfähigem Material bestehen und als Sensorelektroden fungieren, unterscheidet sich die Zwischenschicht (2) je nach Sensortyp. [79, 80]



**Abbildung 2-8: Schematischer Sensoraufbau und Ersatzschaltbilder kapazitiver, (piezo-)resistiver und piezoelektrischer Sensoren**

Grundlage dieser Kraft- bzw. Drucksensorprinzipien ist die elastische Verformung eines Festkörpers. Äußere mechanische Kräfte bewirken eine reversible Verformung des Sensors. Eine plastische Verformung ist dabei normalerweise unerwünscht, weil diese die Sensorcharakteristik bleibend verändern würde. In bestimmten Fällen genügt für eine sensorische Wirkung gar eine mechanische Spannung, die auf die Kristallstruktur der Funktionsschicht wirkt (vgl. piezoresistives und piezoelektrisches Sensorprinzip). [80]

**Kapazitive Druck- bzw. Kraftsensoren** machen sich die Kapazitätsveränderung eines Kondensators zu Nutze, die z. B. bei einem sich unter Krafteinwirkung änderndem Plattenabstand ( $d$ ) auftritt. Wirkt eine Kraft auf den Sensor, nähern sich an dieser Stelle die beiden Kondensatorplatten und die Kapazität des Sensors vergrößert sich. Bei diesem wegmessenden Verfahren korrelieren der Druck bzw. die einwirkende Kraft mit der Kapazität des Kondensators. Die Zwischenschicht (2) muss bei diesem Sensorprinzip ein elektrischer Isolator bzw. ein geeignetes Dielektrikum sein. Die Sensoreigenschaften können durch das in Schicht 2 gewählte Material verbessert werden. Je höher die relative Permittivität ( $\epsilon_r$ ) des Werkstoffs der Zwischenschicht ist, desto größer ist die Kapazität des Kondensators (vgl. Formel ( 2 )). [80]

Für einen Plattenkondensator gilt [79]:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (2)$$

*C*: Kapazität

$\varepsilon_0$ : elektrische Feldkonstante

$\varepsilon_r$ : materialabhängige Permittivitätszahl

*A*: Fläche

*d*: Abstand

Die Vorteile kapazitiver Drucksensoren bestehen in ihrem einfachen Aufbau und ihrer guten mechanischen und elektrischen Stabilität [80]. Hinzu kommt, dass ein Aufbau textiler Kondensatoren auch im Bereich FKV aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit von Kohlenstofffasern und ihrer Eignung als Elektrodenmaterial und der Eignung von Glasfasern als elektrischer Isolator bzw. Dielektrikum einfach möglich ist (vgl. Kapitel 2.1).

Demgegenüber stehen allerdings die Nachteile, dass die Messung einer Kapazität relativ aufwendig ist und dass sich das Sensorsignal i. d. R. nicht linear zur Verformung verhält (vgl. Formel ( 2 )). Außerdem ist es anfällig für Störeinflüsse aus der Umwelt. [80, 81]

Neben wegmessenden Verfahren, d. h. Verfahren, die eine aus einer Krafteinwirkung resultierende mechanische Verformung direkt messen, gibt es auch andere Reaktionen von Festkörpern, die als Sensoreffekt genutzt werden können. **(Piezo-)Resistive Druck- bzw. Kraftsensoren** messen die Veränderung des elektrischen Durchgangswiderstands (R) ihrer Zwischenschicht (2) unter Krafteinwirkung. Das Material, aus dem diese bestehen, muss bei diesem Messprinzip daher unter Krafteinwirkung seinen elektrischen Widerstand verändern. Dies kann durch Verformung (z. B. durch Veränderung des Querschnitts elektrischer Leiter unter Belastung) geschehen (geometrieabhängige Widerstandsveränderung), oder durch eine sich unter Krafteinwirkung verändernde Kristallstruktur bestimmter Materialien (v. A. Halbleiter) ohne notwendige geometrische Verformung (werkstoffabhängige Widerstandsveränderung). [80, 82]

Der beschriebene Zusammenhang lässt sich durch die Formeln ( 3 ) und ( 4 ) nachvollziehen. Für den elektrischen Widerstand  $R$  eines Quaderförmigen Leiters der Länge  $l$  und der Grundfläche  $A$  gilt [82, 83]:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3)$$

Wobei der spezifische Widerstand  $\rho$  der werkstoffabhängige und  $l/A$  der geometrieabhängige Faktor ist.

Bei Deformation des Quaders durch eine mechanische Kraft, die auf  $A$  wirkt, ergibt sich eine Widerstandsveränderung, für die gilt [82, 83]:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4)$$

Bei elektrischen (v. A. metallischen) Leitern dominiert der geometriebestimmte Effekt ( $\Delta l/l - \Delta A/A$ ) und der werkstoffbestimmte Effekt ( $\Delta \rho/\rho$ ) kann vernachlässigt werden. Bei Halbleiter- und keramischen Werkstoffen kann der werkstoffabhängige Effekt jedoch großen Einfluss haben. [80, 82]

Piezoresistive Druck- bzw. Kraftsensoren können zwar eine hohe Empfindlichkeit auch bei geringen Belastungen besitzen, haben aber i. d. R. auch ein stark temperaturabhängiges Sensorsignal [81].

Neben dem piezoresistiven Sensorprinzip gibt es auch andere Reaktionen von Festkörpern auf mechanische Belastung, die als Sensoreffekt genutzt werden können. **Piezoelektrische Druck- bzw. Kraftsensoren** nutzen den piezoelektrischen Effekt, d. h. sie messen Änderungen des Polarisationszustands. Die dielektrische Polarisation hängt z. B. von der exakten Lage der Gitteratome zueinander ab. Die Zwischenschicht (2) muss hier aus einem Material bestehen, dessen elektrische Polarisation sich unter Krafteinfluss verschiebt (Piezokristalle). Die bei der Krafteinwirkung bzw. Verformung verschobene Ladung kann gemessen werden und ist direkt proportional zur einwirkenden Kraft. [79, 80]

Beim piezoelektrischen Sensorprinzip handelt es sich im Gegensatz zum kapazitiven und piezoresistiven um ein aktives Sensorprinzip. Piezoelektrische Sensoren kommen ohne externe Stromversorgung aus, wodurch parasitäre Kapazitäten keine Messfehler hervorrufen. Durch die Ladungsverschiebung wird eine elektrische Spannung erzeugt, die mit einer relativ einfachen Auswerteelektronik gemessen werden kann. Mit piezoelektrischen Sensoren können schnelle periodische Kraftschwankungen in Echtzeit erfasst werden, statische Belastungen jedoch nur mit sehr aufwendiger Messtechnik.

Darüber hinaus besitzt der piezoelektrische Effekt einen relativ geringen Temperaturkoeffizienten. [80, 81]

Die Vor- und Nachteile der beschriebenen Sensorprinzipien sind nachfolgend in Tabelle 1 zusammengefasst.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass grundsätzlich alle drei Messprinzipien dazu geeignet sind, in eine FKV-Struktur integriert zu werden. Wie im vorangegangenen Kapitel (2.1) beschrieben, gibt es bereits einen breiten Stand der Technik zu resistiv wirkender textiler Sensorik, vornehmlich auf Garnebene. Allerdings besitzt diese Sensortechnologie die Nachteile der starken Temperaturabhängigkeit und bei orts aufgelöster Sensorik auf Garnebene die der aufwendigen Kontaktierung.

Wie beschrieben, ist der textile Aufbau von kapazitiver Sensorik in FKV-Strukturen naheliegend. Daher gibt es im Stand der Technik bereits Bestrebungen, Kondensatorstrukturen in die textile Verstärkung zu integrieren. Allerdings zielen diese Arbeiten auf Kondensatoren zur kurzfristigen Energiespeicherung bzw. -bereitstellung ab. Die Sensorwirkung müsste allerdings noch untersucht werden.

Das piezoelektrische Sensorprinzip stellt ein vielversprechendes Sensorprinzip in diesem Bereich dar. Im Aufbau unterscheiden sich piezoelektrische Sensoren nur durch die Zwischenschicht von kapazitiven. Da FKV-Bauteile oft vorwiegend dynamischen Belastungen ausgesetzt sind, müssen statische Belastungen häufig nicht erkannt werden. Es kommt ohne Stromversorgung aus, ist sehr empfindlich und kaum temperaturabhängig.

Der Piezoelektrische Effekt und geeignete piezoelektrisch wirkende Materialien sind in den beiden nachfolgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Vor- und Nachteile der beschriebenen Sensorprinzipien zur Erfassung von Drücken bzw. Kräften [79, 80, 81]

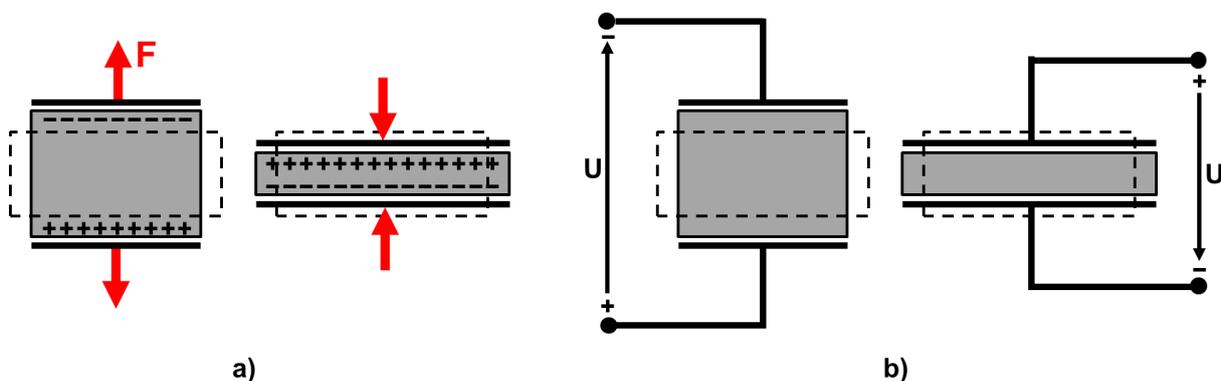
	Vorteile	Nachteile
<b>kapazitives Sensorprinzip</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfacher Sensoraufbau</li> <li>• Gute mechanische und elektrische Stabilität</li> <li>• Erfassung statischer Belastungen möglich</li> <li>• Textiler Aufbau einfach möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Messung der Kapazität relativ aufwendig</li> <li>• Geometrische Verformung des Sensors notwendig</li> <li>• Sensorsignal i. d. R. nicht linear zur Verformung</li> <li>• Anfällig für Störeinflüsse</li> </ul>
<b>(piezo-)resistives Sensorprinzip</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Empfindlichkeit auch bei geringen Belastungen</li> <li>• Bei bestimmten Materialien keine geometrische Verformung des Sensors notwendig</li> <li>• Relativ einfache Messung</li> <li>• Erfassung statischer Belastungen möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stark temperaturabhängiges Sensorsignal</li> </ul>
<b>piezoelektrisches Sensorprinzip</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kommt ohne externe Stromversorgung aus</li> <li>• Erfassung von schnellen periodischen Kraftschwankungen in Echtzeit möglich</li> <li>• Keine geometrische Verformung des Sensors notwendig</li> <li>• Nahezu weglose Messung                             <ul style="list-style-type: none"> <li>⇒ Hysterese- und Krieeffekte vernachlässigbar klein</li> </ul> </li> <li>• Relativ geringer Temperaturkoeffizient</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erfassung statischer Belastungen nur durch aufwendige Schaltung möglich</li> </ul>

## Piezoelektrizität

Unter Piezoelektrizität versteht man die elektromechanische Wechselwirkung zwischen Polarisation, Oberflächenladung bzw. elektrischem Feld und mechanischer Spannung bzw. Dehnung [79, 80, 82]. Der piezoelektrische Effekt wurde 1880 von den Brüdern Pierre und Jacques Curie erstmals beschrieben [84].

Wirkt auf einen piezoelektrischen Werkstoff eine mechanische Spannung ein, erzeugt die daraus resultierende Deformation der Kristallstruktur eine Änderung der Polarisation. Dadurch wird an der Oberfläche des Materials eine elektrische Ladung ( $Q$ ) induziert, die über an den Körper angebrachten Elektroden als elektrische Spannung ( $U$ ) abgegriffen werden kann. Dieser Effekt wird als direkter piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Beim direkten piezoelektrischen Effekt geschieht die Anregung mechanisch durch Zug- bzw. Druckspannung. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-9 links (a) vereinfacht schematisch dargestellt. [82, 83]

Andersherum erzeugt ein über äußere Elektroden induziertes elektrisches Feld eine innere mechanische Spannung in der Kristallstruktur und damit eine geometrische Verformung des piezoelektrischen Materials. Dieser Effekt wird als inverser oder reziproker piezoelektrischer Effekt bezeichnet. Beim inversen piezoelektrischen Effekt geschieht die Anregung elektrisch durch Feldumkehr. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2-9 rechts (b) skizziert. [79, 80, 83]



**Abbildung 2-9: Direkter piezoelektrischer Effekt (a) unter Krafteinwirkung und inverser piezoelektrischer Effekt (b) bei angelegtem elektrischen Feld (Der Zustand vor Einwirken der Kraft bzw. des elektrischen Felds ist jeweils gestrichelt dargestellt.) (i. A. a. [83, 85])**

Für den direkten piezoelektrischen Effekt (a in Abbildung 2-9) gilt damit [83]:

$$P = d_P \sigma_M \quad (5)$$

$P$ : elektrische Polarisation

$d_P$ : piezoelektrischer Koeffizient

$\sigma_M$ : mechanische (Zug-) Spannung

Und für den indirekten piezoelektrischen Effekt (b in Abbildung 2-9) gilt [83]:

$$\varepsilon_M = d_P E \quad (6)$$

$\varepsilon_M$ : mechanische Dehnung

$E$ : elektrische Feldstärke

Die Formeln ( 5 ) und ( 6 ) gelten für den Fall, dass  $P$ ,  $d_P$  und  $\sigma_M$  bzw.  $\varepsilon_M$ ,  $d_P$  und  $E$  entlang der gleichen Achse wirken bzw. für diese Achse gelten.

Der beschriebene Zusammenhang von elektrischem und mechanischem Zustand hängt mit der Asymmetrie der Kristallstruktur piezoelektrischer Materialien zusammen, bei der der geometrische Mittelpunkt und der elektrische Ladungsschwerpunkt nicht übereinstimmen. Bei einwirkenden Kräften bzw. Drücken fallen die Schwerpunkte der positiven und der negativen Ladung nicht mehr zusammen, wodurch ein elektrisches Potential ( $\Phi$ ) entsteht. Dieses kann als elektrische Spannung an der Oberfläche abgegriffen werden. Die verschobene Ladung ist direkt proportional zur einwirkenden Druckkraft ( $F$ ) und der Fläche ( $A$ ) auf die sie einwirkt. [79, 80, 81]

Abbildung 2-10 zeigt schematisch und stark vereinfacht zweidimensionale Gittermodelle mit (1) und ohne (2) Symmetriezentrum ( $Z$ ) im unbelasteten (oben) und im belasteten (unten) Zustand. Bei der Kristallstruktur mit Symmetriezentrum liegt sowohl im unbelasteten als auch im belasteten Zustand der gemeinsame Ladungsschwerpunkt im Symmetriezentrum. Bei der Kristallstruktur ohne Symmetriezentrum (im Beispiel: Quarzkristall) verschieben sich die ursprünglich übereinander liegenden Ladungsschwerpunkte der positiven und der negativen Ladungen. Wodurch ein elektrisches Potential ( $\Phi$ ) entsteht. [80]

Abhängig von der Orientierung der Belastungsachse zur polaren Achse des Kristallgitters unterscheidet man den transversalen (a in Abbildung 2-10) und den longitudinalen (b Abbildung 2-10) piezoelektrischen Effekt. Beim transversalen piezoelektrischen Effekt wirken die Druck- bzw. Zugspannungen ( $\vec{F}$ ) parallel zur Oberflächennormalen ( $\vec{n}$ ),

aber senkrecht zur Polarisationsrichtung ( $\vec{P}$ ). Beim longitudinalen piezoelektrischen Effekt wirken die Kraftvektoren ( $\vec{F}$ ) parallel zur Polarisationsrichtung ( $\vec{P}$ ) und zur Oberflächennormalen ( $\vec{n}$ ). Die Ladung wird beim Longitudinaleffekt an der Angriffsfläche der Kraft abgegriffen. [78, 80, 82]

Für den transversalen piezoelektrischen Effekt gilt daher [82]:

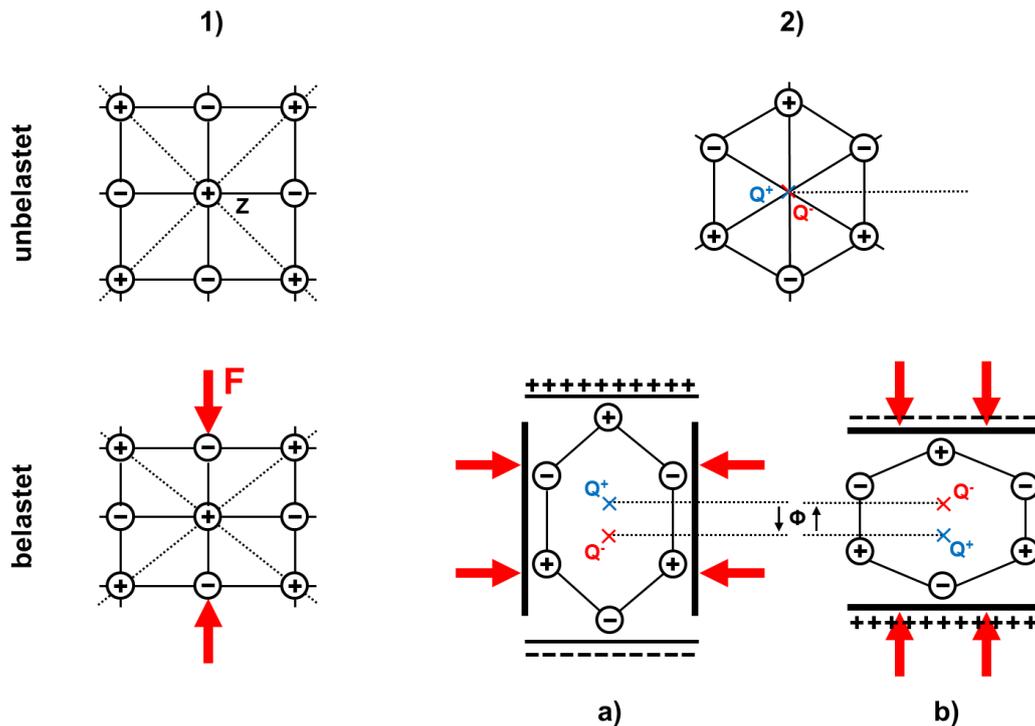
$$\vec{P} \perp \vec{F} \parallel \vec{n} \quad (7)$$

Und für den longitudinalen Effekt gilt [82]:

$$\vec{P} \parallel \vec{F} \parallel \vec{n} \quad (8)$$

In der Praxis findet vor allem der longitudinale piezoelektrische Effekt Anwendung in Piezosensoren und -aktoren.

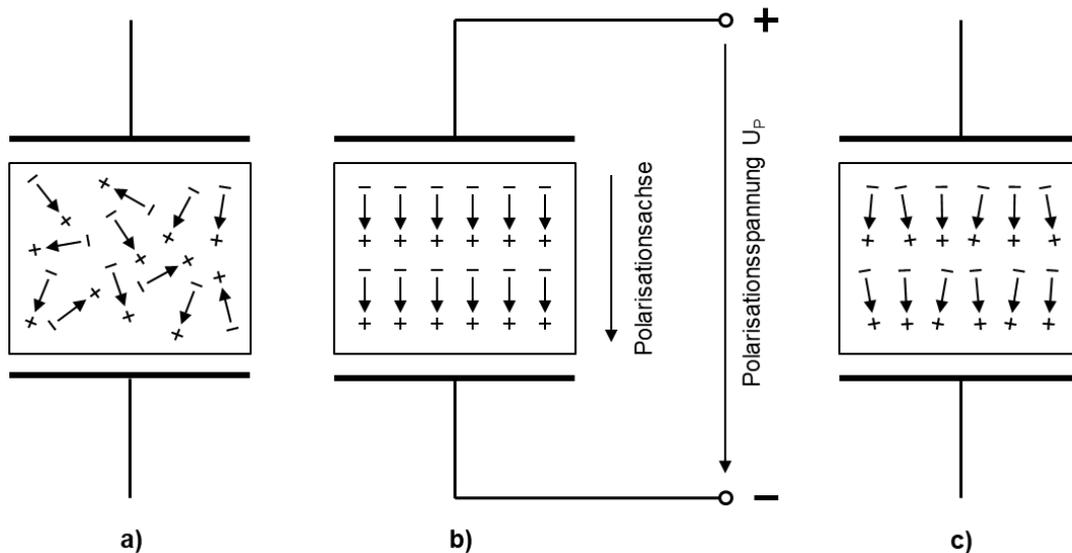
Auch der inverse piezoelektrische Effekt lässt sich mit Abbildung 2-10 veranschaulichen: Legt man parallel zu einer polaren Achse ein elektrisches Feld an, so verschieben sich die Ladungen entsprechend in Richtung des Feldes, d. h. das Kristallgitter dehnt bzw. komprimiert sich parallel zur Feldachse. Polt man das elektrische Feld um, so wird die Verformung entsprechend zur Kompression bzw. zur Dilatation. Senkrecht zum elektrischen Feld treten die entsprechenden, gegenteiligen Deformationen auf. [83]



**Abbildung 2-10:** Schematische Darstellung zweidimensionaler Gittermodelle mit (1) und ohne (2) Symmetriezentrum (Z) im unbelasteten (oben) und im belasteten (unten) Zustand. Außerdem dargestellt: Prinzip des transversalen (a) und des longitudinalen (b) piezoelektrischen Effekts im Gittermodell (i. A. a. [78, 80, 83])

Die Orientierung der Dipole ist bei polykristallinen Werkstoffen zunächst willkürlich und spontan (unterhalb der Curie-Temperatur  $T_C$ ), warum zunächst keine bzw. nur eine geringe Piezoelektrizität vorliegt, weil sich die Dipolmomente gegenseitig aufheben. Erst nach Durchlaufen eines Polarisationsprozesses werden die Dipole einheitlich ausgerichtet.

Die einfachste Polarisationsmethode stellt die elektrische Polarisierung dar. Dieser Prozess ist in Abbildung 2-11 schematisch dargestellt. Die Polarisierung geschieht i. d. R. durch Anlegen einer starken elektrischen Spannung  $U_p$  und der damit verbundenen Erzeugung eines elektrischen Feldes. Eine Polarisierungstemperatur  $T_P$  etwas unterhalb der Curie-Temperatur  $T_C$  verstärkt den Polarisierungseffekt bzw. ermöglicht eine Polarisierung bei niedrigerer Polarisierungsspannung (thermische Polarisierung). Das elektrische Feld muss dabei bis zum Erkalten auf Raumtemperatur aufrechterhalten werden, um die Ausrichtung der Dipole zu fixieren. Die Polarisierung bleibt im Material erhalten, solange  $T_C$  nicht überschritten wird. Lediglich extreme mechanische Belastungen oder sehr starke elektrische Felder können das Material auch im kalten Zustand depolarisieren. [86, 87]

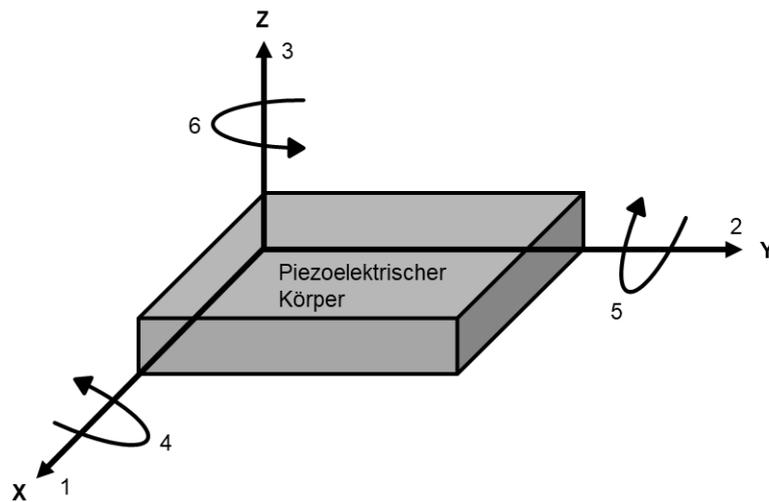


**Abbildung 2-11: Schematische Darstellung des Prozesses der elektrischen Polarisation: Ausrichtung der Dipole vor (a) wöhrend (b) und nach (c) der Durchföhrung (i. A. a. [86])**

Bei piezoelektrischen Materialien, die sich bei der Deformation vollkommen elastisch verhalten, besteht ein linearer Zusammenhang zwischen einwirkender Kraft ( $F$ ) und verschobener Ladung ( $Q$ ) [81]. Es gilt daher [79]:

$$Q = d_{ij} * F \quad (9)$$

Wobei  $d_{ij}$  für den piezoelektrischen Koeffizienten steht. Der piezoelektrische Koeffizient ( $d_{ij}$ ) ist nicht nur werkstoffabhängig, sondern variiert auch je nach Ausrichtung der äußeren Kraft in Bezug auf die Polarisationsachse. Eine Kraft  $F$  ruft eine Ladungverschiebung in Längsrichtung ( $j$ : 1, 2, 3) und im Winkel um die Achsen ( $j$ : 4, 5, 6) hervor. Der Index  $i$  steht für die Polarisationsrichtungen ( $i$ : 1, 2, 3). [79, 82], (vgl. dazu Abbildung 2-12)



**Abbildung 2-12: Koordinatensystem zur Beschreibung des piezoelektrischen Effekts (i. A. a. [79])**

Daher kann für jedes piezoelektrische Material ein piezoelektrischer Tensor aufgestellt werden, der sich aus neun Longitudinal- und Transversalkomponenten sowie neun longitudinalen und transversalen Schubkomponenten zusammensetzt [82, 85]:

$$\underline{d} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Damit können anhand der piezoelektrischen Koeffizienten unterschiedliche Effekte zugeordnet werden [82, 85]:

<i>Longitudinaleffekt:</i>	$d_{11}, d_{22}, d_{33}$
<i>Transversaleffekt:</i>	$d_{12}, d_{13}, d_{21}, d_{23}, d_{31}, d_{32}$
<i>Longitudinaler Schereffekt:</i>	$d_{14}, d_{25}, d_{36}$
<i>Transversaler Schereffekt:</i>	$d_{15}, d_{16}, d_{24}, d_{26}, d_{34}, d_{36}$

Für einen dreischichtig aufgebauten piezoelektrischen Sensor, wie in Abbildung 2-8 (Seite 17) dargestellt, der in Querrichtung belastet wird, sind insbesondere die piezoelektrischen Werte für den Longitudinal- bzw. der Transversaleffekt interessant.

Eine weitere, den piezoelektrischen Werkstoff beschreibende, Größe ist der elektro-mechanische Kopplungsfaktor  $k_{ij}$ . Er beschreibt die Umwandlungseffizienz von mechanischer ( $W_{mech}$ ) in elektrischer Arbeit ( $W_{el}$ ) und andersherum (siehe Formel (11)). Der Faktor  $k_{ij}$  ist als eine Art „Wirkungsgrad“ des piezoelektrischen Materials zu verstehen. [82]

$$k_{ij} = \sqrt{\frac{W_{el}}{W_{mech}}} \quad (11)$$

Der elektromechanische Kopplungsfaktor ist wie der piezoelektrische Koeffizient richtungsabhängig.

Der piezoelektrische Effekt tritt nur in elektrisch nichtleitenden Materialien auf. Man unterscheidet zwischen piezoelektrischen Kristallen, wie Quarz ( $\text{SiO}_2$ ), piezoelektrischen Keramiken, wie Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), und sonstigen piezoelektrischen Materialien, wie das bereits erwähnte Polyvinylidenfluorid (PVDF). [79]

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Materialkennwerte der genannten Werkstoffe aufgezählt. Die Kennwerte dienen lediglich der Orientierung. Da einige der Eigenschaften u. A. auch vom Herstellungsprozess abhängig sind, liefern andere Quellen z. T. etwas abweichende Werte.

PZT wird aufgrund der hohen Piezoelektrizität, der hohen Dielektrizität und der hohen Temperaturbeständigkeit häufig in piezoelektrischen Sensorelementen eingesetzt. Aufgrund seiner Sprödigkeit ist es jedoch schlecht textil verarbeitbar. PVDF besitzt zwar einen viel niedrigeren piezoelektrischen Koeffizienten als PZT, dennoch ist dieser deutlich höher als bspw. bei Quarz. Aufgrund seiner geringen Sprödigkeit ist es flexibel und lässt sich z. B. zu Folien oder gar Fasern verarbeiten. Aufgrund verschiedener Vorteile von Foliensensoren sind neben „starren“ piezokeramikbasierten Piezoelementen mittlerweile im Handel auch „flexible“ piezoelektrische Foliensensoren auf PVDF-Folienbasis erhältlich (siehe Abbildung 2-13). Zum Einsatz kommen PVDF-Foliensensoren z. B. in Drucksensoren, Mikro- und Hydrophonen und als Akustikwandler in Lautsprechern [87].

Aufgrund der piezoelektrischen Eigenschaften von PVDF und seiner guten textilen Verarbeitbarkeit gibt es, wie bereits in Kapitel 2.1 beschrieben, einen breitgefächerten Stand der Technik, der sich mit der Herstellung von Sensorfasern aus PVDF befasst.

Tabelle 2: Übersicht ausgewählter Kennwerte und Eigenschaften der genannten piezoelektrischen Materialien [79, 80, 83, 88, 89, 90, 91]

	Quarze ( $\alpha$ -Quarz)	PZT	PVDF
<b>Klasse</b>	Naturkristall	Keramik	Polymer
<b>Kristallstruktur</b>	einkristallin	polykristallin	teilkristallin
<b>Dielektrizitätszahl (<math>\epsilon_r</math>)</b>	4,5 (A s) (V m) <sup>-1</sup>	290 (A s) (V m) <sup>-1</sup>	12 (A s) (V m) <sup>-1</sup>
<b>Dichte (<math>\rho</math>)</b>	2,65 g cm <sup>-3</sup>	7,8 g cm <sup>-3</sup>	1,76 g cm <sup>-3</sup>
<b>piezoelektrischer Koeffizient</b>	$d_{11} = 2,3 \text{ pC N}^{-1}$	$d_{33} = 593 \text{ pC N}^{-1}$	$d_{33} \approx 16 \text{ pC N}^{-1}$
<b>piezoelektrischer Kopp- lungsfaktor</b>	$k_{11} = 0,1$	$k_{33} = 0,69$	$k_{33} = 0,49$
<b>Curie-Temperatur (<math>T_C</math>)</b>	573 °C	150 – 350 °C	ca. 100 °C
<b>Schmelzpunkt (<math>T_S</math>)</b>	1710 °C	-	175 °C
<b>Sprödigkeit</b>	hoch	hoch	gering
<b>Textile Verarbeitbarkeit</b>	schlecht	schlecht	gut



Abbildung 2-13: Handelsübliches auf Piezokeramik basierendes Piezoelement (links) und PVDF-basierter Foliensensor (rechts)

## **Polyvinylidenfluorid (PVDF)**

PVDF ist ein thermoplastischer, teilkristalliner Kunststoff. Er zeichnet sich durch eine hohe Chemikalien-, Strahlungs- und Witterungsbeständigkeit aus und ist zudem biokompatibel [92]. Die piezoelektrische Wirkung von PVDF wurde 1969 von Heiji Kawai entdeckt [47].

Die unter bestimmten Voraussetzungen vorhandenen piezoelektrischen Eigenschaften von PVDF sind auf die Molekülstruktur des Polymers zurückzuführen. PVDF ist ein polymorpher Kunststoff. Das bedeutet, dass die kristallinen Bereiche in verschiedenen Phasen vorliegen können, auch gleichzeitig. Die einzelnen Phasen werden  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ - und  $\delta$ -Phase bezeichnet. Die piezoelektrischen Eigenschaften sind auf die in der  $\beta$ -Phase vorhandenen Dipole zurückzuführen. Das Vorhandensein von Dipolen und die Fähigkeit zur spontanen Polarisierung macht PVDF zu einem ferroelektrischen Polymer. Ferroelektrische Materialien sind immer auch piezoelektrisch. [87]

Erstarrt PVDF unter normalen Bedingungen aus der Schmelze, ist die  $\alpha$ -Phase die hauptsächlich nachweisbare Phase. Durch Verstrecken unter Temperatureinfluss kann die Struktur der Makromoleküle von der unpolaren  $\alpha$ - in die polare  $\beta$ -Phase umgewandelt werden. Die polaren Makromoleküle liegen statistisch verteilt und neutralisieren sich so gegenseitig. Um einen globalen piezoelektrischen Effekt zu erreichen, müssen die Dipole durch einen Polarisationsprozess ausgerichtet werden. Nach der Polarisierung kann sowohl der direkte als auch der indirekte piezoelektrische Effekt genutzt werden. [87]

PVDF kann wie andere thermoplastische Polymere verarbeitet werden. Es lassen sich Bauteile im Spritzgießverfahren, Folien mittels Blasfolienextrusion und Fasern im Schmelzspinnverfahren herstellen. [3, 92]

PVDF-Fasern haben im Vergleich zur Folie den Vorteil, dass sie sich in herkömmlichen textilen Fertigungsverfahren verarbeiten lassen. Da PVDF ein thermoplastischer Kunststoff ist, können die PVDF-Fasern im Schmelzspinnverfahren hergestellt werden. Ähnlich wie PVDF-Folien wird bei PVDF-Fasern durch Verstrecken die  $\alpha$ - in die  $\beta$ -Phase umgewandelt, wobei das Verstrecken bei Fasern nur in Faserrichtung stattfinden kann. Neben der Umwandlung in die piezoelektrische  $\beta$ -Phase werden durch das Verstrecken die Molekülketten orientiert und die Faser so zugfester [3]. Es lässt sich zudem beobachten, dass die Orientierung der Molekülketten zu einer teilweisen Polarisierung führt und sich bereits ohne zusätzlichen Polarisationsprozess ein piezoelektrischer Effekt nachweisen lässt. Durch einen nachträglichen Polarisationsprozess kann dieser Effekt noch deutlich verstärkt werden (vgl. Kapitel 4).

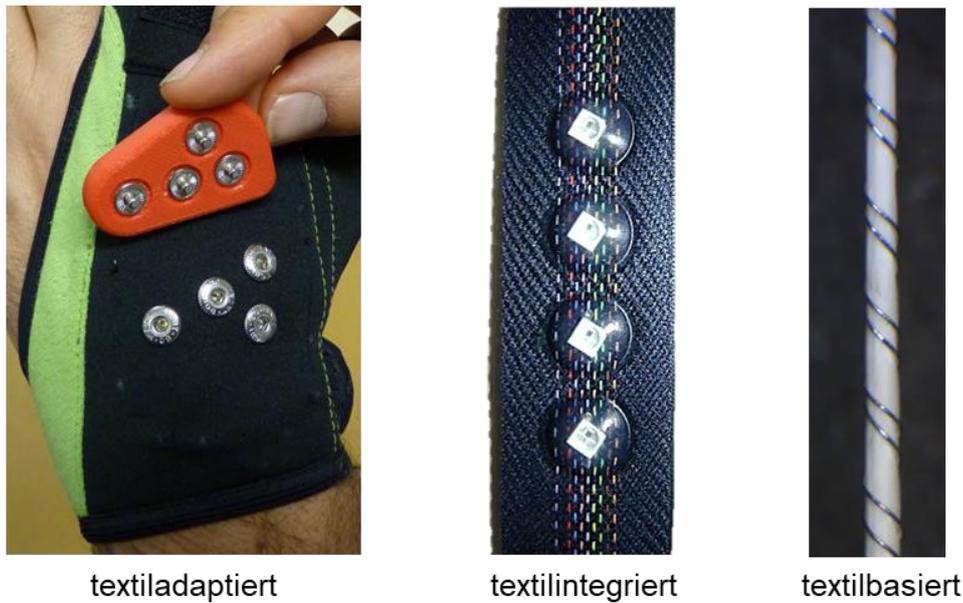
## 2.3 Möglichkeiten der elektrotechnischen Funktionalisierung von Textilien und deren Integrationstiefe

Bei FKV handelt es sich um einen Verbund aus verstärkendem Textil und einem Kunststoff als Matrixwerkstoff. Das Textil an sich spielt dabei für die Eigenschaften des Werkstoffs eine entscheidende Rolle. Daher müssen neben dem Stand der Technik zur Sensorintegration in FKV und den möglichen Sensorprinzipien auch die Möglichkeiten, wie Textilien mit elektronischen Funktionen ausgestattet werden können, betrachtet werden. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten bzw. „Integrationsstufen“. Zunächst findet diese Betrachtung allgemein für Textilien statt und wird dann auf Verstärkungstextilien von FKV übertragen.

Eine Möglichkeit Textilien mit elektronischen Funktionen auszustatten ist es, das Textil so zu adaptieren, um elektronische Geräte mit integrierter Sensorik oder Aktorik an dieses anbringen zu können (*Textiladaptation*), also bspw. das Vorsehen von Taschen, oder durch Anbringen von Klettverschlüssen oder Druckknöpfen zur Befestigung eines elektrischen Geräts. Im Beispiel in Abbildung 2-14 links ist eine auf einem Fingerling mittels Druckknöpfe befestigte „Wristbox“ mit integrierter Elektronik abgebildet.

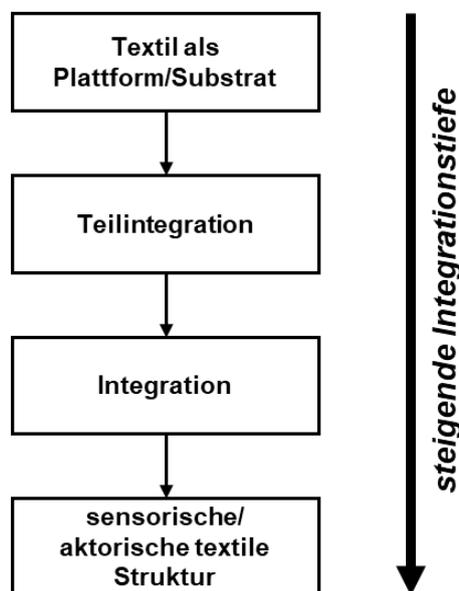
Die nächste Integrationsstufe, um Textilien mit elektronischer Funktionalität auszustatten, ist die Integration von elektrischen Leitern und herkömmlichen elektronischen Bauelementen (Sensoren bzw. Aktoren, aber auch elektrische Schaltungen auf Platinen) in Textilien (*Textilintegration*). In Abbildung 2-14 ist bspw. ein Bandgewebe mit integrierten Mikrokabeln und aufgelöteten und in Kunststoff vergossenen RGB-LED abgebildet.

In vielen Einsatzgebieten ist es wichtig, dass die textilen Eigenschaften erhalten bleiben. Herkömmliche „starre“ elektronische Bauteile sind für solche Anwendungen nicht geeignet. Auch im Bereich der Sensorintegration in FKV ist es vorteilhaft, möglichst keine Störstellen in den Verbund einzufügen (vgl. Kapitel 2.1). Die dritte Integrationsstufe ist folglich Sensoren bzw. Aktoren oder elektrische Schaltungen durch die textile Struktur, also *textilbasiert*, aufzubauen. Dies kann auf Garnebene geschehen, es kann aber auch eine sensorische bzw. aktorische Struktur durch den textilen Aufbau an sich gebildet werden. In Abbildung 2-14 rechts ist als Beispiel ein näherungssensorisches Garn abgebildet. Hier wird der Sensor durch die Garnstruktur gebildet. Zwei lackisolierte metallische Leiter, umwunden um ein Polyester-Filamentgarn, bilden einen Kondensator, der bei Näherung bspw. einer Hand seine Kapazität verändert.



**Abbildung 2-14: Möglichkeiten bzw. „Integrationsstufen“ der elektrotechnischen Funktionalisierung von Textilien**

Eine dezidiertere, auf der Integrationstiefe basierende Untergliederung der Möglichkeiten Textilien elektrotechnisch zu funktionalisieren ist in Abbildung 2-15 dargestellt. Nachfolgend wird diese Gliederung am Beispiel des Stands der Technik von sensorischen FKV aus Kapitel 2.1 erklärt.



**Abbildung 2-15: Integrationstiefen von Sensorik bzw. Aktorik in Textilien**

Wird eine FKV-Struktur als Plattform bzw. Substrat verwendet, bedeutet das die geschilderte Möglichkeit, DMS [20, 21] oder Piezoelemente [22, 23, 24] zur Überwachung der mechanischen Belastung außen auf FKV-Bauteile aufzukleben.

Den nächsttieferen Integrationsschritt von Elektronik stellt die Teilintegration dar. Die in Kapitel 2.1 beschriebene piezoresistive Sensorik von Faserverbundstrukturen aus Kohlenstofffasern beschreiben bspw. einen teilintegrierten Sensor [69, 70]. Die Kohlenstofffasern, als Teil der textilen Bauteilverstärkung, stellen hierbei das sensitive Material dar. Die Sensorelektroden zur Widerstandsmessung werden dabei aber extern auf die FKV-Struktur aufgebracht.

Auch im Stand der Technik zur piezoelektrischen Sensorik bzw. Aktorik findet man die teilweise Sensorintegration in textile Strukturen. Die in Kapitel 2.1 erwähnten Sensoraufbauten aus piezoelektrischen Bikomponentenfasern [51, 55] beschreiben Aufbauten, bei denen auf die aus den Fasern hergestellten Textilien Elektroden mittels Beschichtung aufgebracht bzw. aufgedruckt werden.

Neben der teilweisen Integration von elektrotechnischen Funktionen in Textilien gibt es auch Bestrebungen, diese vollkommen in ein Textil zu integrieren. Auch im Bereich von FKV gibt es für die vollständige Integration von Sensoren einen Stand der Technik (vgl. Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5). Da bei der Prüfung von FKV-Bauteilen die Schallemissionsprüfung eine wichtige Rolle spielt, handelt es sich bei der integrierten Sensorik bzw. Aktorik vornehmlich um Piezoelemente [25, 26, 27].

Die höchste Integrationsstufe von Sensorik bzw. Aktorik in Textilien ist der Aufbau der sensorischen bzw. aktorischen Struktur durch das Textil an sich. Hier gibt es zwei verschiedene Ansätze, die verfolgt werden. Bei einem Ansatz wird der Sensoraufbau durch die Garnstruktur an sich realisiert (vgl. Abbildung 2-14 rechts). Auch im Stand der Technik zur kontinuierlichen Bauteilüberwachung von FKV kommen Sensorgarne bzw. -fasern zum Einsatz. Hier werden, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, u. A. resistive Sensorgarne verwendet [15, 41, 42]. Neben den im FKV weit verbreiteten faseroptischen Sensoren [33, 34] kommen auch immer häufiger piezoelektrische Mehrkomponentengarne [49] bzw. -fasern [50, 52, 53] zum Einsatz.

Neben der Realisierung eines Sensoraufbaus durch die Garnstruktur kann ein textilbasierter Sensor auch auf der Ebene der Textilstruktur aufgebaut werden. Wie bereits in Kapitel 2.1 aufgezeigt, sind auf Textilstrukturebene aus dem Stand der Technik keine rein aus Textilien aufgebauten Sensoren zur kontinuierlichen Überwachung von FKV-Bauteilen bekannt. Es gibt lediglich Anstrengungen zu rein textilen Energiespeichern als Teil der Verstärkungsstruktur von FKV [77]. Obwohl 3D-Gewebestrukturen als Verstärkungstextilien von FKV immer größere Bedeutung gewinnen (vgl. Kapitel 1), tauchen auch hier keine Bestrebungen im Stand der Technik auf, dieses Prinzip auf eine dreidimensionale Gewebestruktur zu übertragen. Lediglich die Integration von sensorischen Garnen in Mehrlagengewebestrukturen finden hier bereits im Stand der Technik Erwähnung [15, 16].

Außerhalb des Bereichs der sensorische FKV im Bereich der sensorischen Textilien gibt es allerdings einen breiten Stand der Technik:

Eine Möglichkeit ist der Aufbau in der zweidimensionalen Ebene. Durch solche Aufbauten lassen sich die in Kapitel 2.2 beschriebenen Sensorprinzipien aufbauen: das kapazitive [93], das resistive [94] und das piezoelektrische [95]. Bei den beiden zuerst genannten Lösungen wird der Sensor durch die sich kreuzenden Kett- und Schussgarne aufgebaut. Beim kapazitiven Verfahren [93] handelt es sich um ein im Innern elektrisch leitfähiges Garn. Außen ist das Garn elektrisch nicht leitfähig beschichtet. Wird ein Kreuzungspunkt zweier solcher Garne belastet, verändert sich die zwischen beiden Garnen gemessene Kapazität. Ähnlich funktioniert der resistive Aufbau in [94]. Hier wird der sich unter wechselnder Belastung ändernde elektrische (Übergangs-) Widerstand zwischen zwei sich kreuzenden elektrisch leitfähigen Garnen als Sensorsignal verwendet. In [95] wird der piezoelektrische Sensoraufbau hingegen durch sich abwechselnden Schusseintrag von elektrisch leitfähigem und piezoelektrischem Garnmaterial erreicht.

Ein anderer Ansatz zum Aufbau eines Sensors durch die Textilstruktur ist der Aufbau des Sensors durch die verschiedenen für das Sensorprinzip erforderlichen Lagen übereinander, also der dreidimensionale Aufbau. Durch das Übereinanderschichten elektrisch leitfähiger und elektrisch nicht leitfähiger Schichten können bspw. kapazitive Sensoren aufgebaut werden [96]. Ähnlich lassen sich resistive Sensoren aufbauen. Hier wird statt der dielektrischen Schicht eine schwach elektrisch leitfähige Schicht verwendet, die unter Druckbelastung ihren elektrischen Durchgangswiderstand verändert [97, 98]. Durch eine Zeilen- bzw. Spaltenausrichtung der Elektroden, kann eine orts aufgelöste Messung erfolgen [99, 100]. Eine Einsatzmöglichkeit solcher textilen Sensoren können Industrieanwendungen, wie die Überwachung von Montageprozessen bzw. das Antrainieren von Robotern mittels sensorischer Handschuhe sein [97, 98]. Aber auch medizinische Einsatzgebiete, wie die Überwachung von Schlafpositionen durch sensorische Bettbezüge [101] oder die Vermeidung der Ulcus-Bildung durch Druckstellen mittels drucksensitiver Sitzbezüge bei Rollstühlen [100] sind denkbar. Auch piezoelektrische Sensoren auf Textilstrukturebene tauchen im Stand der Technik auf. In [102] werden Lagenaufbauten beschrieben, die aus leitfähigen und piezoelektrischen Geweben, Gestriicken und Geflechten bestehen und z. B. als Bewegungssensoren in Wearables eingesetzt werden sollen.

Da ein Sensoraufbau aus einzelnen Lagen aufwendig ist, gibt es hier auch Anstrengungen einen Sensoraufbau aus 3D-Textilien zu realisieren. Das heißt, dass der Sensoraufbau fertig aus der Maschine kommt und nicht aus einzeln gefertigten 2D-Textilien geschichtet werden muss. In [103] wird bspw. ein kapazitiv sensorisches Bandgewebe beschrieben. Bei dem Abstandsgewebe beinhalten die obere und die untere

textile Fläche elektrisch leitfähiges Garn und bilden damit die Kondensatorplatten. Elektrisch nicht leitfähige Polfäden halten die beiden Flächen auf Distanz. Durch eine Krafteinwirkung auf das Band verringert sich der Abstand der beiden Flächen, wodurch sich die Kapazität des Kondensators erhöht (vgl. Formel ( 2 )), was als Sensorsignal verwendet werden kann.

Vereinzelt sind auch piezoelektrisch wirkende 3D-Textilien im Stand der Technik zu finden. In [104] wird ein Abstandsgewirk beschrieben, analog aufgebaut, wie das zuvor beschriebene kapazitive Abstandsgewebe, nur mit PVDF-Monofilament als Polfäden. Das Gewirk wurde zwar als Energy-Harvester entwickelt, wäre grundsätzlich aber auch als Sensor verwendbar. Mittels dieses Aufbaus werden allerdings nur sehr geringe Ströme erzeugt.

In Abbildung 2-16 sind die in diesem Kapitel beschriebenen Integrationsstufen nochmals zusammengefasst und gegliedert sowie mit jeweils einem Beispiel beschrieben.



Abbildung 2-16: Zusammenfassung verschiedener Möglichkeiten zur elektrotechnischen Funktionalisierung von Textilien und Beispiele dazu

## 2.4 Forschungslücke

Als Fazit aus Kapitel 2.1 lässt sich festhalten, dass es bereits einen breit gefächerten Stand der Technik zu in FKV integrierter Sensorik gibt. Auch wenn mit diesen Methoden ein Bauteil kontinuierlich im Betrieb überwacht werden kann, stören integrierte Sensorbauteile und vergleichsweise dicke Sensorfasern den kraftflussgerechten Faserverlauf. Foliensensoren und Hybridbauten mit folienbasierten Sensorbestandteilen schwächen den Verbund durch große Materialgrenzflächen. ‚Sensorische‘ Matrixsysteme schränken die Flexibilität bei der Materialauswahl ein.

Folglich ist eine Verstärkungsstruktur, die an sich als Sensor fungieren kann, erstrebenswert. Arbeiten, die das piezoresistive Verhalten von Kohlenstofffasern ausnutzen, sind im Stand der Technik vorhanden. Da Kohlenstofffasern unter Zugbelastung ein piezoresistives Verhalten aufweisen, erweist sich diese Methode für zugbeanspruchte Bauteile als vielversprechende Technologie. Negative Auswirkungen auf die mechanischen Bauteileigenschaften sind mit dieser Methode zumindest bei CFK-Strukturen vermeidbar. Allerdings ist der elektrische Widerstand von Kohlenstofffasern auch stark temperaturabhängig und eine orts aufgelöste Messung aufwendig.

Auch textile Aufbauten von (Super-)Kondensatoren in der Verstärkungsstruktur sind im Stand der Technik vorhanden. Allerdings zielt der bisherige Stand der Technik hier nur auf die kurzfristige Energiespeicherung bzw. -bereitstellung ab. Eine Untersuchung hinsichtlich einer möglichen sensorischen Wirkung von textilen Kondensatoren im FKV ist aus dem Stand der Technik nicht bekannt.

Aus Kapitel 2.2 kann zusammenfassend schlussgefolgert werden, dass grundsätzlich sowohl das kapazitive, das piezoresistive als auch das piezoelektrische Messprinzip dazu geeignet ist, in eine FKV-Struktur integriert zu werden. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, gibt es bereits einen breitgefächerten Stand der Technik zu resistiv wirkender textiler Sensorik, vornehmlich auf Garnebene. Allerdings besitzt diese Sensortechnologie die Nachteile der starken Temperaturabhängigkeit und bei orts aufgelöster Sensorik auf Garnebene die der aufwendigen Kontaktierung.

Der textile Aufbau von kapazitiver Sensorik in FKV-Strukturen ist ebenfalls naheliegend. Daher gibt es im Stand der Technik bereits Bestrebungen, Kondensatorstrukturen in die textile Verstärkung zu integrieren. Allerdings zielen diese Arbeiten auf Kondensatoren zur kurzfristigen Energiespeicherung bzw. -bereitstellung ab. Eine kraftsensorische Wirkung im FKV ist im Rahmen dieser Arbeit noch zu untersuchen.

Das piezoelektrische Sensorprinzip stellt ein weiteres vielversprechendes Sensorprinzip dar. Im Aufbau unterscheiden sich piezoelektrische Sensoren nur durch die Zwischenschicht von kapazitiven. Da FKV-Bauteile oft vorwiegend dynamischen Belastungen ausgesetzt sind, müssen statische Belastungen häufig nicht erkannt werden. Es kommt ohne Stromversorgung aus, ist sehr empfindlich und kaum temperaturabhängig.

Das piezoelektrische Sensorprinzip ist daher im Stand der Technik zur Sensorintegration in FKV ein weit verbreitetes Messverfahren (vgl. Kapitel 2.1). Wie beschrieben, werden Piezoelemente von außen auf das FKV-Bauteil aufgebracht oder in dieses integriert. Piezoelektrische Mehrkomponentenfasern sind ebenfalls im Stand der Technik zu finden. Darüber hinaus sind im Stand der Technik piezoelektrische Hybridstrukturen zu finden, die einen piezoelektrischen Matrixwerkstoff und Kohlenstofffasern als Elektroden einsetzen.

Aufgrund der Verspinnbarkeit (vgl. Kapitel 2.2) von PVDF und dem mehrschichtigen Aufbau der textilen Verstärkungsstruktur von FKV ist es naheliegend, neben den im Stand der Technik verbreiteten piezoelektrischen Sensorfasern, piezoelektrische Sensoren direkt durch die den FKV verstärkende Textilstruktur aufzubauen. Der volltextile Aufbau von piezoelektrischen Sensoren im Bereich FKV ist aus dem Stand der Technik jedoch bisher nicht bekannt.

Der in Kapitel 2.3 geschilderten Stand der Technik zu den Möglichkeiten der elektrotechnischen Funktionalisierung von Textilien beschreibt außerhalb des FKV, im Bereich sensorischer Textilien, einen breiten Stand der Wissenschaft und Technik. Sensoren auf Textilstrukturebene sind hier bereits verbreitet. Zudem finden z. T. auch sensorische 3D-Strukturen Erwähnung. Auch piezoelektrische Sensoren konnten so bereits aufgebaut werden.

Damit lässt sich die **Forschungslücke** folgendermaßen definieren:

- Komplett textil aufgebaute Sensorstrukturen als Teil des Verstärkungstextils von FKV, die Druck- bzw. Biegebelastungen erfassen, sind bisher nicht bekannt.
- Insbesondere der Aufbau von kapazitiven und piezoelektrischen Sensoren aus Verstärkungstextilien wäre möglich, wird im Stand der Wissenschaft und Technik allerdings bisher nicht beschrieben.
- Auch Mehrlagengewebe, die im Bereich der Faserverbundtechnik aufgrund diverser Vorteile immer mehr an Bedeutung gewinnen, wurden auf Textilstrukturebene noch nicht mit einer Sensorfunktion ausgestattet.

### **3 Zielsetzung, Arbeitshypothesen und Lösungsweg**

Ausgehend von der in Kapitel 1 beschriebenen Motivation und dem in Kapitel 2 beschriebenen Stand der Wissenschaft und Technik wird deutlich, dass der Aufbau von rein textilen Sensoren aus Mehrlagengewebe vorteilhaft ist.

Das Ziel der Arbeit ist daher die Entwicklung einer Methode, mithilfe derer ein Mehrlagengewebe, das als Verstärkungsstruktur von FKV eingesetzt wird, anwendungsspezifisch partiell sensorisch ausgestattet werden kann. Das sensorische Mehrlagengewebe soll eine kontinuierliche Bauteilüberwachung von FKV ermöglichen, ohne dass dabei Fremdkörper eingefügt werden müssen und die Bauteile schwächen. Es soll die Bauteilbelastung in kritischen Bereichen erfassen, wodurch ein mögliches Bauteilversagen vorhergesagt werden kann. So wird die Betriebssicherheit erhöht und es werden Ausfallzeit und Wartungskosten reduziert. Beispielhaft wird dies im Rahmen dieser Arbeit anhand eines Biegebalkens umgesetzt, verifiziert und validiert.

Aufgrund der Eignung von Kohlenstofffasern als Elektroden und Glasfasern als Dielektrikum erscheint der Aufbau kapazitiver Sensoren durch die Verstärkungsstruktur zunächst naheliegend. Allerdings sind im Faserverbund, zusätzlich zu den in Kapitel 2.2 genannten Nachteilen (vgl. Tabelle 1), aufgrund der geringen Verformung keine großen Amplituden im Sensorsignal zu erwarten. Da hierfür aus dem Stand der Wissenschaft und Technik keine Untersuchungen bekannt sind, gilt es dies in einer Grundsatzungersuchung zum Sensorprinzip nachzuweisen.

Das piezoelektrische Sensorprinzip bietet im Vergleich deutliche Vorteile und weniger Nachteile. Darum, und weil es sich bei FKV in vielen Fällen um dynamisch belastete Bauteile handelt, ist es im Bereich SHM und Condition Monitoring ein verbreitetes Messverfahren. Mit PVDF existiert ein Polymer, das gute piezoelektrische Eigenschaften besitzt und insbesondere bei piezoelektrischen Foliensensoren bereits eingesetzt wird. Da sich das Polymer zu Fasern verspinnen lässt, ist auch der rein textile Aufbau von Piezoelementen vorstellbar.

Zudem hat bei einem durch die textile Verstärkungsstruktur gebildeten Sensor die integrierte Sensorfunktion aufgrund der weitgehend lastflussgerechten Ausrichtung der Verstärkungsfasern kaum Auswirkungen auf die mechanische Bauteilfestigkeit.

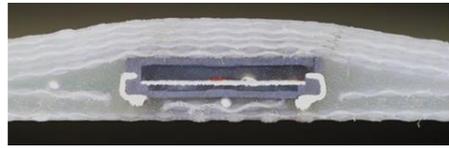
Für die Bearbeitung der gestellten Zielsetzung werden drei **Arbeitshypothesen** aufgestellt:

- 1) Die Bauteilüberwachung mittels gewebter Sensoren ist möglich. Textile Piezoelemente liefern, verglichen mit textilen Kondensatoren, ein deutlich besseres Sensorsignal.
- 2) Durch die weitgehend lastflussgerecht ausgerichteten Verstärkungsfasern - ohne Umlenkung oder Unterbrechung - wirkt sich die Sensorik nicht bzw. kaum negativ auf die mechanische Bauteilfestigkeit des FKV aus.
- 3) Textile piezoelektrische Kraftsensoren lassen sich aus Mehrlagengewebestrukturen herstellen. Belastungen von FKV können mittels piezoelektrischer Mehrlagengewebe, die als Verstärkungsstruktur eingesetzt werden, erfasst werden. Von der Signalstärke kann auf die Höhe der Belastung geschlossen werden.

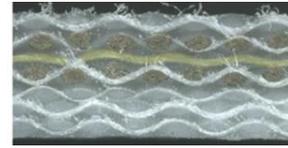
Infolge der Überprüfung der drei Arbeitshypothesen ergeben sich für die Arbeit folgende vier Bearbeitungsfelder:

- Ausgehend von Arbeitshypothese 1 gilt es zunächst die Möglichkeit der Übertragung des Sensorprinzips und des Aufbaus herkömmlicher piezoelektrischer Sensoren auf eine gewebebasierte Verstärkungsstruktur von FKV nachzuweisen und zu erforschen (siehe Abbildung 3-1). Vorversuche zu textilen Piezoelementen in FKV lieferten zudem bereits vielversprechende Ergebnisse [105]. Die sensorischen Eigenschaften der in FKV integrierten, gewebten Piezoelemente werden zudem mit denen von vergleichbaren FKV mit integrierten gewebten Kondensatoren verglichen. (vgl. Kapitel 4.1)
- Um den Einfluss der gewebten Sensoren auf die mechanischen Eigenschaften des FKV möglichst gering, das durch die gewebten Sensoren erzeugte Sensorsignal aber möglichst stark auszugestalten, werden grundlegende Erkenntnisse und Zusammenhänge zum Sensoraufbau und dessen textiler Struktur erforscht. Stets wird dabei der Einfluss der hierfür an den Verstärkungsgeweben vorgenommenen Modifikationen auf die mechanische Bauteilfestigkeit überprüft und hinsichtlich der sensorischen Eigenschaften bewertet. (vgl. Kapitel 4.2)
- Die so gewonnenen Erkenntnisse werden dann auf Mehrlagengewebestrukturen übertragen und analysiert. (vgl. Kapitel 5)
- Mithilfe eines Berechnungsmodells wird schließlich der Zusammenhang von Sensorsignal und mechanischer Belastung gezeigt. (vgl. Kapitel 6)

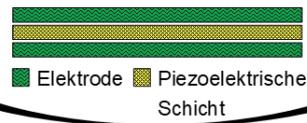
**Handelsübliches Bauteil:**



**Gewebtes Piezoelement:**



**Sensorprinzip:**



**Abbildung 3-1: Übertragung von Sensorprinzip und -aufbau herkömmlicher Piezoelemente auf eine Gewebestruktur**



## 4 Technologie- und Strukturanalyse

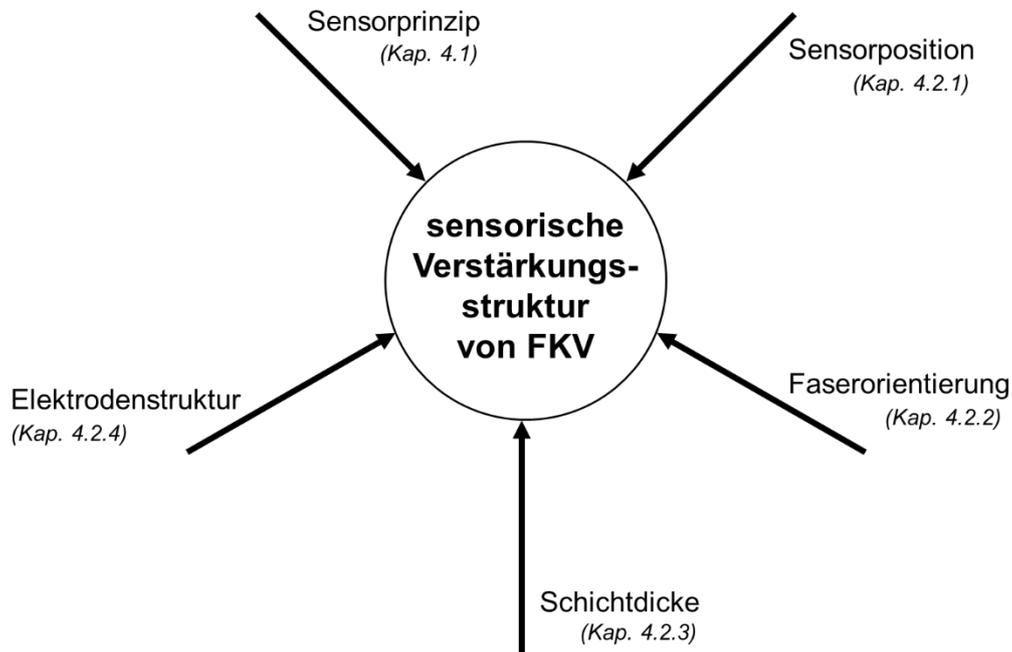
Für die Entwicklung und Erforschung piezoelektrischer Mehrlagengewebe als Teil der textilen Verstärkungsstruktur zur kontinuierlichen Bauteilüberwachung von FKV sind zunächst grundlegende Technologie- und Strukturanalysen hinsichtlich Mess- bzw. Sensorprinzip und Sensoraufbau erforderlich.

Aus Kapitel 2 kann als Schlussfolgerung gezogen werden, dass aufgrund der im FKV üblichen Fasermaterialien zunächst der Aufbau von Kondensatoren als strukturintegrierte Belastungssensoren naheliegend ist. Beim kapazitiven Messprinzip handelt es sich aber um ein vergleichsweise störanfälliges Sensorprinzip. Zudem sind aufgrund der kaum vorhandenen Querschnittsveränderung der konsolidierten FKV-Bauteile unter Belastung keine große Abstandsveränderung der Kondensatorplatten zueinander und damit kein großer Einfluss auf das Sensorsignal zu erwarten. Da das piezoelektrische Sensorprinzip bei ähnlichem Aufbau auch ohne plastische Verformung auskommt, ist hier ein besseres Sensorsignal zu erwarten. Diese Hypothese gilt es zunächst zu beweisen (siehe Kapitel 4.1.2 und 4.1.3). Darüber hinaus ist zu überprüfen, ob die Einbußen bei den mechanischen Bauteileigenschaften bei verbessertem Sensorsignal vertretbar sind (siehe Kapitel 4.1.4).

Beim piezoelektrischen Sensoraufbau muss mit PVDF-Fasern ein bauteilfremdes Material in die Struktur eingefügt werden und dabei der Einfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften bei gleichzeitig möglichst großem Sensorsignal so gering wie möglich gehalten werden. Dabei spielen die Sensorposition, die Faserorientierung und die Schichtdicke der piezoelektrischen Schicht sowie die Elektrodenstruktur eine entscheidende Rolle. Diese Zusammenhänge werden in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.5 untersucht. Auch hier ist darauf zu achten, dass sich die Sensorik möglichst nicht negativ auf die mechanischen Bauteileigenschaften auswirkt.

Ein ebenso wichtiger Bestandteil wie die Funktionsschicht sind bei einem Sensor die Elektroden. Da diese auch voll textil aufgebaut sein sollen, müssen diese hinsichtlich ihrer textilen Struktur für ihre elektrotechnische Funktion und auf das Sensorprinzip optimiert werden. Die Untersuchungen dazu sind in Kapitel 4.2.4 beschrieben.

Die beschriebenen technologischen und strukturellen Einflussfaktoren auf eine sensorische Verstärkungsstruktur von FKV und die dafür erforderlichen Untersuchungen sind in Abbildung 4-1 zusammengefasst.



**Abbildung 4-1: Übersicht der technologischen und strukturellen Einflussfaktoren auf eine sensorische Verstärkungsstruktur von FKV und der daraus resultierenden grundlegenden Voruntersuchungen dazu**

In diesem Kapitel werden daher allgemeine Grundlagenuntersuchungen zu Sensorprinzip und -aufbau durchgeführt. Da es sich um Prinzipuntersuchungen handelt und um in der Maschinenkonfiguration zur Herstellung der (sensorischen) Verstärkungsgewebe möglichst flexibel zu bleiben, werden diese zunächst an Proben im Einzellagenaufbau durchgeführt. Die Proben werden aus einzelnen, separat gefertigten, geschichteten 2D-Geweben als Verstärkung hergestellt. Zudem werden aus Gründen der einfacheren Verarbeitbarkeit in textilen Prozessen die Glasfasern durch Polyesterfasern (PET) substituiert. Die Proben werden dann im Dreipunktbiegeversuch auf ihre elektromechanischen Eigenschaften geprüft.

Abschließend werden in Kapitel 4.2.5, ergänzend zu den bereits in Kapitel 1 beschriebenen mechanischen Vorteilen von Mehrlagengeweben als Verstärkungsstruktur von FKV, überprüft, inwieweit die dreidimensionale Struktur auch für die Funktion und Zuverlässigkeit der textilen Sensoren vorteilhaft sein könnte.

Die im Rahmen dieses Kapitels gewonnenen Erkenntnisse werden dann in Kapitel 5 auf Mehrlagengewebestrukturen für die Verstärkung von FKV übertragen und verifiziert.

## 4.1 Sensorprinzip

Als Schlussfolgerung aus Kapitel 2 kann gezogen werden, dass im Bereich FKV insbesondere der Aufbau von textilen Sensoren nach kapazitivem Funktionsprinzip naheliegend ist, aber auch piezoelektrische Sensoren vielversprechend sein können. Da beide Sensorprinzipien miteinander verwandt sind, werden im Rahmen dieses Kapitels Vergleichsmessungen beider Prinzipien beschrieben. Die im vorliegenden Kapitel vorgestellten Untersuchungen sind z. T. auch in der eigenen Publikation [106] veröffentlicht.

### 4.1.1 Materialien und Methoden

#### Verwendete Materialien

Für den Aufbau von textilen Kondensatoren werden zwei verschiedene Faservarianten benötigt: Elektrisch leitfähige für die Elektroden und elektrisch isolierende für die Isolationsschicht.

Für die Versuche wird aufgrund der einfachen Verarbeitbarkeit ein polyesterfaserverstärkter Kunststoff mit einem textilen Sensorsystem ausgestattet. Für die Experimente wird ein hochfestes Polyethylenterephthalat-Filamentgarn (PET) (PHP Diolen<sup>®</sup> 174S) als elektrischer Isolator und damit als Substitut für Glasfasern verwendet. Als Elektrodenmaterial und damit als Ersatz für Kohlenstofffasern wird ein Garn aus versilberten und damit hochleitfähigen (ca. 30  $\Omega/m$ ) Polyamid-6.6-Filamenten (PA 6.6) (Statex Shieldex<sup>®</sup> 235/36 dtex 4-ply HC+B) eingesetzt.

In weiteren Versuchen wird das PET-Garn in der Funktionsschicht durch ein PVDF-Multifilamentgarn (Lenzing Lenofil<sup>®</sup> PVDF Multifilament 1100dtex LS) ersetzt. PVDF hat bessere dielektrische Eigenschaften als PET. Die relative Permittivität  $\epsilon_r$  von PVDF beträgt etwa 7, die von PET und Epoxidharz etwa 3 [92].

Da das PVDF-Garn während des Herstellungsprozesses gestreckt wird, liegt das Polymer hauptsächlich in der  $\beta$ -Phase und damit in der kristallinen Struktur mit piezoelektrischen Eigenschaften vor. Deshalb wird es in weiteren Untersuchungen auch für die piezoelektrische Sensoranordnung verwendet.

Die detaillierten technischen Parameter der verschiedenen in den Versuchen zu diesem Kapitel verwendeten Garne sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

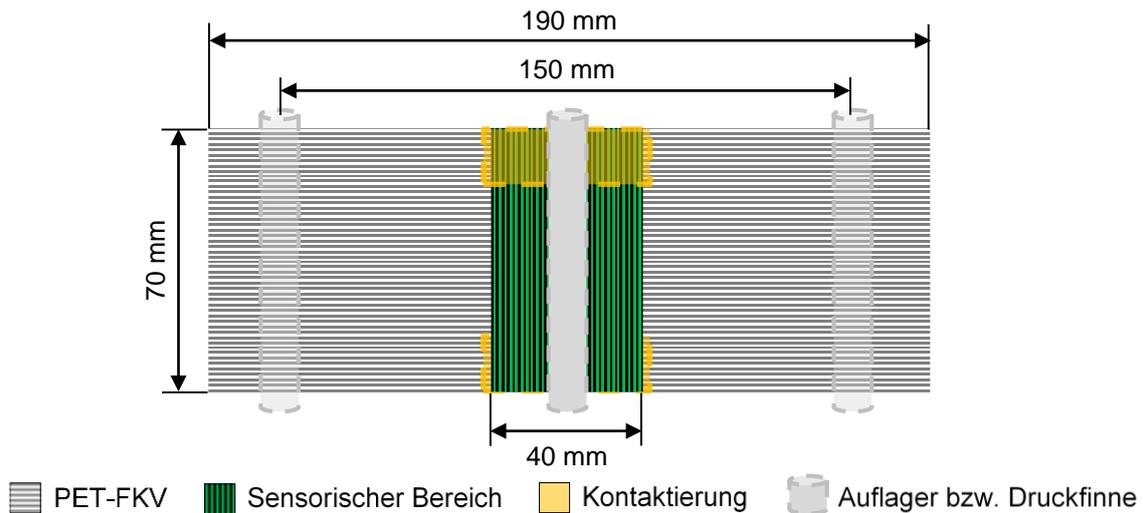
Als Matrixsystem wird ein Zweikomponenten-Epoxidharz von Hexion (LR 285 und LH 286) verwendet.

**Tabelle 3: Verwendete Garnmaterialien**

Garn	Material	Titer (dtex)	Zugfestigkeit (cN/tex)	Bruchdehnung (%)	Funktion
<b>PHP Diolen® 174S</b>	PET	1100	73,9	18.4	elektrischer Isolator; Verstärkung
<b>Statex Shieldex® 235/36 dtex 4-ply HC+B</b>	PA 6.6; silberbeschichtet	roh: 940 versilbert: ~1240	60	30	Elektrode
<b>Lenzing Lenofil® PVDF Multifilament 1100dtex LS</b>	PVDF	1100	14	78	elektrischer Isolator; piezoelektrische Lage

### Probenherstellung

Abbildung 4-2 zeigt den schematischen Aufbau und die Abmessungen der Prüfkörper. Die Abmessungen sind angelehnt an die Norm DIN EN ISO 14125:2011-5 zur Bestimmung der Biegeeigenschaften von faserverstärkten Kunststoffen (Dreipunktbiegeversuch). Zur Orientierung sind die Druckfinne und die Auflager des Dreipunktbiegeversuchs auch eingezeichnet. Die Platzierung des Sensors direkt unter der Druckfinne mag zwar für die Erfassung einer Biegebelastung aufgrund der an dieser Stelle durch die Querspannung hervorgerufenen Artefakte nicht optimal sein. Für den ersten Prinzipnachweis von vollkommen textil aufgebauter Sensorik als Teil der Verstärkungsstruktur von FKV und den Vergleich verschiedener Sensorprinzipien wird dennoch die Position unter der Druckfinne als die Stelle mit der maximalen Biegespannung herangezogen.



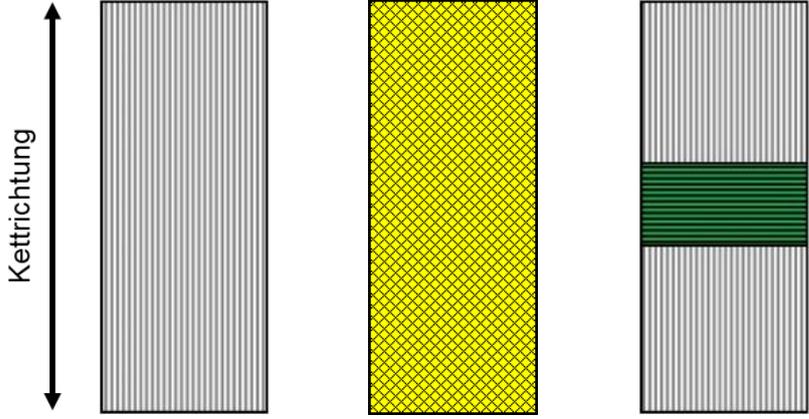
**Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der Proben in Draufsicht mit Druckfinne und Auflager des Dreipunktbiegeversuchs zur Orientierung**

Für die sensorischen FKV-Bauteile werden verstärkende Gewebelagen in Leinwandbindung aus den in Tabelle 3 zusammengefassten Garnmaterialien entsprechend den in Abbildung 4-2 dargestellten Bauteilabmessungen hergestellt. Die verglichen mit anderen Bindungen kurze Fadenflottierung der Leinwandbindung verhindert weitgehend ein Verrutschen der Kett- und Schussfäden. Die Fadenkreuzungspunkte liegen vergleichsweise eng, was die Herstellung von sehr dichten Geweben ermöglicht. Dadurch können Kurzschlüsse zwischen den beiden leitenden Schichten vermieden werden. Zudem sind beide Seiten der Leinwandbindung identisch, was besonders wichtig für die Zwischenschicht ist.

Tabelle 4 fasst die hergestellten Verstärkungsgewebe mit dem Schema der Musterreportanordnung und der Anzahl der für den Verbundaufbau erforderlichen Lagen zusammen.

Die praktische Umsetzung und Herstellung der einzelnen Lagen erfolgt auf einer Greiferwebmaschine G6300 von Sulzer Rütli mit einer Kettdichte von 12,1 KFd/cm und einer Schussdichte von 10 SFd/cm. Das PVDF-Gewebe wird auf einer MüGrip MBCJ2, einer Einarmgreiferwebmaschine mit Einzelschusseintrag, der Jakob Müller AG mit identischen Parametern gefertigt.

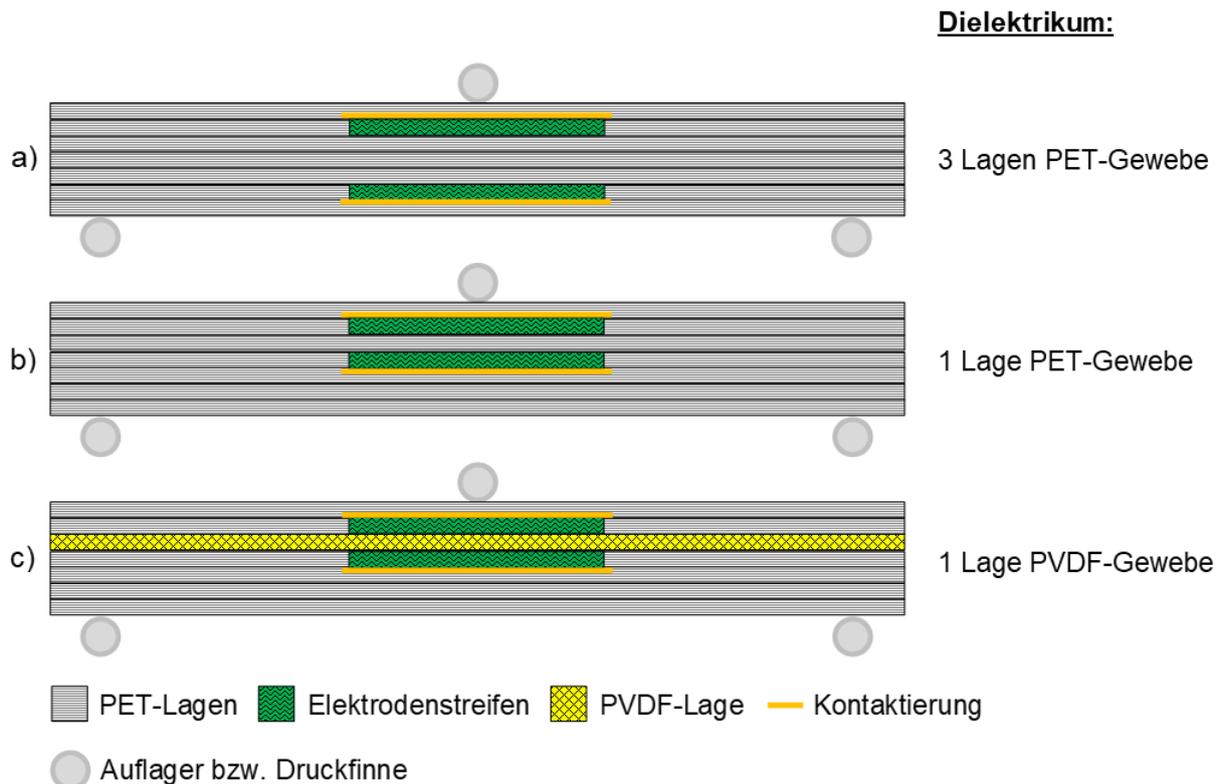
**Tabelle 4: Weblayout der hergestellten Gewebe für die Untersuchungen zum Sensorprinzip (vgl. Abbildung 4-3)**



<b>Schussmaterial</b>	PET 	PVDF 	PET/Statex/PET 
<b>Schussanzahl</b>	200	200	80/40/80
<b>Kettmaterial</b>	PET	PVDF	PET
<b>Funktion</b>	Isolation, Verstärkung	Piezoelektrische Lage	Elektrode
<b>Anzahl</b>	5 bzw. 4	0 bzw. 1	2

Die mehrschichtig aufgebauten FKV-Proben mit der sensorischen Verstärkungsstruktur werden mit dem membranunterstützten Niederdruck-Infusionsverfahren VAP® (Vacuum Assisted Process) hergestellt. Die sensorische Verstärkungsstruktur besteht aus sieben einzelnen Gewebelagen. Das verwendete Epoxidharz härtet bei Raumtemperatur aus. Der Nachhärtprozess erfolgt (während der thermischen Polarisierung) bei 90°C.

Die sensorischen FKV-Proben werden in drei verschiedenen Varianten realisiert. Abbildung 4-3 zeigt schematisch den Schichtaufbau der verschiedenen Proben im Querschnitt und die Position der textilen Elektroden.



**Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der verschiedenen Varianten der hergestellten sensorischen FKV-Proben in Querschnittsansicht**

Nach Gleichung ( 2 ) kann die Kapazität eines Plattenkondensators bei gleicher Elektrodenfläche durch Verringerung des Elektrodenabstands und durch die Wahl eines besseren dielektrischen Materials erhöht werden. Deshalb werden zusätzlich zu den Proben a) in Abbildung 4-3 Proben mit einem in etwa dreimal kleineren Elektrodenabstand hergestellt (b in Abbildung 4-3). Wie eingangs erwähnt, hat unpolarisiertes PVDF etwa zweimal bessere dielektrische Eigenschaften als PET. Daher werden auch Proben mit PVDF-Gewebe als dielektrisches Material gefertigt (c in Abbildung 4-3).

Um statistisch aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, werden je Konfiguration sieben Proben hergestellt. Die elektrische Kontaktierung der Gewebeelektroden geschieht über ein Kupferklebeband mit leitfähigem Kleber (3M Typ 1181), das am Rand auf die Elektroden geklebt wird. Die Position des Kupferklebebands ist in Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 eingezeichnet. Nach dem Aushärten wird das Kupferband durch Entfernen von Harz freigelegt und mit einem Kabel verlötet (vgl. Abbildung 4-4).

Abbildung 4-4 zeigt eine fertige Sensorprobe. Die Abmessungen der Proben betragen 190 mm x 70 mm x 2,8 mm. Tabelle 5 zeigt die Querschnittsansicht der drei verschiedenen Sensorstrukturen. Von jedem Aufbau werden für die folgenden Untersuchungen sieben Proben herangezogen.

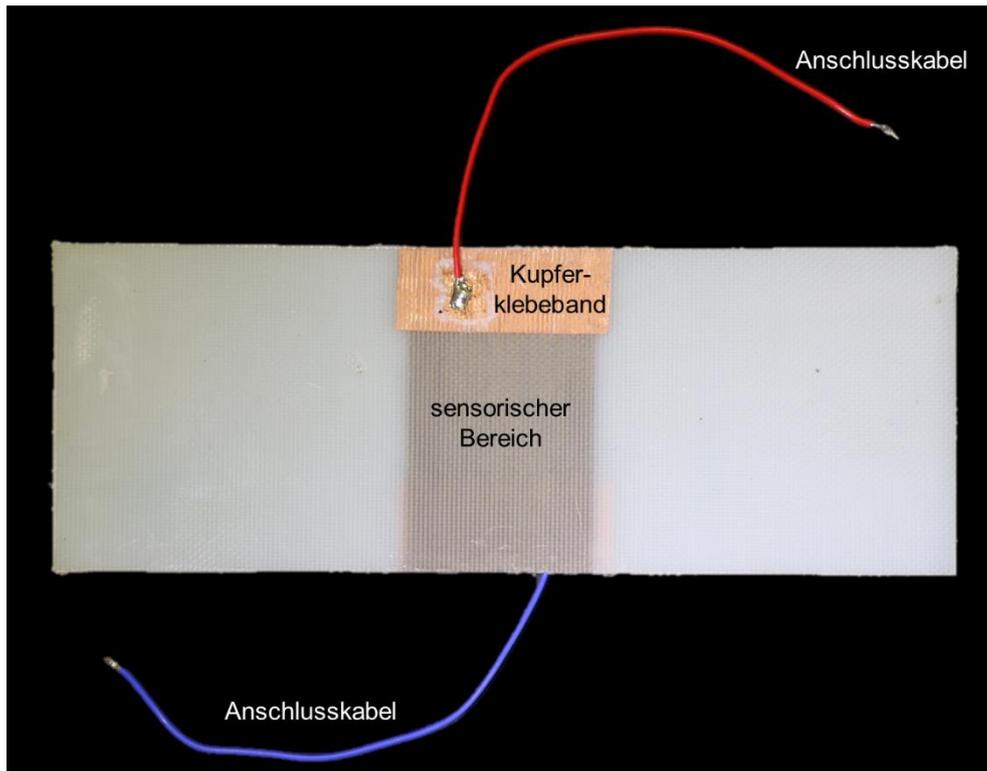


Abbildung 4-4: Sensorische FKV-Probe

Tabelle 5: Schnittbilder der drei verschiedenen Sensorvarianten

<b>Schnittbild</b>			
<b>Struktur</b>	a)	b)	c)
<b>Sensor-konfiguration</b>	Plattenkondensator	Plattenkondensator	Plattenkondensator / Piezoelement
<b>Schema</b>			

## Polarisation der Proben mit piezoelektrischer Zwischenschicht

In den weitergehenden Experimenten in Kapitel 4.1.3 zur Ladungsverschiebung kommt es auf den piezoelektrischen Effekt des PVDF-Garnmaterials an. Die piezoelektrischen Eigenschaften der sensorischen Struktur können durch Polarisation der piezoelektrischen Schicht verbessert werden (vgl. Kapitel 2.2). Aus diesem Grund müssen die Proben mit dem PVDF-Gewebe in der Zwischenschicht (c in Abbildung 4-3) polarisiert werden.

Durch den Polarisationsvorgang werden die Dipole im piezoelektrischen Material auf die Elektroden ausgerichtet. Eine schematische Darstellung des Prozesses ist in Abbildung 2-11 dargestellt. Der thermische Polarisationsprozess in Kondensatoranordnung ist im vorliegenden Fall aufgrund des Probenaufbaus aus gewebten Elektroden und piezoelektrischem Gewebe die praktikabelste Methode.

Abbildung 4-5 zeigt den Ablauf des thermischen Polarisationsprozesses. Nachdem die Proben auf die Polarisationstemperatur  $T_P$  gebracht wurden, werden die beiden gewebten Elektroden an eine Hochspannungsversorgung mit der Polarisationsspannung  $U_P$  angeschlossen. Nach der Polarisationszeit  $t_P$  werden die Proben auf Raumtemperatur  $T_R$  abgekühlt. Das durch die Gleichspannung erzeugte elektrische Feld mit der Feldstärke  $E_P$  wird so lange aufrechterhalten, bis der Polarisationsvorgang abgeschlossen ist und die Proben wieder auf Raumtemperatur abgekühlt sind. Die für die Polarisation erforderlichen Parameter sind Feldstärke  $E_P$ , Polarisationszeit  $t_P$  und Polarisationstemperatur  $T_P$ . Solange die piezoelektrische Struktur nicht über die Curie-Temperatur  $T_C$  erhitzt wird, bleibt die Polarisation erhalten und der Polarisationsprozess ist nur einmal nach dem Herstellungsprozess der sensorischen Verbundstruktur notwendig.

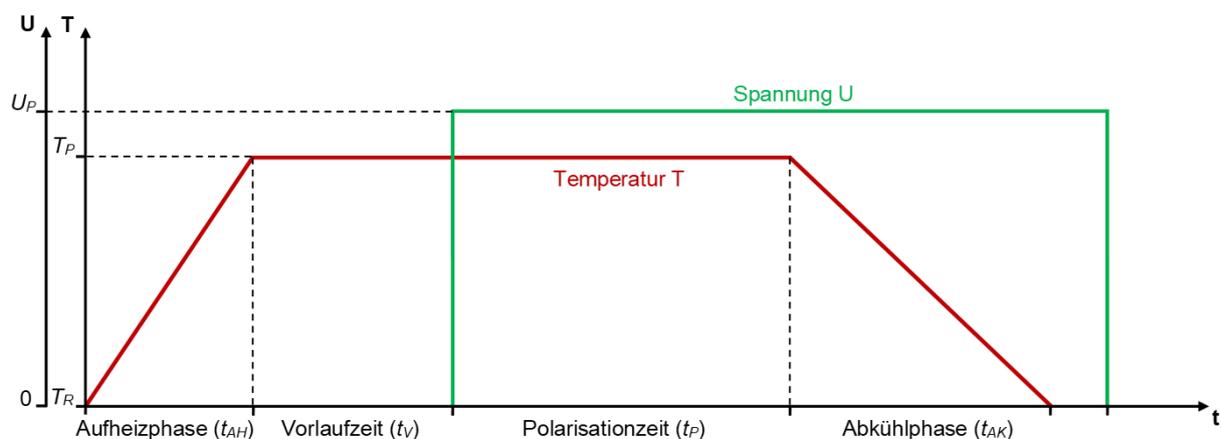


Abbildung 4-5: Ablauf des thermischen Polarisationsprozesses

Kawai [47] empfiehlt für die Polarisierung von PVDF eine Polarisierungstemperatur  $T_P$  zwischen  $50^\circ\text{C}$  und  $90^\circ\text{C}$  und eine elektrische Feldstärke von  $32 \text{ kV mm}^{-1}$ . In anderen Arbeiten werden ähnliche Parameter verwendet [107, 108]. Auch in den durchgeführten Vorversuchen [105] konnten ähnliche textile Piezoelemente aus FKV mit einer Temperatur  $T_P = 90^\circ\text{C}$ , die unter der Curie-Temperatur von PVDF liegt, und  $t_P = 10 \text{ min}$  erfolgreich polarisiert werden. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit die gleichen Polarisationsparameter angewandt.

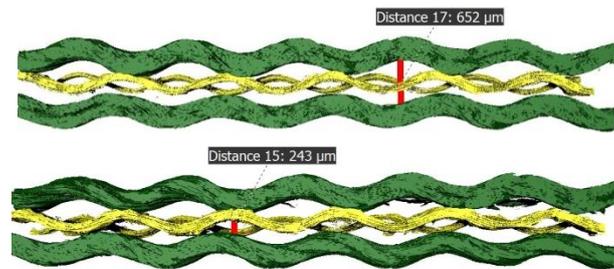
Die Feldstärke  $E_P$  hängt sowohl von angelegter Spannung  $U_P$  als vom Abstand  $d_P$  der Elektroden ab. Der Zusammenhang ist in Gleichung ( 12 ) dargestellt:

$$E_P = \frac{U_P}{d_P} \quad ( 12 )$$

Der Elektrodenabstand  $d_P$  kann anhand eines hochauflösenden Scans mit einem Computertomographen (CT) bestimmt werden. Abbildung 4-6 zeigt den Scan der sensorischen Struktur einer Probe nach Aufbau c), der mit einem GE nanotom<sup>®</sup> m mit einer Scanauflösung von  $2 \mu\text{m}$  aufgenommen wurde. Im Bild sind das Epoxidharz als Matrixmaterial sowie die Kettfäden der Übersicht halber ausgeblendet und nur die Funktionsfäden im Schuss sind sichtbar. Die verschiedenen Materialien sind in unterschiedlichen Farben dargestellt. Die Elektroden aus versilbertem PA-6.6-Garn sind grün eingefärbt und das PVDF in der Funktionsschicht gelb. Die Ondulation des Elektroden-garns ist deutlich sichtbar. Diese Ondulation ist der Grund für ein stark schwankenden  $d_P$ . Abbildung 4-7 zeigt den maximalen und den minimalen Elektrodenabstand.  $d_P$  bewegt sich demnach zwischen  $0,243 \text{ mm}$  und  $0,652 \text{ mm}$ .



**Abbildung 4-6:** CT-Scan des piezoelektrischen Bereichs: Elektrodengarn: grün; piezoelektrisches Garn: gelb; Kettgarn und Matrixmaterial: ausgeblendet



**Abbildung 4-7: Kettenschnitt: maximaler (oben) und minimaler (unten) Elektrodenabstand ( $d_P$ )**

Erste Tests zeigten, dass aufgrund der verglichen mit Epoxidharz niedrigeren Dielektrizität von Luft schon bei sehr niedrigen angelegten Spannungen  $U_P$  mit elektrischen Überschlügen an den Probenrändern zu rechnen ist (siehe Abbildung 4-8 links). Um das zu verhindern, werden die Probenränder mit Silikon (Wacker Elastosil® E43) isoliert (siehe Abbildung 4-8 rechts).



**Abbildung 4-8: Links: Spuren von Überschlügen am Probenrand; rechts: Mit Silikon isolierte Probenkante**

Mit solch einem Aufbau konnte eine zuverlässige Polarisationsspannung von  $U_P = 5 \text{ kV}$  erreicht werden. Zusammen mit  $d_P$  im Bereich von 0,242 mm bis 0,652 mm entspricht das einer elektrischen Feldstärke  $E_P$  im Bereich von  $7,57 \text{ kV mm}^{-1}$  bis  $20,67 \text{ kV mm}^{-1}$ , was zwar etwas unter den in der Literatur empfohlenen Werten liegt, aber, wie sich in den weiteren Versuchen zeigte trotzdem zu einer erfolgreichen Polarisierung führt.

Die Proben mit integrierten textilen Sensoren müssen hinsichtlich ihrer sensorischen Eigenschaften charakterisiert werden (Kapitel 4.1.2 und 4.1.3). Weiterhin ist der Einfluss der textilen Sensoren auf die mechanischen Eigenschaften der Proben mit integrierter Sensorik im Vergleich zu Proben ohne sensorische Verstärkungsstruktur zu bestimmen (Kapitel 4.1.4).

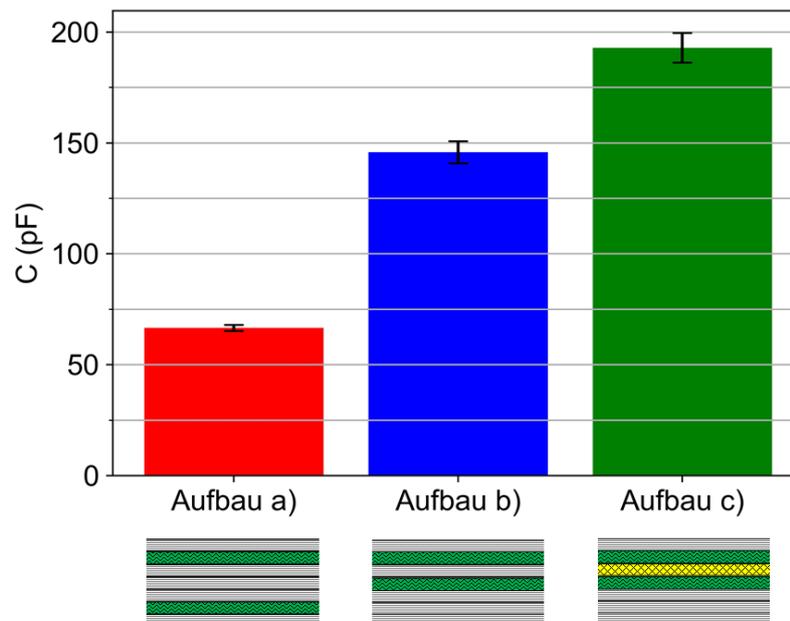
#### 4.1.2 Messung im Ruhezustand (statisch)

Zunächst wird die Kapazität der Proben im Ruhezustand gemessen. Dabei wird untersucht, ob die in Gleichung ( 3 ) beschriebenen Zusammenhänge zwischen der Kapazität und dem Elektrodenabstand und dem der Kapazität und dem dielektrischen Material auch in der textilen Struktur nachgewiesen werden können. Zu diesem Zweck wird die Kapazität  $C$  der Proben bestimmt. Die Kapazitätsmessung wird an allen

Probentypen (a, b, c in Abbildung 4-3) durchgeführt. Die Kapazität  $C$  wird mit einem programmierbaren automatischen RCL-Messgerät FLUKE PM6304 bestimmt. Die Messung wird bei 0,1 kHz durchgeführt. Weitere Experimente ergaben, dass die Messfrequenz keinen signifikanten Einfluss auf die gemessene Kapazität hat. Die verschiedenen Sensorkonfigurationen können auf der Grundlage der erhaltenen Werte charakterisiert und verglichen werden. Darüber hinaus liefert das Messverfahren Orientierungswerte für die nachfolgende dynamische Prüfung.

Wie in Abbildung 4-9 zu sehen ist, sind die in Gleichung ( 2 ) beschriebenen Zusammenhänge zwischen Elektrodenabstand, Dielektrikum und Kapazität des Kondensators auch in der textilen Kondensatorstruktur nachweisbar. So hat Struktur a) in Abbildung 4-3 bei einem ca. dreimal größeren Elektrodenabstand mit 66,6 pF eine deutlich geringere Durchschnittskapazität als Struktur b) mit 145,9 pF. Die Werte sind Durchschnittswerte über die sieben Proben jeden Typs.

Der Einfluss des dielektrischen Materials auf die Kapazität des Kondensators lässt sich ebenfalls in der textilen Struktur nachweisen. Die Proben des Typs c) mit PVDF als dielektrische Gewebeschiicht und einer durchschnittlichen Kapazität von 192,9 pF im nicht polarisierten Zustand erreichen höhere Werte als die Proben b) bei gleichem Elektrodenabstand, aber mit PET-Gewebe als dielektrische Gewebeschiicht. Die Durchschnittswerte mit den jeweiligen Standardabweichungen sind im Anhang in Tabelle 15 aufgeführt.



**Abbildung 4-9: Einfluss von Elektrodenabstand und dielektrischem Textilmaterial auf die Kapazität gewebter Kondensatoren**

### 4.1.3 Messung unter zyklischer Last (dynamisch)

Die sensorische Struktur soll die Belastung der FKV-Komponente online in Echtzeit messen. Die sensorischen Proben werden daher zyklischen Belastungstests unterzogen und die Korrelation zwischen dem Sensorsignal und dem Kraft- bzw. Wegsignal ausgewertet. Mit der dynamischen Messung wird der Zusammenhang zwischen den elektrischen Eigenschaften der sensorischen Verstärkungsstruktur und der Durchbiegung der Probe untersucht. Der Test basiert auf der Norm DIN EN ISO 14125:2011-05 zur Bestimmung der Biegeeigenschaften von FKV. Im Gegensatz zu dem in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Verfahren ist nicht die Bestimmung der mechanischen Kennwerte das Ziel dieser Messung, sondern die Simulation einer zyklischen Biege- bzw. Schwingungssituation zur Bewertung der Sensoreigenschaften. Die Messungen werden auf einer dynamischen Prüfmaschine Zwick Roell mit 5 kN Kraftsensor durchgeführt. Eine in den Versuchsaufbau eingebaute Probe ist in Abbildung 4-10 dargestellt. Die Versuche werden bei einem Auflager- und Druckfinnen Durchmesser von 10 mm und einem Auflagerabstand von 150 mm durchgeführt. Die Sensorauswertung erfolgt auf zwei verschiedene Arten, durch Messung der Kapazität und durch Messung der Ladungsverschiebung der belasteten Aufbauten.

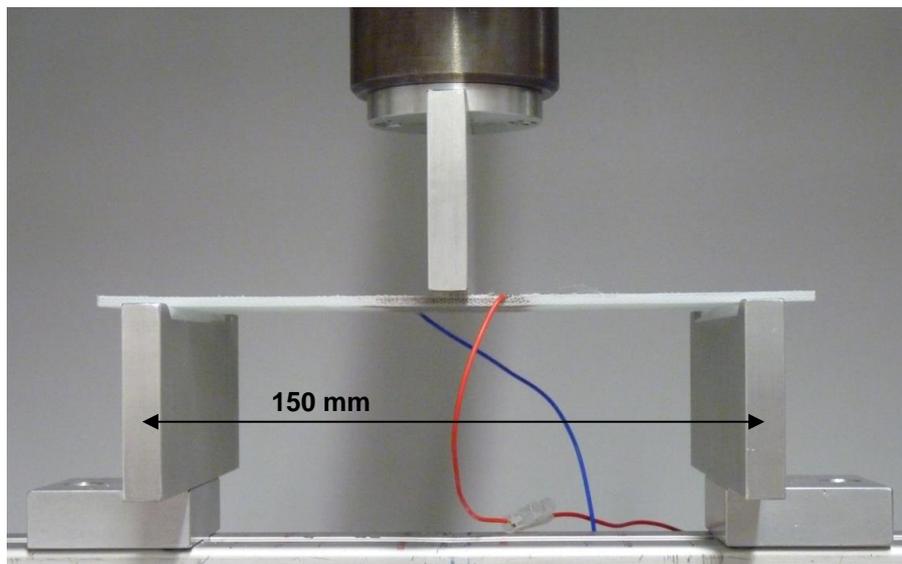


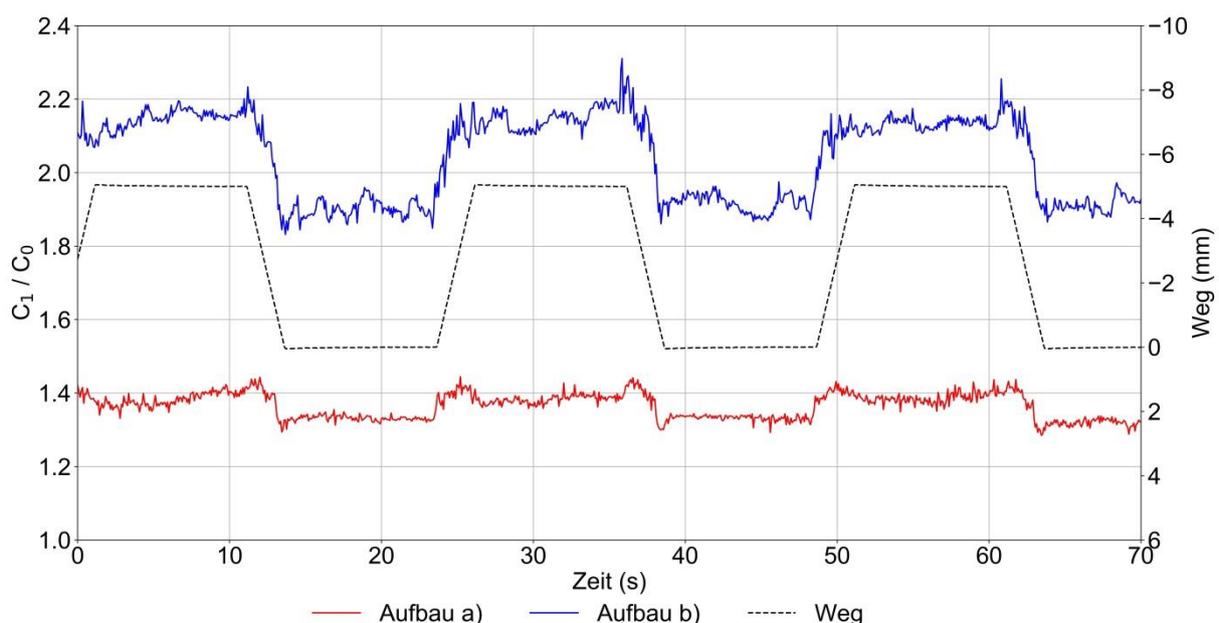
Abbildung 4-10: In die dynamische Prüfmaschine eingelegte sensorische Probe

## Messung der Kapazität unter zyklischer Last

Die Kapazitätsänderungen unter dynamischer Belastung werden mit dem Messgerät PICOCAP® PCapØ2-EVA-KIT der Firma Acam Messelectronic GmbH aufgezeichnet. Die Messfrequenz des Messgeräts beträgt 12,5 Hz. Der gemessene Kapazitätswert ist auf die konstante Referenzkapazität auf der Leiterplatte normiert. Um ein reproduzierbares und vergleichbares Ergebnis zu erhalten, werden die einzelnen Proben identisch in die Prüfeinrichtung eingesetzt und an die Messeinrichtung angeschlossen.

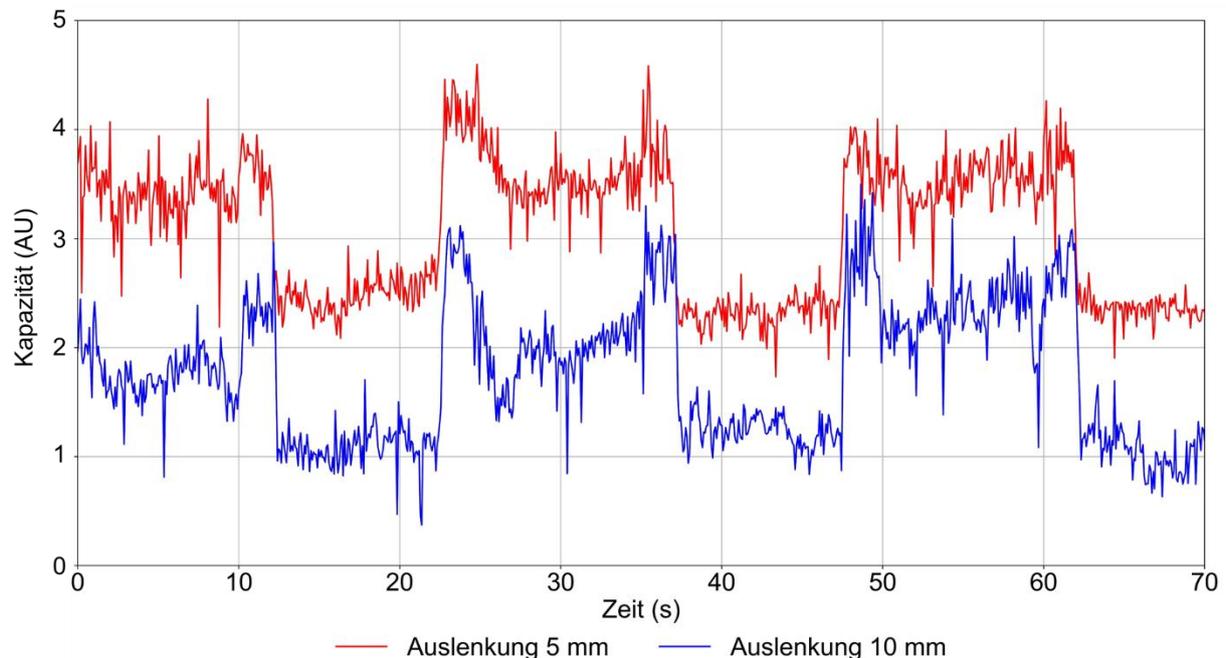
Die Proben werden mit einer niedrigen Frequenz (0,04 Hz) und einer trapezförmigen Wegauslenkung belastet. Eine schnelle Sinusschwingung ist nicht geeignet, da eine kapazitive Messung relativ träge ist. Der Test wird ohne Vorlast durchgeführt. Jeder Zyklus startet bei 0 mm Auslenkung der Probe. Um zu prüfen, ob die Höhe der Auslenkung einen Einfluss auf die Kapazitätsänderung hat, werden die Tests sowohl mit 5 mm als auch mit 10 mm Hub (bzw. Durchbiegung der Probe) durchgeführt. Bei diesen Versuchen wird die Probe lediglich durch eine Belastung reversibel verformt und nicht zerstört.

Abbildung 4-11 zeigt ein Beispiel für den Zusammenhang zwischen der Kapazitätsänderung einer Probe nach Aufbau a) und einer Probe nach Aufbau b) und der zyklischen Auslenkung der Belastungsfinne. Für beide Aufbauten kann ein Zusammenhang zwischen der Auslenkung und der resultierenden Kapazitätsänderung beobachtet werden. Wie aus den Messungen im Ruhezustand zu erwarten, ist das Kapazitätsniveau von Aufbau b) höher als das von Aufbau a).



**Abbildung 4-11: Zusammenhang zwischen Auslenkung (Weg) der Belastungsfinne und der Kapazitätsänderung der sensorischen Proben**

Dennoch gibt es, wie in Abbildung 4-12 ersichtlich, keinen offensichtlichen Zusammenhang zwischen dem Sensorsignal der Proben und unterschiedlichen maximalen Auslenkungen der Belastungsfinne. Darüber hinaus zeigt die Signalschwankung, dass die Kapazitätsmessung sehr empfindlich auf Störeinflüsse reagiert.

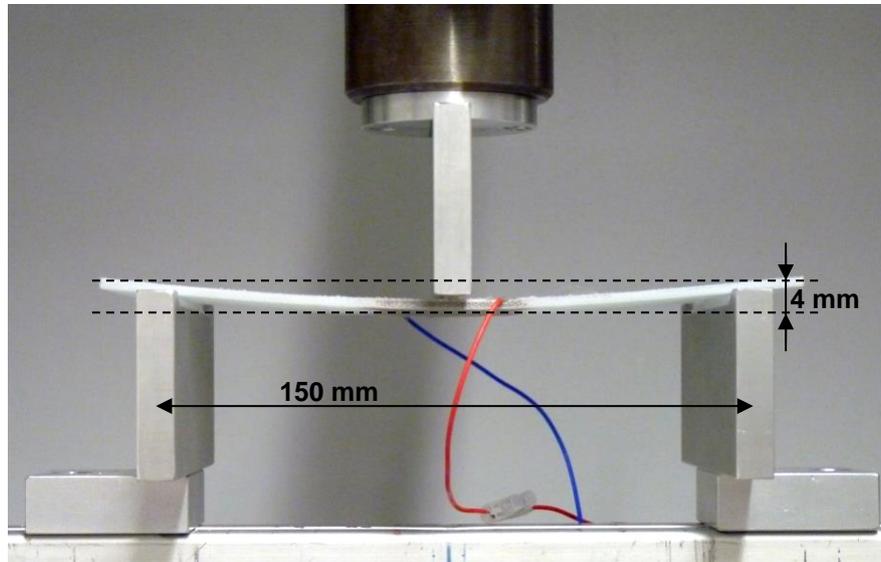


**Abbildung 4-12: Vergleich der Kapazitätsänderung einer sensorischen Probe (Aufbau a) unter Belastungszyklen unterschiedlicher Auslenkung**

### Messung der Ladungsverschiebung

Bei piezoelektrischen Materialien führt eine mechanische Belastung zu einer Ladungsverschiebung. Das bedeutet, dass die Belastungsänderung von Aufbauten mit piezoelektrischer Zwischenschicht (Aufbau c) nicht nur durch die sich ändernde Kapazität, sondern auch durch die hervorgerufene Ladungsverschiebung erfasst werden kann. Eine Ladungsverschiebung findet nur bei sich ändernder Belastung statt. Daher werden die Proben einer kontinuierlichen sinusförmigen Belastung ausgesetzt (Frequenz: 5 Hz; Amplitude: 1 mm). Damit das Sensorsignal dem Kraftsignal folgt, muss die Probe während des gesamten Bewegungszyklus der Druckfinne unter Last stehen. Vorbereitende Experimente haben gezeigt, dass für ein sauberes und reproduzierbares Sensorsignal eine Probenvorspannung von ca. 10 N erforderlich ist [109]. Durch die Vorspannung befinden sich die Proben ständig unter Last, wodurch auch bei einem direkt unter der Druckfinne befindlichen Sensor nicht mit Artefakten bspw. durch das Auftreffen der Druckfinne auf der Probe zu rechnen ist. Deshalb wird die sinusförmige Belastung zwischen -2 mm und -4 mm Auslenkung aufgebracht. Auch hier handelt es sich

um einen zerstörungsfreien Versuch. Die Proben werden nur durchgebogen bzw. in Schwingung versetzt. Abbildung 4-13 zeigt eine in die dynamische Prüfmaschine eingelegte piezoelektrische Probe unter Maximallast.



**Abbildung 4-13: In die dynamische Prüfmaschine eingelegte piezoelektrische Probe unter Maximallast**

Die Aufzeichnung der Versuchswerte erfolgt über ein Oszilloskop Wavesurfer 3034 von Teledyne Lecroy. Für die Messung werden zwischen die zu untersuchende Probe und das Oszilloskop ein Ladungswandler und -verstärker (CCLD2-Konverter) vom Typ 2647-B der Firma Brüel & Kjær und ein Signalaufbereiter und -verstärker 1704-C-10 (Brüel & Kjær) geschaltet. Die untere Grenzfrequenz (Filter 1. Ordnung, -10 %) des CCLD-Konverters (constant current line drive) beträgt 0,17 Hz und seine obere Grenzfrequenz 50 kHz, beide bei 1 nF Wandlerkapazität. Die Eingangsimpedanz beträgt laut Brüel & Kjær 19,2 G $\Omega$ . Die voneinander abhängigen Größen, aufgebrachte Kraft der Prüfmaschine und Sensorsignal, werden am Oszilloskop mit derselben Zeitbasis aufgezeichnet.

Die Messkurven einer Beispielprobe in Abbildung 4-14 zeigen, dass das Kraftsignal und das entsprechende Sensorsignal eine proportionale Änderung aufweisen. Dies ist bereits im unpolarisierten Zustand von PVDF erkennbar. Bei polarisiertem PVDF in der Zwischenschicht ist der Effekt der Ladungsverschiebung deutlich ausgeprägter, da die Ladungsschwerpunkte in der Kristallstruktur des piezoelektrischen Materials in Belastungsrichtung ausgerichtet sind. In Abbildung 4-15 ist dieser Zusammenhang für sieben Proben nach Aufbau c) in einem Balkendiagramm dargestellt. Während das Sensorsignal der Proben im unpolarisierten Zustand im Durchschnitt eine Schwingweite bzw. doppelte Amplitude von um die 5 pC aufweisen, verfünffacht sich der Durchschnittswert auf über 20 pC nach der Polarisation (vgl. Anhang Tabelle 16).

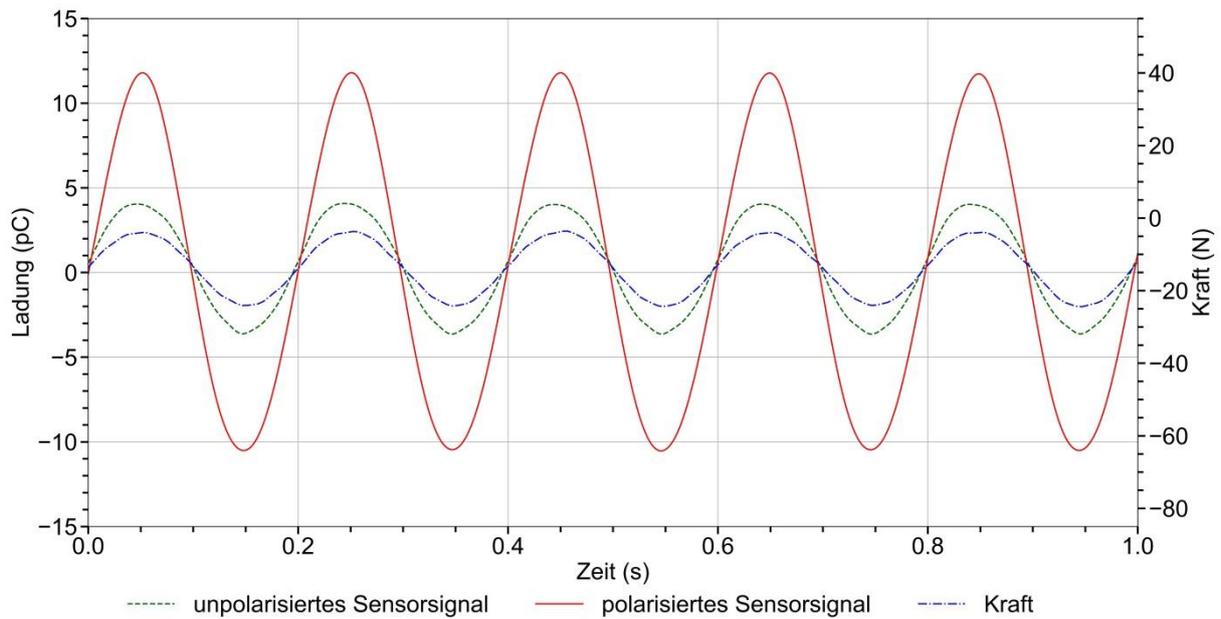


Abbildung 4-14: Belastungsabhängige Ladungsverschiebung einer sensorischen Probe mit Aufbau c) im unpolarisierten und polarisierten Zustand

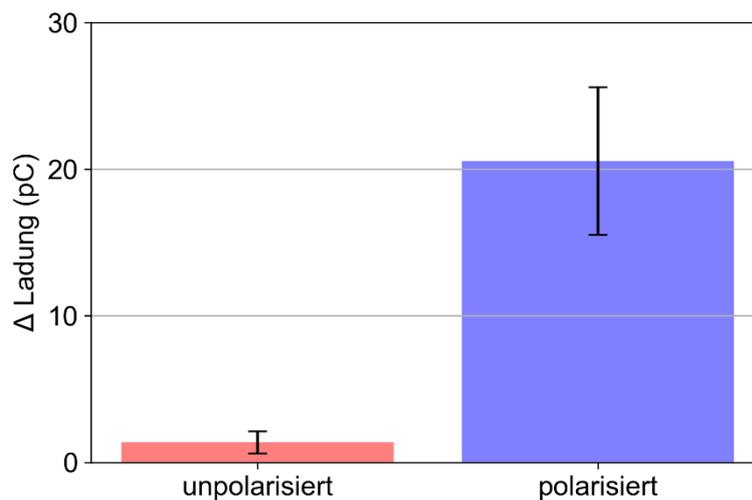


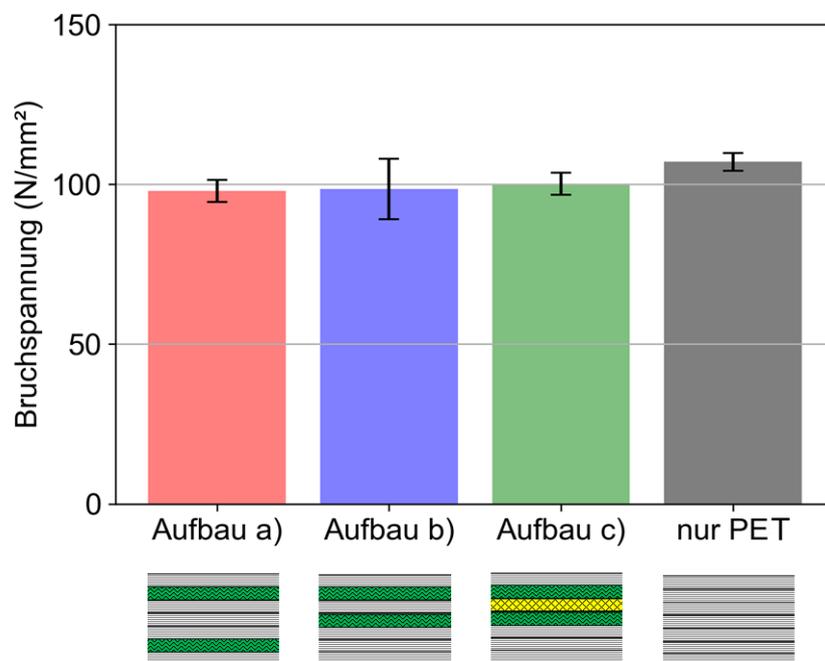
Abbildung 4-15: Einfluss des Polarisierungsprozesses auf Proben mit piezoelektrischer Konfiguration (Aufbau c)

#### 4.1.4 Einfluss der Sensorik auf die mechanischen Bauteileigenschaften des FKV

Um den Einfluss der sensorischen Struktur auf die mechanische Festigkeit des Bauteils zu ermitteln, werden die Proben mit allen Sensorvarianten einem Dreipunkt-Biegeversuch unterzogen und die Ergebnisse mit denen von Vergleichsproben ohne Sensor verglichen (nur PET). Die Tests werden nach der Norm DIN EN ISO

14125:2011-05 durchgeführt. Die Probenabmessungen betragen daher 56 mm x 15 mm x 2,8 mm und der Abstand der Auflager ist 44,8 mm. Die Auflager haben einen Durchmesser von 4 mm und die Druckfinne einen Durchmesser von 10 mm.

Wie in Abbildung 4-16 dargestellt, zeigt der Dreipunkt-Biegeversuch, dass die Integration von elektrisch leitfähigen Schussfäden keinen signifikanten Einfluss auf die mechanische Festigkeit der Proben im Vergleich zu Referenzproben (nur PET) hat. Selbst die Integration eines ganzen piezoelektrischen Gewebes anstelle eines verstärkenden PET-Gewebes hat keinen signifikanten negativen Einfluss auf die mechanische Festigkeit der geprüften Proben. Der Grund könnte darin liegen, dass in den sensorischen Proben keine zugbelasteten Fasern ersetzt werden. Bei den Strukturen a) und b) werden nur Schuss-PET-Garne durch funktionelle Garne ersetzt, bei den Strukturen b) und c) erfolgt der Materialaustausch zudem nur in der Druckseite des Biegebalkens. Aus diesem Grund hat die piezoelektrische Schicht in Struktur c), bei der eine der sieben Schichten aus Fasern besteht, die eine fünfmal geringere Festigkeit als PET-Fasern aufweisen, keinen signifikanten Einfluss auf die mechanische Festigkeit des Probenkörpers. Allerdings sind die mechanischen Eigenschaften von PVDF-Fasern denen von PET-Fasern ähnlicher als die von PVDF-Fasern denen von Glasfasern. Die genauen Werte der Bruchspannung und die jeweiligen Standardabweichungen können im Anhang aus Tabelle 17 entnommen werden.



**Abbildung 4-16: Durchschnittliche Biegespannung beim Dreipunktbiegeversuch der verschiedenen sensorischen Aufbauten und Vergleichsproben ohne integrierten Sensor (nur PET)**

#### 4.1.5 Schlussfolgerungen

Mit den grundlegenden Untersuchungen zum Sensorprinzip in Kapitel 4.1, konnte zunächst nachgewiesen werden, dass es möglich ist, die textile Verstärkungsstruktur von FKV als Sensor für die Zustandsüberwachung einzusetzen. Im Einklang mit der Zielsetzung, keine nicht-textilen Komponenten, wie z.B. konventionelle Sensorelemente, zu verwenden, wurde ein vollständig gewebter Biegesensor realisiert: Die gewebte Verstärkungsstruktur des Verbundwerkstoffs fungiert in sich als Sensor.

Textile Sensoren nach zwei verschiedenen Sensorprinzipien wurden aufgebaut: kapazitive und piezoelektrische Sensorstrukturen. Entsprechend der Gleichung ( 1 ) für die Kapazität eines Plattenkondensators ändert sich die Kapazität der textilen Sensorproben je nach Elektrodenabstand und dielektrischem Material. Die zyklischen Belastungstests zeigen, dass es möglich ist, die Probenbiegung durch die Kapazitätsmessung zu detektieren, diese aber schwer quantitativ zu beurteilen und zudem relativ störungsanfällig ist. Die Messung der Ladungsverschiebung piezoelektrischer Proben liefert ein klares und zur aufgebrachten Last proportionales Sensorsignal. Die Ladungsverschiebung wird durch die Polarisierung des piezoelektrischen Materials in der Funktionsschicht der Sensorstruktur deutlich erhöht.

Durch die ausschließliche Verwendung von Garnen mit ähnlichen Eigenschaften und die Vermeidung intrinsischer Objekte, wie z.B. herkömmliche Sensorelemente oder relativ dicker Sensorfasern, bleiben die Verstärkungsfasern weitgehend lastflussgerecht ausgerichtet. Umlenkungen und Unterbrechungen der Verstärkungsfasern können so vermieden werden. Dementsprechend zeigen auch die mechanischen Biegeprüfungen, dass die notwendige Modifikation zur sensorischen Funktionalisierung der Verstärkungsstruktur im Vergleich zu Proben ohne sensorische Struktur keinen signifikanten negativen Einfluss auf die mechanische Festigkeit der Bauteile hat.

Somit können die erste und zweite Arbeitshypothese als belegt angesehen werden:

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Bauteilüberwachung mittels gewebter Sensoren möglich ist. Dabei liefern textile Piezoelemente liefern, verglichen mit textilen Kondensatoren, ein deutlich besseres Sensorsignal. (Arbeitshypothese 1)

Weil keine Fremdkörper eingefügt werden, kommt der sensorische Aufbau ohne Umlenkung oder Unterbrechung der Verstärkungsfasern aus und wirkt sich somit kaum auf die mechanische Bauteilfestigkeit des FKV aus. (Arbeitshypothese 2)

Aber auch in den folgenden Untersuchungen zum optimierten Sensoraufbau in Kapitel 4.2 und der Übertragung der erzielten Erkenntnisse auf Mehrlagengewebestrukturen in Kapitel 5 wird der Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des FKV weiter beobachtet.

## 4.2 Sensoraufbau

Im vorangegangenen Kapitel hat sich das piezoelektrische Sensorprinzip als vielversprechendes Prinzip zur Online-Erfassung von Bauteilbelastungen erwiesen. Neben dem Sensorprinzip gibt es noch weitere Einflussfaktoren, die den Sensor und seine Zuverlässigkeit beeinflussen. Hier spielen hauptsächlich strukturelle und den Aufbau betreffende Kriterien eine entscheidende Rolle (vgl. Abbildung 4-1). Für die Entwicklung von sensorischen Mehrlagengeweben zur Verstärkung von FKV ist es wichtig, diese zu identifizieren und die Parameter möglichst zu optimieren. Dabei spielt es stets eine wichtige Rolle, dass neben einem möglichst starken, der mechanischen Belastung entsprechenden Sensorsignal auch der Einfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften nicht außer Acht gelassen wird (vgl. 2. Arbeitshypothese).

Die für die nachfolgenden Untersuchungen verwendeten Garnmaterialien sind in Tabelle 3 dargestellt. Wie in Kapitel 4.1, werden aufgrund der einfacheren Verarbeitbarkeit die verstärkenden Glasfasern durch ein hochfestes PET-Filamentgarn substituiert. Als Elektroden wird ein Zwirn aus silberbeschichtetem PA-6.6-Filamentgarn eingesetzt.

Aus Flexibilitätsgründen werden auch diese Versuche zunächst an Proben mit textiler Verstärkung aus geschichteten 2D-Geweben durchgeführt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden dann in Kapitel 5 auf eine Mehrlagengewebestruktur übertragen.

Als Matrixsystem wird, wie in Kapitel 4.1, das Zweikomponenten-Epoxidharz LR 285 und LH 286 von Hexion verwendet.

Insgesamt erfolgt der Herstellungsprozess, soweit nicht anders angegeben, nach dem in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Vorgehen. Von allen sensorischen Aufbauten werden mindestens sieben Proben gefertigt und für die folgenden Untersuchungen herangezogen. Die genauen Werte inklusive Standardabweichungen zu den Übersichtsdiagrammen zu Signalstärke bzw. Bruchspannung können den entsprechenden Tabellen im Anhang entnommen werden.

Die Proben für die Versuche in diesem Kapitel werden für die Prüfung, wie die piezoelektrischen Proben in Kapitel 4.1.3 geprüft und einer kontinuierlichen sinusförmigen Belastung ausgesetzt (Frequenz: 5 Hz; Amplitude: 1 mm; Probenvorspannung: 10 N). Auch die Überprüfung der mechanischen Festigkeit entspricht den in Kapitel 4.1.4 beschriebenen Versuchen.

#### 4.2.1 Einfluss der Sensorlage im Bauteil auf die Sensoreigenschaften

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben und in Abbildung 1-1 und Abbildung 1-2 dargestellt, befinden sich im Falle einer Bauteilbiegung über die Bauteildicke unterschiedliche Spannungsverläufe und -richtungen. Daher ist es wichtig, die sowohl für das Sensorsignal und die mechanische Bauteilfestigkeit möglichst beste Sensorposition zu bestimmen. Die Arbeiten in diesem Kapitel wurden z. T. in der eigenen Publikation [109] veröffentlicht.

#### Probenaufbau

Wie in Kapitel 4.1, werden auch für diese Versuche Proben mit siebenlagiger Verstärkung aus 2D-Geweben hergestellt. Damit der Sensor möglichst wenig Einfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften hat, werden die Funktionsgarne zunächst nur in Schussrichtung eingetragen.

Die verstärkenden Gewebelagen werden entsprechend der in Abbildung 4-17 aufgeführten Bauteilabmessungen aus den ausgewählten Garnmaterialien (siehe Tabelle 3) in Leinwandbindung hergestellt. Tabelle 6 fasst die Daten der hergestellten Verstärkungsgewebe zusammen, führt die Anzahl der für die Verbundstruktur erforderlichen Lagen auf und zeigt jeweils das Rapportlayout als Schema. Um auch mit Fertigungstoleranzen eine Sensorbreite von 40 mm zu gewährleisten, ist der piezoelektrische Streifen mit 50 mm um 10 mm breiter als die Elektrodenstreifen. Die praktische Umsetzung und Herstellung der einzelnen Lagen werden auf einer Greiferwebmaschine G6300 von Sulzer Rütli mit einer Kettdichte von 12,1 KFd/cm und einer Schussdichte von 10 SFd/cm realisiert.

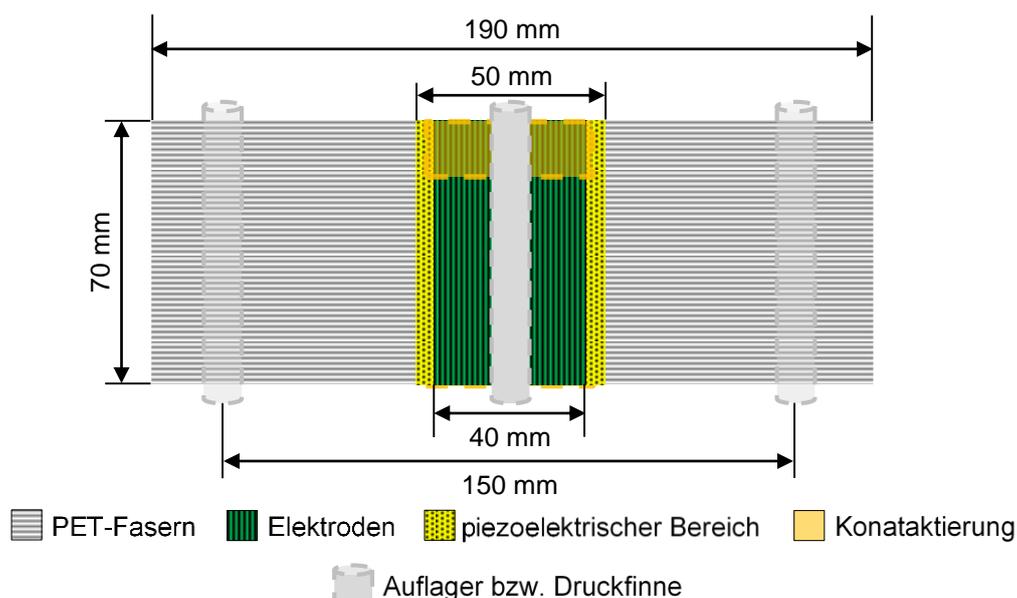
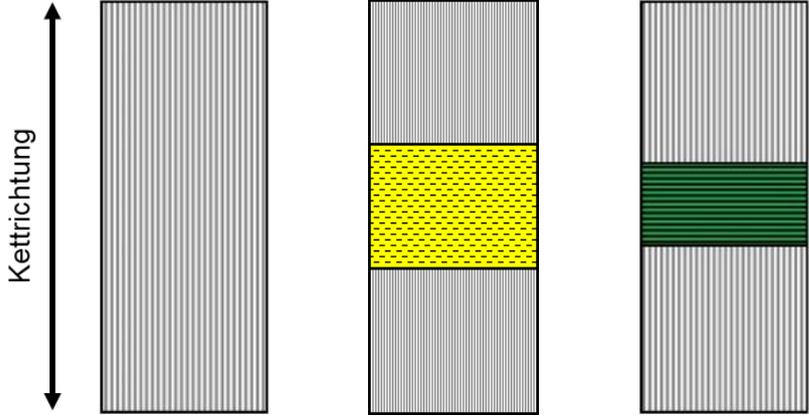


Abbildung 4-17: Schematische Darstellung der Proben in Draufsicht mit Druckfinne und Auflager des Dreipunktbiegeversuchs zur Orientierung

**Tabelle 6: Weblayout der hergestellten Gewebe für die Untersuchungen zur Sensorlage im Bauteil auf die Sensoreigenschaften (vgl. Abbildung 4-18)**

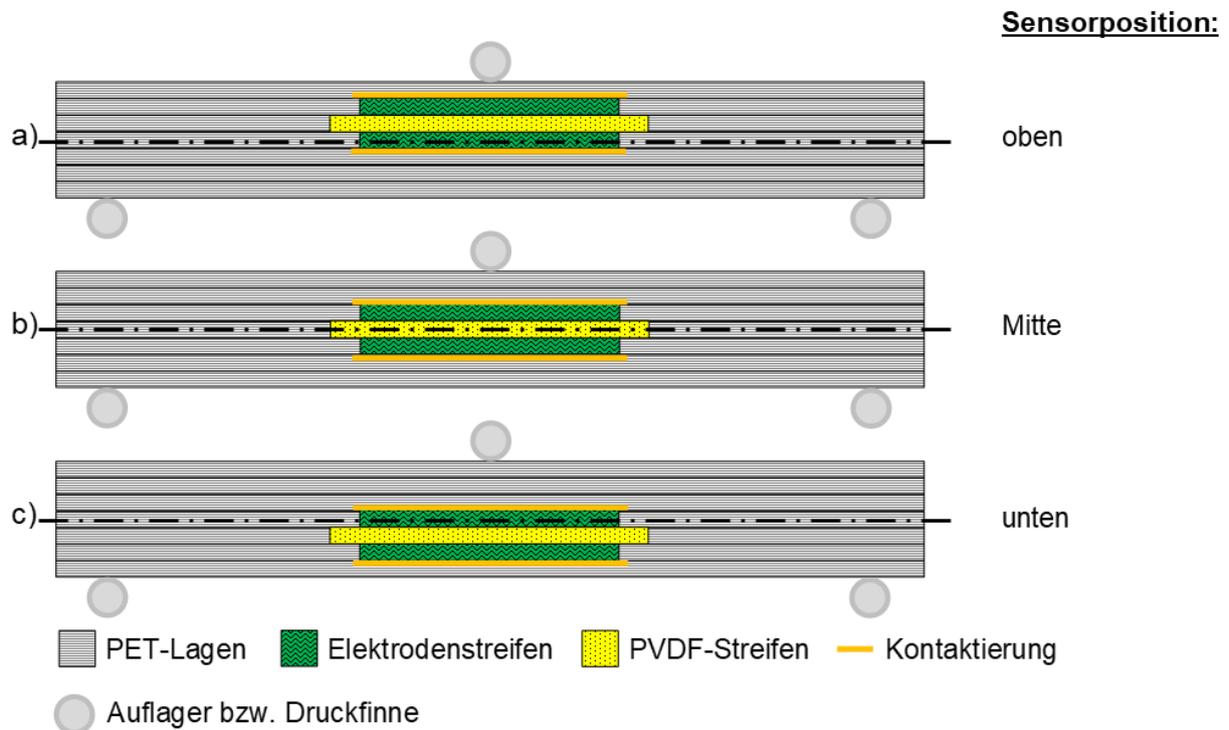


<b>Schussmaterial</b>	PET 	PET/PVDF/PET  /  / 	PET/Statex/PET  /  / 
<b>Schussanzahl</b>	200	75/50/75	80/40/80
<b>Kettmaterial</b>	PET	PET	PET
<b>Funktion</b>	Isolation, Verstärkung	Piezoelektrische Lage	Elektrode
<b>Anzahl</b>	4	1	2

Abbildung 4-18 zeigt schematisch den Schichtaufbau und die Position des textilen Sensors der verschiedenen aufgebauten Proben in der Querschnittsansicht. Der Sensorverbund wird in drei verschiedenen Varianten aufgebaut: Mit Sensor oberhalb der neutralen Faser (a), mit Sensor in der neutralen Faser (b) und mit Sensor unterhalb der neutralen Faser (c). Beim Dreipunkt-Biegeversuch weist der Bereich oberhalb der neutralen Faser in den Proben Druckspannung und der Bereich unterhalb der neutralen Faser Zugspannung in Biegerichtung auf (vgl. Kapitel 1). Zur Orientierung sind in der Abbildung auch die Belastungsfinne und die Auflager des Dreipunkt-Biegeversuchs eingezeichnet.

Zur elektrischen Kontaktierung wird ein Kupferklebeband mit Leitkleber (3M Typ 1181) verwendet, das am Rand auf die Elektroden aufgeklebt wird. Nach der Konsolidierung wird das Kupferband durch Entfernen von ausgehärtetem Harz freigelegt und mit einem Kabel verlötet. Die Konsolidierung der sensorintegrierten, mehrschichtigen Proben wird mit der membranunterstützten Niederdruck-Infusionstechnik VAP® (Vacuum

Assisted Process) realisiert. Die fertigen Proben haben eine Abmessung von 190 mm x 70 mm x 2,8 mm.

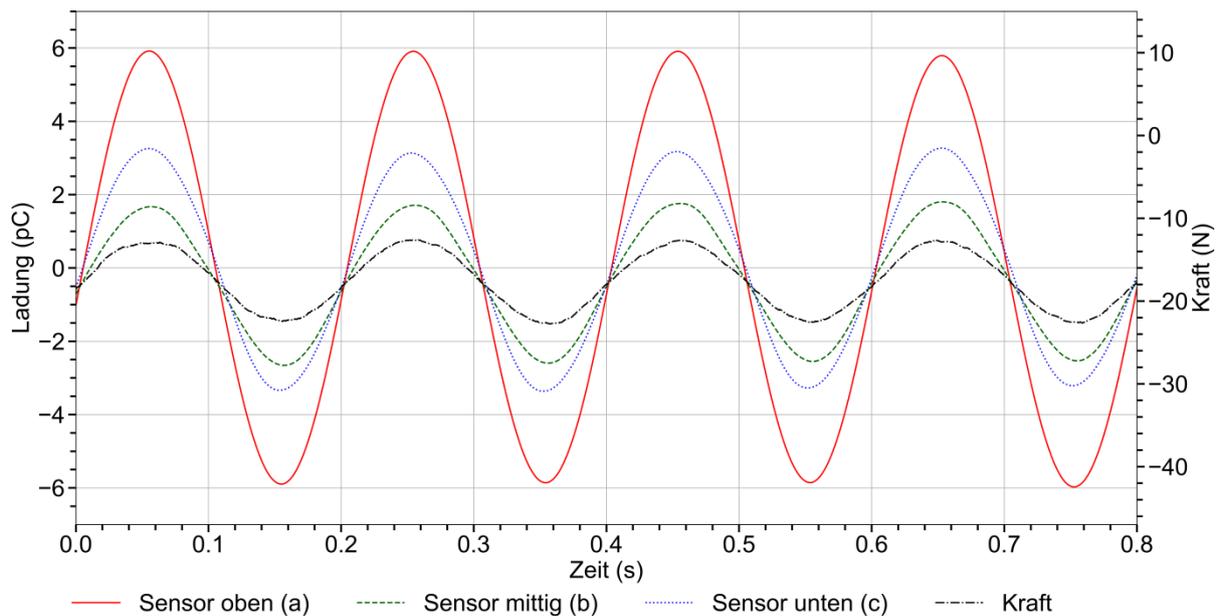


**Abbildung 4-18: Schematische Darstellung der hergestellten sensorischen FKV-Proben in Querschnittsansicht mit unterschiedlicher Sensorposition (a-c)**

Die Polarisierung der Sensoren erfolgt analog zum in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Vorgehen.

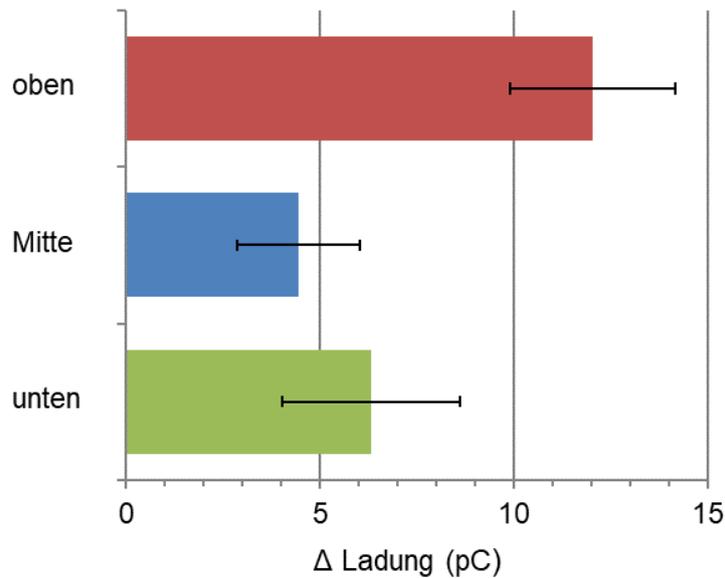
### Sensorische Eigenschaften

Auch hier zeigen die Sensoren in jeder Lage ein klares, sinusförmiges, der Belastung folgendes Signal in allen Sensorpositionen. Abbildung 4-19 zeigt für jede Sensorposition das Sensorsignal einer Beispielprobe. Demnach besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Verformung, der angelegten Kraft und der elektrischen Reaktion im Sensor. Das gemessene Sensorsignal kann daher verwendet werden, um zu bestimmen, wie stark das Bauteil unter der gegebenen Belastung gebogen wird.



**Abbildung 4-19: Signalkurve einer Beispielprobe für jede Sensorposition**

Allerdings ist das Sensorsignal nicht an jeder Position gleich stark ausgeprägt. Die Spitze-Spitze-Durchschnittswerte (doppelte Amplitude bzw. Schwingweite) der Signalkurven von jeweils sieben Proben der unterschiedlichen Varianten (a, b, c aus Abbildung 4-18) zeugen von einer Abhängigkeit des Sensorsignals von der Sensorposition im Probenquerschnitt (siehe Abbildung 4-20). Die durchschnittliche Schwingweite ( $\Delta$ Ladung bzw.  $\Delta Q$ ) der Sensorsignale beträgt 4,5 pC, 6,4 pC und 12,1 pC für den Sensor in, unterhalb bzw. oberhalb der neutralen Faser. Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass  $\Delta Q$  am höchsten ist, wenn sich der Sensor oberhalb der neutralen Faser befindet, und am niedrigsten ist, wenn sich der Sensor in der neutralen Faser befindet.



**Abbildung 4-20: Einfluss der Sensorposition auf die Signalstärke**

Diese Zusammenhänge lassen sich im Fall a) (oben) durch die nähere Position der piezoelektrischen Schicht zur Belastungsfinne und damit zur aufgebrachten (Druck-) Kraft und allgemein durch die Spannungsverteilung in einem Biegebalken begründen (vgl. Kapitel 1 bzw. Abbildung 4-21). Oberhalb der neutralen Faser treten (in Biegerichtung) vor allem Druck- und unterhalb vor allem Zugspannungen auf, die in Richtung der jeweiligen Oberfläche zunehmen. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4-22 schematisch dargestellt. Dass die Proben mit der mittigen Sensorposition (Aufbau b) ebenfalls ein Sensorsignal erzeugen, dürfte daran liegen, dass im belasteten Biegebalken nicht nur Biegedruckspannungen (oberhalb der neutralen Faser) und Biegezugspannungen (unterhalb der neutralen Faser) wirken, sondern auch Querschubspannungen, weil die Hauptspannungen i. A. nicht parallel zur Balkenachse wirken (vgl. Abbildung 1-1). Das bedeutet, dass sich das Sensorsignal vermutlich aus einer Kombination von piezoelektrischem Longitudinal- und Transversaleffekt zusammensetzt (vgl. Kapitel 2.2), die je nach Sensorlage einen unterschiedlich starken Einfluss auf das Sensorsignal haben. Die Diskrepanz zwischen der Signalstärke oberhalb und unterhalb der neutralen Faser ist vermutlich einerseits auf die unterschiedliche Nähe der Sensoren zur Belastungsfinne und damit zur aufgebrachten (Druck-)Kraft zurückzuführen und andererseits darauf, dass sich Querdruck- und Querkzugkräfte eventuell unterschiedlich gut auf senkrecht zur Belastungsrichtung liegende Garne übertragen lassen. Weitere mögliche Einflussfaktoren könnten hier u. a. auch die Lasteinleitung, die Lastausbreitung und die Lastintensität darstellen.

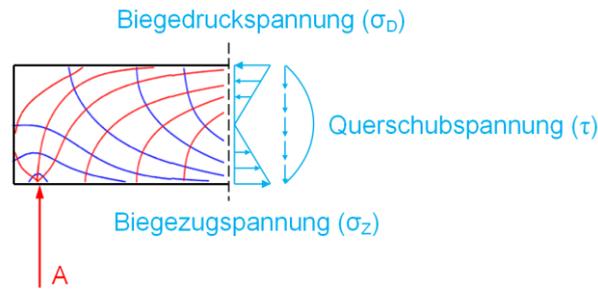


Abbildung 4-21: Schematische Darstellung der verschiedenen Spannungen und deren Wirkungsrichtung am geschnittenen Biegebalken (vgl. Abbildung 1-1)

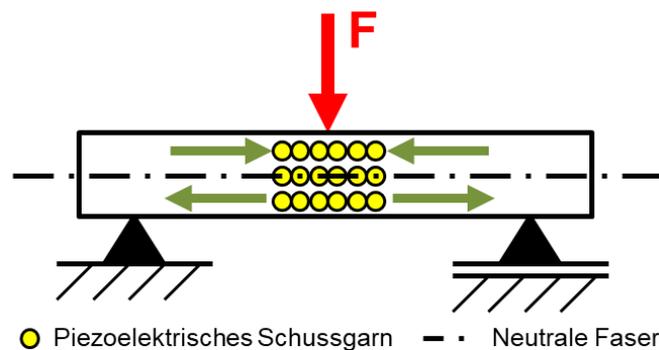
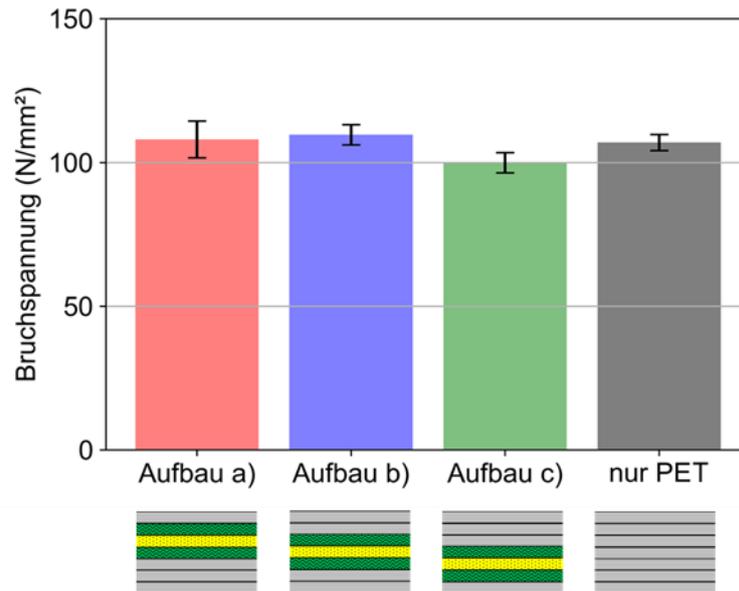


Abbildung 4-22: Schematische Darstellung der Biegebalkentheorie nach Abbildung 1-2 mit eingezeichnetem piezoelektrischem Garn an den unterschiedlichen Positionen im Probenquerschnitt in Schusschnittansicht

### Einfluss der Sensorik auf die mechanischen Bauteileigenschaften

Für diese Versuche wurde das Funktionsgarn lediglich in Schussrichtung, und damit nicht in die Richtung der Hauptspannung beim Biegeversuch eingetragen. Daher ist nur mit einem marginalen Einfluss des weniger festen PVDF-Garns auf die Bauteilfestigkeit zu rechnen. Dennoch korrelieren die Ergebnisse (siehe Abbildung 4-23) direkt mit den Erwartungen aus der Theorie des Biegebalkens. Liegt die schwächere Lage des PVDFs in der Mitte des Bauteilquerschnitts (Aufbau b), liegt diese in der neutralen Faser und beeinflusst kaum die Bauteilfestigkeit. Liegt das PVDF-Garn im Druckbereich, also oben (Aufbau a), ist ein leichter Abfall der Bruchspannung zu beobachten. Größer wird dieser jedoch erst, wenn die PVDF-Lage im Zugbereich, also unten, liegt. Eine Sensorlage oberhalb der neutralen Faser hat daher in Bezug auf die Festigkeit keine signifikanten Nachteile.



**Abbildung 4-23:** Vergleich der Bruchspannung bei einer PVDF-Sensorlage oberhalb (Aufbau a), in (Aufbau b) und unterhalb (Aufbau c) der neutralen Faser mit der einer Referenzprobe ohne Sensor (nur PET)

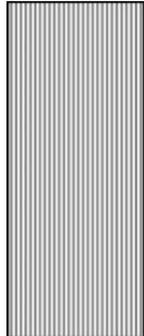
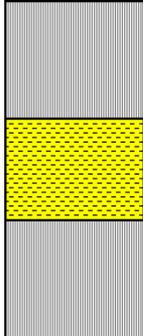
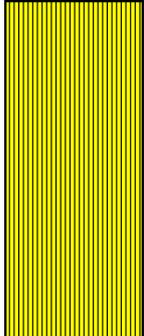
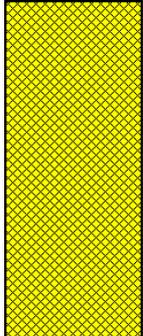
#### 4.2.2 Einfluss der Faserorientierung in der Funktionsschicht auf die Sensoreigenschaften

Neben der Position des Sensors in Dickenrichtung, ist es auch wichtig zu wissen, welche Fasern einer Gewebelage durch das piezoelektrische PVDF ersetzt werden sollen, um ein möglichst starkes Sensorsignal zu erreichen und dabei möglichst wenig Einfluss auf die mechanische Bauteilfestigkeit auszuüben.

##### Probenaufbau

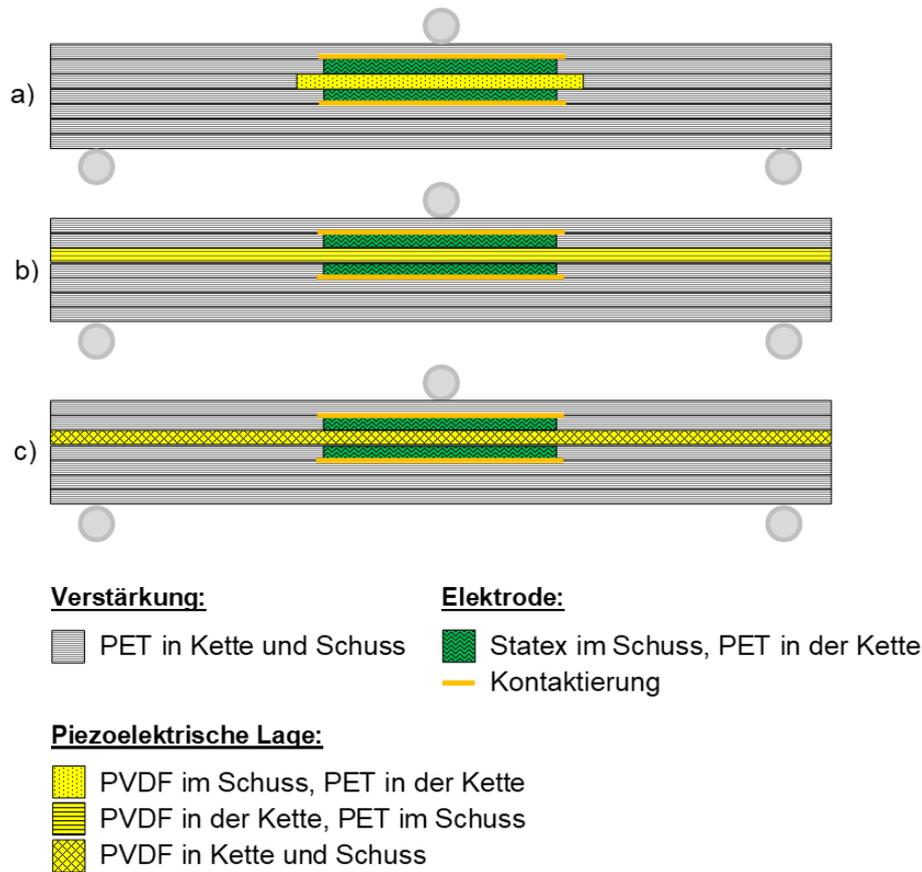
Hierzu werden Proben entsprechend derer in den vorangegangenen Kapiteln hergestellt und analysiert. Für die Versuche werden Proben aus den in Tabelle 7 beschriebenen Gewebe-Layouts in Leinwandbindung hergestellt und Aufbauten entsprechend der in Abbildung 4-24 dargestellten Schemata gefertigt. Es werden Proben mit PVDF-Garn nur im Schuss, nur in Kette und in Kette und Schuss aufgebaut. Die Sensoren werden entsprechend der Erkenntnisse aus Kapitel 4.2.1 oberhalb der neutralen Faser angeordnet.

**Tabelle 7: Layout der hergestellten Gewebe für die Untersuchungen zum Einfluss der Faserorientierung der Funktionsschicht auf die Sensoreigenschaften (vgl. Abbildung 4-24)**

							
<b>Garn-material</b>	Schuss	PET	PET/PVDF/PET	PET	PVDF	PET/Statex/PET	
	Kette	PET	PET	PVDF	PVDF	PET	
<b>Schuss-anzahl</b>		200	75/50/75	200	200	80/40/80	
<b>Funktion</b>		Isolation, Verstärkung	Piezoelektrische Lage	Piezoelektrische Lage	Piezoelektrische Lage	Elektrode	
<b>Anzahl</b>	Aufbau a)	4	1	-	-	2	
	Aufbau b)	4	-	1	-	2	
	Aufbau c)	4	-	-	1	2	

**Legende:**

-  PET in Kette und Schuss
-  PVDF im Schuss, PET in der Kette
-  PVDF in der Kette, PET im Schuss
-  PVDF in Kette und Schuss
-  Statex im Schuss, PET in der Kette



**Abbildung 4-24:** Schematische Darstellung der hergestellten piezoelektrischen FKV-Proben in Querschnittsansicht mit unterschiedlicher Faserausrichtung der Funktionsschicht (a-c)

### Sensorische Eigenschaften

Wie aus Abbildung 4-25 ersichtlich ist, erzeugen Piezofasern in Bauteillängsrichtung (Aufbau b) ein etwas stärkeres Sensorsignal als Piezofasern ausschließlich in Bauteilquerrichtung (Aufbau a). Das liegt vermutlich daran, dass sich die Belastung besser auf Fasern überträgt, die nach der Hauptbelastungsrichtung ausgerichtet sind. Ein deutlich höheres Sensorsignal wird mit Piezofasern in Kett- und Schussrichtung erzeugt (Aufbau c), was am ungefähr doppelten Anteil an piezoelektrischem Material im sensorischen Bereich im Vergleich zu den Aufbauten a) und b) liegen dürfte.

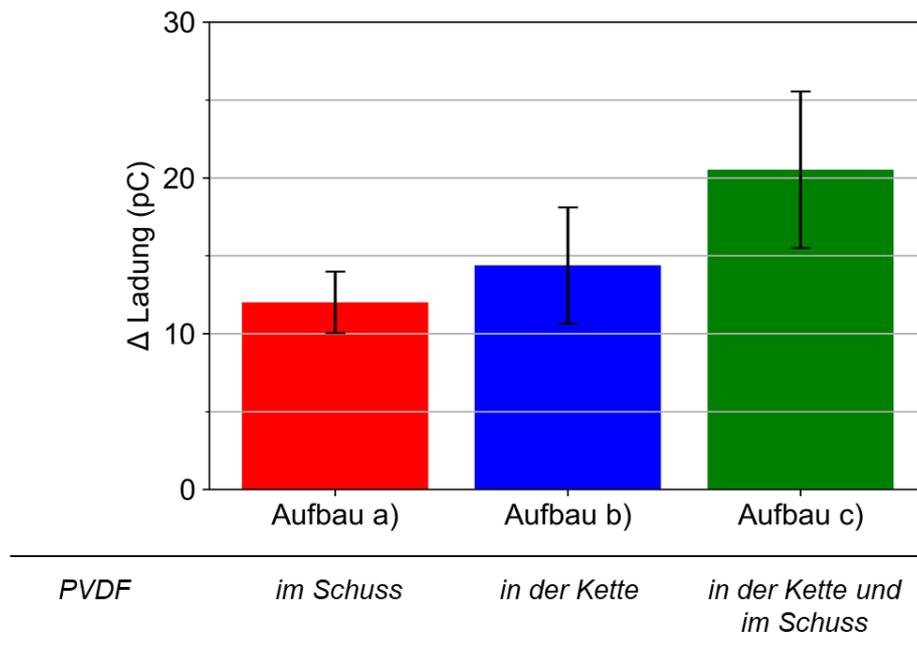
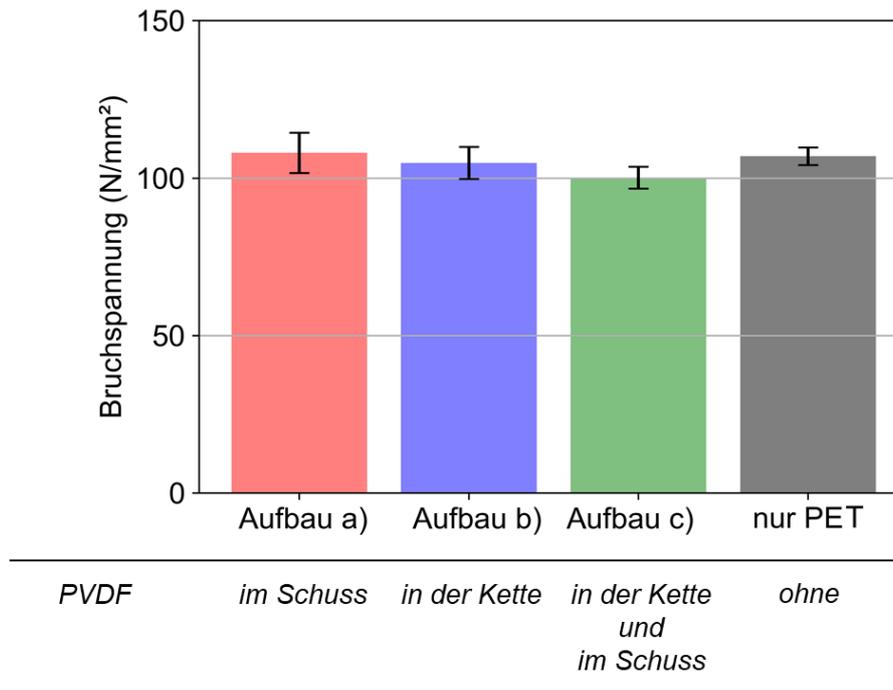


Abbildung 4-25: Einfluss der Faserorientierung auf die Signalstärke

### Einfluss der Sensorik auf die mechanischen Bauteileigenschaften

In Abbildung 4-26 ist der Einfluss des PVDF-Anteils auf die mechanische Bauteilfestigkeit dargestellt. PVDF nur im Schuss (Aufbau a) hat den kleinsten Einfluss. In Kett-richtung (Aufbau b) und damit in Bauteillängsrichtung ist bereits eine etwas geringere Bauteilfestigkeit im Vergleich zu den Referenzproben ohne sensorische Struktur erkennbar. Besteht hingegen eine Lage nur aus PVDF-Garn (Aufbau c) hat man, wenn auch nur geringfügig, im Vergleich die geringste Bauteilfestigkeit. In Anbetracht der relativ geringen Unterschiede und des deutlich stärkeren Sensorsignals wird in der weiteren Arbeit Aufbau c) weiterverfolgt.



**Abbildung 4-26:** Vergleich der Bruchspannung von Proben mit einer PVDF-Sensorlage aus piezoelektrischen Schuss- (a), Kett- (b) und piezoelektrischen Schuss- und Kettfäden (c) sowie Referenzproben ganz ohne PVDF (nur PET)

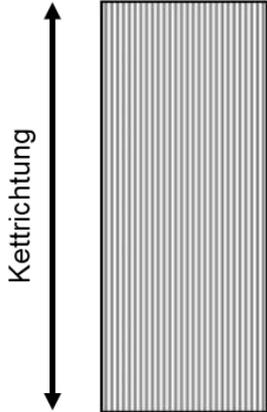
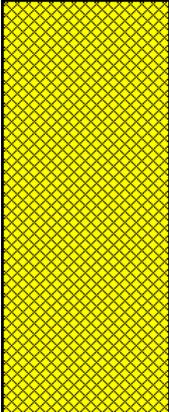
#### 4.2.3 Einfluss der Schichtdicke der Funktionsschicht auf die Sensoreigenschaften

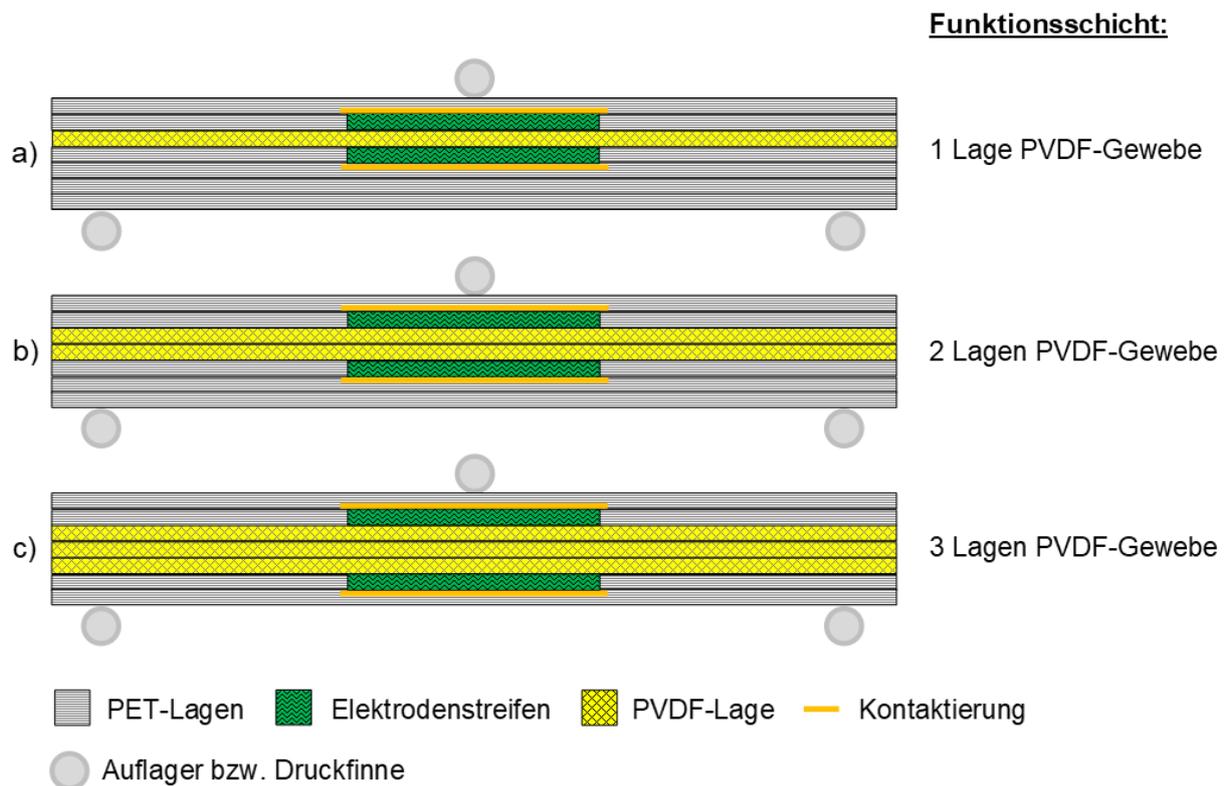
Die Ergebnisse aus Kapitel 4.2.2 lassen darauf schließen, dass ein größerer Anteil an piezoelektrischen Fasern im sensorischen Bereich ein stärkeres Sensorsignal erzeugt. Da dies auch durch eine Erhöhung der Schichtdicke der Funktionsschicht geschehen kann, wird dieser Zusammenhang im Rahmen dieses Kapitels analysiert.

##### Probenaufbau

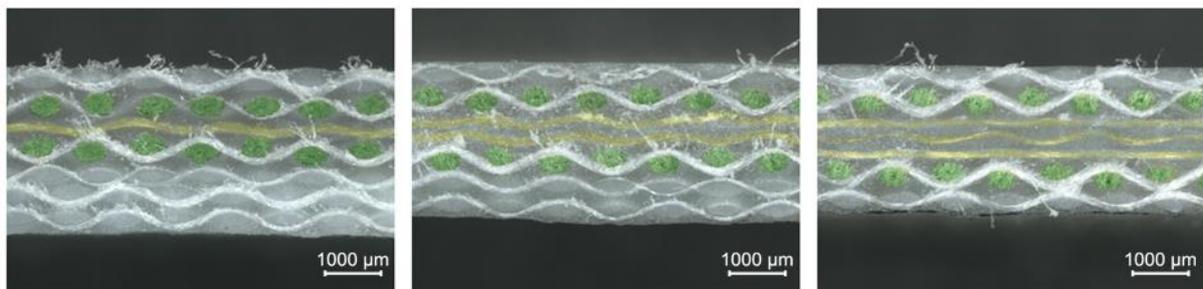
Die Untersuchungen des Einflusses der Schichtdicke der Funktionsschicht auf das Sensorsignal werden jeweils mit Proben aus den in Tabelle 8 aufgeführten Geweben in Leinwandbindung und mit den in Abbildung 4-27 dargestellten Querschnitten durchgeführt. Die Schnittbilder des sensorischen Bereichs der verschiedenen Proben sind in Abbildung 4-28 dargestellt. Um bei der Polarisation der Aufbauten b) und c) (in Abbildung 4-27) eine vergleichbare Feldstärke wie bei den Aufbauten a) und der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Proben mit einer Funktionsschicht aus einer Gewebelage zu erreichen, wird für diese Proben ebenfalls der minimale und maximale Elektrodenabstand der einzelnen Aufbauten vermessen und die Polarisationsspannung  $U_P$  entsprechend angepasst (vgl. Tabelle 22 im Anhang).

**Tabelle 8: Layout der hergestellten Gewebe für die Untersuchungen zur Schichtdicke der Funktionsschicht auf die Sensoreigenschaften (vgl. Abbildung 4-27)**

			
<b>Schussmaterial</b>	PET 	PVDF 	PET/Statex/PET 
<b>Schussanzahl</b>	200	200	80/40/80
<b>Kettmaterial</b>	PET	PVDF	PET
<b>Funktion</b>	Isolation, Verstärkung	Piezoelektrische Lage	Elektrode
<b>Anzahl</b>	2-4	1-3	2



**Abbildung 4-27: Schematische Darstellung der hergestellten piezoelektrischen FKV-Proben in Querschnittsansicht mit unterschiedlicher Schichtdicke der Funktionsschicht (a-c)**



**Abbildung 4-28: Schnittbilder des sensorischen Bereichs der Aufbauten a), b) und c) (von links nach rechts) mit eingefärbtem Elektroden- (grün) und PVDF-Garn (gelb)**

### Sensorische Eigenschaften

Das Sensorsignal der polarisierten Polyesterproben mit zwei- und drei-lagiger PVDF-Schicht wird mit den Ergebnissen der polarisierten Polyesterproben mit einlagiger PVDF-Schicht (Sensorlage oben) verglichen (Aufbauten a) bis c) in Abbildung 4-27). Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-29 zusammengefasst.

Wie nach den in Kapitel 4.2.2 erzielten Erkenntnissen zu erwarten ist, nimmt zunächst bei Aufbau b) aufgrund des größeren Anteils an piezoelektrischem Material in der Funktionsschicht des Sensors die Amplitude des Sensorsignals zu. Werden bei dem siebenlagigen FKV jedoch drei Lagen PVDF-Gewebe als Funktionsschicht des Sensors verwendet (Aufbau c), so nimmt die Stärke des Sensorsignals drastisch ab. Das Niveau liegt dabei auch deutlich unter einem einlagigen Aufbau. Auch dieser Effekt ist mit der Spannungsverteilung im Biegebalken und den in Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22 dargestellten Zusammenhängen zu erklären. Bei Aufbau c) liegt der Sensor mittig im Bauteilquerschnitt. Die durch die Biegezugspannung verursachte Ladungstrennung, die unterhalb der neutralen Faser durch den piezoelektrischen Transversaleffekt erzeugt wird, wirkt mit entgegengesetztem Vorzeichen zu der oberhalb der neutralen Faser durch den Transversaleffekt hervorgerufenen Ladungstrennung, die durch die Biegedruckspannung entsteht. Die Transversaleffekte oberhalb und unterhalb der neutralen Faser heben sich damit bei den Aufbauten c) auf. Besteht das Sensorsignal bei den Aufbauten a) und b) mit Sensoren oberhalb der neutralen Faser aus einer Kombination aus Transversal- und Longitudinaleffekt, so besteht das Sensorsignal der Aufbauten c) lediglich aus dem durch die Querschubspannung verursachten Longitudinaleffekt. Als Schlussfolgerung kann also festgehalten werden, dass eine Erhöhung der Schichtdicke der piezoelektrischen Schicht so lange zu einem stärkeren Sensorsignal führt, solange sie nicht über die neutrale Faser hinausgeht.

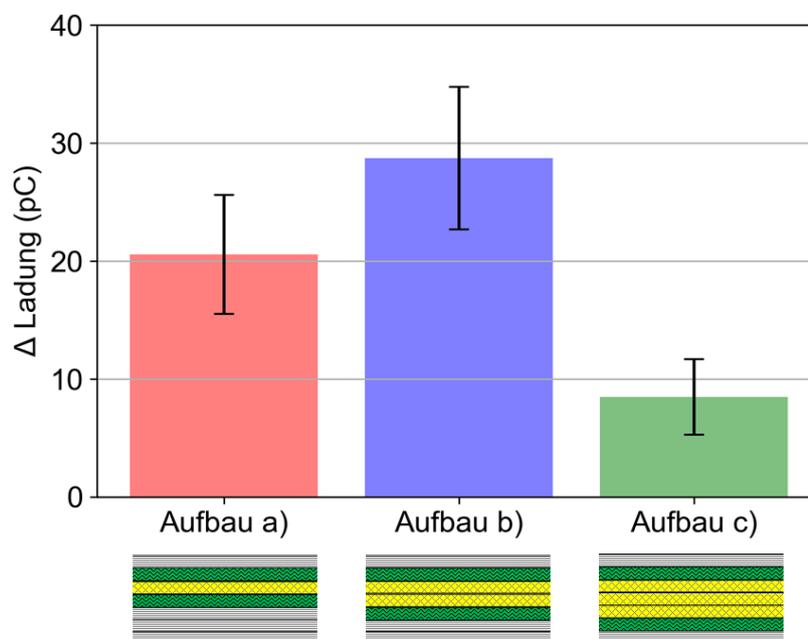


Abbildung 4-29: Signalstärke der Proben mit unterschiedlichen Dicken der Funktionsschicht

## Einfluss der Sensorik auf die mechanischen Bauteileigenschaften

In Abbildung 4-30 ist der Einfluss der unterschiedlichen Anzahl von PVDF-Gewebschichten auf die mechanische Bauteilfestigkeit dargestellt. Hier wird deutlich, dass das Ersetzen kompletter PET-Verstärkungsgewebe durch Funktionsgewebe aus vergleichsweise weniger festem PVDF-Garn deutlich erkennbare Festigkeitseinbußen der FKV-Bauteile zur Folge hat. Das größere Sensorsignal der Aufbauten b) geht damit mit einer Bauteilschwächung einher. Eine dreilagige PVDF-Schicht schwächt das Bauteil weiter. Bei Glasfasern statt PET als Verstärkungsfasern fiel der Festigkeitsunterschied durch den Einsatz von mehreren PVDF-Lagen noch größer aus. Da die Hauptaufgabe der textilen Struktur eines FKV die Bauteilverstärkung ist, scheinen die Sensoraufbauten aus einem einlagigen PVDF-Gewebe als ein guter Kompromiss aus Signalstärke des Sensors und Bauteilfestigkeit.

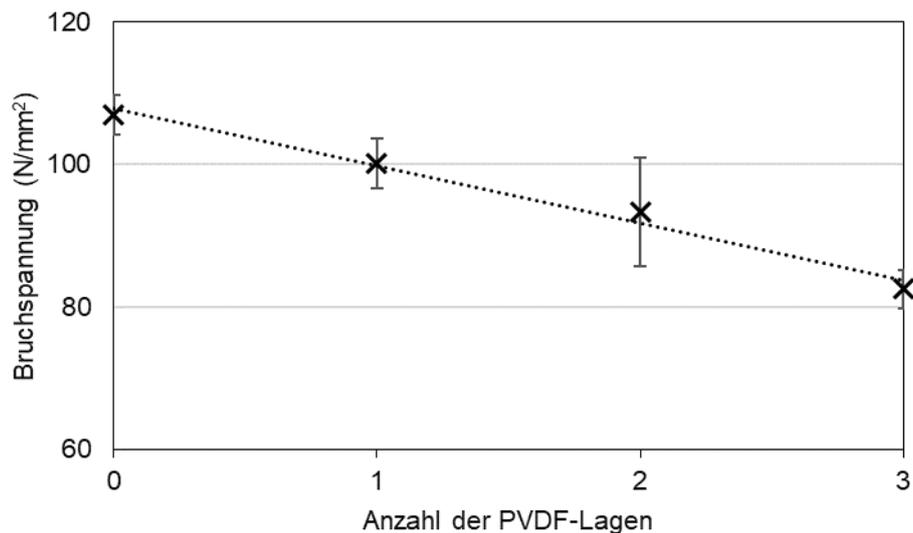


Abbildung 4-30: Abnahme der Bruchspannung bei Zunahme der PVDF-Schichtdicke von keiner PVDF-Gewebelage (Referenz) bis drei Lagen (Aufbau c) mit Trendlinie

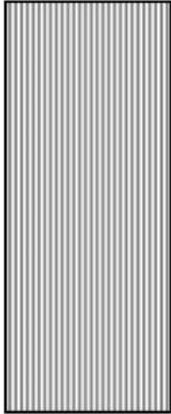
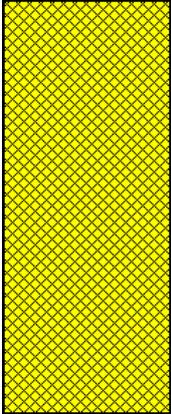
#### **4.2.4 Einfluss der Bindung der gewebten Elektrode auf die Sensoreigenschaften**

Auch die Elektrode als wesentlicher Bestandteil des Sensors bestimmt die elektrischen Eigenschaften der sensorischen Textilstruktur. Je größer der Anteil an leitfähigem Garnmaterial auf der zur piezoelektrischen Funktionsschicht ausgerichteten Seite der Elektrode ist, desto stärker sollte das Sensorsignal bei ansonsten identischem Aufbau sein, weil so mehr in der Zwischenschicht verschobene Ladung „abgegriffen“ werden kann. Um den Einfluss der Bindung der Elektrode auf die sensorischen Eigenschaften der textilen Verstärkungsstruktur zu analysieren und damit die angenommenen Zusammenhänge zu bestätigen, werden Versuche an Proben mit Elektrodengewebe aus unterschiedlichen Köperbindungen durchgeführt.

##### **Probenaufbau**

Die Untersuchungen des Einflusses der Bindung der gewebten Elektrode auf das Sensorsignal werden jeweils an Proben aus den in Tabelle 9 aufgeführten Geweben und mit dem in Abbildung 4-31 dargestellten Querschnitt durchgeführt. Die drei Varianten an unterschiedlichen Aufbauten (a-c) unterscheiden sich hier nicht im Schichtaufbau, sondern lediglich durch das Elektrodengewebe (vgl. Tabelle 9). Das Elektrodengewebe wird im Unterschied zu den anderen Geweben nicht in Leinwandbindung hergestellt, sondern in einer 1/3-Köperbindung. Durch die Köperbindung ist es möglich den Schussfaden (SFd) gezielt vorwiegend auf eine Gewebeseite zu legen. Um einen unterschiedlichen und definierten Anteil an leitfähiger Fläche auf der der piezoelektrischen Funktionsschicht aus PVDF zugewandten Seite zu erzielen, wird die Schussdichte variiert, wodurch sich die unterschiedliche Schussanzahl bei den drei Varianten in Tabelle 9 ergeben. Bei Variante a) beträgt die Schussdichte (SD) 10 SFd/cm, bei Variante b) 14 SFd/cm und bei Variante c) 18 SFd/cm. Nahaufnahmen der verschiedenen Elektrodenvarianten sind in Abbildung 4-32 dargestellt. Der optisch vermessene Anteil an leitfähiger und nicht leitfähiger Oberfläche der Elektrode und dessen Zusammenhang mit der Schussdichte sind in Abbildung 4-33 dargestellt. Zu beachten ist jedoch, dass sich die Schussdichte nicht beliebig erhöhen lässt und eine Verringerung der Schussdichte irgendwann zu einem undefinierten Zustand führt, weil das Gewebe zu locker wird.

Tabelle 9: Weblayout der hergestellten Gewebe zur Untersuchung des Einflusses der Bindung der gewebten Elektrode auf die Sensoreigenschaften (vgl. Abbildung 4-31)

			
	↑ Ketttrichtung ↓		
<b>Schussmaterial</b>	PET 	PVDF 	PET/Statex/PET  /  / 
<b>Schussanzahl</b>	200	200	a) 80/40/80 b) 112/56/112 c) 144/72/144
<b>Kettmaterial</b>	PET	PVDF	PET
<b>Funktion</b>	Isolation, Verstärkung	Piezoelektrische Lage	Elektrode
<b>Anzahl</b>	4	1	2
<b>Bindung</b>	Leinwand	Leinwand	Köper 1/3

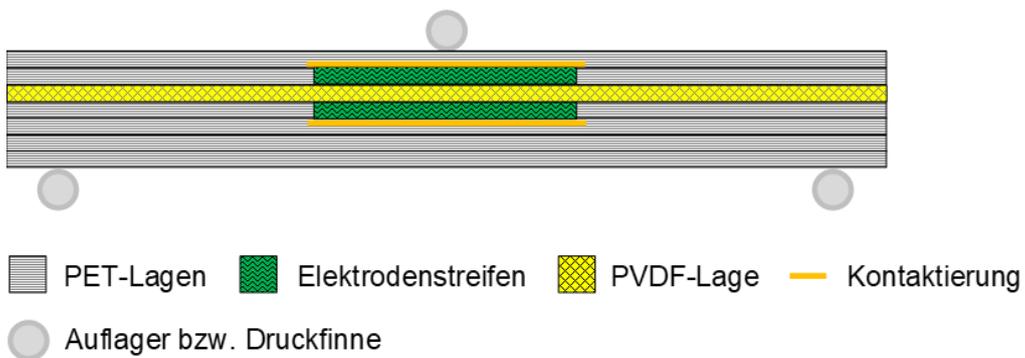
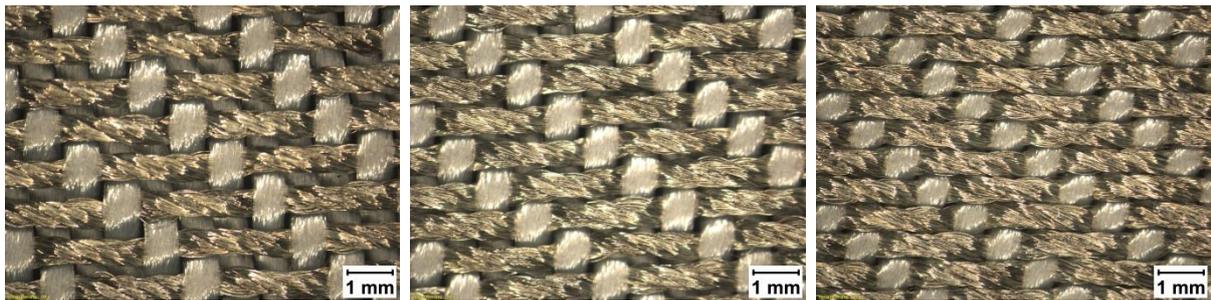
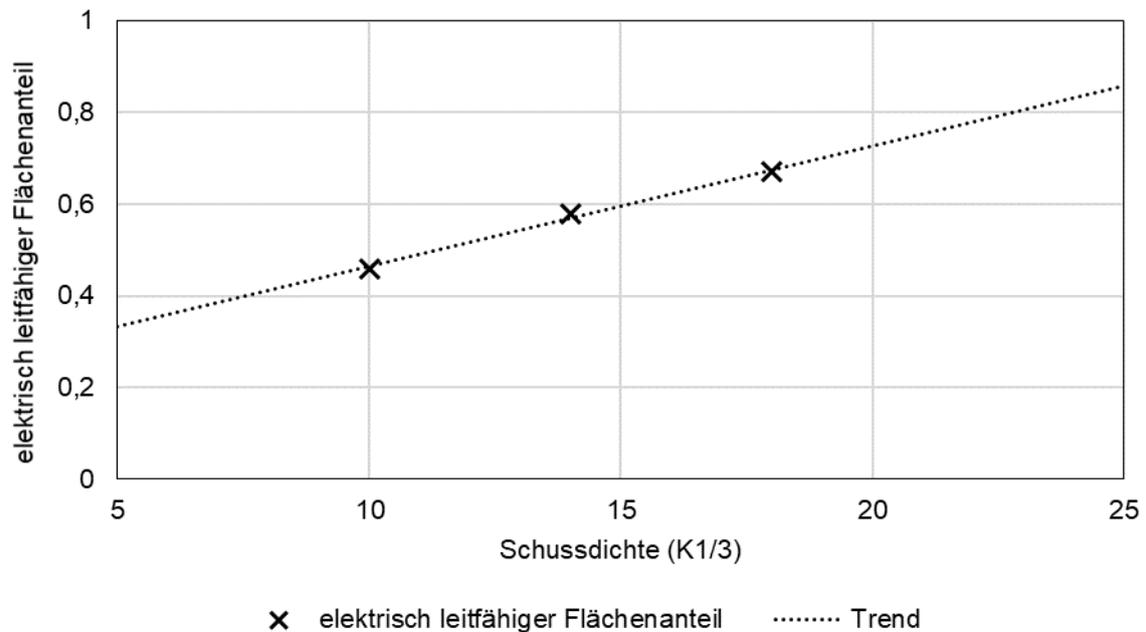


Abbildung 4-31: Schematische Darstellung der hergestellten piezoelektrischen FKV-Proben in Querschnittsansicht



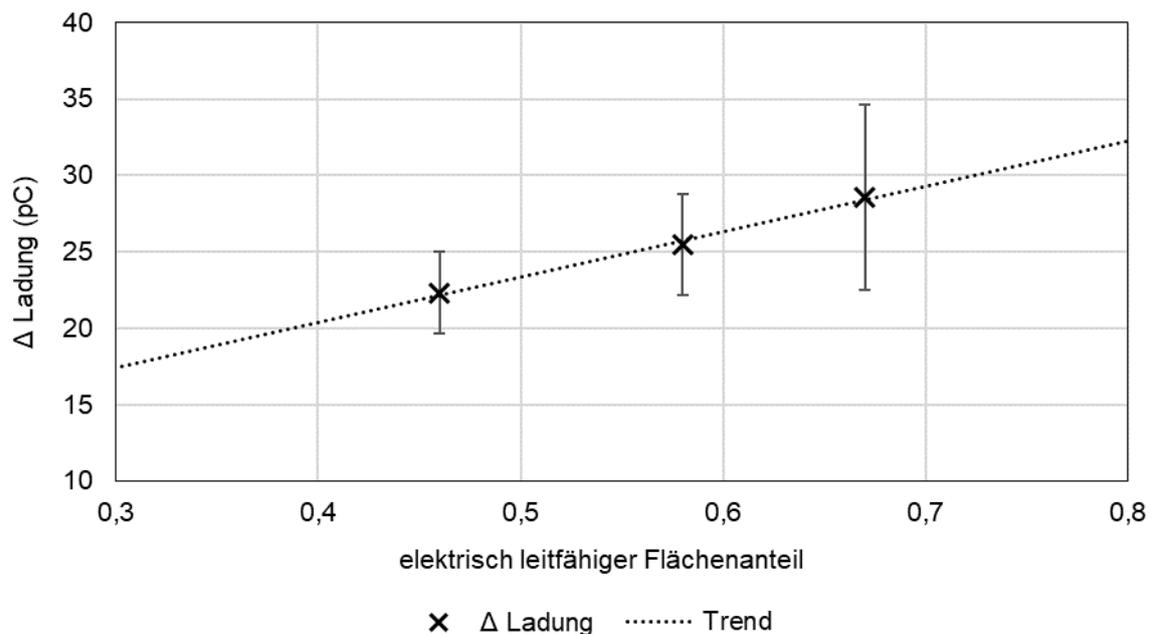
**Abbildung 4-32:** Nahaufnahmen der rechten Wareseite der untersuchten Elektrodenvarianten in Körper 1/3 (von links nach rechts: 10 SFd/cm, 14 SFd/cm und 18 SFd/cm)



**Abbildung 4-33:** Zusammenhang von Schussdichte und elektrisch leitfähigem Garnanteil auf der rechten Wareseite des Elektrodenwebes am Beispiel einer Körper-1/3-Bindung (K1/3) mit eingezeichneter Trendlinie

## Sensorische Eigenschaften

Wie zu erwarten steigt mit der Erhöhung des elektrisch leitfähigen Anteils auf der der piezoelektrischen Funktionsschicht zugewandten Seite auch die Signalstärke der gewebten Sensoren. Dieser Zusammenhang wird durch die in Abbildung 4-34 dargestellten Messergebnissen veranschaulicht. Bei der Entwicklung der Mehrlagengewebestruktur ist daher darauf zu achten, dass bei den textilen Elektroden in Richtung der piezoelektrischen Schicht möglichst viel elektrisch leitfähiges Material ausgerichtet ist.

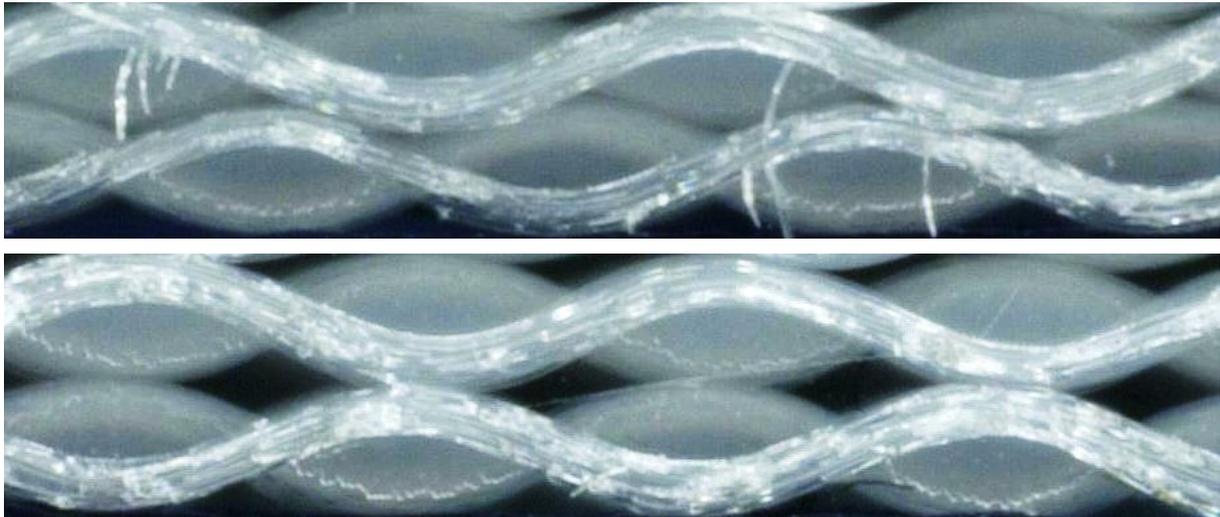


**Abbildung 4-34:** Einfluss des elektrisch leitfähigen Flächenanteils der textilen Elektrodenflächen auf die Signalstärke des Sensors mit eingezeichneter Trendlinie

### 4.2.5 Einfluss der textilen Elektrode auf die Sensorstreuung

Die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen zeigen eine relativ große Standardabweichung bei Messwerten gleicher Proben mit textilem Sensor. Betrachtet man die Schnittbilder von in FKV eingebetteten Verstärkungsgeweben (siehe Abbildung 4-35), besteht die Vermutung, dass die Ursache hierfür an der undefinierten Lage der einzelnen übereinandergelegten Gewebelagen zueinander liegen könnte. Zwei Gewebe, die übereinandergeschichtet werden, können dabei unterschiedlich aufeinander liegen. In Abbildung 4-35 sind Schnittbilder der beiden Extreme abgebildet. Im unteren Beispiel liegen die ondulationsbedingten Dickstellen direkt aufeinander. Oben liegen die Dickstellen des einen Gewebes jeweils an den Dünnstellen des anderen. Theoretisch ist jede (zufällige) Positionierung der beiden Gewebe zueinander möglich. Das

links dargestellte Beispiel ist um ca. die Hälfte dicker, als das rechts abgebildete. Bei einem dreischichtigen Sensoraufbau kann durch die undefinierte Lage der einzelnen Gewebe zueinander somit eine relativ große Varianz an Elektrodenabständen entstehen. Diese Tatsache beeinflusst nicht nur die durch den Sensoraufbau bedingte Sensorfunktion, sondern auch die Qualität der Polarisierung des Sensors, da das PVDF bei größerem Elektrodenabstand, aber gleicher Polarisierungsspannung aufgrund der dann schwächeren Feldstärke weniger gut polarisiert wird. Daraus resultieren Unterschiede in der Signalstärke der Messergebnisse, was zu den relativ hohen Standardabweichungen führt.

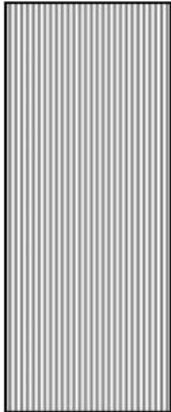
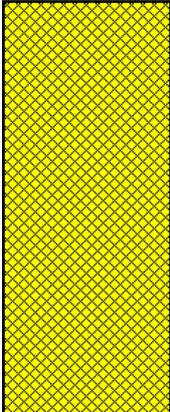


**Abbildung 4-35:** Mikroskopische Schnittbildaufnahmen von jeweils zwei in FKV integrierten Verstärkungsgeweben (Leinwand) mit den beiden Extremen an Ausrichtung zueinander

### Probenaufbau

Die Analysen zum Einfluss der textilen Elektrode werden an Proben durchgeführt, die nach den in Abbildung 4-36 dargestellten Lagenaufbauten aus den in Tabelle 10 aufgeführten Geweben in Leinwandbindung hergestellt wurden. Bei Aufbau a) wird, wie bei den vorangegangenen Untersuchungen und in Abbildung 4-2 dargestellt, das Kupferklebeband lediglich an den Rändern der textilen Elektroden zum Kontaktieren angebracht. Bei Aufbau b) bildet dieses jedoch die gesamte (nicht textile) Elektrodenfläche (siehe schematische Darstellung in Abbildung 4-37). Das Kupferklebeband fungiert hier also nicht nur als Kontaktierung, sondern auch als Elektrode. Durch den Verzicht auf das Gewebe mit ondulierenden Elektrodengarnfäden soll bei Aufbau b) ein konstanter und vor allem ein definierter Abstand zwischen den Elektroden gewährleistet werden. Ansonsten besteht der Aufbau, wie in den vorangegangenen Versuchen auch, aus sieben Gewebelagen.

Tabelle 10: Weblayout der hergestellten Gewebe (vgl. Abbildung 4-36)

			
	↑ Ketttrichtung ↓		
<b>Schussmaterial</b>	PET 	PVDF 	PET/Statex/PET  /  / 
<b>Schussanzahl</b>	200	200	80/40/80
<b>Kettmaterial</b>	PET	PVDF	PET
<b>Funktion</b>	Isolation, Verstärkung	Piezoelektrische Lage	Elektrode
<b>Anzahl</b>	4 bzw. 6	1	2 bzw. 0

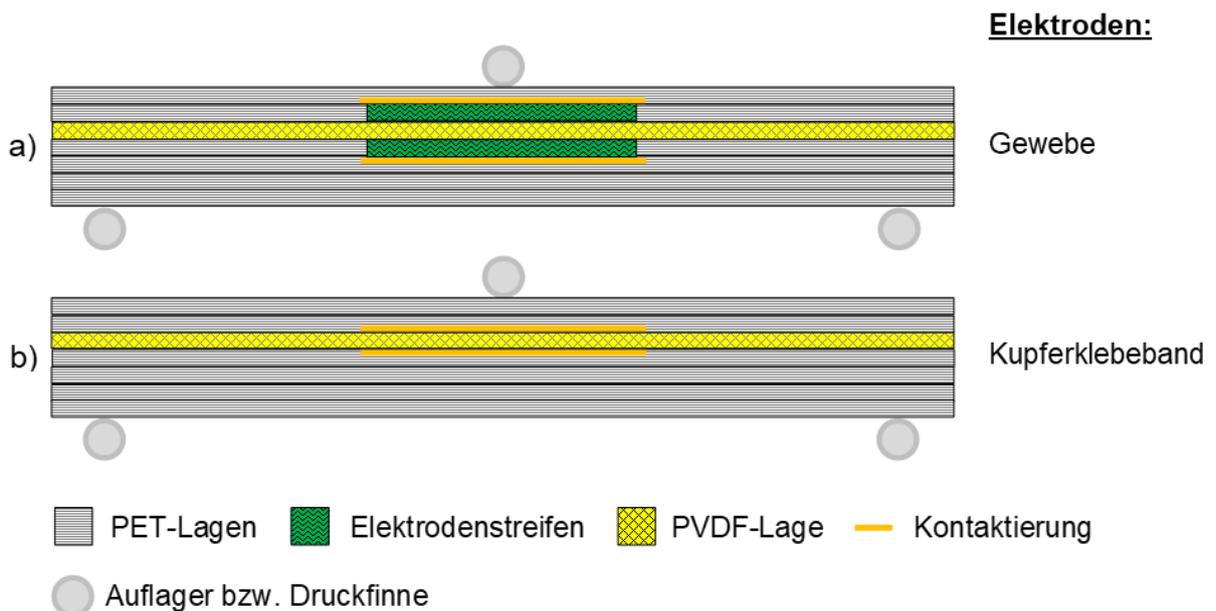
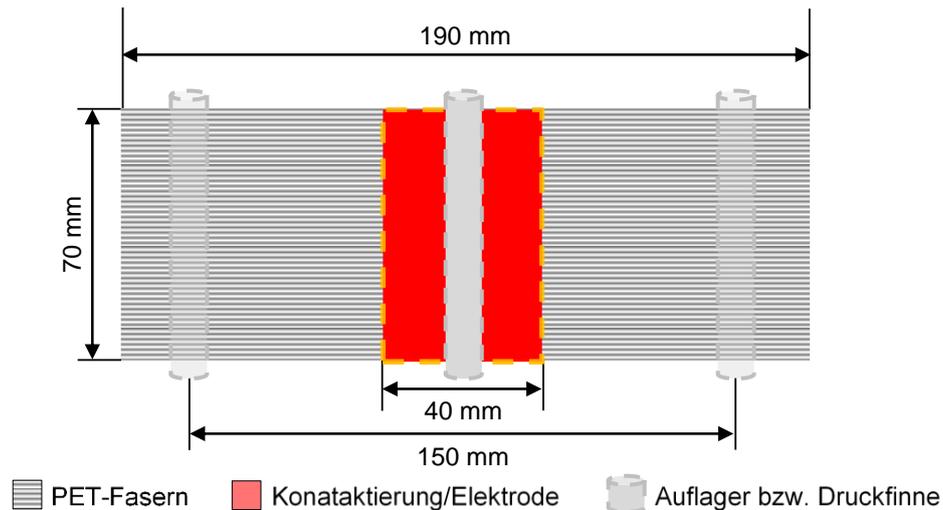


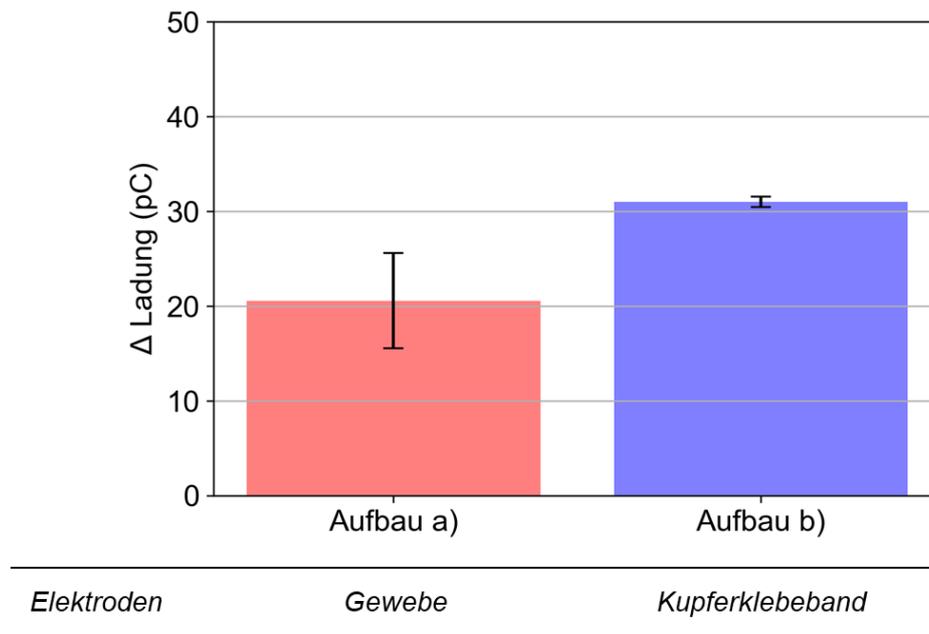
Abbildung 4-36: Schematische Darstellung der hergestellten piezoelektrischen FKV-Proben in Querschnittsansicht mit textiler Elektrode (a) und Klebelektrode (b)



**Abbildung 4-37: Schematische Darstellung von Aufbau b) in der Draufsicht mit Abmessungen**

### Sensorische Eigenschaften

Die Auswertung der Ergebnisse ergibt, dass durch das vergleichsweise definierte Aufbringen der Elektrode durch Aufkleben die Standardabweichung stark verringert wird (siehe Abbildung 4-38). Das gleichzeitig höhere Sensorsignal liegt in der geschlossenen Elektrodenfläche des Klebebands begründet. Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, stellt eine Folie allerdings einen Fremdkörper in der Verstärkungsstruktur dar und bildet noch dazu eine sehr große Grenzfläche. Zu erwarten ist aber, dass durch den „definierten“ textilen Aufbau der Sensoren in der Bindungsstruktur eines Mehrlagengewebes auch die Standardabweichung verringert werden kann. Diese Vermutung gilt es in Kapitel 5 zu bestätigen.



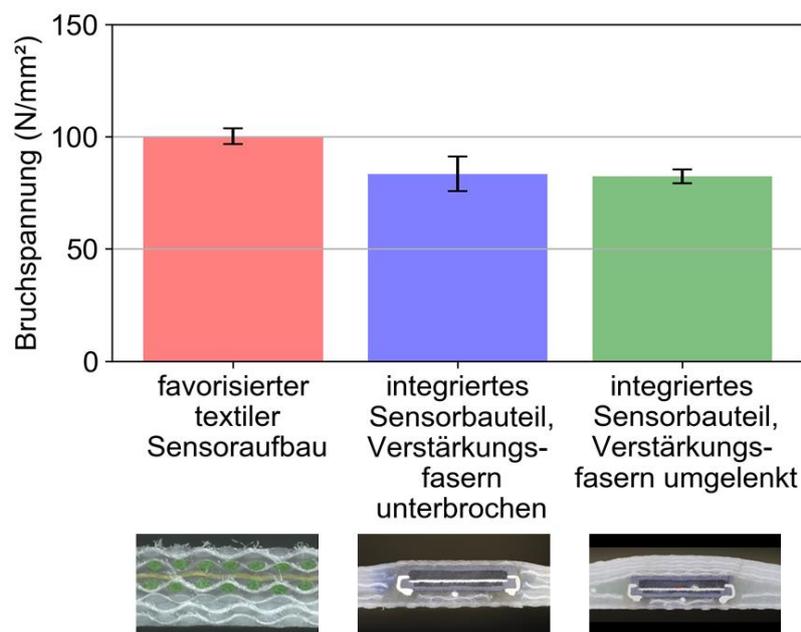
**Abbildung 4-38:** Vergleich der Signalstärke polarisierter Proben mit Elektroden aus leitfähigem Garn (Aufbau a) und Elektroden aus Kupferklebeband (Aufbau b)

#### 4.2.6 Schlussfolgerungen

Aufgrund der besseren mechanischen Festigkeit im Dreipunktbiegeversuch und des vergleichsweise hohen Sensorsignals wird für den gewebten piezoelektrischen Biegesensor in der Mehrlagengewebestruktur eine Sensorposition oberhalb der neutralen Faser angestrebt. Da relativ geringe Unterschiede in der Festigkeit zwischen der Verwendung von PVDF in Kett- und/oder Schussrichtung vorliegen, bei piezoelektrischem Garn in Kett- und Schussrichtung allerdings ein deutlich höheres Sensorsignal zu erwarten ist, wird bei der Mehrlagengewebestruktur ein Aufbau mit PVDF in Kett- und Schussrichtung weiterverfolgt. Um allerdings im Einklang mit der zweiten Arbeitshypothese die Auswirkungen auf die mechanische Bauteileigenschaften möglichst gering zu halten, wird aufgrund der deutlichen Verringerung der mechanischen Bauteilfestigkeit durch eine weitere PVDF-Gewebesicht, trotz des höheren Sensorsignals bei der Entwicklung des Mehrlagengewebes auf diese verzichtet. Die Elektrode sollte eine Bindung aufweisen, die möglichst viel leitfähiges Garn auf der der piezoelektrischen Schicht zugewandten Seite besitzt. Die PVDF Schicht soll möglichst symmetrisch in Ober- und Unterseite gestaltet werden und wird daher als Leinwandbindung umgesetzt. Außerdem sollten die sieben Verstärkungslagen möglichst fest miteinander verbunden werden, sodass die einzelnen Lagen definiert und reproduzierbar zueinander ausgerichtet sind und die Streuung im Messsignal baugleicher Sensoren gering ausfällt.

Bereits durch den Aufbau der sensorischen Verstärkungsstruktur aus einzelnen 2D-Gewebelagen kann durch die Wahl der am besten geeigneten Sensorposition und eine angepasste textile Sensorstruktur im Vergleich zu einem integrierten Piezoelement, wie es in Abbildung 2-5 dargestellt ist, eine vergleichsweise größere Bauteilfestigkeit trotz Sensorfunktion erreicht werden (siehe Abbildung 4-39). Die in Abbildung 2-5 dargestellten Proben wurden hierfür zum Vergleich hinsichtlich ihrer Biegefestigkeit geprüft.

Im nachfolgenden Kapitel werden die in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnisse auf Mehr-lagengewebestrukturen übertragen.



**Abbildung 4-39:** Bruchspannung der Proben mit dem favorisierten textilen Sensoraufbau mit vergleichbaren Proben mit integriertem Sensorbauteil

## **5 Umsetzung und Verifizierung der Erkenntnisse an FKV-Komponenten aus partiell sensorischen Mehrlagengeweben**

Um die in Kapitel 1 beschriebenen Vorteile von Mehrlagengeweben als Verstärkungsstrukturen von FKV auszunutzen sowie die erwähnten Probleme eines Einzellagenaufbaus zu vermeiden, werden die gewonnenen Erkenntnisse in diesem Kapitel an dreidimensionalen Mehrlagengewebestrukturen umgesetzt und verifiziert. Dabei soll durch konsequentes Anwenden der in Kapitel 4 erzielten Ergebnisse ein möglichst optimaler Aufbau des funktionalen, sensorischen Bereichs erzielt werden.

### **5.1 Bindungsentwicklung und Aufbau der Prüfkörper**

Es werden sensorisch ausgestattete FKV auf Mehrlagengewebebasis aufgebaut. Um ein möglichst starkes Sensorsignal bei möglichst geringem Einfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften zu erzielen, werden die erarbeiteten Erkenntnisse berücksichtigt bzw. angewandt. Dies erfolgt, soweit nicht anders angegeben, weitgehend analog zum Vorgehen bei der Herstellung der Versuchskörper in Kapitel 4.

#### **Materialien und Methoden**

Bei den Untersuchungen in Kapitel 4 wurden aus Flexibilitäts- und Handhabungsgründen die verstärkenden Glasfasern durch PET-Garn substituiert. Die Umsetzung der Erkenntnisse an Mehrlagengeweben erfolgt allerdings mit Glasfaserovingen als Verstärkung. PVDF-Garn und Elektrodengarn werden unverändert, wie in Kapitel 4 (vgl. Tabelle 3), verwendet. Als Glasfasern kommt der StarRov<sup>®</sup> 086 600 der Firma Johns Manville zum Einsatz. Dabei handelt es sich um E-Glas mit 600 tex Rovingstärke. Auf den Einsatz von Kohlenstofffasern als Elektroden wird aufgrund ihrer relativ großen Sprödigkeit und der damit einhergehenden Gefahr von Kurzschlüssen durch abstehende (abgebrochene) Faserenden verzichtet.

Die Mehrlagengewebe werden auf einer 3D-Webanlage gefertigt. Diese besteht aus einer Dornier Mono-Greiferwebmaschine vom Typ P2, mit Horizontalabzug HTO

(siehe Abbildung 5-1) und einer Stäubli-Jacquard-Maschine Unival 100 (siehe Abbildung 5-2). Der Monogreifer hat den Vorteil einer sanften Fadenübernahme. Im Gegensatz zu einer Doppelgreifer-Webmaschine entfällt die komplizierte Mittenübergabe des Schussfadens und die zusätzlichen Spannungsspitzen für die relativ spröden Glasfasern. Durch die Jacquard-Maschine können bei jedem Schusseintrag alle Kettfäden über die Bewegung der Litzen separat gesteuert werden. So kann den individuellen Anforderungen des Webprozesses, der Bindung und des Fadenmaterials nachgekommen werden. Das stationäre Abrollgatter für die Kettfäden ist ein Texmer-System mit tangentialem Spulenabzug, Spannungsausgleich und mechanisch einstellbarer Fadenspannung (siehe Abbildung 5-3). Damit kann für jeden Kettfaden die individuell erforderliche Fadenlänge entsprechend der Bindungsfolge zugeführt werden.

Die Entwicklung verschiedener Bindungen für das Mehrlagengewebe erfolgt mit der 3D-Weave-Composite-Software der EAT GmbH. Mit Hilfe dieser Software können die Gewebestrukturen im Schussschnitt dargestellt werden und so Lage für Lage mit jeweils individuellen Kett- und Schussfäden sowie Zusatzinformationen, wie bspw. Fachhöhe oder Phasenversetzungen bei der Fachbewegung, aufgebaut werden. Zudem gibt es die Möglichkeit einer dreidimensionalen Visualisierung. In dieser Ansicht sind der Querschnitt und die Feinheit des Garnes nur schematisch dargestellt. Ebenso entsprechen die Ondulation des Schusses und der Kette sowie die Abstände der Gewebelagen nicht der Realität. Der Gewebeaufbau und mögliche Bindungsfehler lassen sich so gut erkennen. Für die Verwendung der Daten auf der Webmaschine und zur Steuerung der Stäubli-Jacquardmaschine wird von der Software eine Bindungs- bzw. Schlagpatrone zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 5-4).



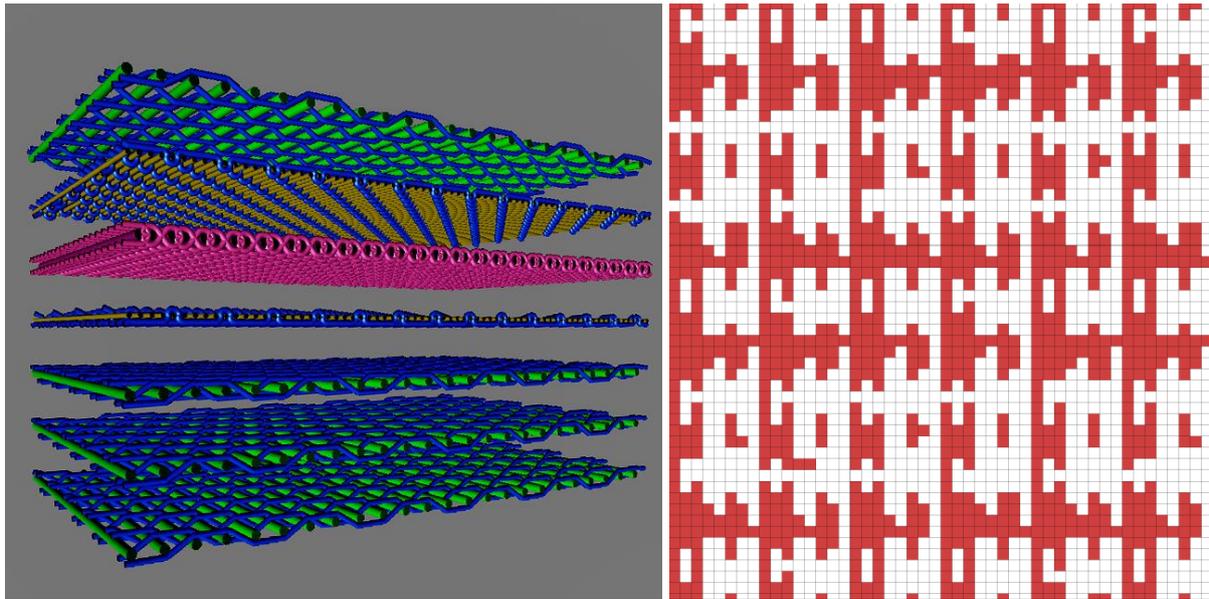
Abbildung 5-1: Dornier Mono-Greiferwebmaschine P2 (rechts) mit Horizontalabzug HTO (links) der Mehrlagengewebe



Abbildung 5-2: Stäubli-Jacquard-Maschine Unival 100 mit Webharnisch für die Übertragung des Fachhubs auf die einzelnen Kettfäden (links) und den Hubaktoren in der Jacquardmaschine (rechts)



**Abbildung 5-3: Stationäres Abrollgatter mit tangentialem Spulenabzug, Spannungsausgleich und mechanisch einstellbarer Fadenspannung**



**Abbildung 5-4:** Beispiel für eine dreidimensionale Visualisierung eines Mehrlagenaufbaus (links) und der zugehörigen Schlagpatrone (rechts)

### **Bindungsentwicklung**

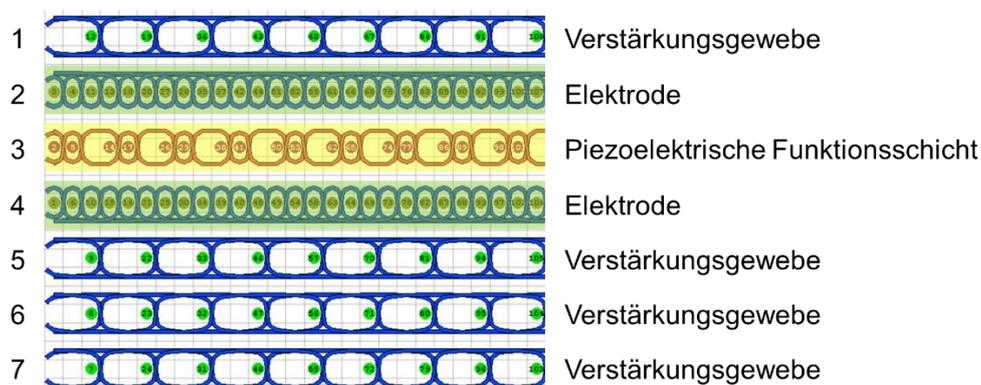
Alle in Kapitel 4 ermittelten Erkenntnisse werden an der Mehrlagengewebestruktur umgesetzt. Der siebenlagige Aufbau wird weiter beibehalten, ebenso die Sensorlage oberhalb der neutralen Faser und die piezoelektrische Schicht mit dem PVDF-Garn in Kette und Schuss. Für jede Funktion wird die ermittelte, am besten geeignete Bindungsart möglichst übernommen. Gleiches gilt für die Schussdichten.

Die Herausforderung bei der Entwicklung dieses Mehrlagengewebes besteht in der Verknüpfung der unterschiedlichen Bindungsarten von Verstärkungstextilien, Elektroden und Funktionsschicht in den verschiedenen Bereichen und der unterschiedlichen Feinheiten der verwendeten Garne. Aus den Anforderungen an den Sensor und den sich aus den unterschiedlichen Garneigenschaften ergebenden verschiedenen Kett- und Schussdichten müssen eine Bindung der Gesamtstruktur und eine mögliche Schussfolge entwickelt werden.

Ausgangspunkt für die Entwicklungen der Mehrlagengewebe ist das im Schussschnitt in Abbildung 5-5 dargestellte Referenzgewebe aus sieben Gewebelagen für den sensorischen Bereich.

Für die verstärkenden Glasfaserlagen wird eine Körperbindung 2/2 verwendet um eine möglichst geringe Ondulation der Fasern und somit eine hohe Festigkeit des FKV zu erhalten. Die piezoelektrische Funktionsschicht wird für eine möglichst dichte Lage mit einer Leinwand 1/1-Bindung gewebt. Um mit einem möglichst großen Anteil an

leitfähigem Material an die piezoelektrische Schicht anzugrenzen, wird für die Elektrodenlagen eine Atlas-Bindung gewählt. Die Elektrodenlage ist jeweils in Richtung der PVDF Lage gerichtet, d. h. oberhalb der PVDF-Lage ist diese als Atlas 4/1 ausgestaltet und unterhalb als Atlas 1/4. Im Vergleich zu den Versuchen in Kapitel 4 weist lediglich die Atlasbindung der Elektroden einen Unterschied im Sensoraufbau auf (in Kapitel 4: Körper 1/3 bzw. Körper 3/1). Dies ist vor allem der im vorigen Absatz beschriebenen Problematik bzw. Herausforderung geschuldet. Der Anforderung möglichst viel leitfähiges Garn in Richtung piezoelektrischer Schicht zu bringen wird die Atlasbindung trotzdem gerecht. Im Vergleich zum Körper 3/1 bzw. 1/3 bringt ein Atlas 4/1 bzw. 1/4 sogar noch mehr leitfähiges Garn in Richtung Funktionsschicht.



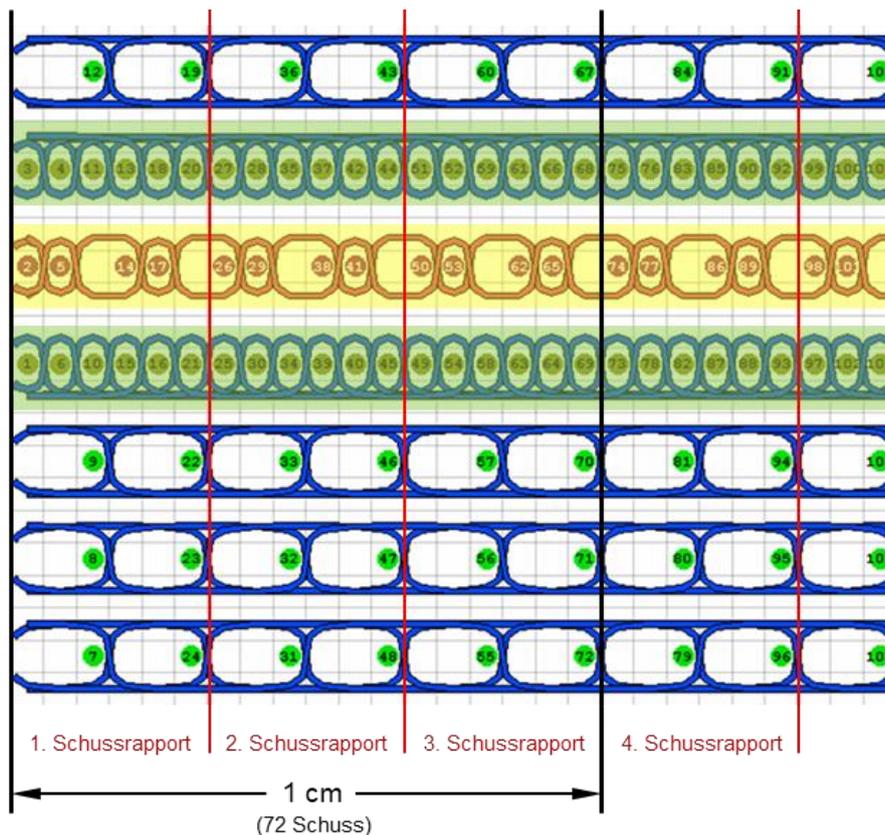
**Abbildung 5-5: Schussschnitt des schematischen Ausgangsaufbaus: Sieben einzelne übereinanderliegende Gewebelagen ohne Anbindungspunkte und ihre Funktion**

Die Garnmaterialien, die Fadendichten und die Bindungen in den einzelnen Lagen sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die Fadendichten ergeben sich aus Kapitel 4, Vorversuchen und den unterschiedlichen Garnstärken.

**Tabelle 11: Garnmaterialien, Fadendichten und Bindungen der einzelnen Lagen**

Lage	Kette		Schuss		Bindung
	Garnmaterial	Kettdichte (KFd/cm)	Garnmaterial	Schussdichte (SFd/cm)	
1	Glas	5	Glas	6	K 2/2
2	Glas	5	Statex	18	A 4/1
3	PVDF	10	PVDF	12	L 1/1
4	Glas	5	Statex	18	A 1/4
5	Glas	5	Glas	6	K 2/2
6	Glas	5	Glas	6	K 2/2
7	Glas	5	Glas	6	K 2/2

Daraus folgt ein Schussrapport von 24 Schüssen für die Mehrlagenbindung. Aus den Schussdichten der einzelnen Lagen folgt eine Gesamtschussdichte für das Mehrlagengewebe von 72 SFd/cm. Das bedeutet, dass 1 cm Mehrlagengewebe ein ganzzahliges Vielfaches eines Schussrapports darstellt (siehe Abbildung 5-6).



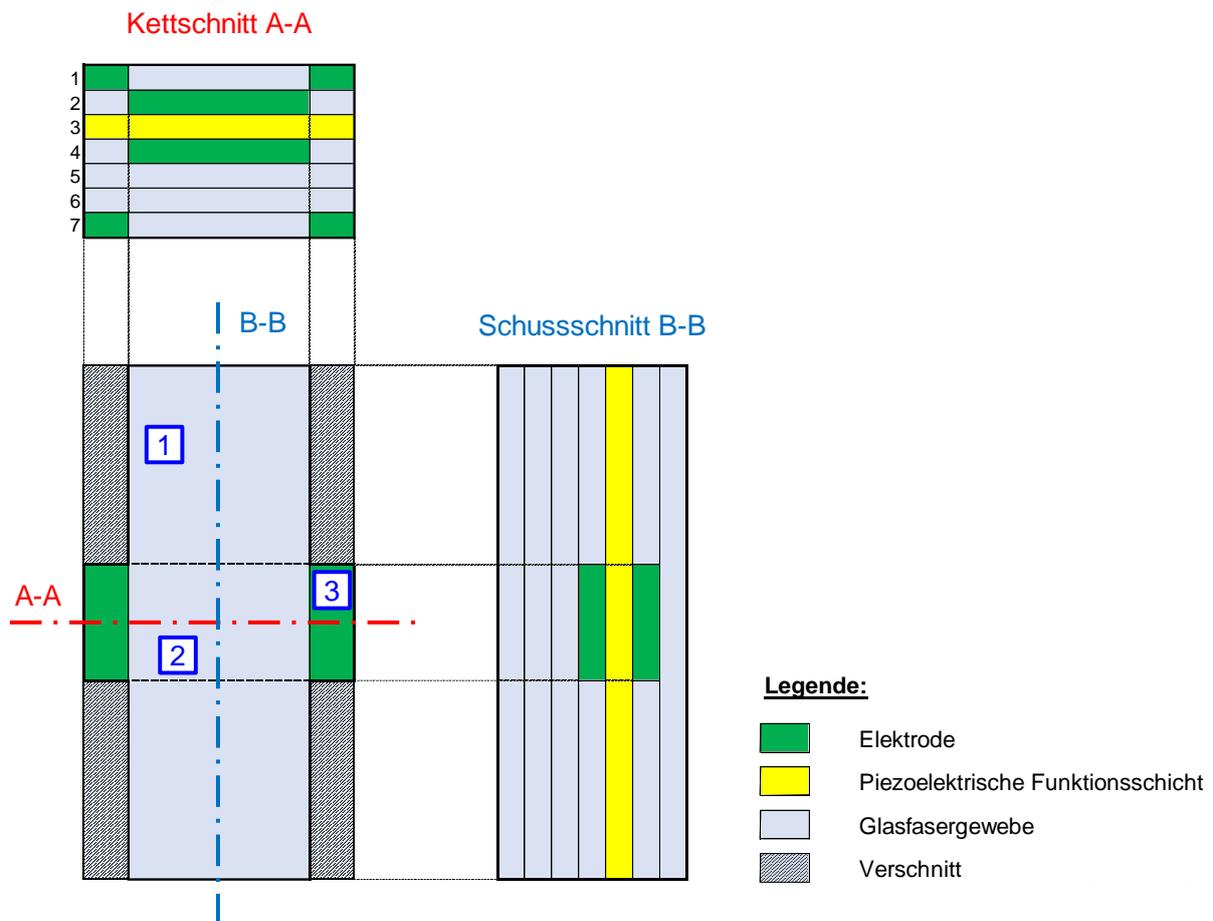
**Abbildung 5-6: Schussrapport und Gesamtschussdichte des Mehrlagengewebes**

Die aus einzelnen, separat gefertigten, Gewebelagen aufgebauten sensorischen FKV in Kapitel 4 verfügen über zwei Bereiche: einen Sensorstreifen und den restlichen Bereich, in dem zwar das PVDF-Gewebe vorhanden ist, aber keine Elektroden. Die Fasern in letzterem Bereich dienen also lediglich der Bauteilverstärkung.

Die Mehrlagenwebtechnik ermöglicht einzelnen Fäden oder Fadengruppen ihre Lage, sowohl in Kette als auch in Schuss, zu wechseln. Mithilfe dieser Webtechnik ist es möglich, einen dritten Bereich zu gestalten, an dem die Elektroden jeweils an die Oberfläche des mehrlagigen Gewebeaufbaus geführt werden, um eine einfachere Kontaktierung dieser zu ermöglichen. Um den sensorischen Bereich durch den Kontaktierungsbereich nicht zu verkleinern und eine Vergleichbarkeit mit den Untersuchungen aus Kapitel 4 zu gewährleisten, wird dieser Bereich als „Flügel“ an die sensorischen FKV-Proben angefügt. Der schematische Aufbau der sensorischen Verstärkungstextilien aus Mehrlagengeweben ist in Abbildung 5-7 dargestellt. Über die Webbreite werden drei solcher Proben nebeneinander gefertigt.

In Abbildung 5-7 sind auch die drei genannten Bereiche markiert. Der erste Bereich (1 in Abbildung 5-7) markiert den Teil des Bauteils, der außerhalb der Kontaktierung und des sensorischen Bereichs liegt, den Basisbereich. In diesem Bereich liegen lediglich die verstärkenden Glasfasern in den Lagen 1, 2 und 4 bis 7 vor und die PVDF-Fasern in Lage 3. Im Bereich 2, dem sensorischen Bereich werden in den Lagen 2 und

4 elektrisch leitfähige Schussfäden eingefügt und bilden die Sensorelektroden. Dieser Bereich stellt den Sensor dar. Im Übergang von Bereich 2 und 3, wechseln diese Schussfäden in die Lagen 1 bzw. 7 und die Schussfäden der Lagen 1 und 7 wechseln in die Lagen 2 und 4. Somit befinden sich im Bereich 3, dem Kontaktierungsbereich, die elektrisch leitfähigen Schussfäden in den Lagen 1 und 7. Lage drei besteht aus PVDF-Garn und die übrigen Lagen 2 und 4 bis 6 bestehen aus Glasfasern. Die in Tabelle 11 den verschiedenen Garnmaterialien zugeordneten Schussdichten gelten selbstverständlich auch in den Bereichen 1 und 3 für die entsprechenden Schussgarne.



**Abbildung 5-7: Schematische Darstellung des sensorischen Mehrlagengewebes**

Ausgehend vom siebenlagigen Aufbau der sensorischen Mehrlagenstruktur in Abbildung 5-5 ist der beschriebene Zusammenhang in Abbildung 5-8 veranschaulicht und in Tabelle 12 zusammengefasst.

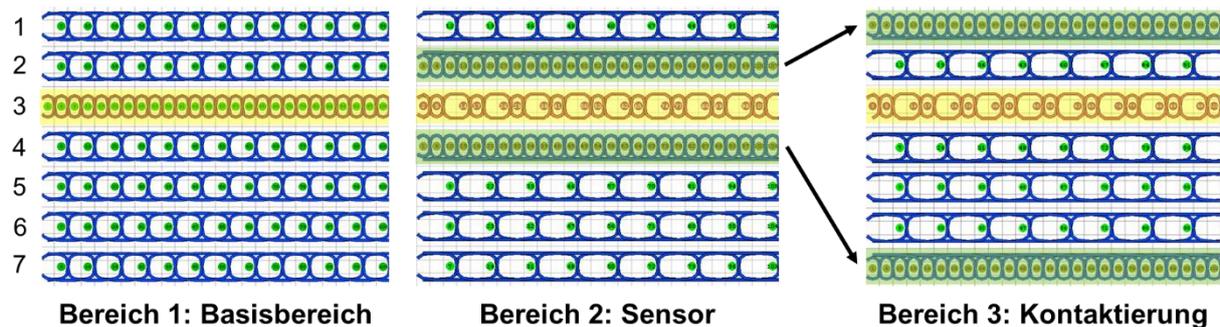


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung von Basisbereich, Sensorbereich und Kontaktierungsbereich im Schusschnitt

Tabelle 12: Schussmaterial und Bindungen in den einzelnen Lagen der unterschiedlichen Bereiche

Lage	Bereich 1		Bereich 2		Bereich 3	
	Schussmaterial	Bindung	Schussmaterial	Bindung	Schussmaterial	Bindung
1	Glas	K 2/2	Glas	K 2/2	Statex	A 1/4
2	Glas	K 2/2	Statex	A 4/1	Glas	K 2/2
3	PVDF	L 1/1	PVDF	L 1/1	PVDF	L 1/1
4	Glas	K 2/2	Statex	A 1/4	Glas	K 2/2
5	Glas	K 2/2	Glas	K 2/2	Glas	K 2/2
6	Glas	K 2/2	Glas	K 2/2	Glas	K 2/2
7	Glas	K 2/2	Glas	K 2/2	Statex	A 4/1

Somit ergibt sich für den Bereich 1 eine Gesamtschussdichte von 48 SFd/cm und für den Bereich 3, wie auch für den Bereich 2, eine Gesamtschussdichte von 72 SFd/cm. Damit stellt auch in diesen Bereichen die Gesamtschussdichte ein ganzzahliges Vielfaches eines Schussrapports dar.

Ausgehend von dieser Referenzbindung aus sieben einzelnen Gewebelagen ohne Anbindung werden Bindungen für Mehrlagengewebe entwickelt.

Neben der beschriebenen Referenzstruktur aus einzelnen, losen Gewebelagen, werden sowohl eine sensorische „Layer-to-Layer“- als auch eine sensorische Through-Thickness“-Verbindung der Gewebelagen entwickelt. Um die Anzahl an möglichen

Varianten einzuschränken, und die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, geschieht die Abbildung, soweit bindungstechnisch möglich, senkrecht („orthogonal interlock“ bzw. „orthogonal interweave“) durch Kettfäden und nicht durch ein zusätzliches Fadensystem.

Die Erkenntnisse aus Kapitel 4 werden somit an folgenden drei sensorischen 3D-Gewebevarianten umgesetzt:

- *Mehrlagenstruktur ohne Anbindungspunkte der Lagen untereinander:*  
als Ausgangsgewebe bei der Entwicklung und Referenz für die Charakterisierung
- *„Layer-to-Layer“-Bindung:*  
sequentielle Lagenanbindung, bei der alle Gewebelagen an die jeweils benachbarten Lagen angebunden sind
- *„Through-Thickness“-Bindung:*  
orthogonale Lagenverbindung, bei der alle Lagen miteinander durch einen Wechsel der Kettfäden der obersten und untersten Gewebelage verbunden sind

Die drei Bindungen der sensorischen Bereiche sind in Abbildung 5-9 jeweils in Schusschnitt und dreidimensionaler Darstellung abgebildet. Schussdichten und festgelegte Bindungen in den einzelnen Lagen werden beibehalten. Auch im Basis- und Kontaktierungsbereich wird jeweils entsprechend abgebunden.

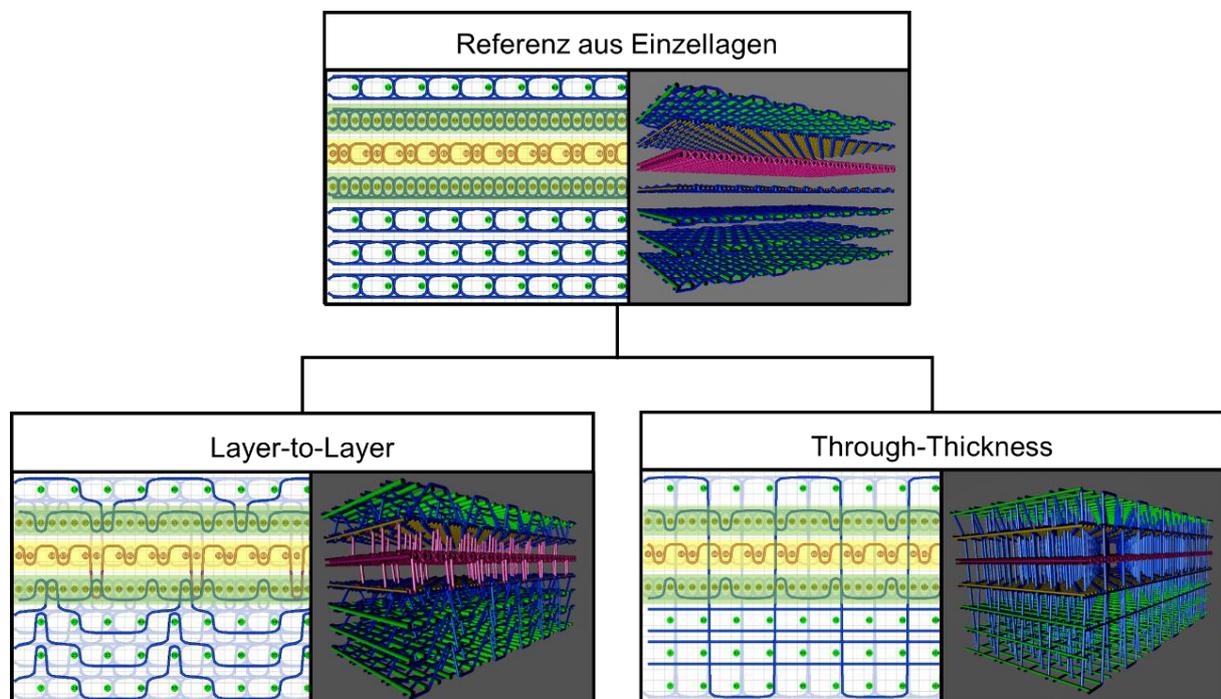


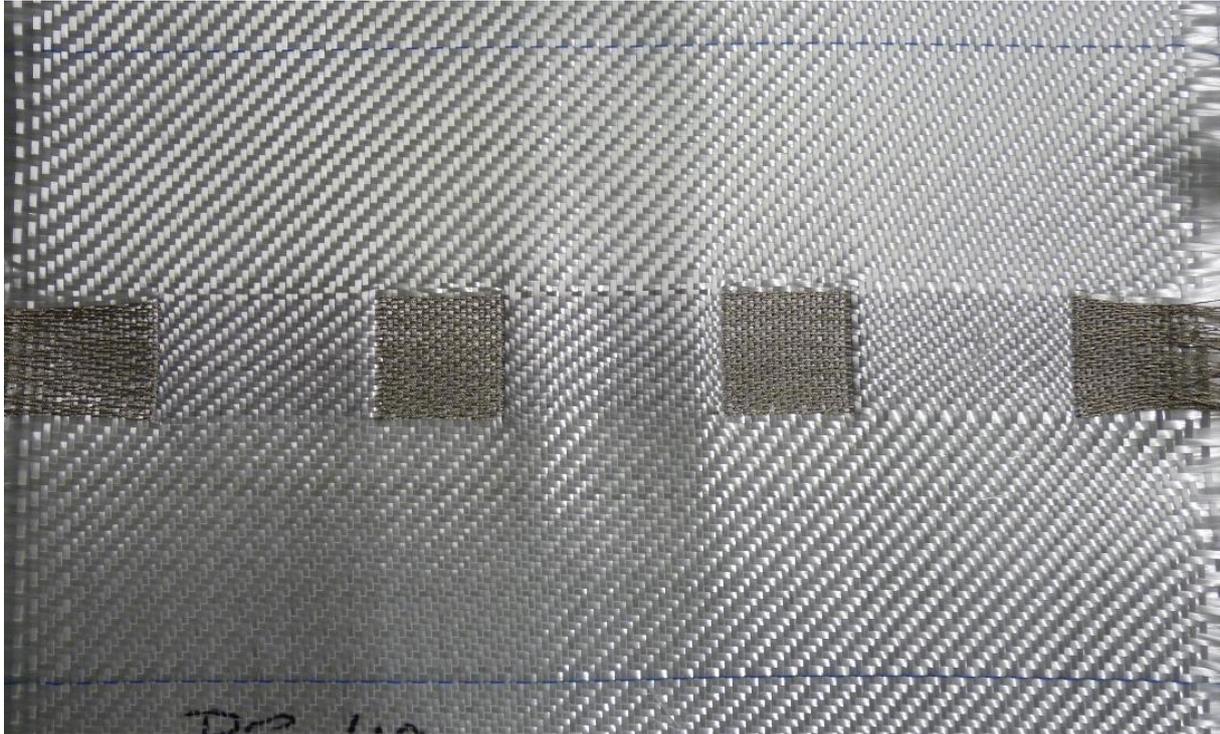
Abbildung 5-9: Schematische Schusschnittansicht und dreidimensionale Darstellung der sensorischen Bereiche der mehrlagigen 3D-Gewebestrukturen mit und ohne Anbindung

## **Herstellung der FKV-Prüfkörper**

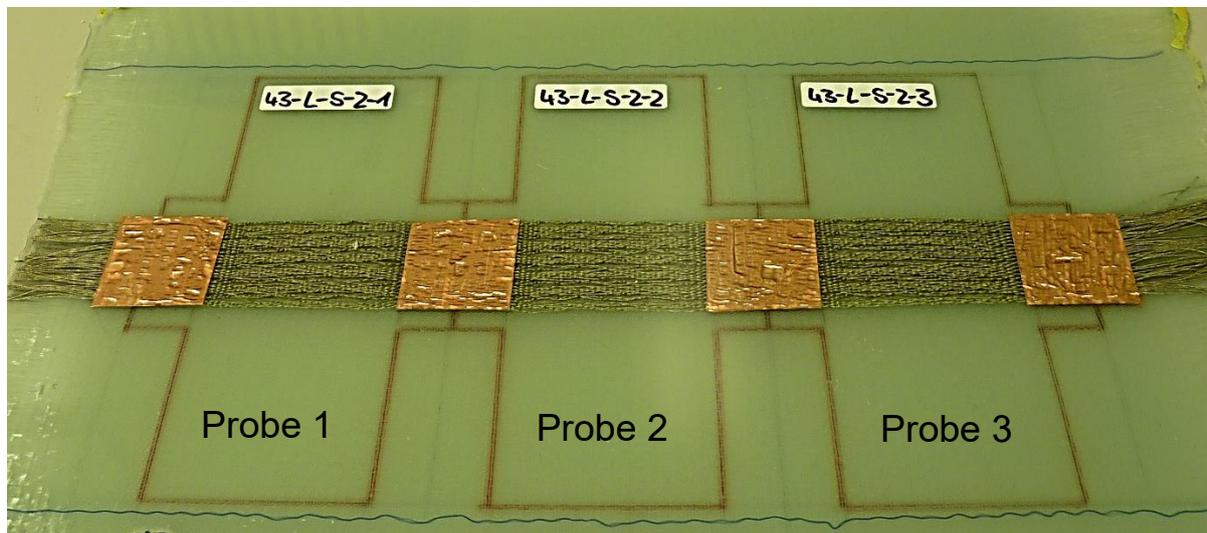
Im Vergleich zur Herstellung der Proben aus Kapitel 4 entfällt bei den Mehrlagengewebe das aufwendige Ausrichten der einzelnen Gewebelagen zueinander, da diese als miteinander verbundene Struktur aneinander fixiert sind. Zudem wird bei der weiteren Verarbeitung im VAP<sup>®</sup>-Verfahren durch die Abbindungen ein Verrutschen der einzelnen Lagen zueinander verhindert. Darüber hinaus werden die Elektroden durch die Abbindungspunkte an der piezoelektrischen Funktionsschicht fixiert und insbesondere bei der Through-Thickness-Bindung an diese regelrecht angedrückt.

In Abbildung 5-10 ist beispielhaft ein Rapport eines solchen Mehrlagengewebes dargestellt. Über die Webbreite können drei Proben aus einem Rapport gefertigt werden. Durch die im Kontaktierungsbereich (3 in Abbildung 5-7) an die Ober- und Unterseite geführten Elektroden können diese an der Oberfläche kontaktiert werden. Dafür werden die Kontaktierungsflächen vor der Konsolidierung zum FKV mit Kupferklebeband mit leitfähigem Kleber (3M Typ 1181).

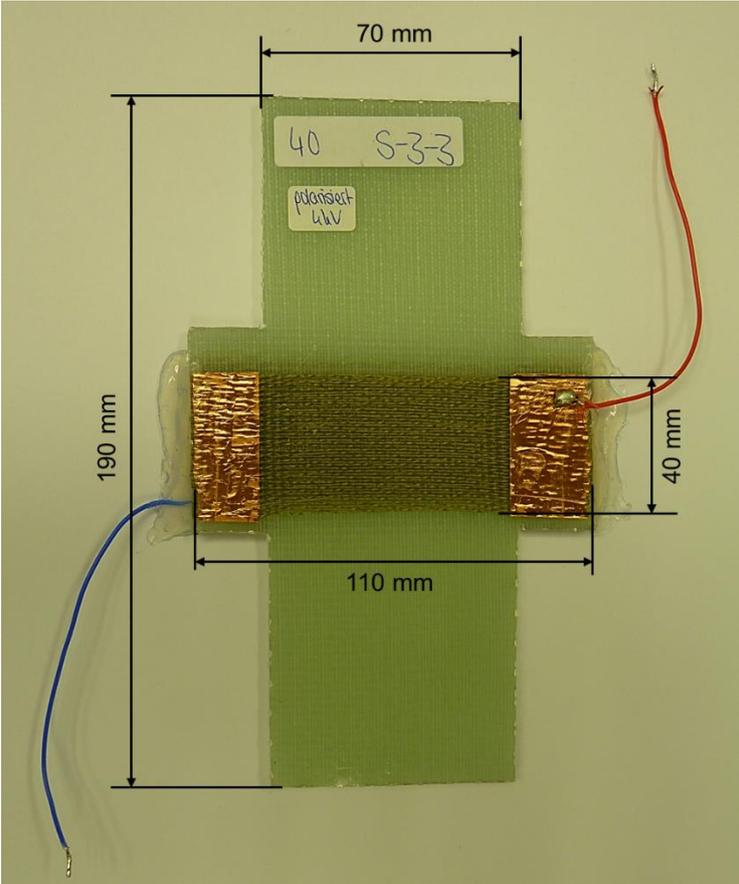
Die Konsolidierung der Mehrlagengewebe zu FKV erfolgt analog zu den Proben in Kapitel 4 (siehe Abbildung 5-11). Die einzelnen Proben werden entsprechend zugesägt. Im Unterschied zu den Proben in Kapitel 4 können zur Kontaktierung der Elektroden direkt an der Oberfläche der Proben Kabel an das Kupferklebeband angelötet werden. Die Polarisierung der Proben geschieht entsprechend des in Kapitel 4 beschriebenen Vorgehens. Die Polarisationsparameter (Elektrodenabstände, Polarisationsspannung und die entsprechende elektrische Feldstärke bei der Polarisierung) der drei gefertigten Varianten sind im Anhang in Tabelle 28 zusammengefasst. Eine fertige Probe und ihre Abmessungen sind in Abbildung 5-12 abgebildet. Die Dicke der Proben beträgt ca. 4 mm. Pro Aufbau werden mindestens zwölf Proben gefertigt und für die Untersuchungen herangezogen.



**Abbildung 5-10:** Rapport des Mehrlagengewebes vor der Konsolidierung zum FKV



**Abbildung 5-11:** Konsolidierter Rapport eines Mehrlagengewebes mit eingezeichnetem  
Probenumriss



**Abbildung 5-12:** Kontaktierte und polarisierte, mit sensorischem Mehrlagengewebe verstärkte Probe und ihre Abmessungen

## 5.2 Elektromechanische Charakterisierung der mit sensorischen Mehrlagengewebe verstärkten FKV-Prüfkörper

Die Versuche zur Charakterisierung der piezoelektrischen Eigenschaften werden, wie die Proben in Kapitel 4, als dynamischer, zerstörungsfreier Dreipunktbiegeversuch an der dynamischen Prüfmaschine Zwick Roell mit 5 kN Kraftsensor durchgeführt. Die eingestellten Parameter der weggesteuerten Prüfung sind in Tabelle 13 aufgelistet. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Versuchen aus Kapitel 4 wird ebenfalls eine Amplitude von 1 mm gewählt. Die höhere Vorspannkraft resultiert aus der höheren Steifigkeit der Mehrlagengewebe mit Glasfasern als Verstärkungsfasern. Die Proben werden zunächst im nicht polarisierten Zustand geprüft, bevor die gleichen Messungen mit polarisierten Proben wiederholt werden. Die genauen Durchschnittswerte der Signalstärke und die entsprechende Standardabweichung aus den folgenden Diagrammen können den zugehörigen Tabellen im Anhang entnommen werden.

**Tabelle 13: Prüfparameter im dynamischen Dreipunktbiegeversuch**

<b>Frequenz</b>	5 Hz
<b>Durchbiegung</b>	0,5 mm bis 2,5 mm
<b>Amplitude</b>	1 mm
<b>Vorspannung</b>	~ 130 N
<b>Stützweite</b>	150 mm

### Referenz aus Einzellagen

Exemplarisch für die Referenzproben aus Einzellagen ohne Anbindung ist in Abbildung 5-13 die gemessene Ladungsverschiebung einer Beispielprobe im polarisierten Zustand und die aufgebrachte Kraft der Biegeprüfmaschine im Zeitverlauf dargestellt.

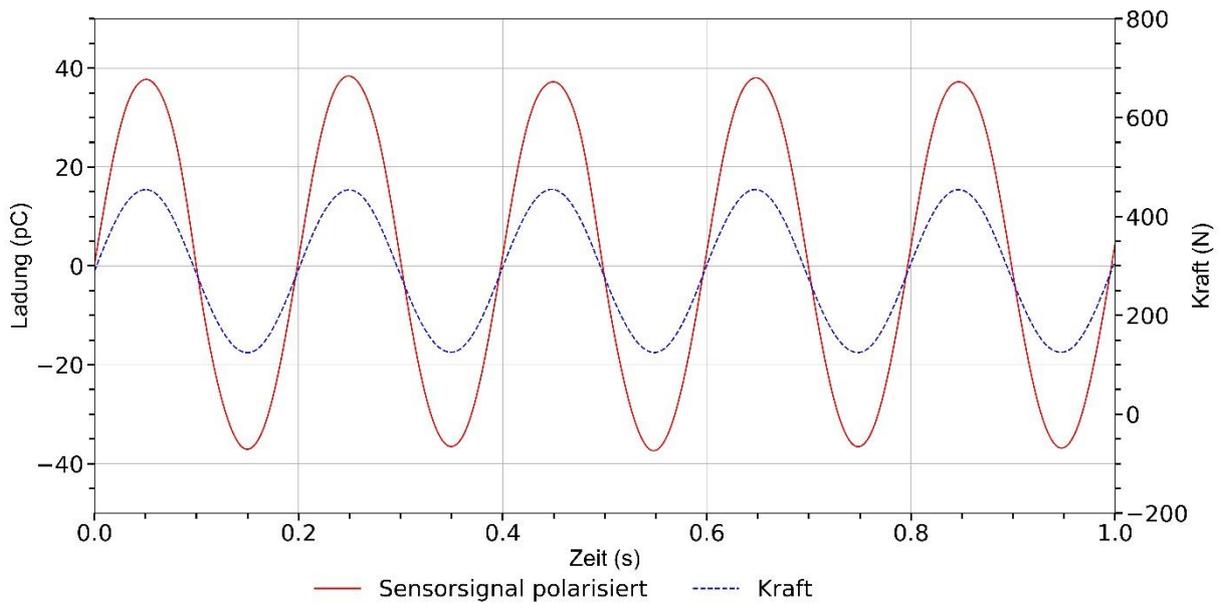


Abbildung 5-13: Piezoelektrisches Sensorsignal und aufgebrachte Kraft einer Referenzprobe, aufgebaut aus Einzellagen ohne Anbindung

Durch die Polarisierung der Proben kann das Sensorsignal mehr als verzehnfacht werden. Die durchschnittliche Schwingweite der Ladung während der dynamischen Belastung über die zwölf Proben erhöht sich von 5,49 pC auf 59,05 pC. Die Mittelwerte der gemessenen Ladungen sowie die Standardabweichung über die Anzahl der Proben sind im Diagramm in Abbildung 5-14 dargestellt.

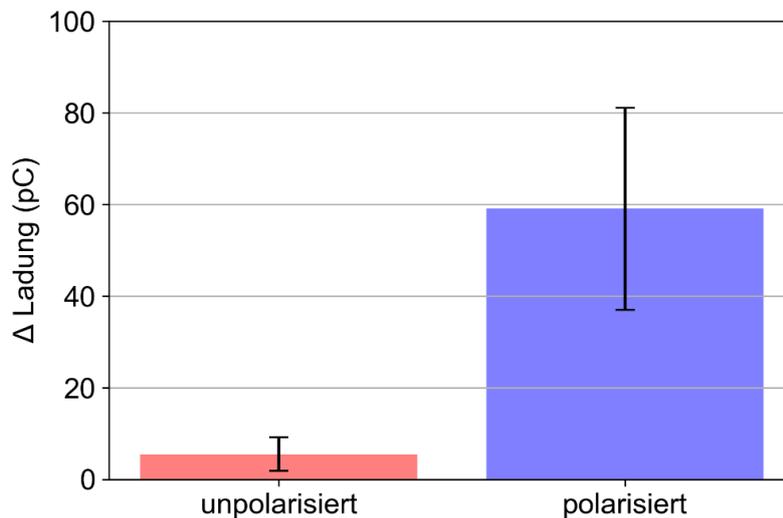
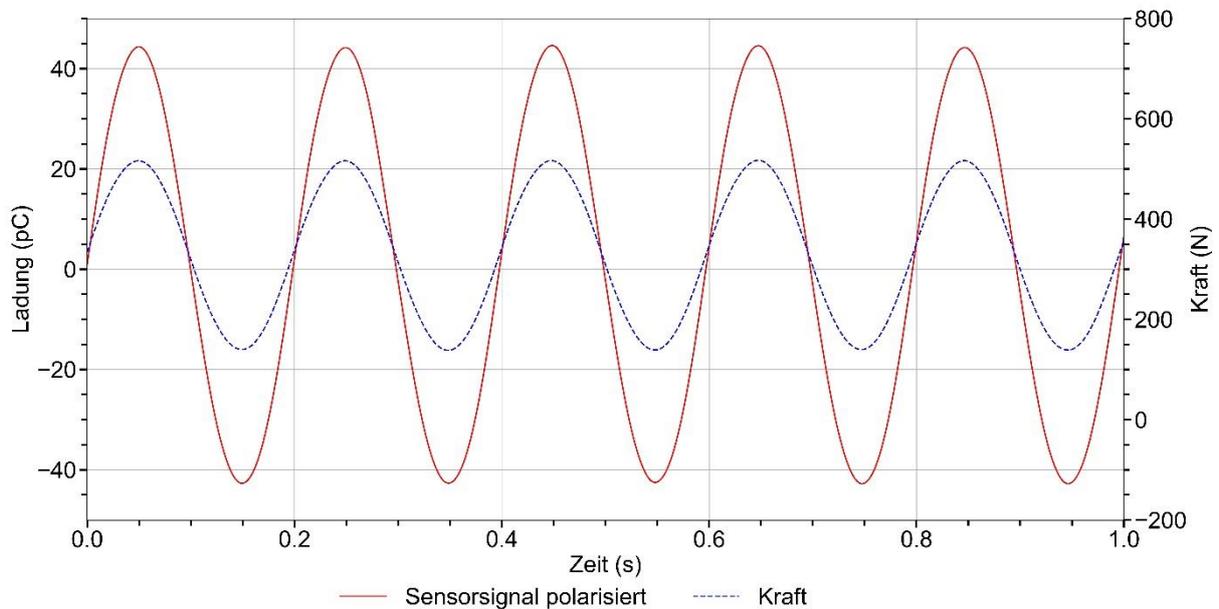


Abbildung 5-14: Einzellagen ohne Anbindung: Vergleich der Signalstärke unpolarisiert – polarisiert

### „Layer-to-Layer“-Struktur

Im Abbildung 5-15 ist der Signalverlauf einer Beispielprobe aus sensorischem Verstärkungsgewebe mit „Layer-to-Layer“-Anbindung dargestellt. Direkt erkennbar ist, dass das Sensorsignal etwas stärker ausfällt, als bei den Referenzproben ohne Anbindung der einzelnen Verstärkungslagen.



**Abbildung 5-15: Piezoelektrisches Sensorsignal und aufgebrachte Kraft einer Beispielprobe mit „Layer-to-Layer“-Anbindung**

Das Sensorsignal wird bei der „Layer-to-Layer“-Anbindung durch die Polarisierung um den Faktor 16 höher (siehe Abbildung 5-16). Der durchschnittliche Wert der gemessenen Ladungen beträgt bei nicht polarisierten Proben 4,45 pC und erhöht sich durch die Polarisierung auf durchschnittlich 71,14 pC.

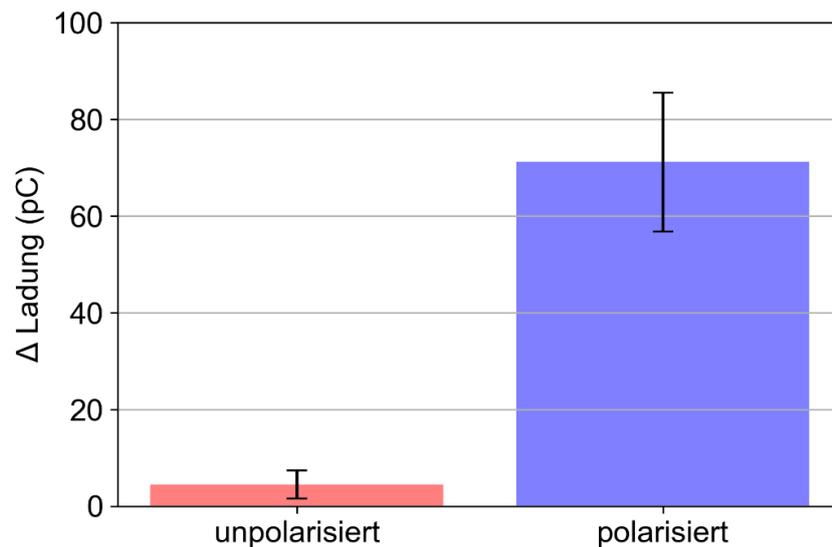


Abbildung 5-16: Layer-to-Layer“-Anbindung: Vergleich der Signalstärke unpolarisiert – polarisiert

### „Through-Thickness“-Struktur

Eine „Through-Thickness“-Anbindung bringt die höchste interlaminare Festigkeit und wäre daher als Gewebestruktur für einen textilen Biegesensor vorzuziehen. In Abbildung 5-17 sind das Sensorsignal einer polarisierten Beispielprobe und die aufgebrauchte Kraft dargestellt. Zu erkennen ist, dass bei der „Through-Thickness“-Anbindung die Signalstärke noch höher ausfällt.

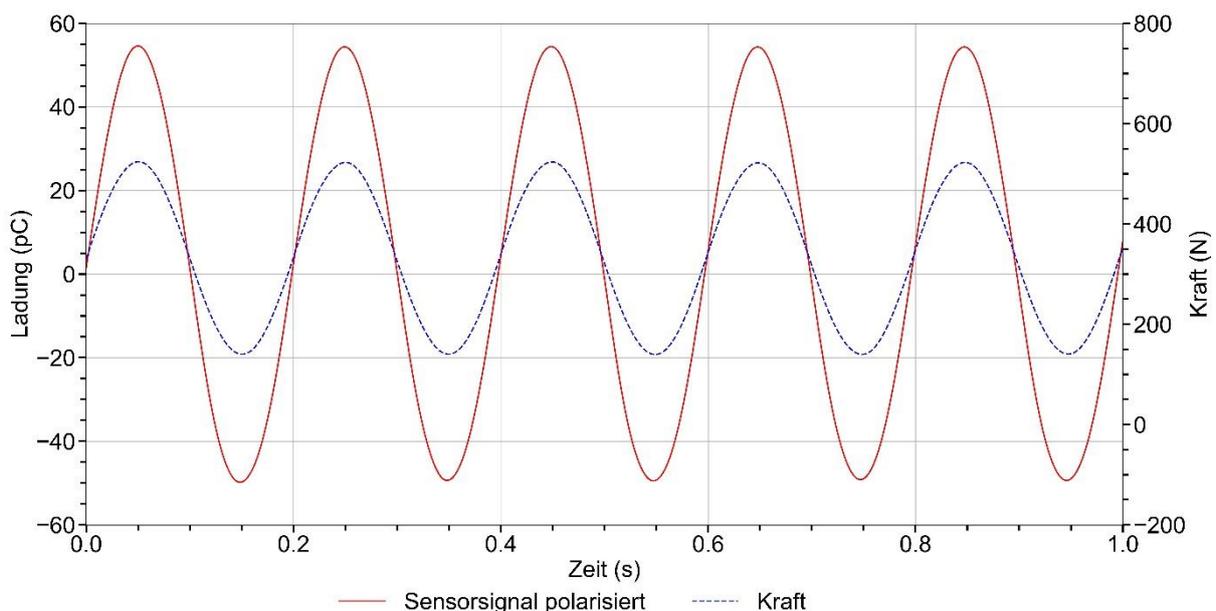


Abbildung 5-17: Piezoelektrisches Sensorsignal einer Beispielprobe mit „Through-Thickness“-Anbindung und aufgebrauchte Kraft

Die Polarisation der Proben bewirkt ein um den Faktor 22 höheres Sensorsignal von 5,24 pC auf durchschnittlich 114,14 pC (siehe Abbildung 5-18). Die kompakte Anbindung der Elektroden an die piezoelektrische Schicht führt zu einem vergleichsweise hohen Sensorsignal. Auch die Streuung über die verschiedenen Proben fällt durch die definierte Positionierung der Lagen zueinander am geringsten aus. Das liegt vermutlich an der komprimierten Form der Bindung, wodurch die Elektroden eng und definiert an die piezoelektrische Schicht gedrückt werden, was auch im Röntgenschnitt der Bindung in Abbildung 5-19 zu sehen ist. Der Übersichtlichkeit halber sind im Bild das Elektrodengarn grün, die piezoelektrische Funktionsschicht gelb und die abbindenden Glasfasern blau eingefärbt. Die restlichen Verstärkungsfasern sind weiß dargestellt.

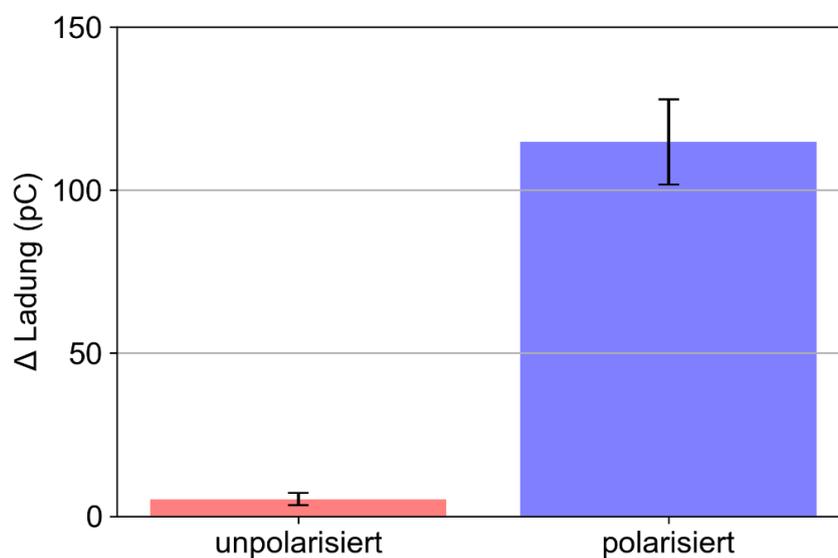


Abbildung 5-18: „Through-Thickness“-Anbindung: Vergleich der Signalstärke unpolarisiert – polarisiert

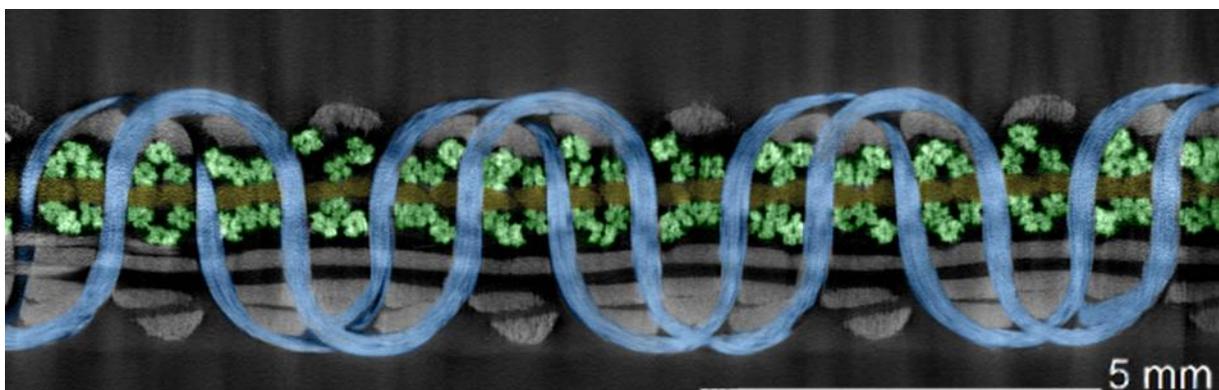
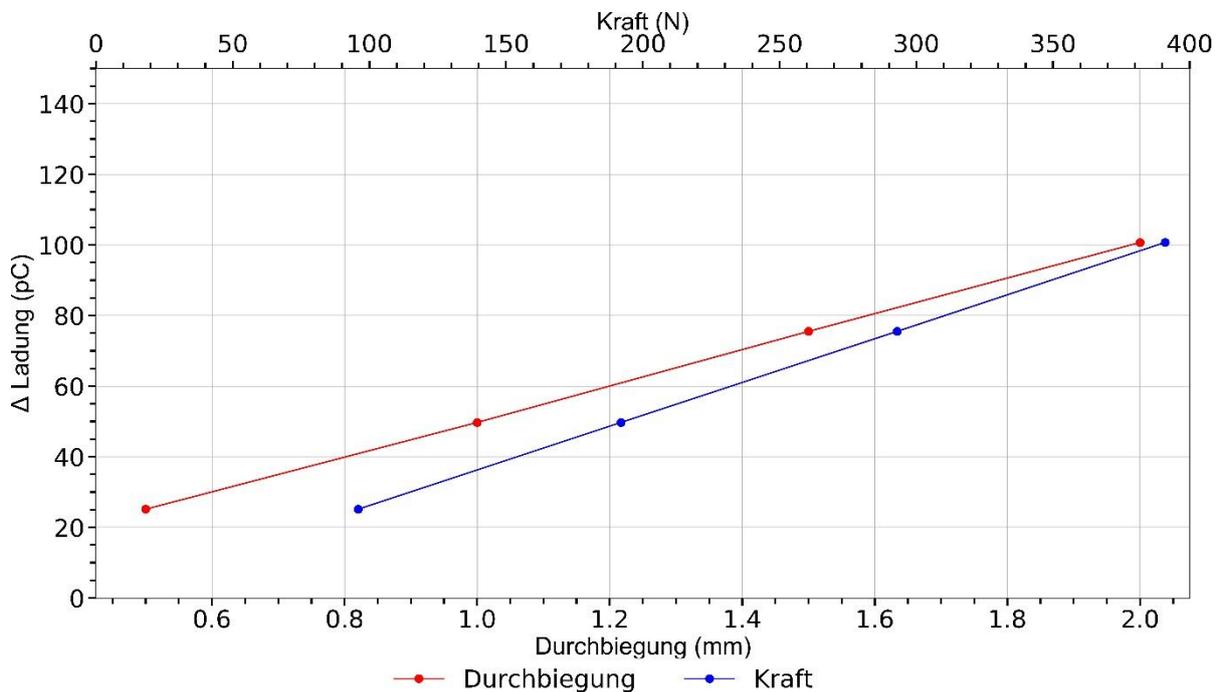


Abbildung 5-19: Röntgenschnitt des sensorischen Bereichs der „Through-Thickness“-Bindung; Elektrodengarn: grün; PVDF-Garn: gelb; Abbindefäden: blau; restliche Verstärkungsfasern: weiß

### Abhängigkeit von Kraft, Weg und Sensorsignal

Der sinusförmige Verlauf des Sensorsignals bei sinusförmiger Belastung lässt bereits auf eine lineare Abhängigkeit des Sensorsignals zur aufgetragenen Kraft im betrachteten Bereich schließen. Der Nachweis erfolgt über das Aufbringen eines veränderten Hubs und der damit einhergehenden Maximalkraft und der kraftabhängigen Auswertung des Sensorsignals. Wie in Abbildung 5-20 beispielhaft für eine „Layer-to-Layer“-Probe aufgezeigt, besteht zwischen dem eingestellten Weg bzw. der aufgetragenen Kraft durch den Prüfstempel und der gemessenen Signalamplitude ein linearer Zusammenhang.



**Abbildung 5-20: Abhängigkeit des Sensorsignals von Hub und aufgetragener Kraft am Beispiel einer Messung an einer Probe mit „Layer-to-Layer“-Bindung**

### 5.3 Mechanische Bauteileigenschaften der mit sensorischen Mehrlagengeweben verstärkten FKV-Prüfkörper

Die statische Biegeprüfung der Proben erfolgt ebenfalls an einer Zwick Roell Prüfmaschine. Um den Einfluss der Anbindungsvariante auf die mechanische Festigkeit des Bauteils zu ermitteln, werden Proben der beiden Varianten einem Dreipunkt-Biegeversuch unterzogen und die Ergebnisse mit denen der Referenzproben aus einem Einzellagenaufbau verglichen. Die Tests werden nach der Norm DIN EN ISO 14125:2011-05 durchgeführt. Die Probenabmessungen betragen daher 73 mm x 58 mm x 3,6 mm und der Abstand der Auflager 58 mm. Für die Auflager und die Druckfinne des Dreipunktbiegeversuchs ergibt sich nach Norm ein Durchmesser von 10 mm. Von jeder Variante werden fünf Proben geprüft.

In Abbildung 5-21 sind die Ergebnisse der statischen Dreipunktbiegeprüfung dargestellt. Die im Vergleich zur Referenzprobe aus Einzellagen ohne Anbindung etwas geringere Festigkeit der „Layer-to-Layer“- und „Through-Thickness“-Anbindung rührt daher, dass aus technischen Gründen die Anbindung durch die Kettfäden erfolgt und diese damit teilweise nicht in Belastungsrichtung ausgerichtet sind. Die genauen Werte und die Standardabweichungen können Tabelle 32 im Anhang entnommen werden.

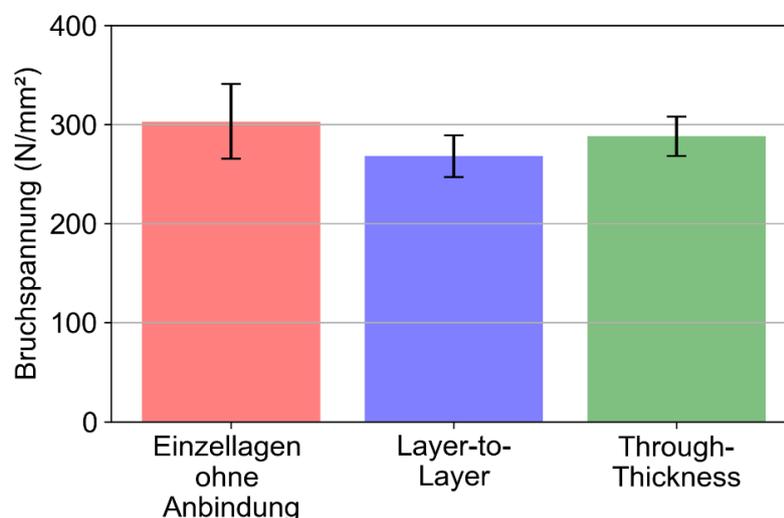


Abbildung 5-21: Vergleich der Bruchspannung der beiden Anbindungsvarianten und der Referenz

## 5.4 Schlussfolgerungen

Die im Rahmen von Kapitel 4 erarbeiteten Erkenntnisse und Zusammenhänge konnten in diesem Kapitel erfolgreich an sensorischen Mehrlagengeweben mit lasttragenden Glasfaserovingen als Verstärkungsfasern verifiziert werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Mehrlagenwebtechnik dazu geeignet ist, textile Verstärkungsstrukturen herzustellen, die partiell sensorisch wirken. Sensorische Mehrlagengewebe mit Anbindung der einzelnen Lagen zueinander sind empfindlicher und erzeugen bei gleicher Belastung ein höheres Sensorsignal als Proben ohne Anbindung der einzelnen Lagen zueinander. Darüber hinaus konnte die Schlussfolgerung aus Kapitel 4.2.5 bestätigt werden, dass mittels Mehrlagenwebtechnik Sensoren mit geringerer Streuung in der Signalstärke hergestellt werden können.

Der Vergleich der Anbindungsvarianten (siehe Abbildung 5-22) zeigt, dass die größte Signalstärke bei der „Through-Thickness“-Anbindung erreicht werden kann. Nicht nur die relative, sondern auch die absolute Streuung über verschiedene Proben fällt bei dieser Variante am geringsten aus. Grundsätzlich verhält sich das Sensorsignal im untersuchten Bereich linear und ist proportional zu Kraft und Durchbiegung.

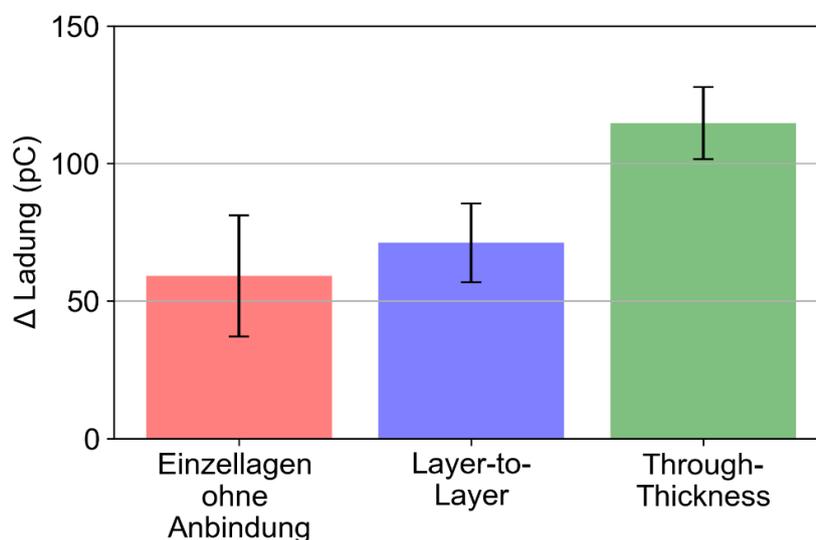


Abbildung 5-22: Vergleich der Signalstärken der drei hergestellten Bindungen

Somit kann nun auch die dritte Arbeitshypothese bestätigt werden: Es ist möglich piezoelektrische Mehrlagengewebe als Verstärkungstextilien einzusetzen. Die Signalstärke ist abhängig von der Höhe der Belastung. Inwieweit das Sensorsignal als Maß für die Bauteilbeanspruchung herangezogen werden kann, wird im nachfolgenden Kapitel überprüft.

Aufgrund der kettseitigen Anbindung der einzelnen Lagen der Verstärkungsgewebe verringert sich die Biegefestigkeit der Mehrlagengewebeproben im Vergleich zu den Proben ohne Anbindung. Bei den Proben mit „Through-Thickness“-Anbindung fällt diese Verringerung jedoch etwas geringer aus.

Die Validierung der sensorischen Verstärkungsstrukturen im nachfolgenden Kapitel findet an Proben mit der „Through-Thickness“-Anbindung statt, da diese das größte durchschnittliche Sensorsignal bei der geringsten Signalstreuung erzeugen konnten.

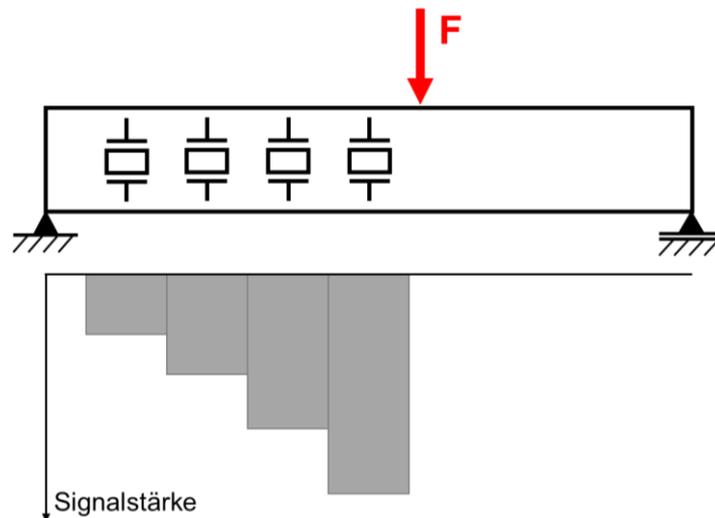


## **6 Validierung der mehrlagengewebebasierten Sensoren mittels eines mechanischen Berechnungsmodells**

Nachdem die in Kapitel 4 erarbeiteten grundlegenden Erkenntnisse und Zusammenhänge zum Aufbau von textilen Piezoelementen in Kapitel 5 auf ein Mehrlagengewebe übertragen wurden, geht es in diesem Kapitel um die Validierung der Signale der textilen Sensoren. Ziel ist es, das Sensorsignal der textilen Sensoren als Maß der Materialbeanspruchung heranziehen zu können. Dabei soll das Sensorsignal im Mehrlagengewebe qualitativ dem Verlauf der Biegespannung im Bauteil bei einfachen Belastungsfällen (Biegebalken) gegenübergestellt und beides gegenseitig in einen Zusammenhang gebracht werden. Ziel ist es eine Korrelation der elektrischen Signale der Biegesensoren und der mechanischen Beanspruchung der faserverstärkten Kunststoffproben nachzuweisen und zu modellieren.

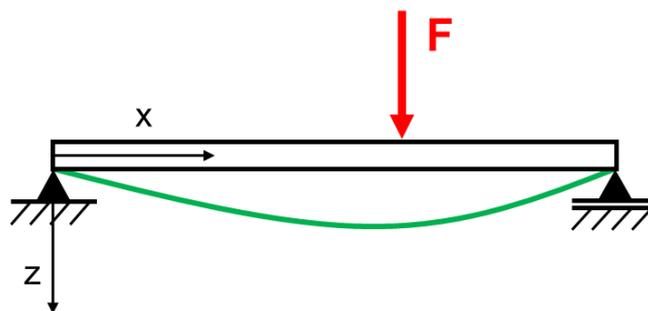
Mit dem Nachweis des linearen Zusammenhangs von Sensorsignal und einwirkender Kraft wurden in Kapitel 5.2 bereits wichtige Voraussetzungen für die Beschreibung der mechanischen Zusammenhänge von Belastung und Sensorsignal geschaffen.

Für die Erarbeitung eines qualitativen Berechnungsmodells und der damit verbundenen Validierung der entwickelten Methode werden vier der gewebebasierten Biegesensoren in regelmäßigen Abständen parallel zueinander in das Verstärkungstextil eingebaut. Aus diesen sensorischen Mehrlagengeweben werden FKV-Proben hergestellt. Anschließend werden diese im dynamischen Dreipunktbiegeversuch belastet (schematische Beispieldarstellung in Abbildung 6-1). In verschiedenen Belastungsfällen werden die erfassten Sensorsignale der modellierten Biegespannung gegenübergestellt.



**Abbildung 6-1:** Schematische Beispieldarstellung von einem Biegebalken mit integrierten piezoelektrischen Sensoren und deren Sensorsignal

Ansatz der in diesem Kapitel beschriebenen Herangehensweise ist, dass die FKV-Proben aufgrund ihrer Geometrie als Balken betrachtet werden können. In der klassischen Mechanik existieren Modelle, um Biegebalken zu modellieren. Ausgehend von vereinfachten Theorien, wie der in Abbildung 6-2 dargestellten Balkentheorie, können mechanische Grundgleichungen hergeleitet werden, um die Deformationen und die auftretenden Spannungen zu bestimmen.



**Abbildung 6-2:** Darstellung eines gelagerten Balkens und dessen Deformation (grün) durch eine einwirkende Kraft  $F$  (i. A. a. [110])

Im Rahmen dieses Kapitels werden zunächst im dynamischen Dreipunkt-Biegeversuch die Signale der textilen Sensoren experimentell erfasst. Die Ergebnisse werden dann mit dem nach der Bernoulli-Euler-Biegetheorie modellierten Biegespannungsverlauf verglichen.

## 6.1 Aufbau der Proben

Für die in Kapitel 6 benötigten Proben wird der siebenlagige Aufbau des Verstärkungsgewebes mit integrierter Sensorik aus Kapitel 5 beibehalten. Als Bindung wird die Through-Thickness-Variante gewählt, da mit dieser das vergleichsweise stärkste Sensorsignal erzielt werden kann. Das verwendete Faser- bzw. Garnmaterial bleibt im Vergleich zu Kapitel 5 unverändert. Lediglich Sensoranzahl sowie Sensor- und Probenabmessungen werden angepasst (siehe Abbildung 6-3). Da von der Messtechnik vier Sensorsignale gleichzeitig erfasst werden können, sind die Proben mit vier Sensoren ausgestattet.

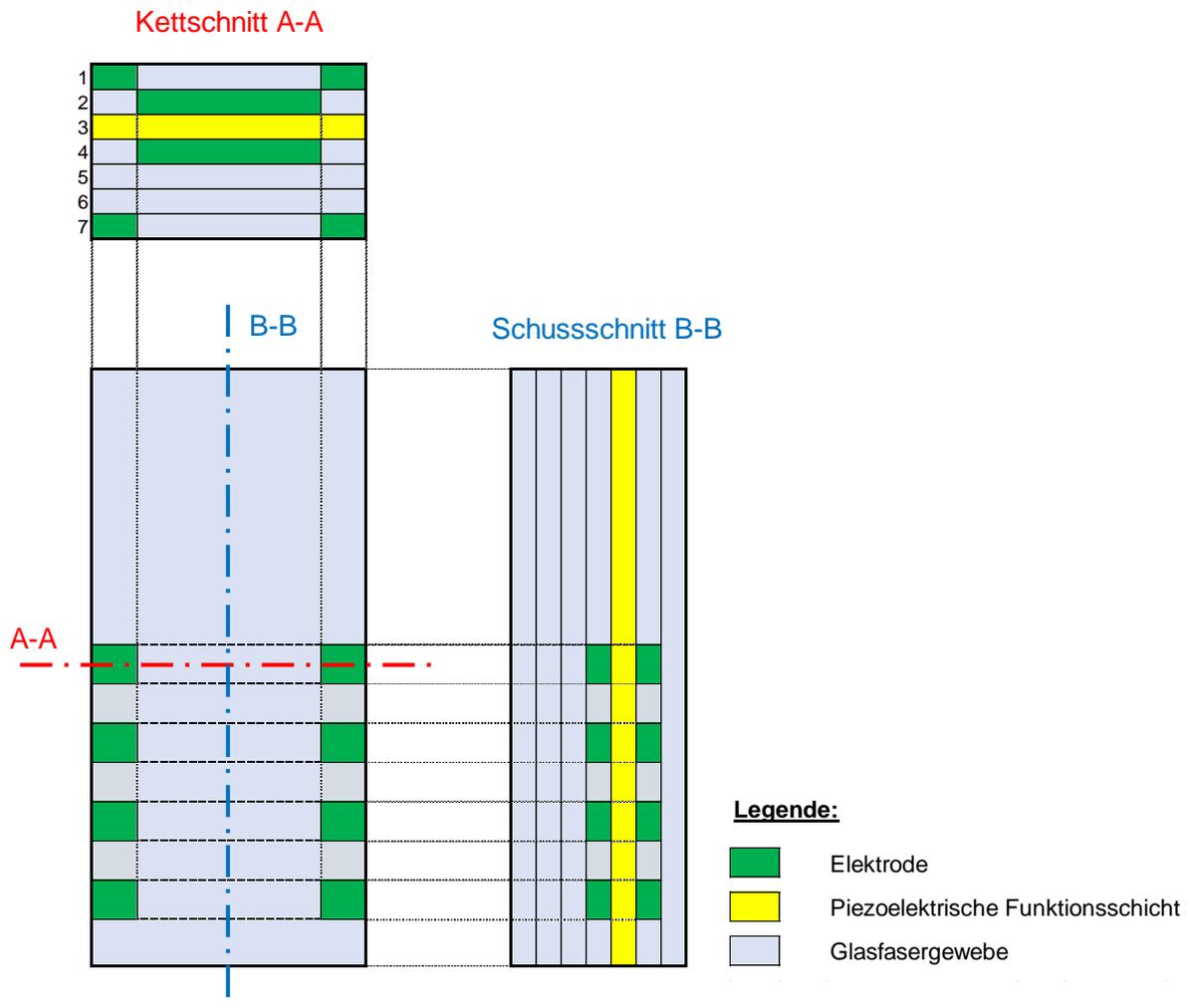
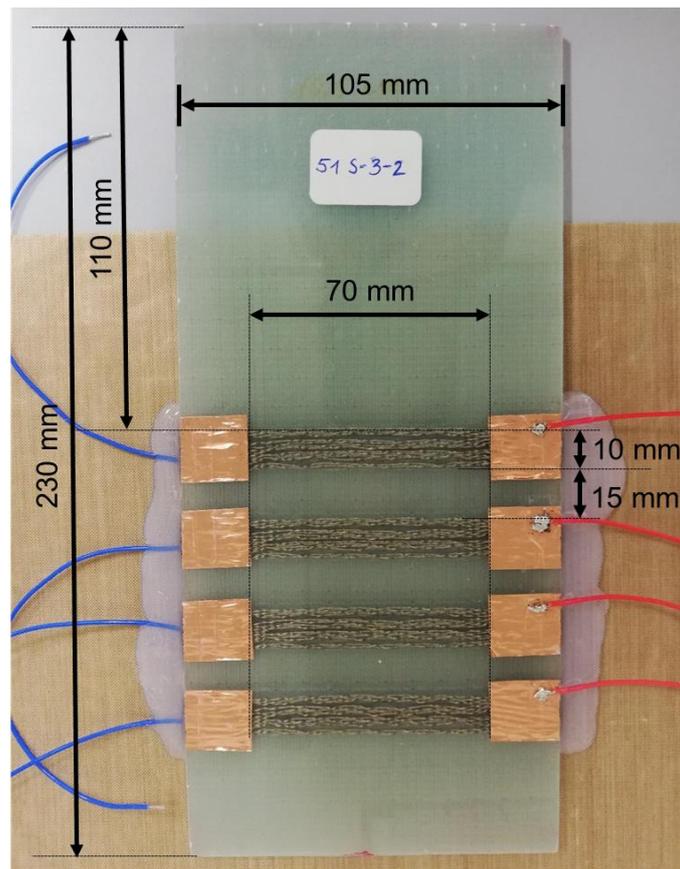


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung des sensorischen Mehrlagengewebes

Die Proben werden analog zu Kapitel 5 kontaktiert, konsolidiert und polarisiert. In Abbildung 6-4 ist eine sensorische Probe mit Abmessungen dargestellt. Die Proben sind ca. 4 mm dick. Für die folgenden Untersuchungen werden sechs Proben gefertigt.



**Abbildung 6-4:** Kontaktierte und polarisierte, mit sensorischem Mehrlagengewebe verstärkte Probe und ihre Abmessungen

## 6.2 Prüfaufbau und -parameter

Um die sensorischen Eigenschaften der Proben zu charakterisieren, werden analog zu den beiden vorangegangenen Kapiteln dynamische Dreipunkt-Biegeprüfungen durchgeführt. In Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 14125:2011-05 werden die Proben von zwei Lagern mit einem Radius von 5 mm getragen und von einer Druckfinne mit dem Radius 5 mm belastet. Wie in den vorausgegangenen Untersuchungen wird die Druckfinne auf die Probe aufgesetzt und mit einer Vorspannung belastet. Die piezoelektrische Messkette entspricht der der vorangegangenen Kapitel. Alle vier Sensorsignale werden simultan auf derselben Zeitbasis aufgezeichnet.

Untersucht werden zwei Belastungsfälle. In Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 sind beide Fälle schematisch dargestellt. Die vier Sensoren sind in orange eingezeichnet und werden von rechts nach links mit a, b, c, d bezeichnet. Für beide Belastungsfälle werden dieselben Proben verwendet.

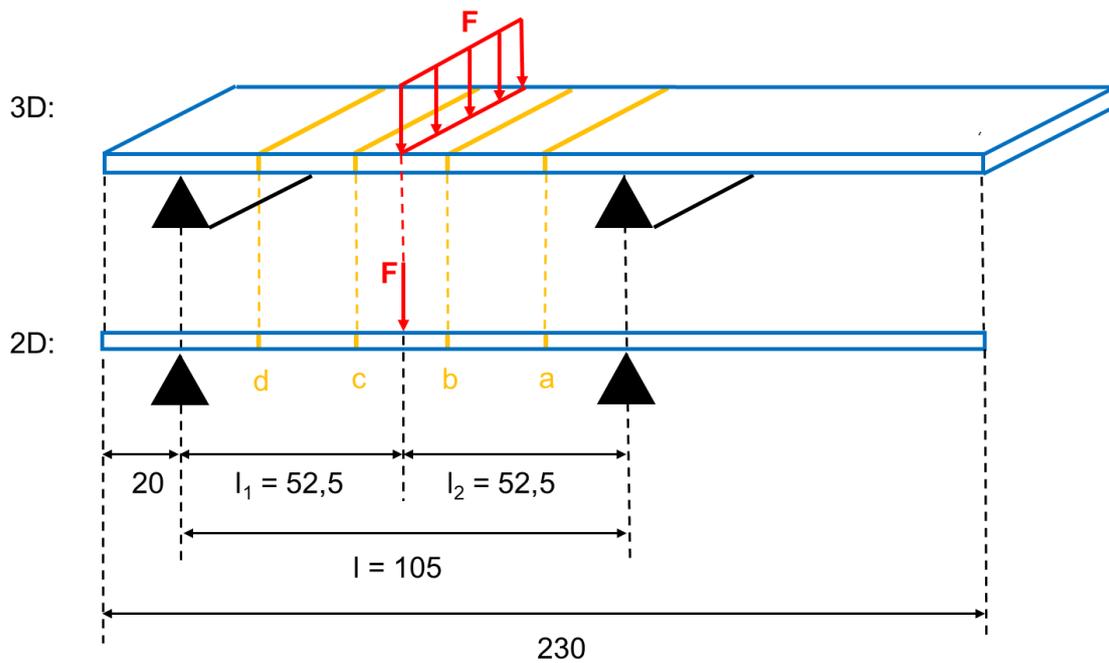


Abbildung 6-5: Belastungsfall 1: Mittige Belastung zwischen den Auflagern, je zwei Sensoren zwischen Druckfinne und Auflager

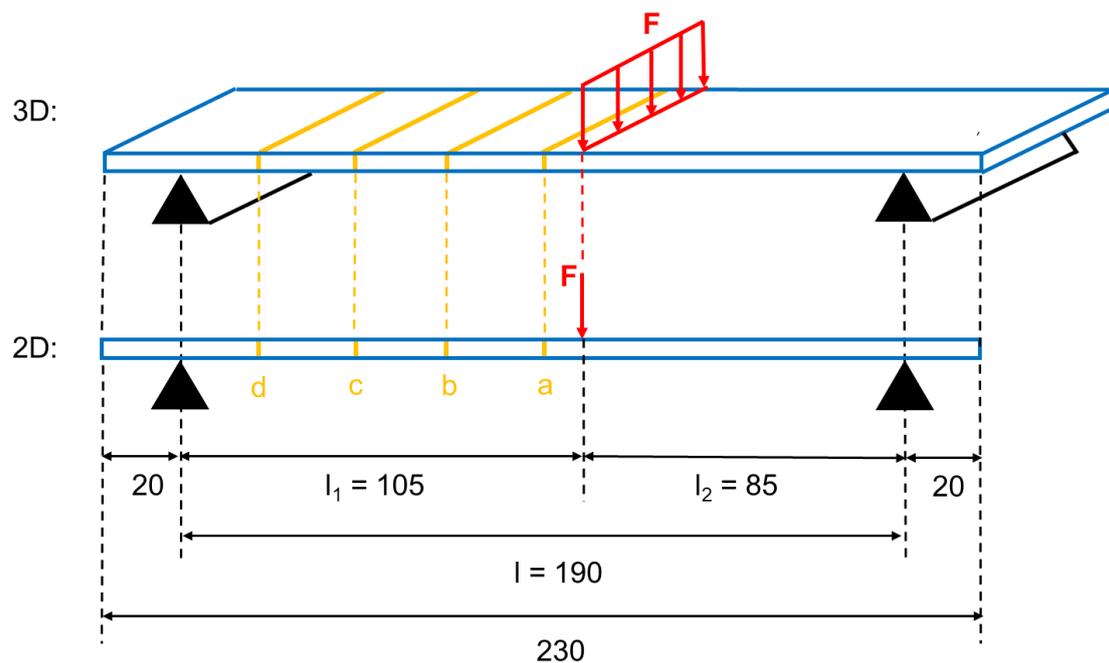
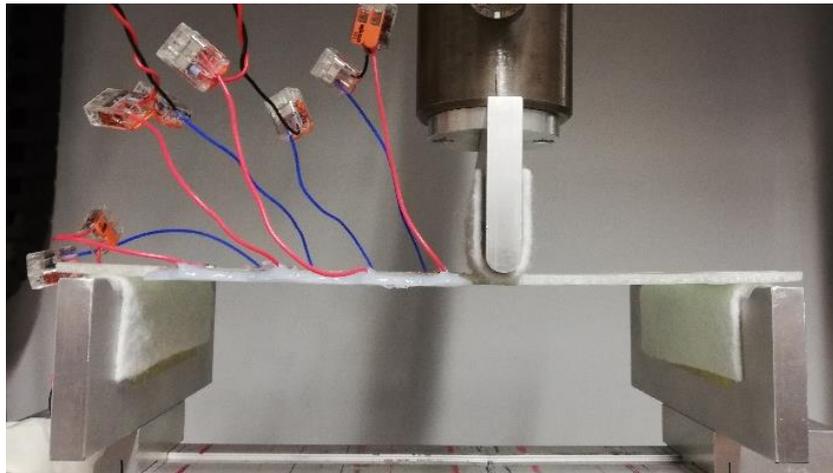


Abbildung 6-6: Belastungsfall 2: Belastung außerhalb der Mitte zwischen den Auflagern, vier Sensoren links zwischen Druckfinne und Auflager



**Abbildung 6-7: In die dynamische Prüfmaschine eingelegte sensorische Probe mit vier Sensoren**

Die Proben werden, wie in vorausgegangenen Untersuchungen, zyklisch unter einer Vorspannung mit einer Frequenz von 5 Hz und einer Amplitude von 1 mm belastet. Die Proben werden im Bereich von 2 mm bis 3 mm Durchbiegung belastet. In diesem Bereich verhalten sich die Proben linear-elastisch und es wird keine irreversible Verformung verursacht. Die Prüfparameter sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

**Tabelle 14: Prüfparameter der beiden Belastungsfälle im dynamischen Dreipunktbiegeversuch**

	<b>Belastungsfall 1</b>	<b>Belastungsfall 2</b>
<b>Frequenz</b>	5 Hz	5 Hz
<b>Durchbiegung</b>	2 mm bis 4 mm	2 mm bis 4 mm
<b>Amplitude</b>	1 mm	1 mm
<b>Vorspannung</b>	~ 315 N	~ 80 N
<b>Stützweite</b>	105 mm	190 mm

### 6.3 Balkentheorie nach Euler-Bernoulli

Unter einem Balken versteht man in der technischen Mechanik ein Bauteil, dessen Querschnitt sehr viel kleiner ist als seine Länge. Belastet wird ein Balken senkrecht zu seiner Längsachse. Unter Einwirken von äußeren Lasten deformiert sich der Balken. Man spricht von einer Balkenbiegung. Im Bauteil treten dabei innere Kräfte bzw. Spannungen auf. Querkraft  $Q$  und Biegemoment  $M$  sind Resultierende davon. Mithilfe der Balkentheorie können Gleichungen zur Berechnung der Spannungen und der Deformation hergeleitet werden. [110]

Bei den sensorischen Proben aus FKV handelt es sich um balkenähnliche Bauteile, die auf Biegung belastet werden. Die Sensoren sind in die das Bauteil verstärkende Textilstruktur integriert. Sie sind somit Teil der kraftaufnehmenden Verstärkungsfasern. Es liegt daher nahe, dass das Signal der gewebten Sensoren direkt mit den im Bauteil wirkenden Spannungen zusammenhängt und sich das sensorische Verhalten somit annähernd mit der Balkentheorie beschreiben lässt.

Die bernoullischen Annahmen ermöglichen eine vereinfachte Betrachtung des Verhaltens eines Biegebalkens. Es handelt sich dabei um Modellannahmen, die in der Realität, wenn überhaupt, nur annähernd zutreffen. Wesentliche Annahme der Euler-Bernoulli-Balkentheorie ist, dass ein schubstarrer Balken vorliegt. Das bedeutet, dass der Einfluss von Schubverformungen bei der Berechnung vernachlässigt wird. Balkenquerschnitte, die vor der Deformation senkrecht zur Balkenachse stehen, stehen nach der Deformation senkrecht zur deformierten Balkenachse. Die Querschnitte bleiben außerdem nach der Deformation in sich eben. [110, 111]

Die Euler-Bernoulli-Balkentheorie ist für einen schlanken Balken gültig. Dieser darf dabei nur kleine Verformungen erfahren. Als schlank wird ein Balken bezeichnet, dessen Höhe  $h$  wesentlich kleiner ist als seine Länge  $l$ . Unter einer kleinen Verformung versteht man einen so kleinen Auslenkungswinkel  $\Theta$ , dass  $\sin\Theta \approx \Theta$  gilt [110, 111]. Beide Voraussetzungen treffen im vorliegenden Fall zu.

Mit Hilfe der Euler-Bernoulli Balkentheorie können also die Durchbiegung von Balken und die dabei auftretenden Spannungen bestimmt werden. In Abbildung 6-8 ist schematisch eine FKV-Probe dargestellt und wie sie im dynamischen Dreipunktbiegeversuch belastet wird (Belastung senkrecht zur Längsachse). Unter der Einwirkung der äußeren Kraft deformiert sich die FKV-Probe.

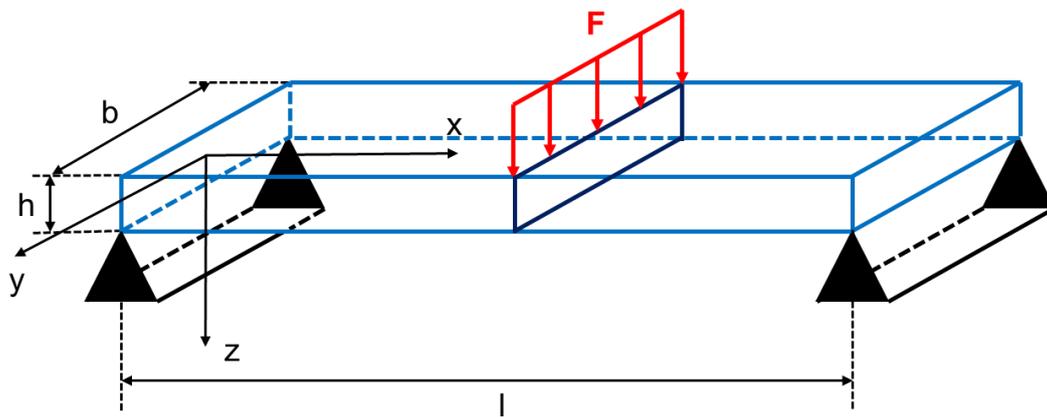


Abbildung 6-8: Schematische Darstellung einer senkrecht zur Längsachse belasteten FKV-Probe

Zur Aufstellung der Grundgleichungen wird zunächst die einachsige Biegung betrachtet. Die Achsen  $y$  und  $z$  sind die Hauptachsen des Querschnitts. Äußere Lasten treten hier nur in  $z$ -Richtung auf und verursachen nur Querkräfte  $Q$  in  $z$ -Richtung und ein Moment  $M$  um die  $y$ -Achse. Der Biegebalken kann als 2D-„Problem“ betrachtet werden, da alle äußeren Kräfte nur in der  $x$ - $z$ -Ebene wirken. Eine Modellreduktion inklusive der einwirkenden Kraft ist in Abbildung 6-9 dargestellt.

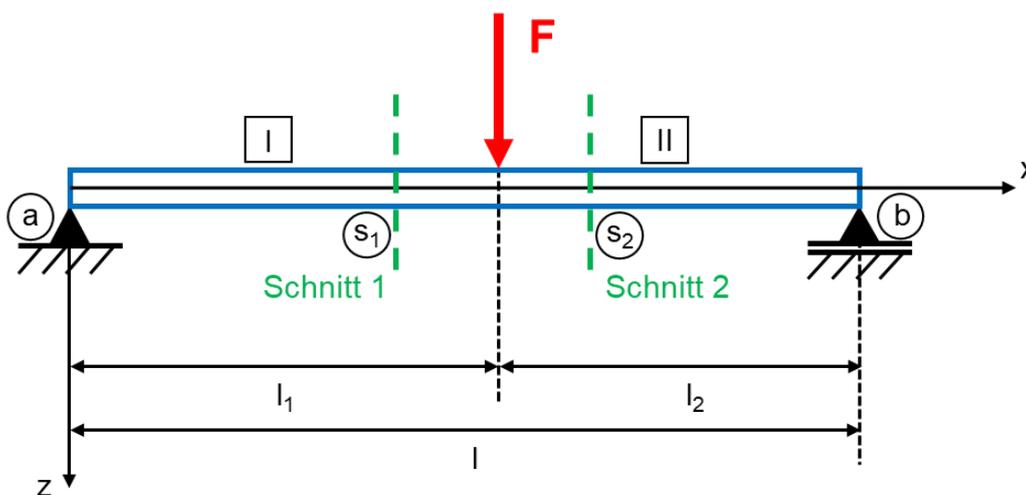


Abbildung 6-9: Schematische Darstellung des 2D-Modells des Biegebalkens

Die inneren Spannungen bzw. Kräfte am Balken sind das Maß für die Materialbeanspruchung. Durch (gedankliches) Schneiden des Balkens senkrecht zur Balkenachse (grün in Abbildung 6-9) werden die inneren Spannungen bzw. Kräfte freigelegt und eine Berechnung möglich gemacht. An der Schnittstelle wirken dann die über den Querschnitt verteilten inneren Spannungen. Das an einer beliebigen Stelle geschnittene 2D-Modell des Biegebalkens aus Abbildung 6-9 und die inneren Kräfte sind in Abbildung 6-10 dargestellt. Da der Balken senkrecht zur Längsachse belastet wird,

treten in den Querschnitten als Resultierende der inneren Spannungen nur Querkraft  $Q$  und Biegemoment  $M$  auf. [2]

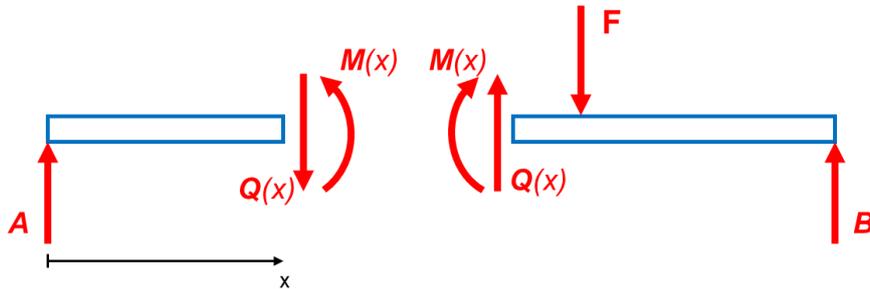


Abbildung 6-10: Am in Abbildung 6-9 eingezeichneten Schnittpunkt  $s_1$  geschnittener Balken mit äußeren und inneren Kräften

Aus den Gleichgewichtsbedingungen für den gesamten Balken können die Lagerreaktionen ermittelt werden:

$$\begin{aligned} \text{a)}: \quad l B - l_1 F &= 0 & \rightarrow & B = \frac{l_1}{l} F \\ \text{b)}: \quad -l A + l_2 F &= 0 & \rightarrow & A = \frac{l_2}{l} F \end{aligned}$$

Aus den Gleichgewichtsbedingungen ergibt sich für einen Schnitt in Punkt  $S$  an einer beliebigen Stelle  $x$  im Bereich  $0 \leq x \leq l_1$  (I in Abbildung 6-9):

$$\begin{aligned} \uparrow: \quad A - Q &= 0 & \rightarrow & Q(x) = A = \frac{l_2}{l} F \\ \text{S}_1: \quad x A - M &= 0 & \rightarrow & M(x) = x A = x \frac{l_2}{l} F \end{aligned}$$

Entsprechend gilt für einen Schnitt in Punkt  $S_2$  an einer beliebigen Stelle  $x$  im Bereich  $l_1 \leq x \leq l$  (II in Abbildung 6-9):

$$\begin{aligned} \uparrow: \quad B + Q &= 0 & \rightarrow & Q(x) = -B = -\frac{l_1}{l} F \\ \text{S}_2: \quad (l - x) B - M &= 0 & \rightarrow & M(x) = (l - x) \frac{l_1}{l} F \end{aligned}$$

Somit gilt für die Querkraft:

$$Q(x) = \begin{cases} \frac{l_2}{l} F, & 0 < x < l_1 \\ -\frac{l_1}{l} F, & l_1 < x < l \end{cases} \quad (13)$$

Und für das Moment gilt dementsprechend:

$$M(x) = \begin{cases} x \frac{l_2}{l} F, & 0 \leq x \leq l_1 \\ (l-x) \frac{l_1}{l} F, & l_1 \leq x \leq l \end{cases} \quad (14)$$

Die Schnittgrößen sind in Abbildung 6-11 schematisch dargestellt. An der Angriffsstelle der Kraft  $F$  hat der Querkraftverlauf einen Sprung, der die gleiche Größe besitzt, wie die Kraft  $F$ . Der Momentenverlauf hat an der Kraftangriffsstelle einen Knick. Dort tritt das größte Biegemoment auf.

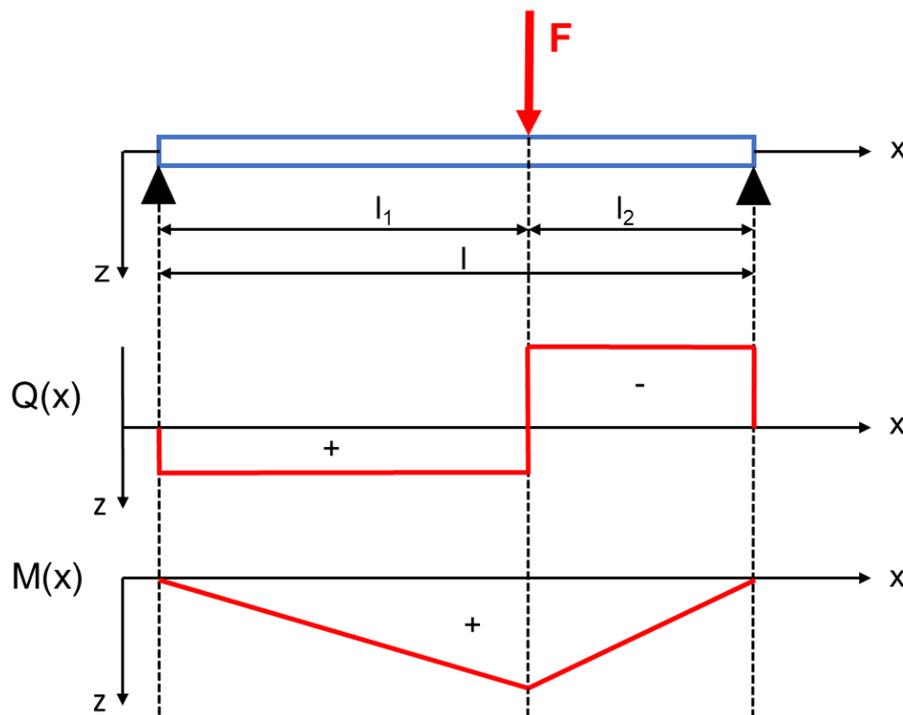


Abbildung 6-11: Schematischer Verlauf von Querkraft und Biegemoment am Biegebalken

Weiter gilt für die Biegespannung  $\sigma_B$  [110]:

$$\sigma_B = \frac{M}{I} z \quad (15)$$

Wobei  $I$  für das Flächenträgheitsmoment steht.

In Abbildung 6-12 ist die lineare Spannungsverteilung im Querschnitt des Balkens schematisch dargestellt. Im vorliegenden Belastungsfall wirken unterhalb der neutralen Faser ( $z > 0$ ) Zug- und oberhalb ( $z < 0$ ) Druckspannungen. In der neutralen Faser herrschen keine Spannungen. Die dem Betrag nach größte Spannung tritt am Balkenrand mit dem größten Abstand  $z_{\max}$  auf.

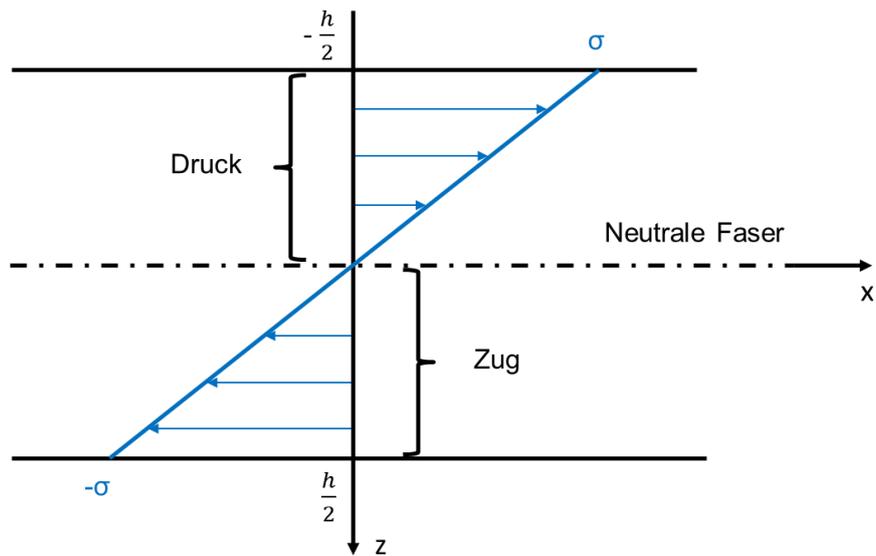


Abbildung 6-12: Spannungsverteilung im Balkenquerschnitt (i. A. a. [112])

Für das Widerstandsmoment  $W$  gilt somit [110]:

$$W = \frac{I}{|z|_{max}} \quad (16)$$

Für  $z_{max}$  gilt hier (vgl. Abbildung 6-12):

$$|z|_{max} = \frac{h}{2}$$

Aus ( 15 ) und ( 16 ) folgt:

$$\sigma_{B max} = \frac{M}{W} \quad (17)$$

Das Flächenträgheitsmoment für rechteckige Querschnittsflächen, wie im vorliegenden Fall, beträgt [110]:

$$I = \frac{b h^3}{12} \quad (18)$$

Wobei  $b$  für die Balkenbreite und  $h$  für die Balkenhöhe steht.

Aus den Formeln ( 14 ) bis ( 18 ) folgt für den Biegespannungsverlauf:

$$\sigma_B(x) = \begin{cases} \frac{6 l_2 F}{l b h^2} x, & 0 \leq x \leq l_1 \\ \frac{6 l_1 F}{l b h^2} (l - x), & l_1 \leq x \leq l \end{cases} \quad ( 19 )$$

Mit ( 19 ) und den Prüf- bzw. Messwerten lässt sich der Biegespannungsverlauf der Proben unter den beiden Belastungsszenarien modellieren.

## 6.4 Ergebnisse

Für die Auswertung der Messergebnisse werden diese dem modellierten Spannungsverlauf nach ( 19 ) für beide Belastungsszenarien gegenübergestellt und verglichen.

### Belastungsfall 1

In Abbildung 6-13 sind exemplarisch die Signalverläufe der einzelnen Sensoren einer Probe unter der dynamischen Belastung dargestellt. Zu erkennen ist, dass die beiden Sensoren, die sich weiter entfernt von der Druckfinne befinden, ein deutlich niedrigeres Sensorsignal erzeugen als die beiden sich in der Nähe befindlichen Sensoren. Noch dazu erzeugen Sensor a und d sowie Sensor b und c nahezu identische Signalamplituden.

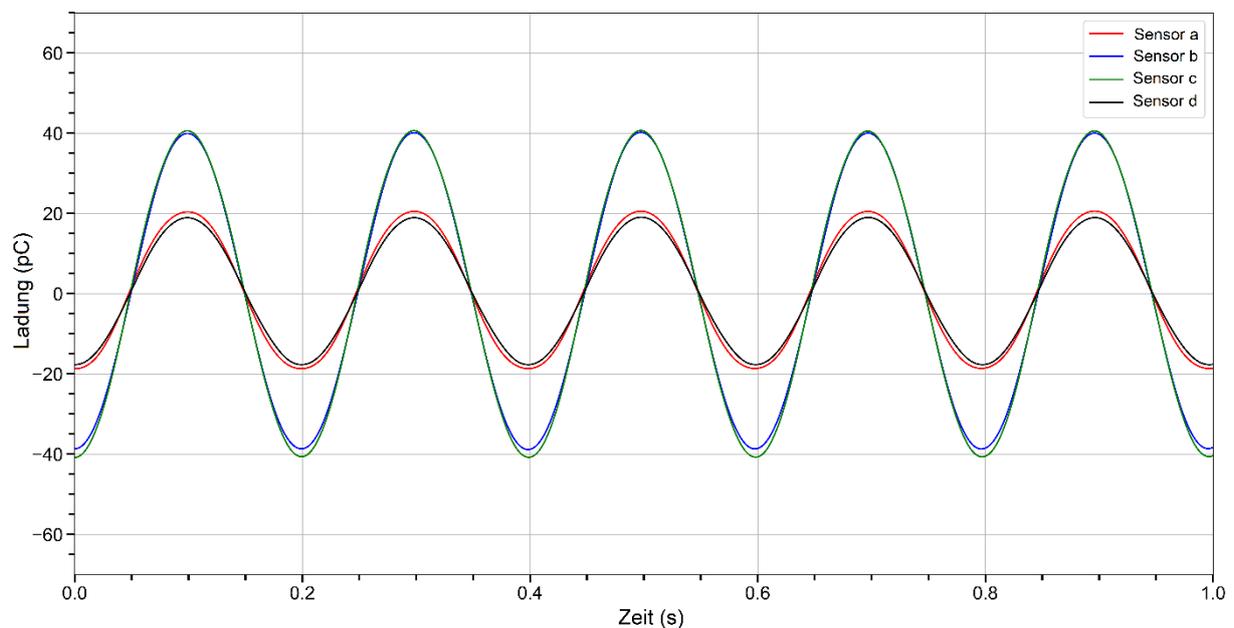
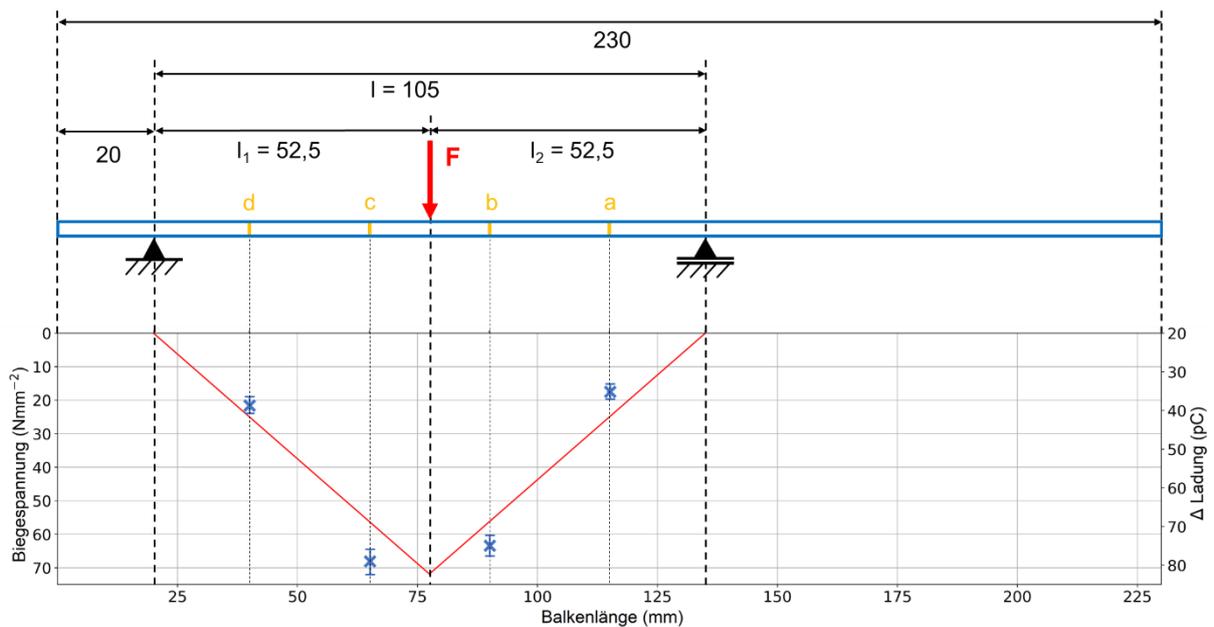


Abbildung 6-13: Sensorsignale der einzelnen Sensoren einer exemplarischen Probe unter dynamischer Belastung im Belastungsfall 1

Bei maximaler Durchbiegung beträgt die aufgebrachte Kraft  $F$  im symmetrischen Belastungsfall etwa 700 N. Dort tritt auch das höchste Sensorsignal auf. In Abbildung 6-14 ist die durchschnittliche Schwingweite (doppelte Amplitude) der vier Sensoren der sechs Proben im symmetrischen Belastungsfall (vgl. Anhang: Tabelle 34) dem modellierten Biegespannungsverlauf gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die Sensorsignale dem Trend des modellierten Biegespannungsverlaufs im Bauteil folgen. Anhand von jeweils zwei Punkten in Bereich I und II kann allerdings noch nicht auf eine lineare Korrelation geschlossen werden.



**Abbildung 6-14:** Darstellung des modellierten Biegespannungsverlaufs (rot) und der durchschnittlichen Schwingweiten der Sensorsignale (blau) im Belastungsfall 1

## Belastungsfall 2

In Abbildung 6-15 sind die Sensorsignale einer exemplarischen Probe unter dynamischer Last im Belastungsfall 2 aufgetragen. Erkennbar ist die Abnahme der Signalamplitude bei steigender Entfernung des Sensors von der Belastungsfinne. Ebenfalls erkennbar sind die im Vergleich zum Belastungsfall 1 allgemein deutlich niedrigeren Signalamplituden aufgrund der größeren Stützweite bei gleicher Durchbiegung.

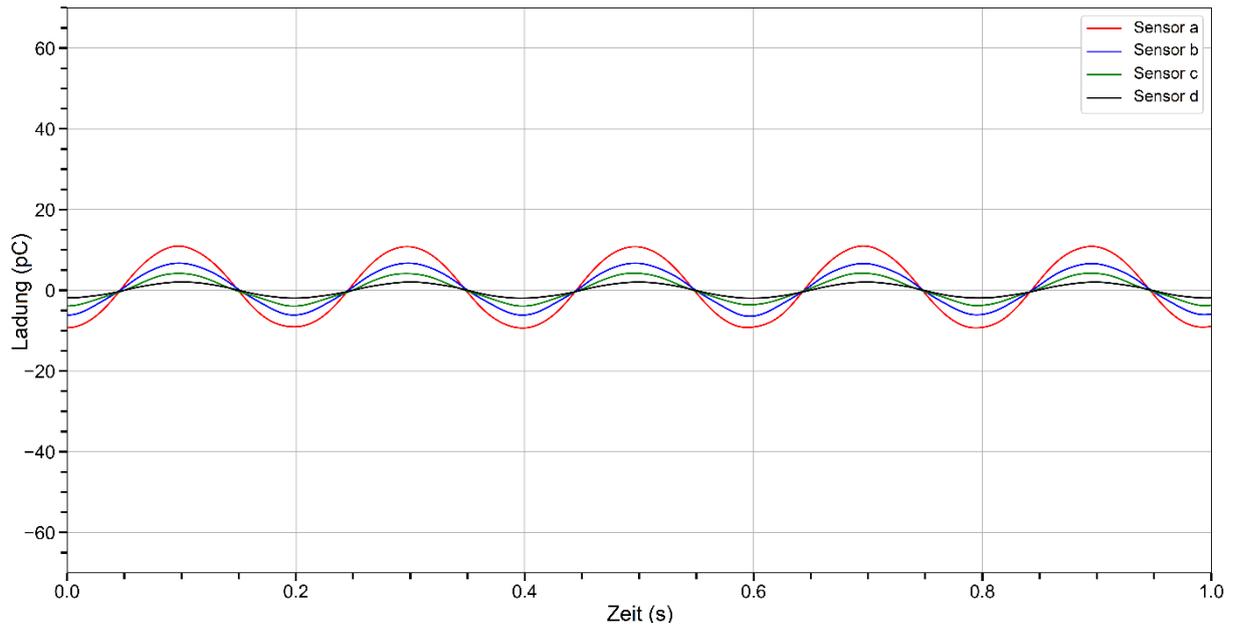


Abbildung 6-15: Sensorsignale der einzelnen Sensoren einer exemplarischen Probe unter dynamischer Belastung im Belastungsfall 2

Bei maximaler Durchbiegung beträgt die aufgebrauchte Kraft  $F$  im Belastungsfall 2 etwa 160 N. Abbildung 6-16 zeigt die durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale der vier Sensoren von sechs Proben im unsymmetrischen Belastungsfall (vgl. Anhang: Tabelle 35). Im Diagramm sind die einzelnen durchschnittlichen Signalamplituden dem modellierten Biegespannungsverlauf gegenübergestellt.

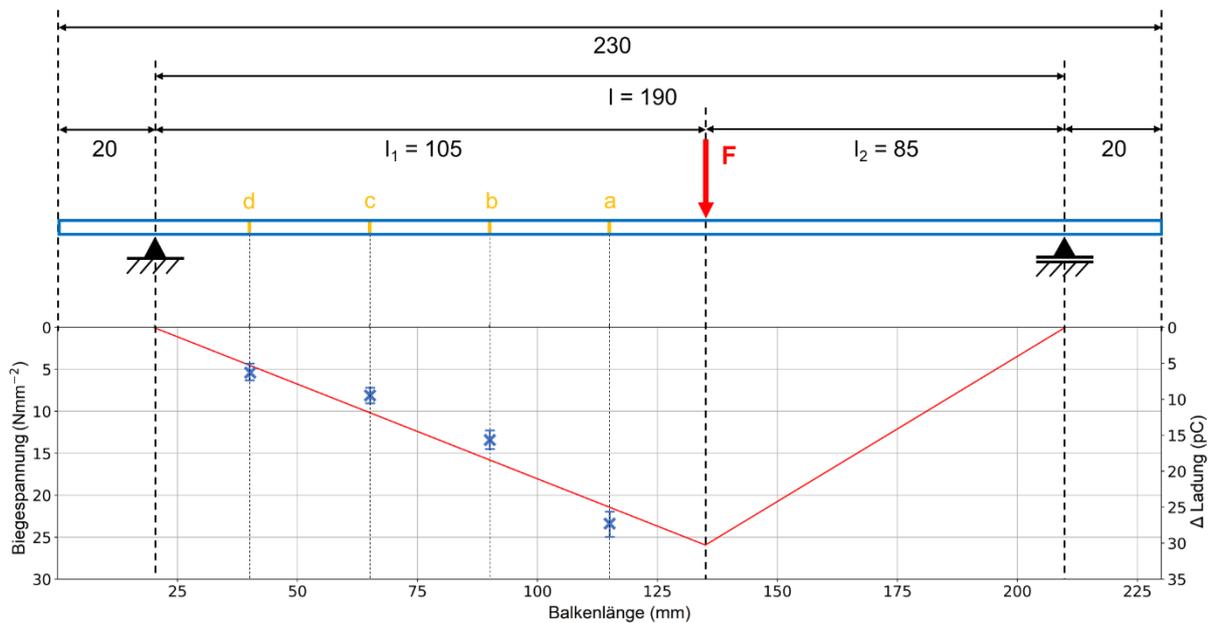


Abbildung 6-16: Darstellung des modellierten Biegespannungsverlaufs (rot) und der durchschnittlichen Schwingweiten der Sensorsignale (blau) im Belastungsfall 2

## 6.5 Schlussfolgerungen

Trotz der vielen getroffenen Vereinfachungen kann mit der idealisierten Betrachtung der Euler-Bernoulli-Balkentheorie und dem damit modellierten Biegespannungsverlauf der Trend der Sensorsignale im FKV-Bauteil näherungsweise abgebildet werden.

Auch wenn im vorliegenden Fall die meisten Voraussetzungen für die Anwendbarkeit der Euler-Bernoulli-Balkentheorie erfüllt sind, gibt es Einschränkungen. Eine Voraussetzung für die Euler-Bernoulli-Balkentheorie ist, dass der Balken aus isotropem Material besteht und dem Hooke'schen Gesetz folgt. Im vorliegenden Fall trifft dies allerdings nur eingeschränkt zu. Der FKV besitzt faserrichtungsabhängige mechanische Eigenschaften.

Außerdem wird bspw. die Lasteinleitung (de Saint-Venant) vernachlässigt. Auch der Einfluss des Eigengewichts wurde nicht berücksichtigt, wobei dieser bei einem Leichtbauteil gering sein dürfte.

In Kapitel 5.2 konnte zwar ein lineares Sensorverhalten im betrachteten Bereich nachgewiesen werden. Allerdings besitzen die einzelnen Sensoren zueinander eine gewisse Streuung, was zu Abweichungen gegenüber dem Berechnungsmodell führen kann.

Eine Optimierung der Modellierung könnte bspw. durch eine erweiterte Balkentheorie, die die Längsspannungen genauer erfasst, erreicht werden (z. B. [113]). Außerdem würde sich auch eine Modellierung mit finiten Scheibenelementen anbieten.



## 7 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Ziel der Arbeit, eine Methode zu entwickeln, mithilfe derer ein als textile Verstärkungsstruktur von FKV eingesetztes Mehrlagengewebe partiell sensorisch ausgestattet werden kann, erreicht werden konnte.

Um das Ziel zu erreichen wurden folgende drei Arbeitshypothesen aufgestellt und im Rahmen dieser Arbeit belegt:

- 1) Die Bauteilüberwachung mittels gewebter Sensoren ist möglich. Textile Piezoelemente liefern, verglichen mit textilen Kondensatoren, ein deutlich besseres Sensorsignal.
- 2) Durch die weitgehend lastflussgerecht ausgerichteten Verstärkungsfasern - ohne Umlenkung oder Unterbrechung - wirkt sich die Sensorik nicht bzw. kaum negativ auf die mechanische Bauteilfestigkeit des FKV aus.
- 3) Textile piezoelektrische Kraftsensoren lassen sich aus Mehrlagengewebestrukturen herstellen. Belastungen von FKV können mittels piezoelektrischer Mehrlagengewebe, die als Verstärkungsstruktur eingesetzt werden, erfasst werden. Von der Signalstärke kann auf die Höhe der Belastung geschlossen werden.

Zunächst konnte prinzipiell nachgewiesen werden, dass sich eine gewebte Verstärkungsstruktur von FKV dazu eignet, als Sensor für die Erfassung der Bauteilbelastung zu fungieren. Die Proben mit gewebten piezoelektrischen Sensoren lieferten, im Vergleich zu den Proben mit gewebten Kondensatoren ein deutlich klareres und ein zur beaufschlagten Kraft proportionales Sensorsignal. Wodurch die erste Arbeitshypothese belegt werden konnte.

Die gewebten, piezoelektrischen Mehrlagenstrukturen wurden hinsichtlich eines möglichst starken Sensorsignals als auch eines möglichst geringen Einflusses auf die mechanischen Bauteileigenschaften optimiert. Durch systematische Struktur- und Signalanalysen konnte am Beispiel eines siebenlagigen gewebeverstärkten Kunststoffverbundes die geeignetste Sensorposition im Bauteilquerschnitt und den möglichst besten Sensoraufbau der gewebten Piezoelemente für Biegebeanspruchungen

ermittelt werden. Durch eine minimale Modifikation des Verstärkungsgewebes kann dieses als Belastungssensor des FKV fungieren, ohne dabei die mechanischen Eigenschaften des FKV-Bauteils gravierend zu verändern. Somit konnte auch die zweite Arbeitshypothese bestätigt werden.

Die ermittelten Erkenntnisse und Zusammenhänge wurden anschließend an einem partiell sensorischen Mehrlagengewebe umgesetzt und verifiziert. Dabei konnte zudem nachgewiesen werden, dass sich die Mehrlagenwebtechnik vorteilhaft auf die Sensoreigenschaften wie Signalstärke und -streuung auswirkt. Mit der „Through-Thickness“-Anbindung konnten hier die besten Ergebnisse erzielt werden.

Zur Validierung der Sensorsignale wurden zudem Proben aus einem mehrlagengewebeverstärkten Kunststoffverbund hergestellt, der mit vier der textilen Sensoren ausgestattet ist. Die Sensorsignale der einzelnen Proben unter zyklischer Last im Dreipunktbiegeversuch wurden dem errechneten Biegespannungsverlauf in der Probe gegenübergestellt. Trotz der bei der Berechnung getroffenen Vereinfachungen, kann bei den beiden betrachteten Lastfällen eine Korrelation der errechneten Spannungswerte mit den gemessenen Sensorsignalen erkannt werden. Die Sensoren eignen sich also nicht nur zur Lasterfassung, sondern auch zur quantitativen Lastmessung. Bei bekannter Belastung müssten Bauteile damit nicht unbedingt in allen Bereichen mit Sensoren ausgestattet sein. Durch den bekannten Spannungsverlauf ließe sich vielmehr vom Sensorsignal eines sensorischen Bereichs auf die Beanspruchung in anderen Bauteilbereichen schließen. Somit konnte auch die dritte Arbeitshypothese bestätigt werden.

Auch wenn durch diese Arbeit nun eine Methode zur Verfügung steht, durch die mit Mehrlagengeweben verstärkte Kunststoffe mit biegesensorischen Eigenschaften ausgestattet werden können, so eröffnen sich doch weitere Felder, die es einer genaueren Betrachtung in der Zukunft Wert sind:

Wurden die Grundlagenversuche noch an PET-faserverstärkten Kunststoffen durchgeführt, fand die Validation und Verifikation an FKV-Bauteilen mit einer Verstärkung aus Mehrlagengeweben mit Glasfasern statt. Obgleich sich Kohlenstofffasern aufgrund ihrer elektrischen Leitfähigkeit für den Einsatz als Elektroden eignen würden, wurde in den Versuchen zur Entwicklung von sensorischen Gewebestrukturen, wie auch zur Validierung und Verifikation der Methode, lediglich silberbeschichtetes PA-6.6-Filamentgarn als Elektrodenmaterial eingesetzt. Die dreidimensionale, aber gleichzeitig kompakte Textilstruktur und das Weben als anspruchsvoller Herstellungsprozess sind besondere Herausforderungen an die relativ spröden und kaum scherfesten Kohlenstofffasern. Man läuft bei ihrem Einsatz daher Gefahr, dass gerissene Filamente in der Sensorstruktur zu Kurzschlüssen führen. Aus diesem Grund wurden sie für die in den Versuchen verwendeten Mehrlagengewebe noch nicht eingesetzt. In

nachfolgenden Entwicklungen wäre es aber denkbar diese als Elektroden einzusetzen. Auch elektrisch leitfähig beschichtete Glasfasern wären für einen verstärkungsfaserreinen Aufbau denkbar. Was aber mit ähnlichen Problemen, wie bei den Kohlenstofffasern einhergehen würde.

Durch die technisch bedingte kettseitige Lagenanbindung bei den Mehrlagengewebestrukturen führen die „Layer-to-Layer“- und „Through-Thickness“-Anbindung im Vergleich zur Referenz aus Einzellagen ohne Anbindung zu Einbußen in der Biegefestigkeit der Vergleichskörper. Dieser Effekt ist allerdings nicht auf die Sensorfunktion zurückzuführen, sondern ist strukturbedingt. Bei einer schussseitigen Anbindung wäre mit diesen Einbußen nicht mehr zu rechnen, da so keine lastaufnehmenden Fasern in der Kette umgelenkt werden. Diese Gewebekonstruktion war im Rahmen dieser Arbeit leider aus software-technischen Gründen nicht umsetzbar und gilt es in Zukunft noch zu untersuchen.

Zur Herstellung von konsolidierten FKV-Proben aus den Verstärkungsgeweben wurde das VAP<sup>®</sup>-Verfahren eingesetzt. Gerade die Sensorsignale der einzelnen Proben mit Verstärkung aus 2D-Textilien besitzen untereinander eine relativ hohe Streuung. Der eingesetzte Konsolidierungsprozess spielt hier sicher auch eine Rolle. Durch den vakuumbasierten Prozess variieren die Proben untereinander in der Dicke. Durch den Einsatz einer soliden Form und des Resin-Transfer-Mouldings (RTM) ließen sich Proben gleicher Dicke und mit einheitlichem Faser-Volumen-Gehalt herstellen. Auch bei den Proben aus Mehrlagengeweben ließe sich so die Streuung in der Signalstärke vielleicht noch weiter verringern.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Sensoren zur Erfassung von Biegebelastungen entwickelt und hinsichtlich ihrer elektromechanischen Eigenschaften charakterisiert. Denkbar wäre aber auch der Einsatz zur Impact-Erkennung. Auch hierfür könnte die textile sensorische Verstärkungsstruktur weiter optimiert werden. Da es sich bei einem Impact um keine statische Last, sondern um eine kurzzeitige dynamische Last handelt, wären die gewebten Piezoelemente sicher auch hier für die Erfassung geeignet.

Ebenso denkbar wäre die Anwendung des inversen piezoelektrischen Effekts mit Hilfe der gewebten Piezoelemente. Durch Auswertung nach dem Sender-Empfänger-Prinzip könnten Bauteilbelastungen erfasst oder Beschädigungen im Bauteil detektiert werden. Hierfür müssten im Bauteil ein Piezoelement als Aktor fungieren, das über eine angelegte Wechselspannung das Bauteil in Schwingung versetzt, und eines oder mehrere Piezoelemente als Sensor, die die durch das Bauteil geleitete Schwingung erfassen. Durch Veränderungen im Signal kann so, je nach Einsatz auf Bauteilbelastungen oder -beschädigungen geschlossen werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Mehrlagengewebestruktur nicht erst im fertigen Bauteil als Sensor zu verwenden, sondern bereits während der Bauteilfertigung (OPM). So könnten die Sensoren im zuvor beschriebenen Sender-Empfängermodus bspw. zur Qualitätssicherung während der Herstellung eingesetzt werden und wichtige Produktionsdaten, wie Aushärtegrad des Epoxidharzes oder Füllstand der RTM-Form direkt aus dem Bauteilinnern liefern. Als Messprinzip kann hier die mit dem bei der Aushärtung des Epoxidharzes steigenden Elastizitäts-Modul verbundene immer besser werdenden Übertragung der angeregten Schwingung dienen. So könnten ohne zusätzliche integrierte Sensorik nicht nur die Bauteilqualität verbessert werden, sondern auch Prozesszeiten sowie Ausschuss verringert werden.

Eine mechanische Spannung induziert eine Ladungsverschiebung in der Kristallstruktur des piezoelektrischen Materials, d. h. es wird eine elektrische Spannung erzeugt. Die so erzeugte elektrische Spannung kann nicht nur als Maß für die Bauteilbelastung herangezogen, sondern auch zur Energiegewinnung verwendet werden. Die piezoelektrische Mehrlagengewebestruktur könnte somit auch zur dezentralen Energieerzeugung direkt in dynamisch belasteten Bauteilen verwendet werden. Die erzeugte Energie könnte bspw. temporär lokal gespeichert werden und bei Bedarf Sensoren oder Aktoren versorgen. Die Verstärkungsstruktur würde so als textiler Energierekuperator fungieren.

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] F. Leonhardt und E. Mönning, Vorlesung über Massivbau - Erster Teil - Grundlagen zur Bemessung im Stahlbeton, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1973.
- [2] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder und W. A. Wall, Technische Mechanik - Band 1: Statik, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [3] C. Cherif u. a., Textile Werkstoffe für den Leichtbau - Techniken, Verfahren, Materialien, Eigenschaften, Berlin Heidelberg: Springer, 2018.
- [4] E. Witten, V. Mathes, M. Sauer und M. Kühnel, „Composites-Marktbericht 2018,“ AVK und Carbon Composites, November 2018.
- [5] J. Brandt, K. Drechsler und F.-J. Arendts, „Mechanical Performance of Composites Based on various Three-Dimensional Woven-Fibre Preforms,“ *Composites Science and Technology* 56, pp. 381-386, 1996.
- [6] R. Umer, H. Alhussein, J. Zhou und W. J. Cantwell, „The mechanical properties of 3D woven composites,“ *Journal of Composite Materials* 51, pp. 1703-1716, 2017.
- [7] S. Dai, P. R. Cunningham, S. Marshall und C. Silva, „Influence of fibre architecture on the tensile, compressive and flexural behaviour of 3D woven composites,“ *Composites Part A* 69, pp. 195-207, 2015.
- [8] S. Schindler, H.-J. Bauder, J. Wolfrum, J. Seibold, N. Stipic, L. von Wascinski, M. Tielebein und G. T. Gresser, „Engineering of three-dimensional near-net-shape weave structures for high technical performance in carbon fibre-reinforced plastics,“ *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 14, pp. 1-16, 2019.

- [9] T. Huang, Y. Wang und G. Wang, „Review of the Mechanical Properties of a 3D Woven Composite and Its Applications,“ *Polymer-Plastics Technology and Engineering* 57 (8), pp. 740-756, 2018.
- [10] X. Chen, L. W. Taylor und L.-J. Tsai, „An overview on fabrication of three-dimensional woven textile preforms for composites,“ *Textile Research Journal* 81 (9), pp. 932-944, 2011.
- [11] K. C. Warren, R. A. Lopez-Anido und J. Goering, „Behavior of three-dimensional woven carbon composites in single-bolt,“ *Composites Structures* 127, pp. 175-184, 2015.
- [12] K. C. Warren, R. A. Lopez-Anido und J. Goering, „Experimental investigation of three-dimensional woven composites,“ *Composites: Part A* 73, pp. 242-259, 2015.
- [13] N. Kawamura, „The Light Weight Body Structure Technologies of Lexus LFA,“ in *Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (12th) (JISSE-12)*, Tokyo, Japan, 11/2011.
- [14] D. Coupé, „3D woven preforms for aeronautical application,“ in *9th Aachen-Dresden International Textile Conference*, Aachen, 2015.
- [15] E. Häntzsche, A. Matthes, A. Nocke und Ch. Cherif, „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* 203, pp. 189-203, 2013.
- [16] A.-F. M. Seyam und T. Hamouda, „Smart textiles: evaluation of optical fibres as embedded sensors for structure health monitoring of fibre reinforced composites,“ *The Journal of The Textile Institute* 104, pp. 892-899, 2013.
- [17] N. Meyendorf, „Neue Konzepte für Bauteil- und Materialüberwachung in der Verkehrstechnik - speziell in Bahn und Flugzeug,“ *LIFIS Online, Internetzeitschrift des Leibnitz-Instituts für interdisziplinäre Studien e. V.; ISSN 1864-6972*, 2007.
- [18] D. Balageas, C.-P. Fritzen und A. Güemes, *Structural Health Monitoring*, London: Wiley-ISTE, 2006.

- [19] P. A. Fomichov, Y. K. Kim, A. K. Kromine und S. Krishnaswamy, „Laser ultrasonic array system for real-time cure monitoring of polymer-matrix composites,“ *Journal of Composite Materials* 36, pp. 1889-1901, 2002.
- [20] A. Strauss, K. Bergmeister, B. Bonfiglioli und G. Pascale, „Basic study of monitoring on FRP,“ in *Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure: Proceedings of the first international conference on structural health monitoring an intelligent infrastructure Bd. 2*, pp.1209-1214, Tokyo, Japan, 2003.
- [21] B. Bonfiglioli, A. Strauss, G. Pascale und K. Bergmeister, „Basic study of monitoring on fibre reinforced polymers: theoretical and experimental study,“ *Smart Materials and Structures* 14, pp. 12-23, 2005.
- [22] B. Y. Mohammed, C. K. Tan, S. J. Wilcox und A. Z. S. Chong, „Damage characterisation od carbon fiber reinforced composite plate using acoustic emission,“ *Key Engineering Materials* 558, pp. 184-194, 2013.
- [23] N. Dervalis, R. Barthope, W. J. Staszewski und K. Worden, „Structural health monitoring of composite material typical of wind turbine blades by novelty detection on vibration response,“ *Key Engineering Materials* 518, pp. 319-327, 2012.
- [24] S. S. Kessler, S. M. Spearing und C. Soutis, „Damage detection in composite materials using lamb wave methods,“ *Smart Materials and Structures* 11, pp. 269-278, 2002.
- [25] S. Masmoudi, A. El Mahi und S. Turki, „Use of peizoelectric as acoustic emission sensor for in situ monitoring of composite structures,“ *Composites Part B*, pp. 307-320, 2015.
- [26] I. M. De Rosa und F. Sarasini, „Use of PVDF as acoustic emission sensor for in situ monitoring of mechanical behaviour of glass/epoxy laminates,“ *Polymer Testing* 29, pp. 749-758, 2010.
- [27] A. Weder, S. Geller, A. Heinig, T. Tyczynski und W. Hufenbach, „A novel technology for the high-volume production of intelligent composite structures with integrated peizoceramic sensors and electronic components,“ *Sensors and Actuators A* 202, pp. 106-110, 2013.
- [28] L. Klein, „Sensor Systems for FRP Lightweight Structures: Automotive Features on Serial Sensor Products,“ *Sensors*, 19, 3088, 2019.

- [29] C. Caneva, I. M. De Rosa und F. Sarasini, „Monitoring of impact aramid reinforced composites by embedded PVDF acoustic emission sensors,“ *Strain* 44, pp. 308-316, 2008.
- [30] X. Chen, S. Guo, G. Zhang, M. Lu und Y. Shi, „Flexible piezoelectric nanofiber composite membranes as high performance acoustic emission sensors,“ *Sensors and Actuators A* 199, pp. 372-378, 2013.
- [31] W. Hufenbach, M. Gude und T. Heber, „Embedding versus adhesive bonding of adapted piezoceramic modules for function-integrative thermoplastic composite structures,“ *Composites Science and Technology* 71, pp. 1132-1137, 2011.
- [32] H. Cui und F. Zhao, „Damage identification for a beam structure based on a PVDF piezoelectric film combined sensor,“ *Measurement Science and Technology* 32 (11); 115105, 2021.
- [33] A. Goshal, J. Ayers, M. Gurvich, M. Urban und N. Bordick, „Experimental investigations in embedded sensing of composite components in aerospace vehicles,“ *Composites Part B* 71, pp. 52-62, 2015.
- [34] M. Olivero, G. Perrone, A. Vallan und D. Tosi, „Comparative study of Fiber Bragg Gratings and Fiber Polarimetric Sensors for structural health monitoring of carbon composites,“ *Advances in Optical Technologies* 804905, 2014.
- [35] M. Miskiewicz, L. Pyrzowski und B. Sobczyk, „Short and Long Term Measurements in Assessment of FRP Composite Footbridge Behavior,“ *Materials* 13, 525, 2020.
- [36] J. H. L. Grave, M. I. Haheim und A. T. Echtermeyer, „Measuring changing strain fields in composites with Distributed Fiber-Optic Sensing using the optical backscatter reflectometer,“ *Composites Part B* 74, pp. 138-146, 2015.
- [37] Z. M. Hafizi, J. Epaarachchi und K. T. Lau, „Impact location determination on thin laminated composite plates using an NIR-FBG sensor system,“ *Measurement* 61, pp. 51-57, 2015.
- [38] L. Rodriguez-Cobo, A. Cobo und J.-M. Lopez-Higuera, „Embedded compaction pressure sensor based on Fiber Bragg Gratings,“ *Measurement* 68, pp. 257-261, 2015.

- [39] K. T. Lau, „Structural health monitoring for smart composites using embedded FBG sensor technology,“ *Materials Science and Technology* 30, pp. 1642-1654, 2014.
- [40] P. D. Foote, „Integration of structural health monitoring sensors with aerospace, composite materials and structures,“ *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik* 46, pp. 197-203, 2015.
- [41] M. M. B. Hasan, C. Cherif und A. Matthes, „Early prediction of the failure of textile-reinforced thermoplastic composites using hybrid yarns,“ *Composites Science and Technology* 72, pp. 1214-1221, 2012.
- [42] M. M. B. Hasan, C. Cherif, A. B. M. Foisal, T. Onggar, R. D. Hund und A. Nocke, „Development of conductive coated Polyether ether ketone (PEEK) filament for structural health monitoring of composites,“ *Composites Science and Technology* 88, pp. 76-83, 2013.
- [43] S. Nauman, P. Lapeyronnie, I. Cristian, F. Boussu und V. Koncar, „Online measurement of structural deformations in composites,“ *IEEE Sensors Journal* 11, pp. 1329-1336, 2010.
- [44] S. Nauman, I. Cristian und V. Koncar, „Intelligent carbon fibre composite based on 3D-interlock woven reinforcement,“ *Textile Research Journal* 82, pp. 931-944, 2012.
- [45] A. J. Brunner, M. Birchmeier, M. M. Melnykowicz und M. Barbezat, „Piezoelectric fiber composites as sensor elements for structural health monitoring and adaptive material systems,“ *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 20, pp. 1045-1055, 2009.
- [46] C. R. Bowen, M. Watson, D. N. Betts, P. Harris, M. Bertin und H. A. Kim, „Piezoelectric Fibres integrated into structural composites,“ *Ferroelectrics* 466, pp. 14-20, 2014.
- [47] H. Kawai, „The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride),“ *Japanese Journal of Applied Physics* 8, pp. 975-976, 1969.
- [48] M. Bonnet, *Kunststofftechnik*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [49] H. J. Sim, C. Choi, C. J. Lee, Y. T. Kim und S. J. Kim, „Flexible two-ply piezoelectric yarn energy harvester,“ *Current Nanoscience* 11, pp. 539-544, 2015.

- [50] A. Lund, C. Jonasson, C. Johansson, D. Haagensen und B. Hagström, „Piezoelectric polymeric bicomponent fibers produced by melt spinning,“ *Journal of Applied Polymer Science* 126, pp. 490-500, 2012.
- [51] E. Nilsson, A. Lund, C. Jonasson, C. Johansson und B. Hagström, „Poling and characterization of piezoelectric polymer fibers for use in textile sensors,“ *Sensors and Actuators A* 201, pp. 477-486, 2013.
- [52] S. E. G. Walter, Entwicklung piezoelektrisch wirksamer Sensorfaser auf Basis von Polyvinylidenfluorid, Aachen: Shaker Verlag, 2012.
- [53] B. Gauß, M. Jux, S. Walter, M. Kubicka, G. Seide, P. Wierach, T. Gries und G. Roth, „Poling effects in melt spun PVDF bicomponent fibres,“ *Key Engineering Materials* 664, pp. 110-114, 2015.
- [54] M. Akerfeldt, E. Nilsson, P. Gillgard und P. Walkenström, „Textile piezoelectric sensors - melt spun bi-compoment poly(vinylidene fluoride) fibers with conductive cores and poly(3,4-ethylene dioxythiophene)-poly(styrene sulfonate) coating as the outer electrode,“ *Fashion and Textiles* 1:13, 2014.
- [55] M. Akerfeldt, A. Lund und P. Walkenström, „Textile sensing glove with piezoelectric PVDF fibers and printed electrodes of PEDOT:PSS,“ *Textile Research Journal* 85, pp. 1789-1799, 2015.
- [56] G. Haghashtiani und M. A. Greminger, „Fabrication, polarization, and characterization of PVDF matrix composites for integrated structural load sensing,“ *Smart Materials and Structures* 24 045038, 2015.
- [57] J. Khaliq, D. B. Deutz, J. A. Caraveo Frescas, P. Vollenberg, T. Hoeks, S. van der Zwaag und P. Groen, „Effect of the piezoelectric ceramic filler dielectric constant on the piezoelectric properties of PZT-epoxy composites,“ *Ceramics International* 43, pp. 2774-2779, 2017.
- [58] N. K. James, D. B. Deutz, R. K. Bose, S. van der Zwaag und P. Groen, „High piezoelectric voltage coefficient in structured lead-free (K,Na,Li)NbO<sub>3</sub> particulate-epoxy composites,“ *Journal of the American Ceramic Society* 99, pp. 3957-3963, 2016.
- [59] K. Takaishi, Y. Kubota, H. Kurita, Z. Wang und F. Narita, „Fabrication and electromechanical characterization of mullite ceramic fiber/thermoplastic polymer piezoelectric composites,“ *Journal of the American Ceramic Society* 105, pp. 308-316, 2022.

- [60] L. Vertuccio, V. Vittoria, L. Guadagno und F. De Santis, „Strain and damage monitoring in carbon-nanotube-based composite under cyclic strain,“ *Composites Part A* 71, pp. 9-16, 2015.
- [61] G. Spinelli, P. Lamberti, V. Tucci, L. Vertuccio und L. Guadagno, „Experimental an theoretical study on piezoresistive properties of a structural resin reinforced with carbon nanotubes,“ *Composites Part B* 145, pp. 90-99, 2018.
- [62] N. D. Alexopoulos, C. Bartholome, P. Poulin und Z. Marioli-Riga, „Structural health monitoring of glass fiber reinforced composites using embedded carbon naotube (CNT) fibers,“ *Composites Science and Technology* 70, pp. 260-271, 2010.
- [63] L. Gao, T.-W. Chou, E. T. Thostenson und Z. Zhang, „A comparative study of damage sensing in fiber composites using uniformly and non uniformly dispersed carbon nanotubes,“ *Carbon* 48, pp. 3788-3794, 2010.
- [64] L. Vertuccio, L. Guadagno, G. Spinelli, P. Lamberti, V. Tucci und S. Russo, „Piezoresistive properties of resin reinforced with carbon nanotubes for health-monitoring of aircraft primary structure,“ *Composites Part B* 107, pp. 192-202, 2016.
- [65] C. Christner, A. Horoschenkoff und H. Rapp, „Longitudinal and transverse strain sensitivity of embedded carbon fibre sensors,“ *Journal of Composite Materials* 47, pp. 155-167, 2012.
- [66] S. Wang und D. D. L. Chung, „Self-sensing of flexural strain and damage in cabon fiber polymer-matrix composite by electrical resistance measurement,“ *Carbon* 44, pp. 2739-2751, 2006.
- [67] I. De Baere, W. Van Paepegem und J. Degrieck, „Electrical resistance measurement for in situ monitoring of fatigue of carbon fabric composites,“ *International Journal of Fatigue* 32, pp. 197-207, 2010.
- [68] X. Cheng, H. Zhou, Z. Wu und X. Hu, „An investigation into self-sensing property of hat-shaped 3D ortogonal woven composite under bending test,“ *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 38, pp. 149-166, 2019.
- [69] T. J. Swait, F. R. Jones und S. A. Hayes, „A practical structural health monitoring system for carbon fibre reinforced composite based on electrical resistance,“ *Composites Science and Technology* 72, pp. 1515-1523, 2012.

- [70] A. Todoroki, K. Yamada, Y. Mizutani, Y. Suzuki und R. Matsuzaki, „Impact damage detection of a carbon-fibre-reinforced polymer plate employing self-sensing time-domain reflectometry,“ *Composite Structures* 130, pp. 174-179, 2015.
- [71] E. Starke, J. Landgraf, G. Pfeifer und K.-U. Roscher, „Integrierte Sensornetzwerke in Faserverbundwerkstoffen,“ *Sensoren und Messsysteme 2006, 13. ITG/GMA-Fachtagung, Vorträge, Freiburg, DE, 13.-14. März 2006*, pp. 329-332, 2006.
- [72] D. J. O'Brien, D. M. Baechle und E. D. Wetzel, „Design and performance of multifunctional structural composite capacitors,“ *Journal of Composite Materials* 45, pp. 2797-2809, 2011.
- [73] D. J. O'Brien, D. M. Baechle, O. B. Yurchak und E. D. Wetzel, „Effect of processing conditions and electrode characteristics on the electrical properties of structural composite capacitors,“ *Composites Part A* 68, pp. 47-55, 2015.
- [74] T. Carlson, D. Ordéus, M. Wysocki und L. E. Asp, „CFRP structural capacitor materials for automotive applications,“ *Plastics, Rubber and Composites* 40, pp. 311-316, 2011.
- [75] T. M. Brugo, E. Maccaferri, D. Cocchi, L. Mazzocchetti, L. Giorgini, D. Fabiani und A. Zucchelli, „Self-sensing hybrid composite laminate by piezoelectric nanofibers interleaving,“ *Composites Part B* 212, 108673, 2021.
- [76] J. F. Snyder, E. B. Gienger und E. D. Wetzel, „Performance metrics for structural composites with electrochemical multifunctionality,“ *Journal of Composite Materials* 49, pp. 1835-1848, 2015.
- [77] N. Shirshova, H. Qian, M. S. P. Shaffer, J. H. G. Steinke, E. S. Greenhalgh, P. T. Curtis, A. Kucernak und A. Bismarck, „Structural composite supercapacitors,“ *Composites Part A* 46, pp. 96-107, 2013.
- [78] K. W. Bonfig, B. Bill, H. J. Kloucek, K. H. Martini, R. Müller und J. Paetow, Technische Druck und Kraftmessung, Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1995.
- [79] E. Hering und G. Schönfelder, Sensoren in Wissenschaft und Technik - Funktionsweise und Einsatzgebiete, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018.
- [80] H. Schaumburg, Sensoren, Stuttgart: Teubner, 1992.

- [81] S. Hesse und G. Schnell, Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [82] H.-R. Tränkler und L. M. Reindl, Sensortechnik - Handbuch für Wissenschaft und Praxis, Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.
- [83] E. Ivers-Tiffée und W. von Münch, Werkstoffe der Elektrotechnik, Wiesbaden: Teubner, 2007.
- [84] J. Curie und P. Curie, „Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées,“ *Bulletin de la Société minéralogique de France*, 3-4, pp. 90-93, 1880.
- [85] J. Tichy und G. Gautschi, Piezoelektrische Meßtechnik, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1980.
- [86] K. Ruschmeyer, Piezokeramik: Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen, Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1995.
- [87] T. T. Wang, J. M. Herbert und A. M. Glass, The Applications of Ferroelectric Polymers, Glasgow und London: Blackie, 1988.
- [88] R. Patzelt und H. Schweinzer, Elektrische Meßtechnik, Wien: Springer-Verlag, 1996.
- [89] K. A. Hofmann, Anorganische Chemie, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 1973.
- [90] J. M. Sinapius, Adaptronik, Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [91] W. Heywang, Sensorik, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1986.
- [92] H. Domininghaus, Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, Berlin Heidelberg New York: Springer, 2005.
- [93] S. Takamatsu, T. Kobayashi, N. Shibayama, K. Miyake und T. Itoh, „Fabric pressure sensor array fabricated with die-coating and weaving techniques,“ *Sensors and Actuators A* 184, pp. 57-63, 2012.
- [94] E. Gunnarsson, M. Karlsteen, L. Berglin und J. Stray, „A novel technique for direct measurements of contact resistance between interlaced conductive yarns in plain weave,“ *Textile Research Journal* 85, pp. 499-511, 2015.

- [95] A. S. Krajewski, K. Magniez, R. J. N. Helmer und V. Schrank, „Piezoelectric Force Response of Novel 2D Textile Based PVDF Sensors,“ *IEEE Sensors Journal* 13, pp. 4743-4748, 2013.
- [96] T. Holleczeck, A. Rüegg, H. Harms und G. Tröster, „Textile pressure sensors for sports applications,“ in *IEE Sensors*, Kona, HI, USA, 2010.
- [97] G. H. Büschner, R. Koiva, C. Schürmann, R. Haschke und H. J. Ritter, „Flexible and stretchable fabric-based tactile sensor,“ *Robotics and Autonomous Systems* 63, pp. 244-252, 2015.
- [98] S. Kim, P. Hofmann, H. Finckh, U. Röder, A. Dinkelmann, M. Haupt und G. T. Gresser, „Flat Knitted Sensory Work Glove for Process Monitoring and Quality Assurance,“ in *Advances in Automotive Production Technology – Theory and Application. ARENA2036*, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 2021, pp. 256-263.
- [99] W. Xu, M.-C. Huang, N. Amini, L. He und M. Sarrafzadeh, „eCushion: A Textile Pressure Sensor Array Design and Calibration for Sitting Posture Analysis,“ *IEEE Sensors Journal* 13, pp. 3926-3934, 2013.
- [100] O. Chenu, N. Vuillerme, M. Bucki, B. Diot, F. Cannard und Y. Payan, „TexiCare: An innovative embedded device for pressure ulcer prevention. Preliminary results with a paraplegic volunteer,“ *Journal of Tissue Viability* 22, pp. 83-90, 2013.
- [101] J. J. Liu, W. Xu, M.-C. Huang, N. Alshurafa, M. Sarrafzadeh, N. Raut und B. Yadegar, „Sleep posture analysis using a dense pressure sensitive bedsheet,“ *Pervasive and Mobile Computing* 10, pp. 34-50, 2014.
- [102] F. Mokhtari, G. M. Spinks, C. Fay, Z. Cheng, R. Raad, J. Xi und J. Faroughi, „Wearable Electronic Textiles from Nanostructured Piezoelectric Fibers,“ *Advanced Materials Technologies*, 1900900, 2020.
- [103] P. Borowski, Y.-S. Gloy, S. Jockenhoevel und T. Gries, „Kontinuierliche Fertigung von 3D-Smart-Textiles-Bandgewebe am Beispiel funktionalisierter Evakuierungsmatten,“ *Melliand Textilberichte*, pp. 187-189, 4/2012.
- [104] N. Soin, T. H. Shah, S. C. Anand, J. Geng, W. Pornwannachai, P. Mandal, D. Reid, S. Sharma, R. L. Hadimani, D. V. Bayramol und E. Soires, „Novel "3-D spacer" all fibre piezoelectric textiles for energy harvesting applications,“ *Energy and Environmental Science* 7, pp. 1670-1679, 2014.

- [105] H. Christof, L. Müller, S. Küppers, P. Hofmann, E. Giebel, S. Frick, M. Gabler und G. T. Gresser, „Integration Methods of Sensors in FRP Components,“ *Material Science Forum Vol. 825-826*, pp. 586-593, 2015.
- [106] P. Hofmann, A. Walch, S. Arnold-Keifer, S. Kumar Selvarayan und G. T. Gresser, „Utilization of the textile reinforcements of fiber reinforced plastics as sensor for condition monitoring,“ *Composites Part A 126 105603*, 2019.
- [107] P. Bloß, M. Steffen, H. Schäfer, G. Eberle und W. Eisenmenger, „Polarization and electric field distribution in thermally poled PVDF and FEP,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 3 (3)*, pp. 417-424, 1996.
- [108] X. Guo, J. Wang, J. Ding und Y. Jiang, „Study on preparation and polarization process of PVDF thin film,“ in *Proceedings Volume 9284, 7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optoelectronics Materials and Devices for Sensing and Imaging; 92841F (AOMATT 2014)*, Harbin China, 2014.
- [109] P. Hofmann, A. Walch, A. Dinkelman, G. T. Gresser und S. Kumar Selvarayan, „Woven piezoelectric sensors as part of the textile reinforcement of fiber reinforced plastics,“ *Composites Part A 116*, pp. 79-86, 2019.
- [110] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder und W. A. Wall, *Technische Mechanik - Band 2: Elastostatik*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [111] C. Spura, *Technische Mechanik 2. Elastostatik*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [112] H. Dietmann, *Einführung in die Elastizitäts- und Festigkeitslehre*, Stuttgart: Kröner, 1992.
- [113] T. J. Hofmann, *Beitrag zur verfeinerten Balkentheorie*, Stuttgart: Bericht Nr. 15; Insitut für Baustatik der Universität Stuttgart, 1992.



## Anhang

**Tabelle 15: Durchschnitt der gemessenen Kapazität ( $\bar{C}$ ) und die Standardabweichungen ( $\sigma$ ) zu Abbildung 4-9**

	$\bar{C}$ (pF)	$\sigma$ (pF)
<b>Aufbau a)</b>	66,6	1,4
<b>Aufbau b)</b>	145,9	5,4
<b>Aufbau c)</b>	192,9	7,2

**Tabelle 16: Durchschnittliche Schwingweite ( $\bar{\Delta}$ Ladung) der Sensorsignale und Standardabweichung der unpolarisierten und polarisierten Proben aus Abbildung 4-15**

	$\bar{\Delta}$ Ladung (pC)	$\sigma$ (pC)
<b>polarisiert</b>	1,36	0,74
<b>unpolarisiert</b>	20,55	5,04

**Tabelle 17: Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-16**

	$\bar{\sigma}$ Bruchspannung (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Aufbau a)</b>	97,88	3,43
<b>Aufbau b)</b>	98,51	9,47
<b>Aufbau c)</b>	100,16	3,48
<b>nur PET</b>	107,01	2,79

**Tabelle 18: Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-20**

	$\bar{\Delta}$ Ladung (pC)	$\sigma$ (pC)
<b>oben</b>	12,02	2,13
<b>Mitte</b>	4,46	1,59
<b>unten</b>	6,33	2,28

**Tabelle 19: Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-23**

	$\bar{\sigma}$ Bruchspannung (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Aufbau a)</b>	108,08	6,41
<b>Aufbau b)</b>	109,68	3,55
<b>Aufbau c)</b>	99,95	3,52
<b>nur PET</b>	107,01	2,79

**Tabelle 20: Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-25**

	$\bar{\Delta}$ Ladung (pC)	$\sigma$ (pC)
<b>Aufbau a)</b>	12,02	1,97
<b>Aufbau b)</b>	14,40	3,73
<b>Aufbau c)</b>	20,53	5,03

**Tabelle 21: Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-26**

	<b>Ø Bruchspannung (N/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>σ (N/mm<sup>2</sup>)</b>
<b>Aufbau a)</b>	108,08	6,41
<b>Aufbau b)</b>	104,86	5,07
<b>Aufbau c)</b>	100,16	3,48
<b>nur PET</b>	107,01	2,79

**Tabelle 22: Polarisationsparameter der untersuchten Proben mit unterschiedlichem Elektrodenabstand aus Kapitel 4.2.3**

	<b>Polarisations- spannung U<sub>p</sub> (kV)</b>	<b>Abstand Elekt- rodengarn d<sub>p, min</sub> – d<sub>p, max</sub> (µm)</b>	<b>elektrische Feldstärke E (kV mm<sup>-1</sup>)</b>
<b>Aufbau a)</b>	3	299 – 473	6,34 – 10,03
<b>Aufbau b)</b>	5,5	595 – 920	5,98 – 9,24
<b>Aufbau c)</b>	7	933 – 1029	6,8 – 7,5

**Tabelle 23 Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-29**

	<b>Ø ΔLadung (pC)</b>	<b>σ (pC)</b>
<b>Aufbau a)</b>	20,55	5,04
<b>Aufbau b)</b>	28,72	6,05
<b>Aufbau c)</b>	8,46	3,20

**Tabelle 24: Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-30 in Kapitel 4.2.3**

	Anzahl an PVDF-Lagen	$\bar{\sigma}$ Bruchspannung (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
nur PET	0	107,01	2,79
Aufbau a)	1	100,16	3,48
Aufbau b)	2	93,38	7,59
Aufbau c)	3	82,55	2,70

**Tabelle 25: Daten der Diagramme in Abbildung 4-33 und Abbildung 4-34**

Schussdichte K1/3, (SFd/cm)	elektrisch leitfähiger Anteil	$\bar{\Delta}$ Ladung (pC)	$\sigma$ von Ladung (pC)
10	0,46	22,31	5,35
14	0,58	25,46	6,59
18	0,67	28,58	12,1

**Tabelle 26: Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-38**

	$\bar{\Delta}$ Ladung (pC)	$\sigma$ (pC)
Aufbau a)	20,53	5,03
Aufbau b)	30,99	0,57

**Tabelle 27: Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 4-39**

	$\bar{\sigma}$ Bruchspannung (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
<b>Favorisierter textiler Sensoraufbau</b>	100,163	3,48
<b>integriertes Sensorbauteil, Verstärkungsfasern unterbrochen</b>	83,46	7,69
<b>integriertes Sensorbauteil, Verstärkungsfasern umgelenkt</b>	82,37	3,12

**Tabelle 28: Polarisationsparameter der untersuchten Proben mit unterschiedlichem Elektrodenabstand aus Kapitel 5.1**

	<b>Polarisationsspannung <math>U_p</math> (kV)</b>	<b>Abstand Elektrodengarn <math>d_{p, \min} - d_{p, \max}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>elektrische Feldstärke <math>E</math> (kV mm<sup>-1</sup>)</b>
<b>Einzellagen, ohne Anbindung</b>	4	347 - 399	10,03 - 11,53
<b>„Layer-to-Layer“</b>	4	326 - 716	5,59 - 12,27
<b>„Through-Thickness“</b>	4	230 - 313	12,78 - 17,39

**Tabelle 29: Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der unpolarisierten und polarisierten Proben aus Abbildung 5-14**

	$\bar{\Delta L}$ Ladung (pC)	$\sigma$ (pC)
<b>polarisiert</b>	5,49	3,63
<b>unpolarisiert</b>	59,05	22,08

**Tabelle 30: Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der unpolarisierten und polarisierten Proben aus Abbildung 5-16**

	$\bar{\Delta}$ Ladung (pC)	$\sigma$ (pC)
polarisiert	4,45	2,94
unpolarisiert	71,14	14,35

**Tabelle 31: Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der unpolarisierten und polarisierten Proben aus Abbildung 5-18**

	$\bar{\Delta}$ Ladung (pC)	$\sigma$ (pC)
polarisiert	5,24	1,90
unpolarisiert	114,14	12,96

**Tabelle 32: Durchschnittliche Bruchspannung und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 5-21**

	$\bar{\sigma}$ Bruchspannung (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )
Einzellagen, ohne Anbindung	303	37,6
Layer-to-Layer	268	21
Through-Thickness	288	19,7

**Tabelle 33: Durchschnittliche Schwingweite der Sensorsignale und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 5-22**

	$\bar{\Delta}$ Ladung (pC)	$\sigma$ (pC)
Referenz, ohne Anbindung	59,05	22,08
Layer-to-Layer	71,14	14,35
Through-Thickness	114,14	12,96

**Tabelle 34: Durchschnittliche Schwingweite der Signale der einzelnen Sensoren und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 6-14**

	$\bar{\Delta}$ Ladung (pC)	$\sigma$ (pC)
<b>Sensor a)</b>	34,75	3,06
<b>Sensor b)</b>	74,68	5,82
<b>Sensor c)</b>	78,83	7,18
<b>Sensor d)</b>	38,45	3,54

**Tabelle 35: Durchschnittliche Schwingweite der Signale der einzelnen Sensoren und Standardabweichung der Proben aus Abbildung 6-16**

	$\bar{\Delta}$ Ladung (pC)	$\sigma$ (pC)
<b>Sensor a)</b>	6,33	1,53
<b>Sensor b)</b>	9,49	1,89
<b>Sensor c)</b>	15,52	1,91
<b>Sensor d)</b>	27,34	2,75