



*Ein Zukunftsmodell für Traditionsbanchen in
der vierten industriellen Revolution*



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

SACHBERICHT ZUM VERWENDUNGSNACHWEIS TEIL 1: KURZBERICHT

Zwanzig20-Projekt:	futureTEX
Verbundvorhaben-Nummer:	VP 29
Verbundvorhaben-Titel:	Textiles meet physics – Anwendung physikalischer Phänomene in textilen Konstruktionen für Sicherheit und Effizienz
Kurztitel:	auXteX
Förderkennzeichen:	03ZZ0629D
Teilvorhaben-Nummer:	TP 29.4
Teilvorhaben-Titel:	Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung auxetischer Effekte innovativer Technischer Textilien im Bauwesen
Akronym:	auXteXHTWK
Antragsteller:	Partner 4 HTWK Leipzig, Institut für Betonbau Karl-Liebknecht-Straße 132 04277 Leipzig
Vorhabenlaufzeit:	01.07.2018 - 31.10.2022

Postanschrift:
PF 301166
04251 Leipzig

Besucheradresse:
Geutebrückbau, Raum G315
Karl-Liebknecht-Straße 132
04277 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 3076 6267
Fax: +49 (0)341 30766461

Email / Internet:
klaus.holschemacher@htwk-leipzig.de
www.ifb.htwk-leipzig.de

Kein Zugang für elektronisch
signierte und verschlüsselte
Dokumente.

1. Aufgabenstellung sowie Ausgangslage Stand der Wissenschaft und Technik

Ziel des Projektes war es, auf Basis numerischer Untersuchungen, neuartige Bauweisen mit wesentlich verbesserten mechanischen Eigenschaftsprofilen zu entwickeln. Der Schwerpunkt lag dabei auf makroskopischen Strukturierungs- und Formgebungskonzepten zur Effizienzsteigerung von Leichtbaukonstruktionen, die dazu führen, dass Bauteile aus konventionellen und neuen Werkstoffen ein globales »auxetisches« Systemverhalten aufweisen.

Die HTWK Leipzig sollte hierzu die Möglichkeiten und Grenzen auxetischer Effekte bei der Verankerung von Faserverbundwerkstoffen sowie der Verbindung solcher Baustoffe untersuchen. Weiterhin erschien von Anfang an die Nutzung des auxetischen Effektes zur Abdichtung von Fugen relevant, weshalb die HTWK Leipzig auch die Anwendung auxetischer Dichtelemente fokussieren sollte.

Der auxetische Effekt verschiedener, bei den Partnern produzierter textiler Halbzeuge sollte dabei durch Experimente und FEM-Simulationen nachgewiesen und qualifiziert werden.

Ein weiteres Ziel bestand darin, mit den Partnern innerhalb des Verbundprojektes sowie Partnern der anderen Verbundprojekte in thematisch verwandten Bereichen eng zusammenzuarbeiten, um durch den Wissensaustausch bessere Ergebnisse erzielen zu können und durch das Einfleßenlassen eigener Kompetenzen in das Gesamtprojekt dessen erfolgreichen Verlauf wesentlich zu unterstützen.

Zum Projektstart war der Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich auxetischer Effekte und deren technischer Anwendung rudimentär. Die Nutzung auxetischer Effekte an oder in Materialien und Strukturen im Bauwesen war nicht bekannt. Allerdings wurde die Technologie in anderen Ingenieurdisziplinen sowie der Medizintechnik bereits kleinmaßstäblich verwendet. Neben einigen natürlichen auxetischen Materialien konnten bereits verschiedene künstliche Materialien und Strukturen labormaßstäblich entwickelt werden. Dazu gehörten z. B. Graphitkerne in der Reaktortechnik oder Wabenstrukturen für Filtermembranen in der Energietechnik.

2. Ablauf des Vorhabens

Die HTWK Leipzig realisierte die Projektbearbeitung im Zeitraum vom 01.10.2019 bis zum 31.10.2023. Gegenüber der ursprünglichen Planung ergab sich ein zeitlicher Mehraufwand von 10 Monaten, weshalb das Projekt nicht, wie zunächst angedacht, zum 31.12.2021 endete. Durch die Corona-pandemiebedingten Lockdowns, die sich über nahezu den gesamten Projektzeitraum erstreckten, kam es zu unvermeidbaren Verspätungen und Ausfällen sowie Mehrbedarfen bei der Bearbeitung der Arbeitspakete. Vor diesem Hintergrund wurde eine Projektverlängerung unvermeidlich.

Der Ablauf des Projektes gliederte sich entsprechend des Projektantrages in Arbeitspakete mit entsprechenden Arbeitsschritten. Die Beteiligung der HTWK Leipzig an diesen Aktivitäten ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Im AP 1 führte die HTWK Leipzig mit dem AS 1.4 zunächst eine Eingrenzung und Fokussierung der Einsatzmöglichkeiten von auxetischen Textilien für die Nutzung im Bauwesen und im modernen Betonbau durch. Mit dem AS 2.4 wurden zudem zu erwartende Randbedingungen für etwaige labortechnische Untersuchungen aufgestellt. Im Rahmen des AP 3 konnte die HTWK Leipzig mit verschiedenen FEM-Werkzeugen erste Berechnungsmethoden und ingenieurmäßige Modellvorstellungen zur rechnerischen Erfassung und Integration auxetischer Effekte etablieren. Mit dem AS 6.4 gelang die Entwicklung von Vorzugsvarianten und Lösungen zur Implementierung des auxetischen Effektes, wohingegen das AS 7.4 dazu diente die Integration der auxetischen, textilen Halbzeuge in Bindersystemen zu realisieren. Im AP 8 konnten dann fortlaufend erste Muster und Prototypen experimentell untersucht werden. Die AS 9.4 und 10.4 dienten zuletzt dazu, durch die Erstellung von Demonstratoren und in situ-Objekten die Anwendungscharakteristika und -potenziale von auxetischen Strukturen und Halbzeugen unter praxisnahen Bedingungen aufzuzeigen.

Tabelle 1: Übersicht zu Arbeitspaketen (AP), Arbeitsschritten (AS) im Teilvorhaben der HTWK Leipzig

AP/AS	Bezeichnung der Aktivität
1	Grundsatzuntersuchungen, Eruierung von Anwendungsgebieten und –strategien, Erstellung Anforderungskataloge an auxetische Strukturen im Bereich
1.4	<i>Betonbau</i>
2	Entwicklung von Simulationsmodellen durch FEM für die textilen Grundstrukturen in der Zielanwendung und Voruntersuchungen zur Anwendung auxetischer Phänomene für anwendungsrelevante Problemstellungen
2.4	<i>Voruntersuchungen zur Anwendung auxetischer Phänomene für anwendungsrelevante Problemstellungen im Bereich Betonbau</i>
3	Konzeptionierung und Bemessung von Vorzugsvarianten in den Zielanwendungen:
3.4	<i>Betonbaubereich</i>
6	Entwickeln von Konstruktionsdetails nach bauphysikalischen, werkstofftechnologischen, konstruktiven und typologischen Aspekten sowie Simulation der Varianten in den Bereichen:
6.4	<i>Konstruktionsdetails: Betonbau</i>
7	Entwicklung von Umsetzungsstrategien und Untersuchungen zur Konsolidierung der biegeschlaffen Textilien für:
7.4	<i>Festlegung und Erprobung üblicher zementöser und polymerer Bindersysteme</i>
8	Entwicklung von Prüfkörpergeometrien und Versuchsständen zur Erprobung der gefundenen Konzepte, Details und Bemessungsansätze für die Zielbereiche und Re-Design der Strukturen
8.4	<i>Entwicklung der labortechnischen Umsetzung für experimentelle Untersuchungen an ersten Mustern und Preformen</i>
9	Erstellung von Probestücken und Demonstratoren für Einbau- u. Belastungsversuche mit Prototypen und Preformen, Prüfungen u. Untersuchungen an hergestellten Textilien Probekörpern und Demonstratoren
9.4	<i>Fertigungsversuche im Betonbau</i>
10	In-Situ-Tests mit Vorzugsanwendungen und -strategien sowie Konzeption zur prototypischen Herstellung der eruierten Vorzugsvarianten, Bewertung der Eignung der Strukturen für die Anwendungsfelder, Berichtslegung für:
10.4	<i>Betonbau</i>

3. Wesentliche Ergebnisse sowie Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Im Zuge der Projektarbeit entstand zunächst ein Anforderungskatalog, der wesentliche Anforderungen und Spezifikationen an den auxetischen Effekt und dessen textiltechnische Umsetzung aus Sicht des Bauwesens definierte. Im Zuge dessen wurden auch die möglichen Anwendungsfelder präzisiert. So sollten unter anderem die lineare Abdichtung von Gebäudehüllen und die Verankerung von nichtmetallischen Bewehrungen fokussiert werden.

Als geeignete textiltechnische Verfahren ließen sich das Flechten und das Kemailverfahren eingrenzen, um später einen auxetischen Effekt an strangförmigen Elementen auszulösen, die dann wiederum einzeln oder im Zusammenwirken mit mehreren auxetischen Elementen wirken sollten. Der auxetische Effekt sollte durch Einschnüren eines elastischen Rovingkerns mit einer umschnürenden steifen Faser (z.B. Carbon-/Aramidfaser) gelingen.

Bei der Bestimmung der zu erwartenden Rahmenbedingungen konnte schnell erkannt werden, dass der Kern dabei so elastisch und dick wie möglich ausgeführt werden sollte und Materialien mit geringer Querdruckempfindlichkeit zwingend zur Anwendung kommen müssen. Im Seilbildungsprozess entstehenden besondere Herausforderungen, die insbesondere die Formstabilität und die Materialzuführung betreffen.

Die Projektarbeit zeigte anschließend, dass Finite-Element-Methoden das geeignetste Werkzeug darstellen, um den auxetischen Effekt an strangförmigen Strukturen rechnerisch aufzuzeigen. Hierzu

wurden verschiedene FEM-Modelle entwickelt und überprüft. Der Umschnürungs- oder Querdruck, ausgelöst durch die auxetische Struktur, ließ sich in verschiedenen Matrices simulieren.

Durch die Projektpartner wurden verschiedene auxetische strangartige Elemente durch Flechten hergestellt und der HTWK Leipzig für Versuche zur Verfügung gestellt. Mittels entwickelter Prüfschemata und -ständen ließ sich der auxetische Effekt sichtbar machen und später auch messtechnisch nachweisen. Durch diese Versuche gelang eine weitere Schärfung der Einsatzmöglichkeiten und -grenzen für die verschiedenen Materialkonstellationen. Dies mündete in der Entwicklung von Vorzugsvarianten zur Implementierung des auxetischen Effektes.

Besonders hervorzuheben ist dabei die Erstellung erster flächiger Muster und Demonstratoren für Abdichtungszwecke. An der HTWK Leipzig wurden dazu mehrere strangförmige Strukturen flächig angeordnet und in hochflexible Matrices eingebunden. Bei späteren Zugversuchen ließ sich der auxetische Effekt am entstandenen Dichtelement darstellen und qualifizieren. Durch die Einbindung in Betonfugen von WU-Prüfkörpern ließ sich zudem die abdichtende Wirkung in Wasserundurchlässigkeitsprüfungen dokumentieren.

Aufgrund der positiven Erfahrungen wurden zuletzt Demonstratoren und *in situ*-Objekte erstellt, um den Praxisbezug aufzuzeigen. Es liegt ein funktionsfähiger Demonstrator vor, der ein auxetisches Dichtelement am typischen Detail „Fuge Bodenplatte/aufgehende Wand“ zeigt.

Während der gesamten Projektlaufzeit fand eine rege Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern statt. Diese betraf vor allem die gemeinsame Arbeit mit dem Partner Implenia, die in der Entwicklung der FEM-Werkzeuge und der Erstellung und Erprobung erster Dichtelemente mündete. Mit dem Partner STFI konnten verschiedenste strangartige Strukturen entwickelt und getestet werden. Der Partner stellte dabei Strukturen mit verschiedenen Kernen und unterschiedlichen Rovings her. Die Effekte des Flechtprozesses sowie der Anordnung der Materialien zueinander ließen sich in diesem Prozess aufzeigen und qualifizieren. Zuletzt sei auch die Zusammenarbeit mit dem Partner Embro genannt. Für die Ausbildung flächenhafter Strukturen konnte die HTWK immer wieder auf die Expertise und die Herstellmöglichkeiten des Unternehmens zurückgreifen.



*Ein Zukunftsmodell für Traditionsbanchen in
der vierten industriellen Revolution*



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

SACHBERICHT ZUM VERWENDUNGSNACHWEIS TEIL 2: EINGEHENDE DARSTELLUNG

Zwanzig20-Projekt:	futureTEX
Verbundvorhaben-Nummer:	VP 29
Verbundvorhaben-Titel:	Textiles meet physics – Anwendung physikalischer Phänomene in textilen Konstruktionen für Sicherheit und Effizienz
Kurztitel:	auXteX
Förderkennzeichen:	03ZZ0629D
Teilvorhaben-Nummer:	TP 29.4
Teilvorhaben-Titel:	Möglichkeiten und Grenzen der Nutzung auxetischer Effekte innovativer Technischer Textilien im Bauwesen
Akronym:	auXteXHTWK
Antragsteller:	Partner 4 HTWK Leipzig, Institut für Betonbau Karl-Liebknecht-Straße 132 04277 Leipzig
Vorhabenlaufzeit:	01.07.2018 - 31.10.2022

Postanschrift:
PF 301166
04251 Leipzig

Besucheradresse:
Geutebrückbau, Raum G315
Karl-Liebknecht-Straße 132
04277 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 3076 6267
Fax: +49 (0)341 30766461

Email / Internet:
klaus.holschemacher@htwk-leipzig.de
www.ifb.htwk-leipzig.de

Kein Zugang für elektronisch
signierte und verschlüsselte
Dokumente.

1. Durchgeführte Arbeiten und Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung

Arbeiten im Rahmen des AP 1:

Für die Eingrenzung und Fokussierung der Einsatzmöglichkeiten von auxetischen Textilien für den Einsatz im Bauwesen wurde ein Anforderungskatalog erarbeitet. Wesentliche Anforderungen sind demnach:

- die technischen Textilien sollen eindimensionale (strangförmig, Seil) und/oder flächige Erzeugnisse darstellen
- strangförmige oder flächige (streifenförmige) Strukturen können zu fächerförmigen Strukturen zusammengeführt werden
- Ableitung weiterer Anforderungen hinsichtlich bautechnischer und bautechnologischer Belange

Als zu avisierende Anwendungen wurden dabei erkannt:

- lineare Abdichtungen für Gebäudehüllen
- Verankerung seilartiger Strukturen
- flächenartige Strukturen für Verbund- und Sandwichelemente
- Geotextilien

Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse entsprachen den Intentionen und Zielvorstellungen der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

Arbeiten im Rahmen des AP 2:

Für die weiteren Arbeiten wurde zunächst ein geeignetes textiltechnisches Verfahren eruiert:

- Grundsatzuntersuchungen an 3D-gedruckten Exponaten
- Fokussierung auf Effektbildung durch Flechten und Kemailverfahren
- auxetischer Effekt soll durch Einschnüren eines elastischen Rovingkerns mit einer umschnürenden steifen Faser (z.B. Carbon-/Aramidfaser) gelingen
- auxetischer Effekt tritt somit direkt am Roving auf
- Ausführung nach Bild 1 als ein Einfach- und Doppelhelix

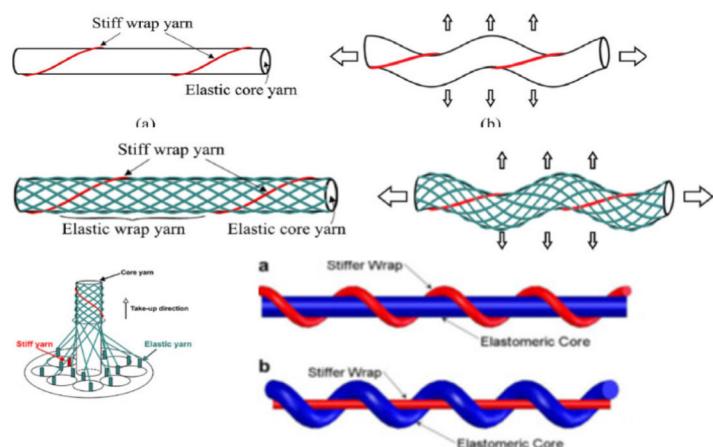


Bild 1: Angestrebte textiltechnische Verfahren

Der Hauptfokus wurde dabei, in Absprache mit den Partnern, zunächst auf das textiltechnische Verfahren Flechten gelegt. Dabei wurden folgende Grundsätze/Parameter betrachtet:

- Material und Proportion von Kern sowie kernumschnürendem Material
- Kern soll einen möglichst großen Durchmesser aufweisen und elastisch sein
- umschnürendes Material soll dagegen eine sehr hohe Steifigkeit besitzen
- weitere Parameter betrafen die Seiltechnik (Anstellwinkel, Doppelhelix)

Um eingehendere Kenntnisse zu den grundsätzlichen Konstruktionen der textilen Strukturen sowie zu den Beanspruchungsgrenzen und den Eigenschaften der Kombinationswerkstoffe zu erlangen, wurden, in Zusammenarbeit mit Partnern STFI und EMBRO, seilartige Strukturen mit Aramidfaserkern und umschnürenden Carbonfasern entwickelt und untersucht:

- Versuch des Nachweises des auxetischen Effektes über Umschnürungsdruck sowie Längs- und Querdehnungsmessung

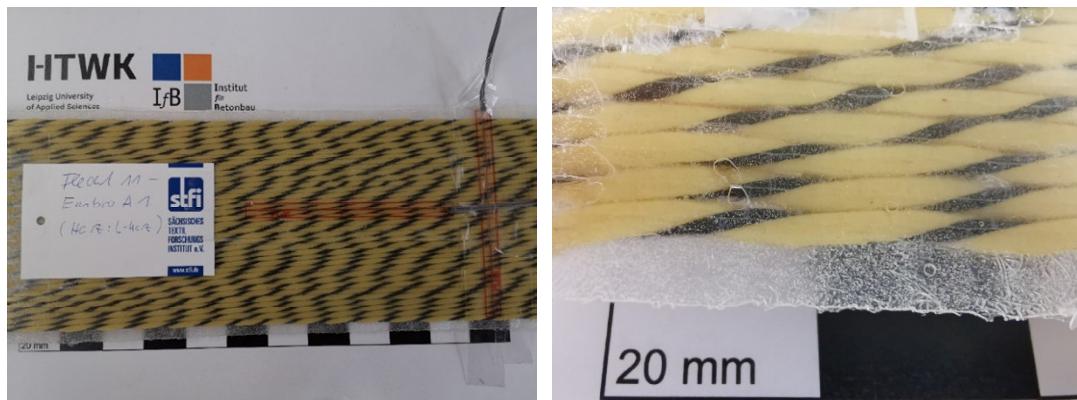


Bild 2: Beprobte plattenartige, auxetische Strukturen



Bild 3: Probekörper und Belastungsversuch mittels elektromechanischer Prüfmaschine

Wesentlich Erkenntnisse dieser Tastversuche waren dabei:

- Nachweis des auxetischen Effektes über Umschnürungsdruck oder Längs- und Querdehnungsmessung ist kompliziert, gewählte Versuchsaufbauten waren aber vielversprechend
- Strukturkern sollte so elastisch wie möglich ausgeführt und Materialien mit geringer Querdruckempfindlichkeit gewählt werden

- besondere Herausforderungen: durch Seilerei wird Effekt zum Teil vorweggenommen, Kerndurchmesser ist z. Z. stark begrenzt, Auswahl Matrix schwierig, Formstabilität des Kerns problematisch, Querdruckempfindlichkeit Carbon unterschätzt

Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse entsprachen den Intentionen und Zielvorstellungen der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

Arbeiten im Rahmen des AP 3:

Um geeignete Berechnungsmethoden aufzeigen zu können, wurde frühzeitig die Simulation mit Finite-Element-Methoden fokussiert. Dabei wurden Simulationen der seilartigen auxetischen Strukturen durchgeführt:

- geometrische Modellbildung
- Studien zu geeigneten FE-Elementtypen
- im Rahmen des AP 3 gelangen dabei erste erfolgreiche Simulationen
- die grundlegende Eignung von FEM-Methoden ließ sich nachweisen

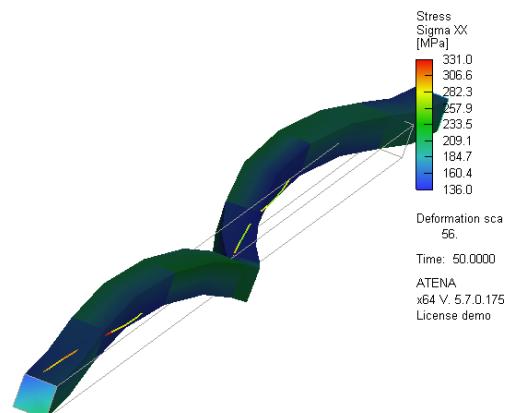


Bild 4: FEM-Simulation an seilartiger, auxetischer Struktur

Insgesamt gelang es, erste Berechnungsmethoden und ingenieurmäßige Modellvorstellungen zur rechnerischen Erfassung und Integration auxetischer Effekte aufzuzeigen. Vergleiche mit Simulationen und Simulationsansätzen des Partners Implenia zeigten allerdings, dass eine weitere Verfeinerung und Verbesserung angezeigt war.

Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse entsprachen im Wesentlichen den Intentionen und Zielvorstellungen der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

Arbeiten im Rahmen des AP 6:

Im AP 6 erfolgte eine weitere Präzisierung und Verbesserung der entwickelten FEM-Modelle. Dabei ließen sich die realen Materialeigenschaften berücksichtigen und die geplanten strang-/seilartigen auxetischen Strukturen detaillierter modellieren:

- Kern: elastisch, isotropes Verhalten
- umhüllendes Material: anisotropes Verhalten

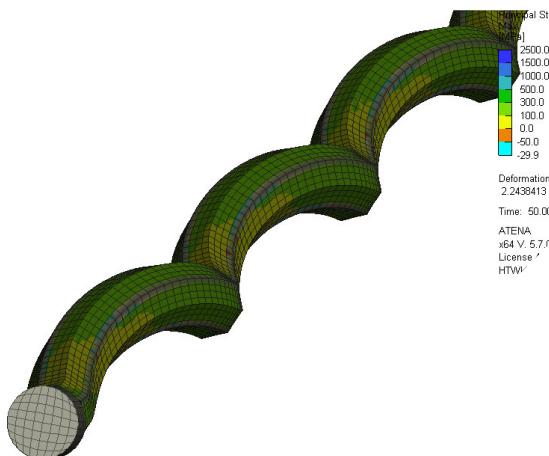


Bild 5: Verbesserte FEM-Simulationen an seilartiger, auxetischer Struktur

Weiterhin gelang es, die einzelnen auxetischen Elemente in Substrate und Matrices zu integrieren und das Gesamtverhalten des Verbundbauteils zu untersuchen.

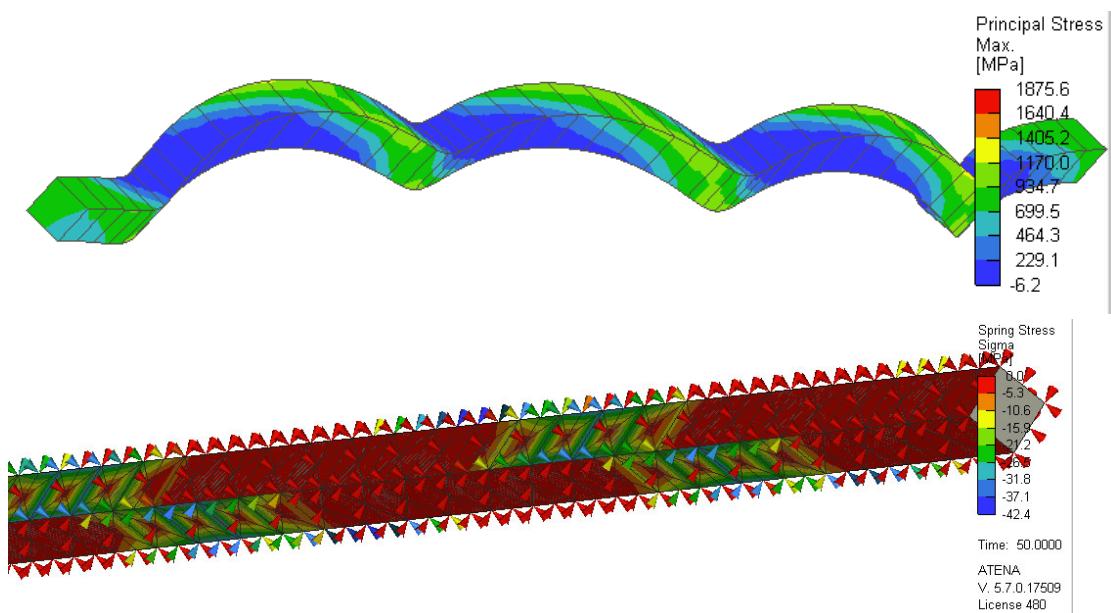


Bild 6: FEM-Simulationen mit ungehinderter Verformung (auxetische Struktur frei im Raum) und behinderter Verformung (auxetische Struktur in Substrat)

Die Arbeiten mit den verbesserten Modellen zeigten:

- dass FEM als Mittel der Simulation, Visualisierung und Nachrechnung geeignet ist
- Umschnürungs- oder Querdruck, ausgelöst durch die auxetische Struktur, sich in verschiedenen Matrices simulieren lassen
- die Simulation der Verformungen mit Feder-Elementen am besten gelingt
- bei behinderter Verformung entstehen spiralförmige Bereiche mit ausgeprägtem Querdruck
- diese Erkenntnis ließ sich mit experimentellen Ergebnissen in Einklang bringen

In der Folge gelang eine 3D-Modellierung der konzeptionell entwickelten Konstruktionsteile sowie die Identifikation der wesentlichsten Einflussgrößen, wie z. B. Bauteilgeometrie oder die Lage und Ausbildung der auxetischen Strukturen im Bauteil.

Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse entsprachen den Intentionen und Zielvorstellungen der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

Arbeiten im Rahmen des AP 7:

Für die Verbindung mehrerer strangartiger auxetischer Strukturen in einem Verbundbauteil wurden verschiedene polymere Bindersysteme erprobt und mit den Erfahrungen aus AP 6 verglichen. Es zeigte sich, dass die Einbindung in sehr starre Epoxidharzsysteme die Ausbildung des auxetischen Effektes zu sehr behindert. Geeigneter sind dagegen Matrices mit einem niedrigen E-Modul sowie Silikoneinbettungen.

Die Einbettung erfolgte an der HTWK Leipzig labormäßig in händischer Arbeit. Für die Ausbildung von flächenhaften Strukturen wurden Schalungen erstellt und die einzelnen strangartigen Strukturen an diesen fixiert. Anschließend konnten Epoxidharze oder Silikonmassen im Gießverfahren eingebracht werden.



Bild 7: Flächig angeordnete auxetische Elemente (links) und fertige Prüfkörper

Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse entsprachen den Intentionen und Zielvorstellungen der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

Arbeiten im Rahmen des AP 8:

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus AP 2 erfolgten im AP 8 die labortechnische Umsetzung erarbeiteter Konzepte und die Durchführung experimenteller Untersuchungen an ersten Mustern und Preformen. Diese wurden vom Partner STFI zur Verfügung gestellt. Die Untersuchungen konzentrierten sich zunächst auf einzelne strangförmige auxetische Elemente.

- Versuche sollten die Nutzung des auxetischen Effekts zur Verankerung via Querdruck beweisen und den Querdruck experimentell erfassen

Die Geometrie und das Material wurden hierzu variiert:

Material 1:

- Kern: PMMA (Monofilament); Durchmesser D=2mm
- umhüllende Faser: Aramid; Schlaglänge ca. 18mm

Material 2:

- Kern: PMMA (10 Einzelfasern); Durchmesser Einzelfaser $D=0,3\text{mm}$
- umhüllende Faser: Aramid; Schlaglänge ca. 16,4mm

Zur messtechnischen Bestimmung des auxetischen Effektes kam ein umhüllendes Röhrchen zum Einsatz, welches seinerseits über bekannte Materialdaten verfügte und mit Dehnungsmessstreifen ausgestattet wurde:

für Material 1 verwendetes Röhrchen:

- Außendurchmesser $DA=4\text{mm}$
- Innendurchmesser $DI=2\text{mm}$
- Material: ASA (Acrylester-Styrol-Acrylnitril); $E=2500 \text{ N/mm}^2$

für Material 2 verwendetes Röhrchen:

- Außendurchmesser $DA=5\text{mm}$
- Innendurchmesser $DI=3\text{mm}$
- Material: ASA (Acrylester-Styrol-Acrylnitril); $E=2500 \text{ N/mm}^2$

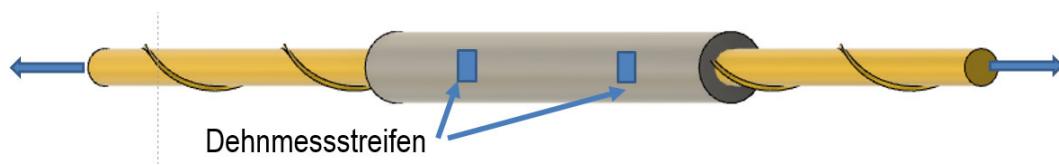


Bild 8: Versuchsaufbau



Bild 9: Realer Versuchsaufbau (links) mit umhüllendem Röhrchen (rechts)



Bild 10: Typisches Versagensbild (links) und Einschnüren des elastischen Kerns sowie Ausbildung des auxetischen Effekts (rechts) bei Nutzung von Material 1

Während der Versuche ließen sich die eingeleitete Kraft, der axiale Maschinenweg und die Dehnung am aufgebrachten Röhrchen messen. Daraus ließ sich das Weg-Querdehnungs-Verhalten ableiten. Die Interpretation der gewonnenen Daten führte zu folgenden Schlüssen:

- ohne Trennmittel scheinbar keine Zugdehnungsentwicklung
- mit Trennmittel sichtbare Zugdehnungsentwicklung in Querrichtung
- Fazit: starker Einfluss der Längsdehnungsentwicklung aufgrund mangelhafter Entkopplung von Röhrchen und Faser
- dieser Einfluss ist nicht mess- oder kalkulierbar ohne zusätzlichen DMS in Längsrichtung auf Röhrchen
- mit Trennmittel zeigte sich in den Versuchen eine zunächst lineare Zugdehnungsentwicklung
- somit ließ sich die Entstehung des Querdrucks nachweisen

Die gewonnenen Dehnungsdaten wurden anschließend genutzt, um den entstehenden Querdruck direkt zu berechnen:

- analytische Berechnung des Querdrucks am dickwandigen Rohrquerschnitt
- Querdruck erreicht Werte bis $0,8 \text{ N/mm}^2$
- Querdruck ist über Röhrchenhöhe unterschiedlich, in Abhängigkeit von Schlaghöhe des umschließenden Rovings
- Querdruck kann errechnet werden und ist somit mathematisch erfassbar
- weitere Versuche mit einer höheren Anzahl an DMS bestätigten die Ergebnisse

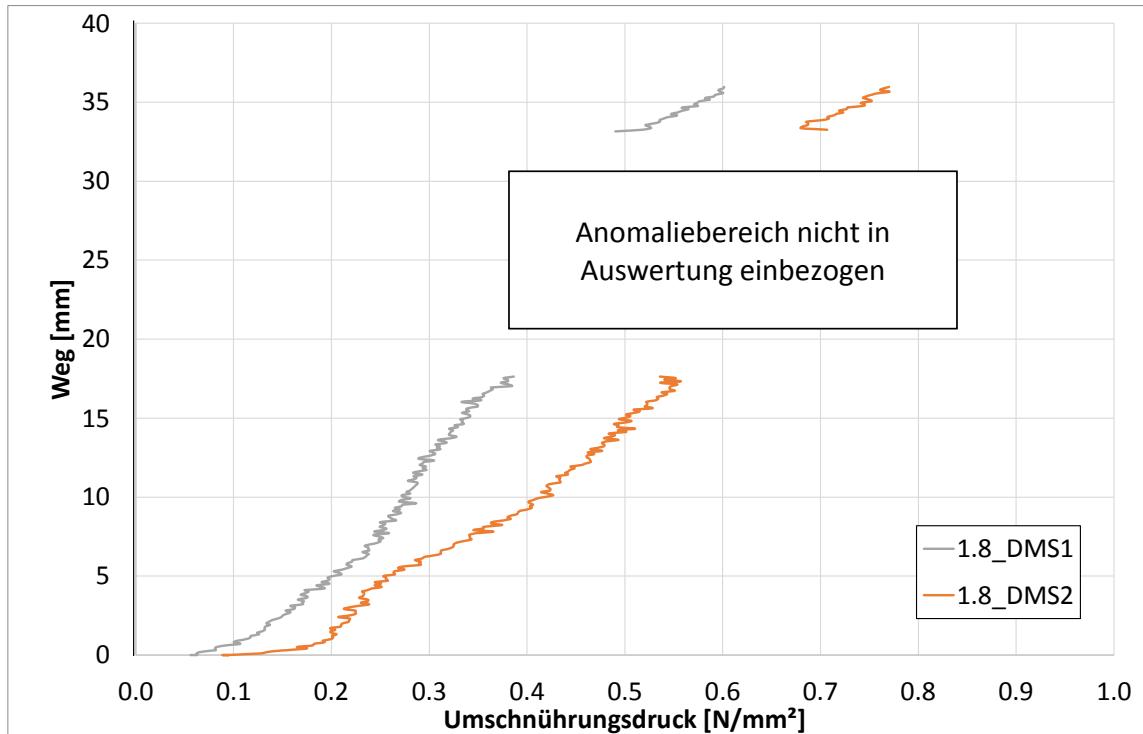


Bild 11: Weg-Umschnürungsdruck-Beziehung Material 1 (mit Trennmittel)

In einem weiteren Schritt erfolgte die Erstellung erster flächiger Muster/Demonstratoren für Abdichtungen:

- flächige Anordnung mehrerer strangförmiger auxetischer Strukturen (Kern: PMMA (Monofilament); Durchmesser D=2mm; umhüllende Faser: Aramid oder Glas)
- Einbindung in hochflexible Matrices für spätere Abdichtfunktion (Silikoneinbettung)
- Größe der Elemente: 30 x 5 x 0,5 cm
- Durchführung von Zugversuchen zur Darstellung und Qualifizierung des auxetischen Effektes

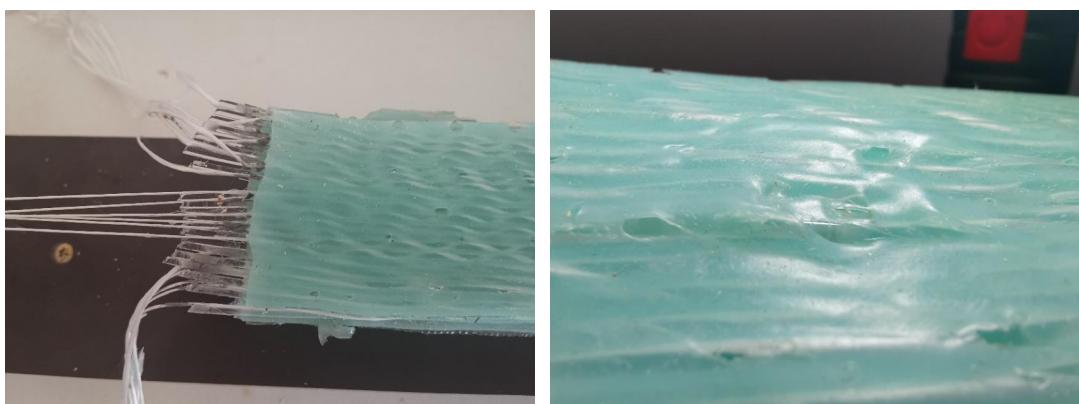


Bild 12: Beprobung eines Prüfkörpers (links) und visuelle Verfolgung der Volumenzunahme in Querrichtung (rechts)

Aus den gewonnenen Ergebnissen ließen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- eine signifikante Volumenzunahme in Querrichtung an den Probekörperoberflächen konnte erkannt und dokumentiert werden
- eine abdichtende Wirkung in Fugen ist zu erwarten

- zur Erzielung des auxetischen Effektes war sehr viel Kraft notwendig
- zum Teil wurden bei Kraftaufbringung die zulässigen Spannungen der einschnürenden Fasermaterialien überschritten
- vorzeitiges Versagen musste deshalb immer wieder festgestellt werden

Um die Anwendung in Abdichtungen zu optimieren, mussten andere auxetische Materialien mit flexiblerem Kern entwickelt und beprobzt werden. Hierzu erfolgte eine Modifikation der auxetischen Materialien für den Einsatz in Abdichtungselementen:

- Nutzung neuer Kerne → flexibler Kern, Bentonitbänder
- Variation Kerndurchmesser (4 und 8 mm)
- Variation der umschnürenden Fasern (Anordnung gleichlaufend und gegenläufig; Variation der Ganghöhe)
- Materialien wurden nach Abstimmung vom Partner STFI gefertigt und an der HTWK beprobzt

In Zugversuchen wurde der auxetische Effekt direkt an den Proben gemessen und erfasst.



Bild 13: Versuchsdurchführung mit Kerndurchmesser 8 mm: Volumenvergrößerung (links) und im Detail (rechts)



Bild 14: Versuchsdurchführung mit Kerndurchmesser 8 mm und gegenläufiger Anordnung der umhüllenden Faser: Volumenvergrößerung (links) und im Detail (rechts)



Bild 15: Versuchsdurchführung mit Kerndurchmesser 4 mm: vor Zugversuch (links) und Volumenvergrößerung in Querrichtung (rechts)

Die Auswertung der gewonnenen Erkenntnisse lässt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- eine signifikante Volumenzunahme in Querrichtung konnte bei allen beprobten Elementen erkannt und dokumentiert werden
- der Effekt lässt sich ohne großen Kraftaufwand und ohne Zerstörung der umhüllenden Fasern erzielen
- ein gegenläufiger Verlauf der umhüllenden Faserrovings war besonders effektiv
- für die Anwendung als Abdichtung sind Kerndurchmesser 4mm zu präferieren
- alternative Kerne aus Bentonit scheinen ebenfalls geeignet
- hier ist der Einsatz als reines strangförmiges Dichtelement zu präferieren

Die strangförmigen Elemente mit hochflexiblen Kern wurden in der Folge in Silikon eingebettet, um flächenhafte Verbundelemente zu erhalten:

- flächige Anordnung mehrerer strangförmiger auxetischer Strukturen (hochflexibler Kern; Durchmesser $D=4\text{mm}$ und 8mm ; umhüllende Faser: Aramid)
- Einbindung in hochflexible Matrices für spätere Abdichtfunktion
- Größe der Elemente: $20 \times 4 \times 0,5 \text{ cm}$
- Durchführung von Zugversuchen zur Darstellung und Qualifizierung des auxetischen Effektes

In Zugversuchen wurde der auxetische Effekt direkt an den Proben gemessen und erfasst.



Bild 16: Versuchsdurchführung mit Kerndurchmesser 8 mm: vor Zugversuch (links) und Volumenvergrößerung und Verformung Oberfläche (rechts)



Bild 17: Versuchsdurchführung mit Kerndurchmesser 8 mm und gegenläufiger Anordnung der umhüllenden Faser: Volumenvergrößerung und Verformung Oberfläche (links) und im Detail (rechts)

Die Versuche zeigten bei allen beprobten Elementen eine signifikante Volumenzunahme in Querrichtung. Der Effekt lässt sich hier ohne großen Kraftaufwand und ohne Zerstörung der umhüllenden Fasern erzielen. In Fugen sollte durch den entstehenden Anpressdruck infolge Volumenzunahme ein zusätzlicher Abdichtungseffekt generiert werden können.

Die Arbeiten im AP leisteten einen erheblichen Beitrag, um das Leistungsprofil der textilen Verbundstrukturen unter definierten Prüfbedingungen für eine konkrete Zielanwendung, die Abdichtung von Betonfugen, herauszuarbeiten.

Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse entsprachen den Intentionen und Zielvorstellungen der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

Arbeiten im Rahmen des AP 9:

Im AP 9 sollten Belastungsversuche zur Validierung der gefundenen Lösungsstrategie in der präferierten Zielanwendung stattfinden. Dazu wurden zunächst wieder auxetische Fugenbänder hergestellt und anschließend in Standardprüfkörper für sog. WU (Wasserundurchlässigkeit) – Prüfungen eingebaut.



Bild 18: WU-Prüfkörperschalungen (links) und mit eingebautem auxetischem Fugenband (rechts)

Für die Versuche wurde dabei eine Arbeitsfuge künstlich erzeugt, indem in einem ersten Betonageprozess Beton bis auf Höhe der Fugenbänder eingebaut wurde. Nach Betonerhärtung erfolgte eine zweite Betonage zur vollständigen Befüllung der Probekörper.

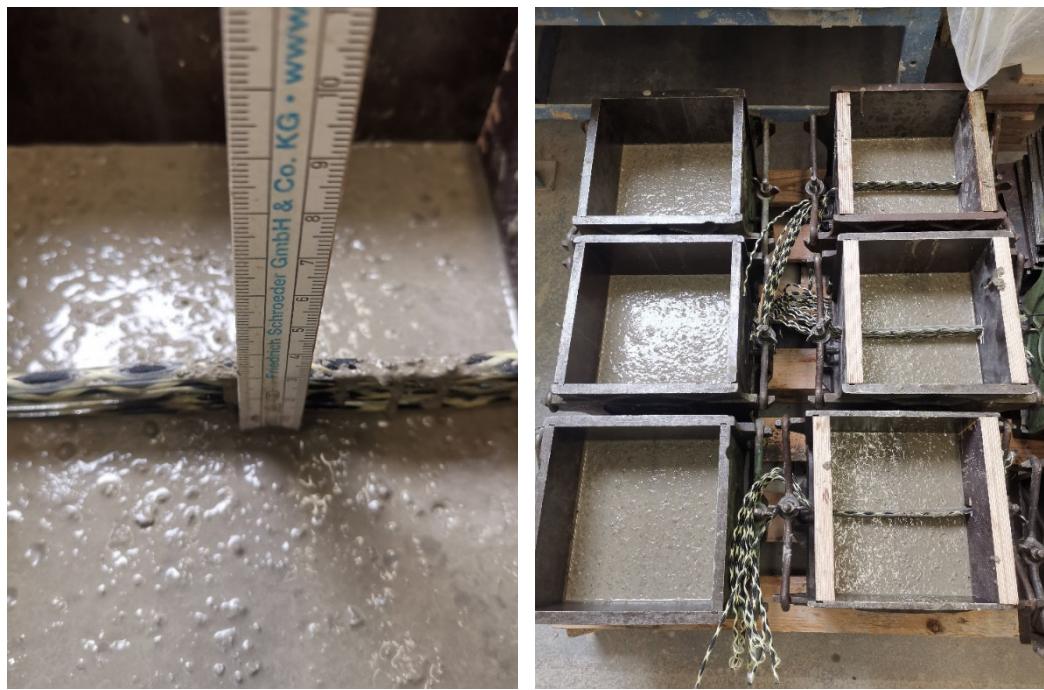


Bild 19: Erste Lage Beton (links) und WU-Prüfkörperschalungen mit und ohne eingebaute auxetische Fugenbänder (rechts)

Die WU-Prüfung erfolgte beim Partner Implenia am Baustoffprüflabor in Leipzig. Eine eingehende Darstellung der Ergebnisse erfolgt durch den entsprechenden Abschlussbericht des Partners.

Im Ergebnis dieser Versuche ließ sich die Funktionalität der entwickelten Strukturen aufzeigen und beweisen.

Die Fugenbänder ermöglichen aufgrund ihrer Beschaffenheit per se eine starke Erhöhung des Wassereindringwiderstandes von Betonfugen. Der auxetische Effekt und die damit verbundene Volumenänderung in Querrichtung bewirken eine Verstärkung des abdichtenden Effektes. So kann die Auxetik in der Zielanwendung genutzt werden, um z. B. eine nachträgliche Abdichtung von Leckagen zu ermöglichen.

Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse entsprachen den Intentionen und Zielvorstellungen der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

Arbeiten im Rahmen des AP 10:

Im AP 10 sollten die Anwendungscharakteristika und -potenziale der auxetischen Strukturen/Halbzeuge unter praxisnahen Bedingungen verdeutlicht werden. Hierzu wurde das im Bauwesen und Betonbau wichtige Fugendetail „Bodenplatte / Aufgehende Wand“ als Demonstrator nachvollzogen und ein auxetisches Fugenband, aufbauend auf den Erfahrungen der AP 8 und AP 9, entwickelt und vom Partner Embro gefertigt. Der Herstellprozess des flächenhaften auxetischen Textils wurde dabei insofern optimiert, als das die Einzelemente auf eine Kaschierung aufgebracht wurden, was die Anordnung und Fixierung in Schalungen maßgeblich vereinfachte.



Bild 20: Flächenhaftes auxetisches Textil (links) und Vergleich vor und nach Einbettung in Silikonmatrix (rechts)

Im Anschluss erfolgte die Erstellung des Demonstrators.



Bild 21: Eingebautes auxetisches Fugenband (links) und fertiger Demonstrator (rechts)

Durch die Arbeiten am Demonstrator ließen sich die Potenziale der präferierten Zielanwendung nochmals aufzeigen und beweisen.

Die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse entsprachen den Intentionen und Zielvorstellungen der ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

2. Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Da ein Großteil der Aufwendungen aus Personalmitteln bestand, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Ausführung zum zahlenmäßigen Nachweis verzichtet. Es konnten bis zum Ende des Bewilligungszeitraumes nahezu 100 % der Mittel abgerufen werden.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das beschriebene Vorhaben der HTWK Leipzig war eng mit den FuE-Arbeiten verschiedenen Partner der gewerblichen Wirtschaft verknüpft. Die im Rahmen des Teilvorhabens beschriebenen Arbeiten, Untersuchungen und grundlagenorientierten Technologieentwicklungen stellten ausschließlich vorwettbewerbliche Arbeiten dar. Der Grad der Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsleistungen ging weit über die bisher üblichen firmeninternen Leistungen für Forschung und Entwicklung der beteiligten Unternehmen hinaus. Die von den Unternehmen generierten Umsätze und die dabei erzielten Gewinnmargen hätten nicht ausgereicht, um, in Ergänzung zum fordernden Tagesgeschäft, Forschungs- und Entwicklungsaufgaben in der gebotenen Qualität und mit einem hohen wissenschaftlichen Standard vollständig zu finanzieren.

Auch fehlt den Unternehmen die technologische Ausstattung, um im Alleingang derart komplexe Entwicklungen zu betreiben. Um die geplante Entwicklung zur Produktionsreife zu bringen, sind die Grundlagenarbeiten in den Instituten zu leisten, welche über die Labor- und Prüfgeräte verfügen und bereits umfangreiche Erfahrung mit den Einzelkomponenten vorweisen können. Eine enge Zusammenarbeit war somit Grundvoraussetzung.

Die HTWK Leipzig erfüllte über den gesamten Projektzeitraum diese Aufgaben und stellte ihr Knowhow sowie ihre Versuchs- und Laborstätten zur Verfügung, um die Möglichkeiten und Grenzen auxetischer Effekte im Bauwesen zusammen mit den Partnern STFI, Implenia und Embro zu eruieren. Auf Grund der intensiven Zusammenarbeit mit den Partnern und dem Projektkonsortium konnten aussichtsreiche Anwendungsfelder eingegrenzt und bewertet werden.

In der Endkonsequenz liegen nun Demonstratoren vor, die den konkreten Einsatz aufzeigen und verdeutlichen.

Ohne eine Zuwendung wären das durchgeführte Teilprojekt und eine erfolgreiche Zusammenarbeit in diesem Maße nicht möglich gewesen.

4. Darstellung des voraussichtlichen Nutzens

Die Nutzung der Auxetik in der Wissenschaft und in den Ingenieurdisziplinen steht erst am Anfang. Die Herbeiführung des Effektes mittels technischer Textilien, dessen Eingrenzung und Bewertung sowie die Beobachtung von Wechselwirkungen in komplexeren Strukturen waren zu Beginn des Projektes weder systematisch aufgearbeitet noch wirklich verstanden.

Das Teilprojekt der HTWK Leipzig bot, im Zusammenspiel mit den FuE-Aktivitäten der Partner, die einmalige Gelegenheit auxetische Effekte in der Ingenieurdisziplin Bauwesen näher zu beleuchten und eventuelle Potenziale aufzudecken. Durch die systematische Untersuchung, beginnend mit dem Anforderungskatalog bis hin zu den ersten funktionstüchtigen Demonstratoren, konnte die Lernkurve in diesem völlig neuen Forschungsfeld wesentlich schneller durchschritten werden, was wiederum ein hohes Potenzial für eine spätere wirtschaftliche Verwertung der Ergebnisse birgt.

Die Ergebnisse des Teilvorhabens sind zwar grundlegend, verhelfen den beteiligten Praxispartnern aber durch erste praktische Versuche, die neue Technologie besser zu verstehen. Damit können in weiteren Vorhaben gezielt Produkte und vor allem Herstellprozesse für die Anwendung auxetischer technischer Textilien entwickelt, optimiert und letztlich dem Markt angeboten werden.

Erwähnenswert erscheinen darüber hinaus der erfolgreiche Netzwerkaufbau sowie die Pflege bestehender Kontakte und Partnerschaften durch die Projektarbeit. Zu mehreren Partnern konnten sehr enge Verbindungen seitens der HTWK Leipzig aufgebaut werden, die in Folge zu weiteren Forschungsprojekten und -aktivitäten führen sollten.

Das nun erhöhte Knowhow im Umgang mit technischen Textilien und deren Nutzung im Bauwesen macht die HTWK Leipzig dabei zu einem attraktiven Partner, innerhalb des vorhandenen Konsortiums und darüber hinaus.

5. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind außerhalb des Konsortiums keine weiteren Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens seitens anderer Stelle bekannt geworden. Die umfangreichen Forschungsergebnisse stellen daher ein Alleinstellungsmerkmal der Forschungs- und Entwicklungskompetenz des Zuwendungsempfängers dar.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

Mit dem nun erfolgten Abschluss des Teilprojektes sollen, in Abstimmung mit den beteiligten Partnern, Veröffentlichungen in namhaften Zeitschriften, wie z. B. Betonwerk International, erfolgen.

7. Literatur

- Evans, K. E. (1991): Auxetic polymers: a new range of materials. *Endeavour* 15 (4), S. 170-174
- Prof. Obrecht, H.; Reinicke, U.; Walkowiak, M.: Auxetische Strukturen, Neue Wege zu gewichtseffizienten Konstruktionen, *Zeitschrift Lightweightdesign*, 11/2011, S. 36-42
- Walkowiak, M.: Auxetische Strukturierungskonzepte im makroskopischen Skalenbereich, ISBN 978-3-8440-2902-04, 08/2014
- Friedl, A.; Richter, K.: Auxetische Textilien, *smartTEX-Workshop* 17.10.2012
- Rant, Darja ; Pavko-Cuden, Alenka/University of Ljubljana, SI
- Design of multifunctional weft knitted structures with auxetic potential/Entwurf von multifunktionellen Kulierwarenstrukturen mit auxetischem Potenzial
avantex, Internationales Forum und Symposium für High-Tech-Textilien, 7/2013/20140202145, Beitrag (Konferenz)
- Anonym: Zug macht dick. Werkstoffe. Suche nach auxetischen Materialien
Zeitschrift *Blick durch die Wirtschaft*/1997/M97080267634
- Kluge, Axel; Nocke, A.; Cherif, C.; Linse, T.; Ulbricht, V./TU Dresden; Textile Aktoren auf Grundlage von Formgedächtnislegierungen für adaptive faserverstärkte Polymere, Techtextil, Internationales Techtextil-Symposium, 17/2013/201402022, Beitrag Konferenz
- Lakes, R. S. (1987): Negative Poisson's ratio materials. *Science* 238, S. 551
- Lakes, R. S. (1987): Foam structures with a negative Poisson's ratio. *Science* 235, S. 1038-1040
- Lakes, R. S. (1991): Deformation mechanisms of negative Poisson's ratio materials: Structural aspects. *Journal of Materials Science* 26, S. 2287-2292
- Baughman, R. H.; Shacklette, J. M.; Zakhidov, A.; Stafstrom, S. (1998): Negative Poisson's ratios as a common feature of cubic metals. *Nature* 392 (6674), S. 362-365
- Alderson, A. (1999): A triumph of lateral thought. *Chemistry & Industry*, 17, May, S. 384-391
- Baughman, R. H.; Dantas, S. O.; Stafstrom, S.; Zakhidov, A.A.; Mitchell, T. B.; Dubin, D. H. E. (2000): Negative Poisson's ratios for extreme states of matter. *Science* 288, S. 201 -2022