

# TourAtlas

## Matrixhybride

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



# Zukunft unternehmen!

## Unsere Anwendungsfelder



**Automotive**



**BuildTech**



**InduTech**



**Luftfahrt**



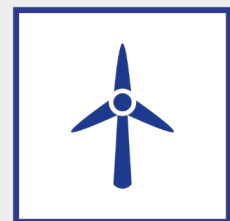
**MedTech**



**MobilTech**



**SportTech**



**Windenergie**

## ➤ Über das Forschungsprojekt futureTEX

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

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

## ➤ **Abschlussdokumentation Umsetzungsvorhaben Matrixhybride**

### **Werkstoff- und Technologieentwicklung zur form- und kraftschlüssigen Kopplung thermoplastischer und duroplastischer FVK-Lamine**

Laufzeit: 1. August 2017 – 31. März 2021

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

## **Inhalt**

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Management Summary .....                           | 6  |
| Partner .....                                      | 7  |
| Problemstellung und Motivation .....               | 9  |
| Beitrag zur Realisierung der futureTEX-Ziele ..... | 10 |
| Lösungsansatz .....                                | 10 |
| Ergebnisse .....                                   | 11 |
| Verwertung und wirtschaftliche Bedeutung .....     | 16 |
| Ausblick .....                                     | 17 |

## ➤ Management Summary

Für Faserverbundkunststoffe (FVK) werden als Matrixmaterialien wahlweise Thermoplaste (TP) oder Duroplaste (TS für Thermoset) verwendet. Beide Matrixsysteme besitzen teilweise sehr verschiedene Eigenschaften, weswegen sich sowohl die Verarbeitung als auch die späteren Bauteileigenschaften stark voneinander unterscheiden.

Das Gesamtziel des Forschungsprojektes Matrixhybride war eine Kombination dieser beiden Matrices in einem Verbundwerkstoff, um duroplastische FVK-Bauteile über Schweißverfahren fügen zu können. Die neue Werkstoff- und Technologieentwicklung schließt eine bisher vorhandene gravierende Verfahrenslücke bei Fügeprozessen im Compositebereich.

Die Kopplung beider Matrixsysteme soll über die Kombination der Verbindungstechniken Form- und Stoffschluss erfolgen. Der Formschluss wird durch ein textiles Halbzeug erzeugt. Hierfür werden vorrangig Gewebe einge-

setzt, deren Kett- und Schussfäden alternierend die Matrixseite wechseln. Der Stoffschluss musste über den Nachweis adhäsiver Bindungen an der Grenzfläche zwischen duroplastischer und thermoplastischer Matrix erreicht werden. Die wissenschaftlich-technischen Herausforderungen betrafen die Fachgebiete Textiltechnologie, Presstechnik und Presstechnologie, Fügetechnologie mit dem Schwerpunkt Schweißen von Duroplasten sowie die Werkstoffprüfung mit neuen bzw. modifizierten Verfahren zur Beschreibung und Bewertung hybrider Lamine. In allen Arbeitsbereichen wurde fertigungstechnisches Neuland beschritten.

Für das Projekt wurde ein kompetentes Konsortium aus drei Firmen und drei Instituten zusammengestellt. Die Entwicklung matrixhybrider Lamine zielte vorrangig auf Anwendungen in der Luftfahrt. Dementsprechend wurde das Vorhaben von der Cotesa GmbH in Mittweida, einem Zulieferer für Strukturbauteile für Airbus und Boeing, koordiniert.

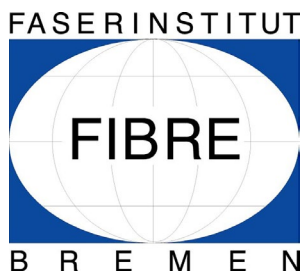
## ➤ Partner



Cotesa GmbH (Koordinator)  
Bahnhofstraße 67 | 09648 Mittweida  
Ansprechpartner: Dr. Jakob Schulz  
T: +49 3727 9985-161 | schulz@cotesa.de



Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)  
Annaberger Straße 240 | 09125 Chemnitz  
Ansprechpartner: Günther Thielemann  
T: +49 371 5274-239 | guenther.thielemann@stfi.de



Faserinstitut Bremen e.V.  
Am Biologischen Garten 2 | 28195 Bremen  
Ansprechpartner: Holger Büttemeyer  
T: +49 421 218-59650 | buettemeyer@faserinstitut.de

### Cotesa GmbH (Koordinator)

Die Cotesa GmbH verfügt über 19 Jahre Erfahrung bei der serienmäßigen Herstellung von FVK-Bauteilen für die Luftfahrtindustrie und ist ein zertifiziertes Luftfahrt-Zulieferunternehmen. Es sind über 400 Mitarbeiter bei Cotesa GmbH beschäftigt. Zu den Kunden gehören sowohl Fluggerätehersteller (z. B. Airbus, AHD) als auch Luftfahrt-zulieferer (z. B. PAG, DIEHL, ESW, EADS EFW, AOA). Das Hauptproduktionsmittel sind die Autoklaven, in denen die Prepreg-Bauteile ausgehärtet werden. Das CFK-Bauteilspektrum der COTESA GmbH reicht von einfachen kleineren Bauteilen bis zu komplexen Profilen mit bis zu 7 m Länge. Das Qualitätsmanagementsystem der Cotesa GmbH ist nach EN 9100 zertifiziert.

### Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V. (STFI)

Das Sächsische Textilforschungsinstitut ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung, die sich der langjährigen Traditionen sächsischer Textilforschung verpflichtet fühlt. Technische Textilien für den Bereich des Leichtbaus mittels Faserverbundkunststoffen (FVK) sind einer der Schwerpunkte im Institut. Das Spektrum umfasst die Entwicklung neuer Textilstrukturen für FVK mittels der Technologien Weben, Wirken, Sticken und Stricken sowie die Vliesstoffherstellung. Im Zentrum für textilen Leichtbau des STFI wird auch an den Folgetechnologien bis zum Laminat auf Basis Thermo- und Duroplasten einschließlich Werkstoffprüfung und Faserrecycling geforscht.

### Faserinstitut Bremen e.V.

Am Faserinstitut Bremen e.V. (FIBRE) arbeiten derzeit 60 Mitarbeiter unterschiedlicher Fachrichtungen mit dem Ziel der (Weiter-)Entwicklung von innovativen Fertigungsverfahren. Im Verbundvorhaben wird insbesondere die werkstoffwissenschaftliche Kompetenz des Instituts eingebracht. Das FIBRE hat in den vergangenen Jahren seine Aktivitäten im Bereich der Multimaterial-Verbindungstechnik und deren Fertigungsverfahren stark intensiviert und dabei einen Schwerpunkt in diesem Bereich etabliert. Sowohl auf dem Gebiet der Konzeption von Fügeverbindungen als auch deren Charakterisierung sind zahlreiche Arbeiten durchgeführt worden.



Cetex Institut für Textil- und Verarbeitungsmaschinen gGmbH  
Altchemnitzer Straße 11 | 09120 Chemnitz  
Ansprechpartner: Sebastian Nendel  
T: +49 371 5277-200 | [nendel@cetex.de](mailto:nendel@cetex.de)



**Eichler und Meurers  
Industrietechnik GmbH**

Eichler und Meurers Industrietechnik GmbH  
Berbisdorfer Straße 113 | 09123 Chemnitz  
Ansprechpartner: Dipl.-Ing. Ralph Meurers  
T: +49 37209-69292 | [meurers@em-industrie.de](mailto:meurers@em-industrie.de)



**RUCKS**

Rucks Maschinenbau GmbH  
Austraße 2 | 08371 Glauchau  
Ansprechpartner: Thomas Bachmann  
T: +49 3763 6003-18 | [bachmann@rucks.de](mailto:bachmann@rucks.de)

## Cetex Institut für Textil- und Verarbeitungsmaschinen gGmbH

Cetex gGmbH ist ein Forschungsinstitut im Bereich Textilmaschinenbau. Der Forschungsschwerpunkt liegt in der Entwicklung von großserientauglichen Technologien und Maschinen für Technische Textilien, insbesondere auch für den Faserverbundbereich. Im Mittelpunkt stehen Verfahrens- und Materialentwicklungen von endlosfaserverstärkten Halbzeugen und komplexen Preformen für den Leichtbau aus Hochleistungsfasern, wie Carbon, Glas, Basalt und Aramid, sowie die Maschinen zu deren Herstellung.

## Eichler und Meurers Industrietechnik GmbH

Die E&M Industrietechnik GmbH ist mit 7 Mitarbeitern seit 11 Jahren im Sondermaschinenbau tätig. Der Aufgabenschwerpunkt des Unternehmens liegt in der Konstruktion und dem Bau von Komponenten des Textilmaschinenbaus, insbesondere Gatter, Zuführeinrichtungen, Wickler und Absaugeinrichtungen.

## Rucks Maschinenbau GmbH

Die RUCKS Maschinenbau GmbH ist spezialisiert auf die Einzelfertigung kundenspezifischer Pressen-Systeme und Sonderanlagen für vielfältigste Anwendungen. Das RUCKS Produktionsspektrum erstreckt sich von kleinen Laborpressen bis hin zu komplexen Produktionsanlagen. Dabei deckt RUCKS die gesamte Wertschöpfungskette, von der Konstruktion über Fertigung und Inbetriebnahme bis hin zum Service ab.

## ➤ Problemstellung und Motivation

Faserverbundwerkstoffe (FVK) sind bewährte Werkstoffe im Leichtbau. Im extremen Leichtbau, wie im Flugzeugbau, sind vor allem carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) etabliert. Für Faserverbundkunststoffe werden als Matrixmaterialien wahlweise Thermoplaste (TP) oder Duroplaste (TS für Thermoset) verwendet. Beide Matrixsysteme besitzen teilweise sehr verschiedene Eigenschaften, weswegen sich sowohl die Verarbeitung als auch die späteren Bauteileigenschaften stark voneinander unterscheiden.

Für tragende Strukturbauteile in Flugzeugen werden überwiegend duroplastisch basierte FVK eingesetzt. Der große Nachteil besteht darin, dass das Fügen eines CFK-Rumpfes mit Spanten und Stringern bisher nur durch Kleben und sicherheitshalber durch zusätzliches Nieten erfolgt. Das sind zeit- und kostenintensive Prozesse, die zugleich die Eigenmasse des Flugzeugs negativ beeinflussen.

Das Ziel des Forschungsprojektes Matrixhybride war eine Kombination duroplastischer und thermoplastischer Matrices in einem Verbundwerkstoff, um duroplastische FVK-Bauteile über Schweißverfahren fügen zu können. Die neue Werkstoff- und Technologieentwicklung schließt

eine bisher vorhandene gravierende Verfahrenslücke bei Fügeprozessen im Compositebereich. Die Kopplung beider Matrixsysteme soll über die Kombination der Verbindungstechniken Form- und Stoffschluss erfolgen. Der Formschluss wird durch ein textiles Halbzeug erzeugt. Hierfür werden vorrangig Gewebe eingesetzt, deren Kett- und Schussfäden alternierend die Matrixseite wechseln. Ein möglichst hoher Ondulationsgrad innerhalb des Gewebes sorgt dafür, dass die Matrixseite besonders häufig gewechselt wird und sich dadurch die Verbindungsfestigkeiten erhöhen. Darüber hinaus hat man durch die Möglichkeit des Formschlusses die Option, nicht-kompatible Matrixwerkstoffe miteinander zu fügen. Neben der Verbindungstechnik des Formschlusses wird der Stoffschluss verwendet, um die Verbindungsfestigkeiten zu erhöhen bzw. zu superpositionieren. Der Stoffschluss musste über den Nachweis atomarer/kovalenter Bindungen an der Grenzfläche zwischen duroplastischer und thermoplastischer Matrix erreicht werden. Diese Bindungen können nur entstehen, wenn die chemische Struktur der beiden Matrixwerkstoffe für eine solche Verbindung geeignet ist, weswegen ausschließlich zueinander compatible Matrixwerkstoffe diese Bindungsmechanismen nutzen können.

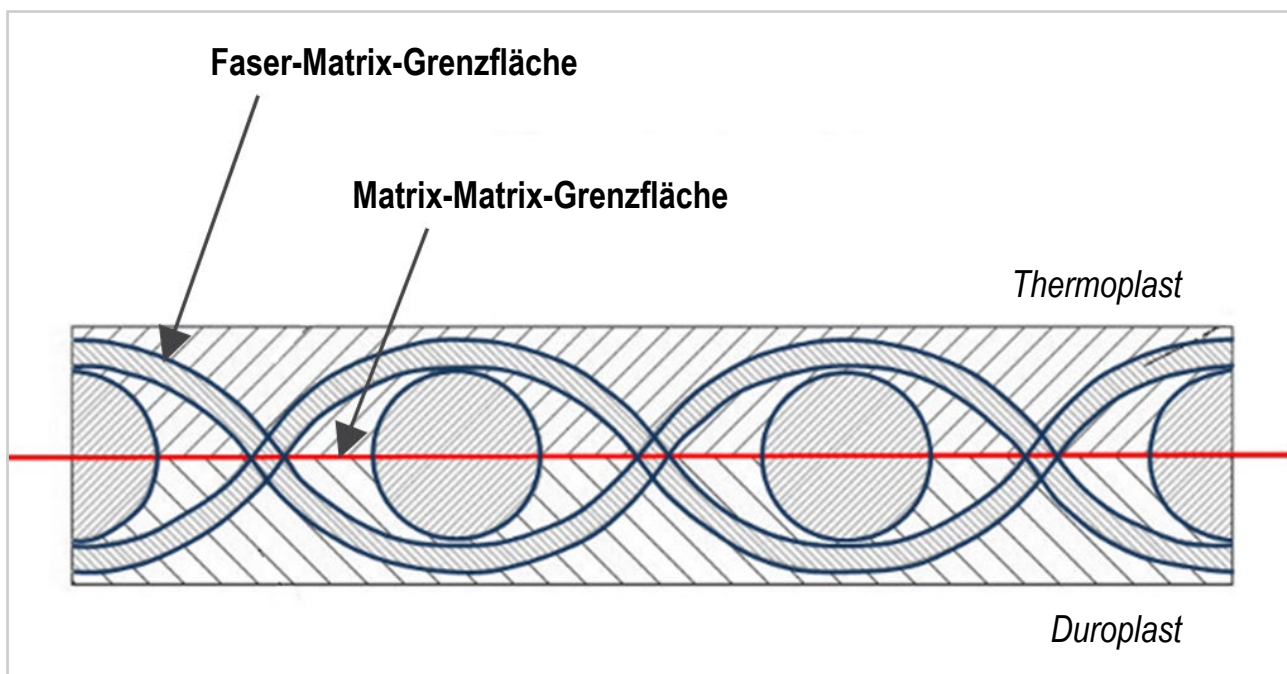


Abbildung 1: Prinzipskizze – Matrixhybrides Prepreg, Quelle: STFI

## ➤ Beitrag zur Realisierung der futureTEX-Ziele

Die Entwicklung matrixhybrider Verbundwerkstoffe hat das Niveau einer disruptiven Produktinnovation, einhergehend mit technologischen Niveausprüngen in den einzelnen Prozessstufen und nachgelagerten Innovationen in bisher nicht möglichen Fügeprozessen. Die Entwicklung gehört zum Themenbereich Composites und wurde der Partnerstruktur entsprechend fokussiert auf den Luftfahrtsektor, ist aber prinzipiell auf den Automobilbau im Großserienbereich und zahlreiche andere Anwendungsgebiete übertragbar.

Das Erreichen der Projektziele erforderte die Zusammenarbeit verschiedenster Branchen. Konkret involviert waren der Textilmaschinenbau, der Pressenbau für spezielle FVK-Technologien, Institute aus den Bereichen Textilforschung, Laminatforschung, Berechnung, Werkstoffprüfung, Grenzflächenphysik, Schweißtechnik sowie

ein Endanwender als Luftfahrtzulieferer. Die Inhalte des Projekts leisten einen Beitrag zum schonenden Umgang mit stofflichen und energetischen Ressourcen sowie zur Nachhaltigkeit.

Die beteiligten Institute und Firmen erwarben im Projekt einen Know-how-Vorsprung, der zur Stärkung des Wirtschaftsstandorts Deutschland und speziell zur Festigung der Leaderposition im Bereich Technischer Textilien beiträgt. Das gebildete Partnerkonsortium plant weiterführende Forschungsarbeiten im Kompetenzbereich des compositebasierten Leichtbaus. Ziel dieser Folgeprojekte ist die Integration von Firmen anderer Anwenderbranchen wie z. B. aus dem Automobilbau sowie von Partnern entlang der gesamten Prozesskette vom Textilmaschinenbau über Halbzeuge bis zum Endprodukt.

## ➤ Lösungsansatz

Zur zielgerichteten Entwicklung innovativer Maschinenkonzepte für Textilmaschinen wurden folgende Arbeitspakete in Angriff genommen:

- AP 1 Spezifikation der Thermoplast-Duroplast-Verbindung und Materialauswahl
- AP 2 Mathematische Modellierung der Grenzflächen zwischen den Bindungspartnern
- AP 3 Entwicklung und Fertigung textiler Halbzeuge (Gewebe, Vliesstoffe aus Recyclingfasern, Mustertextilien)
- AP 4 Maschinenbau und Anlagenmodifikation (Presstechnik, Kalandrierung, Webmaschine)

- AP 5 Technologie-Entwicklung für teilkonsolidierte und hybride Prepregs
- AP 6 Laminatfertigung und diskontinuierlicher duroplastischer Laminataufbau
- AP 7 Werkstoffprüfung und Charakterisierung (statisch, dynamisch, Mikroskopie)
- AP 8 Optimierung von Anlagen und Technologien (textile Halbzeuge, Lamine)
- AP 9 Thermisches Fügen
- AP 10 Fertigung von Funktionsmustern
- AP 11 Qualitätssicherung, Konzept für QS-System

## ➤ Ergebnisse

Alle Arbeitspakete wurden fachlich-inhaltlich und im geplanten zeitlichen Umfang bearbeitet. Die formulierten Zielstellungen konnten im Projektverlauf erreicht werden.

### Untersuchte Werkstoffe im Projekt

- Thermoplast-Matrix: Polyetherimid (PEI)
- Duroplast-Matrix:
  - RTM6 (Nasslaminat/Injektion)
  - M21 (Prepreg/Autoklav)
- Faserwerkstoffe als Kopplungsschicht zwischen den Matrixsystemen:
  - Carbonfasergewebe mit Thermoplastschlichte auf Basis von Roving HTS45 P12 (Teijin)
  - Carbonfasergewebe entschlichtet
  - Vliesstoffe aus recycelten Carbonfasern

### Maschinentechnische Voraussetzungen

Im Projekt wurden drei Prüfstände gebaut bzw. Veränderungen an bestehenden Anlagen vorgenommen. Dieses betraf:

- Versuchsstand Weben (STFI und Eichler & Meurers) zur Fertigung von Geweben mit spezifischem Ondulationsgrad zur Matrixkopplung
- Versuchsstand diskontinuierliches Pressen (STFI und Rucks):
  - Aufrüstung der hydraulischen Presse mit Hochtemperatur-Heizplatten und einem innovativen Kühlsystem
  - Für präzise Regelung der Heizplatten und exakte Prozessparameter
- Versuchsanlage (Cetex) zur kontinuierlichen Fertigung teilkonsolidierter thermoplastischer Halbzeuge und matrixhybrider Prepregs auf Basis von Geweben und Vliesstoffen:
  - Konstruktive Entwicklung, Bau und Erprobung der Versuchsanlage
  - Versuchsweise Herstellung teilkonsolidierter thermoplastischer Halbzeuge und matrixhybrider Prepregs

Die wesentlichsten wissenschaftlichen Erkenntnisse sind:

### Komplex Hybride Laminat

Als Nassverfahren wurde das Infusionsverfahren eingesetzt, um die matrixhybriden Laminat zu fügen. Das Infusionsverfahren ist gekennzeichnet von einer offenen Werkzeugstruktur, welche mit einer Vakuumfolie geschlossen wird. Notwendig hierfür war das teilkonsolidierte Gewebhalbzeug, welche vom STFI bzw. von der Cetex entwickelt und hergestellt wurden. Um ein Hinterfließen des niedrigviskosen Epoxidharzes zu vermeiden, musste die teilkonsolidierte Gewebeseite auf der Werkzeugseite aufliegen und anschließend abgedichtet werden. Anschließend konnten die weiteren Halbzeuge mit Verstärkungsfasern auf das teilkonsolidierte Halbzeug positioniert werden.

Des Weiteren war keine weitere Anpassung des Infusionsprozesses notwendig, sodass der konventionelle Infusionsaufbau umgesetzt und durchgeführt wurde. Das matrixhybride Laminat ist dadurch gekennzeichnet, dass neben dem überwiegenden duroplastischen Kunststoff eine thermoplastische Oberfläche auf einer Seite vorhanden ist, welche bereits optisch im Laminat zu erkennen ist.

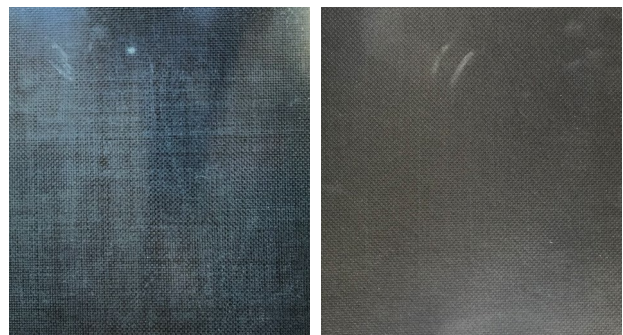


Abbildung 2: Oberflächen des matrixhybriden Laminats (links: Thermoplast – rechts: Duroplast), Quelle: STFI

### Komplexe Prozesstechnologie und Anlagentechnik zur Herstellung teilkonsolidierter und matrixhybrider Halbzeuge

Mit der anlagentechnischen Umsetzung sowohl der Teilkonsolidierung thermoplastischer Halbzeuge als auch der Vollimpregnierung matrixhybrider Prepregs auf Basis der Kalandertechnik wurde die Entwicklung eines energie-

und kosteneffizienten Herstellungsverfahren mit dem Ziel angestrebt, das entwickelte Verfahren technisch zu

realisieren und die erforderlichen Versuche zur Material- und Verfahrensoptimierung durchzuführen (Abb. 3).

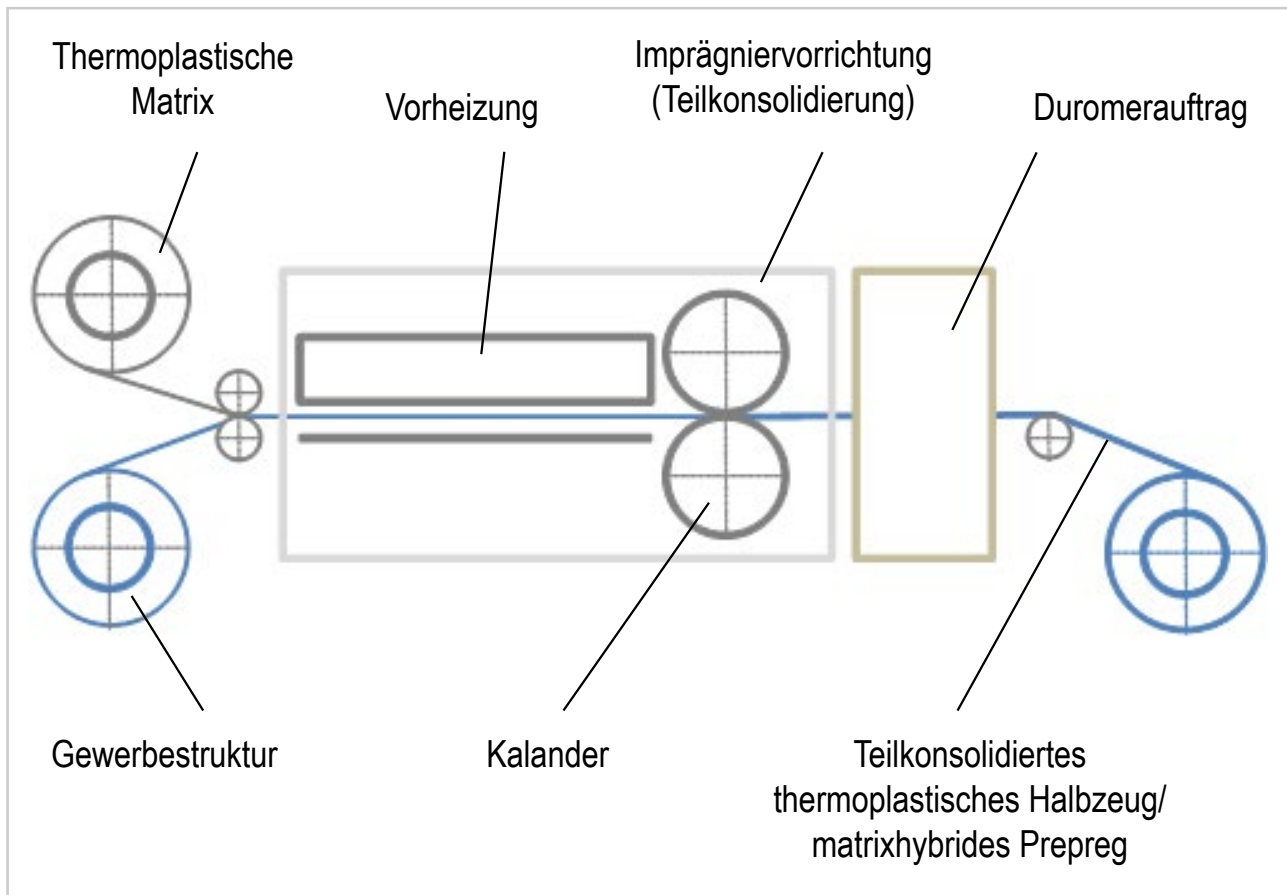


Abbildung 3: Technologie und Anlagenschema zur Herstellung teilkonsolidierter thermoplastischer Halbzeuge und matrixhybrider Prepregs, Quelle: Cetex Institut für Textil- und Verarbeitungsmaschinen gGmbH

Im Ergebnis der Projektbearbeitung wurde das wissenschaftlich-technischen Ziel erreicht und in einer Versuchsanlage konstruktiv umgesetzt. Die Versuchsanlage besitzt einen modularen Aufbau und ermöglicht die Herstellung teilkonsolidierter thermoplastischer Halbzeuge und matrixhybrider Prepregs (Abb. 4). Voraussetzung für die parameterechte Teilimprägnierung der Gewebestruktur inner-

halb des Verfahrens ist die exakte Prozessführung während der Imprägnierung des Gewebematerials. Direkte Prozessparameter sind Druck, Temperatur und Zeit sowie deren Variation unter dem Einfluss der gegebenen Parameter, dem Schmelz- und Verarbeitungsverhalten des aufzutragenden Polymers sowie der Permeabilität der Gewebestruktur.



Abbildung 4: Versuchsanlage zur Herstellung teilkonsolidierter thermoplastischer Halbzeuge und matrixhybrider Prepregs, Quelle: Cetex Institut für Textil- und Verarbeitungsmaschinen gGmbH

Das teilkonsolidierte thermoplastische Halbzeug entsteht durch das Imprägnieren und Konsolidieren des Gewebematerials auf einer Materialseite bis zur Gewebemitte. Im weiteren Verfahrensablauf wird das matrixhybride Prepreg durch das Auftragen der duromeren Matrix auf die

noch offene Faserseite des thermoplastischen teilkonsolidierten Halbzeugs gebildet. Innerhalb der Anlagentechnik werden beide Verfahrensschritte auf der Versuchsanlage zu einer technologisch durchgängigen Prozessführung miteinander vereint (Tab. 1).

| Merkmal                | Anlagenparameter                                                                                              | Bemerkung                                                                                     |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Arbeitsbreite          | 300 ... 600 mm                                                                                                |                                                                                               |
| Arbeitsgeschwindigkeit | 2 m/min                                                                                                       | Versuchsanlage                                                                                |
| Temperaturbereich      | > 300°C                                                                                                       | in der Imprägniervorrichtung                                                                  |
| Materialverarbeitung   | Gewebe, Vlies                                                                                                 |                                                                                               |
| Materialzuführung      | von Materialrolle ( $D \leq 500$ mm)                                                                          | Ausgangs- und Fertigmateriale                                                                 |
| Teilimprägnierung      | einseitig bis zu 50 Prozent der Gewebe-/Vliesdicke                                                            | thermoplastisch teilkonsolidiertes Material                                                   |
| Duromerauftrag         | einseitig auf die offene Faseroberfläche bis zur thermoplastischen Grenzfläche im teilkonsolidierten Material | Vollimprägnierung des teilkonsolidierten thermoplastischen Halbzeugs – matrixhybrides Prepreg |

Tabelle 1: Parameter der Versuchsanlage (Teilkonsolidierung und Matrixhybrid), Quelle: Cotesa GmbH

Die hergestellten teilkonsolidierten und matrixhybriden Versuchsmuster konnten für weitere werkstoffmechanische Untersuchungen sowie für die versuchsweise Verarbeitung zu Probelaminaten den jeweiligen Projektpartnern zur Verfügung gestellt und die Weiterverarbeitung untersucht werden (Abb. 5).

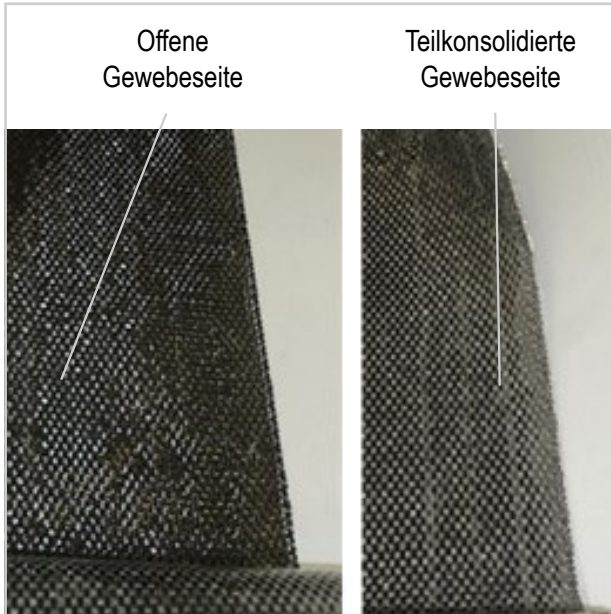


Abbildung 5: Auf der Versuchsanlage hergestelltes teilkonsolidiertes Versuchsmuster, Quelle: Cotesa GmbH

## Komplex Fügen/Schweißen

Die teilkonsolidierten Gewebelagen wurden mittels Autoklav-, Infusions- oder Pressverfahren zu duroplastischen Laminaten mit thermoplastischer Oberfläche verarbeitet und wurden im weiteren Schritt verschweißt. Die Voruntersuchungen zu unterschiedlichen Schweißverfahren haben ergeben, dass genauere Forschungen zu Ultraschall- und Widerstandsverschweißungen durchgeführt werden sollten.

Das Ultraschallverschweißen benötigte neben den zwei verschiedenen Laminaten einen Energiedirektor des thermoplastischen Materials. Da Polyetherimid (PEI) der vorrangige Thermoplast war, dienten als Energiedirektoren sowohl ein vom STFI gefertigter Vliesstoff aus PEI als auch entsprechende Folien.

Das Verschweißen mittels Ultraschalles wurde mit beiden Typen von Energiedirektoren erfolgreich demonstriert. Gegenüber dem Vliesstoff hatte das Folienmaterial eine höhere Gleichmäßigkeit aufgrund seiner morphologischen Beschaffenheit, weswegen die mechanischen Eigenschaften geringfügig höher waren. Innerhalb von Zug-Scher-Prüfungen konnten im Maximum bis zu 24 MPa erreicht werden (Abb. 6).

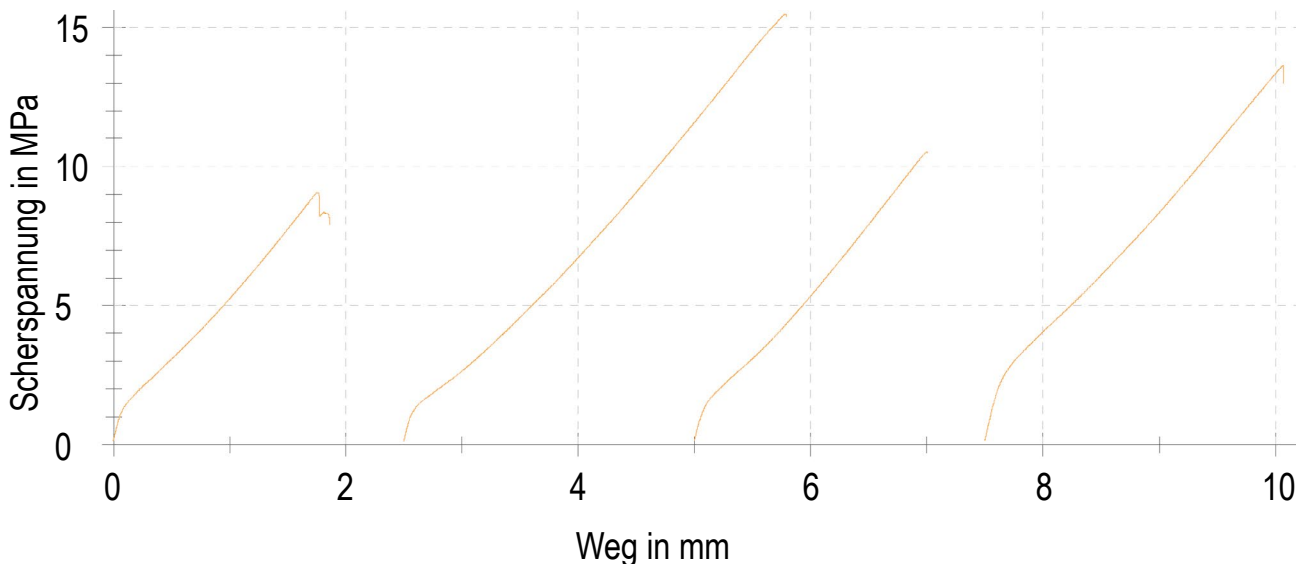


Abbildung 6: Ergebnisse der Zug-Scher-Prüfung an vier ultraschallgeschweißten, matrixhybriden Laminaten, Quelle: Faserinstitut Bremen e.V.

Verschiedene Material- und Prozessoptimierungen wurden während der Verschweißprozesses durchgeführt. Zum einen wurde ein statisches Verfahren für das Ultraschallschweißverfahren mit matrixhybriden Laminaten und zum anderen wurde ein kontinuierliches Verfahren entwickelt.

Innerhalb des statischen Verfahrens wurde die optimale Schweißdauer bestimmt. Eine zu geringe Schweißdauer führt zu einer unvollständigen Verbindung zwischen den thermoplastischen Oberflächen. Eine zu lange Schweißdauer führt zur thermischen Degradation und dadurch zu

einer Materialzersetzung, welche zu vermeiden ist. Bei den PEI-Vliesstoffen lag die optimale Schweißzeit bei 300 ms und bei den Folienmaterialien bei 450 ms. Die Ergebnisse wurden durch die Charakteristik der Energieerzeugungskurve bestätigt. Neben den mechanischen Untersuchungen durch Zug-Scher-Versuche wurden bild-

gebende Untersuchungen mittels Lichtbildmikroskopie durchgeführt (Abb. 7). Hierbei konnte festgestellt werden, dass sowohl Vliesstoffe als auch Folienmaterialien bei Verwendung der optimalen Parameter nur zu einem sehr geringen Teil Mikroporen im Übergangsbereich aufgewiesen haben.

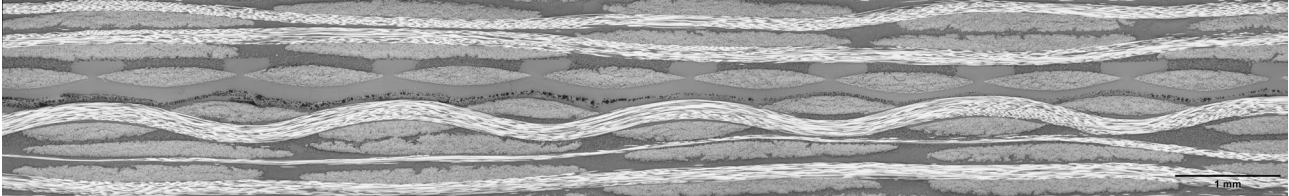


Abbildung 7: Schliffbildaufnahme eines ultraschallgeschweißten, matrixhybriden Laminats, Quelle: Cotesa GmbH

Hinsichtlich des kontinuierlichen Verfahrens wurden die optimalen Vorschubgeschwindigkeiten der Sonotrode experimentell untersucht. Für Vliesstoffe lagen diese bei 30 mm/s und für Folien bei 35 mm/s, welche optisch und mechanisch bewertet wurden.

Neben PEI wurden ebenfalls Polyvinylbutyral (PVB) experimentell beim Ultraschallverschweißen untersucht. Hierbei mussten ebenfalls zunächst die optimalen Prozesseigenschaften ermittelt werden. Optisch konnten keine signifikanten Änderungen zwischen einer Schweißdauer von 250 ms und 500 ms festgestellt werden. Die mechanischen Eigenschaften von PVB waren gegenüber den mechanischen Eigenschaften von PEI klar unterlegen (Schubspannungen von 7 MPa).

Für die Untersuchungen mittels Widerstandsschweißen wurden zunächst Widerstandsheizelemente benötigt,

welche in einem separaten Prozess hergestellt worden sind. Hierbei wurde ein Metallmesh mit einem dem PEI-Vliesstoff innerhalb eines Pressprozesses imprägniert und mit einer Glasfasergewebedeckschicht isoliert. Dieses Heizelement wurde anschließend im weiteren Verlauf im Widerstandsschweißen eingesetzt.

Auch bei dieser Untersuchungsreihe wurden zunächst die optimalen Prozessparameter bestimmt. Diese wurden bei 13 Volt, 25 Ampere und einer Schweißdauer von 100 s gefunden. Die mechanischen Eigenschaften waren mit einer Schubspannung von ca. 15 MPa etwas schlechter als beim Ultraschallschweißen, wobei aber auch beim Widerstandsschweißen eine vollständige Imprägnierung sichergestellt werden konnte (Abb. 8). Teilweise war der Imprägniergrad sogar höher als beim Ultraschallschweißen.

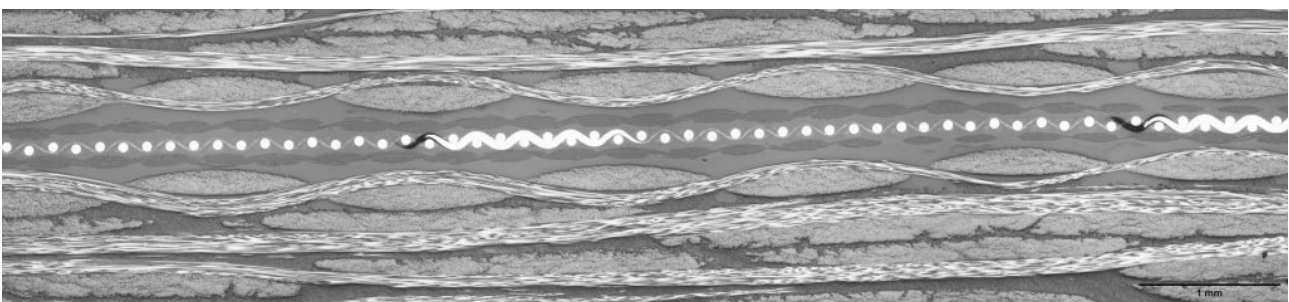


Abbildung 8: Schliffbildaufnahme eines widerstandsgeschweißten, matrixhybriden Laminats, Quelle: Cotesa GmbH

Um nicht nur ebene Laminats zu verschweißen, sondern auch die Machbarkeit von komplexeren Geometrien darzustellen, wurden zum Ende des Projektes auch Referenzstrukturen mit höherem Komplexitätsgrad hergestellt. Zum einen wurde ein flaches mittels RTM gefertigtes Laminat mit einem infusionshergestellt L-Profil mittels

Ultraschallschweißverfahren gefügt. L-Profile kommen im Bereich der Luftfahrt häufiger vor und sind daher eine geeignete Demonstration. Bei den Versuchen zur Referenzstruktur konnte gezeigt werden, dass typische prozessinduzierte Formabweichungen zu Schwierigkeiten im kontinuierlichen Verschweißprozess führten. Zudem muss

hierbei sichergestellt werden, dass die Bauteile ordnungsgemäß eingespannt werden können, damit es nicht zu einem zusätzlichen Verkippen der Bauteile kommt. Im späteren Serienprozess muss darüber hinaus sichergestellt werden, dass genügend Arbeitsraum für die Sonotrode zur Verfügung steht. Nachfolgend ist die ultraschweißte Referenzstruktur abgebildet, welche final im statischen Schweißverfahren gefertigt wurde.

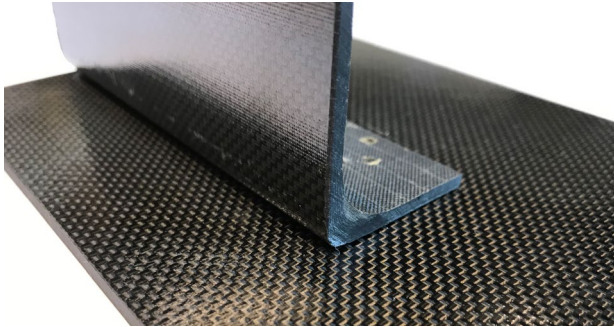


Abbildung 9: Demonstration eines ultraschallverschweißten L-Profiles auf einem matrixhybriden Laminat, Quelle: Faserinstitut Bremen e.V.

## Fazit

Die wissenschaftlich-technischen Ziele des Projekts wurden erreicht. Es wurde der Nachweis erbracht, dass mit Hilfe thermoplastisch basierter Laminatlagen auf der Oberfläche duroplastischer Bauteile das Fügen mittels Schweißverfahren möglich ist.

Mit der Anwendung matrixhybrider Systeme werden innovative Leichtbaulösungen möglich, die bisher aus Kostengründen gescheitert sind. Bis zur Serienreife sind weiterführende Forschungsarbeiten und eine umfassende Charakterisierung und Qualifizierung aller technologischen Teilschritte sowie der Werkstoffe erforderlich.

Diese neue Werkstoff-Technologie-Kombination muss für jede neue TP-TS-Werkstoffpaarung anwendungsspezifisch untersucht und bewertet werden.

## ➤ Verwertung und wirtschaftliche Bedeutung

Die Entwicklung hatte vorrangig zum Ziel, werkstoffliche und technologische Grundlagen zum Schweißen duroplastisch basierter Composite-Bauteile zu schaffen. Dieses Ziel wurde erreicht. Der anwendungsseitige Schwerpunkt lag im Bereich der Luftfahrt, auch manifestiert durch die exklusive Beschränkung auf durchaus kostenintensive Werkstoffe, wie Carbonfasern, Luftfahrt-zugelassener Harzsysteme und Hochleistungsthermoplaste als Schweißschicht.

Das Potenzial der Entwicklung liegt in einer deutlichen Senkung der Fertigungskosten, vor allem durch den Ersatz aufwendiger Klebevorgänge mit zusätzlichem Nieten durch Schweißverfahren. Dieser Vorteil ist auf einen breiten Anwenderkreis übertragbar, prinzipiell überall dort,

wo duroplastische Strukturbauteile in Fügeprozessen zu Baugruppen werden. Mögliche Einsatzbereiche außerhalb des Aviation-Sektors sind:

- Automobilbau,
- Nutzfahrzeugbau (LKW, Spezialfahrzeuge wie Feuerwehr, Mobilkräne usw.),
- Schienenfahrzeugbau,
- Schiffbau,
- Maschinenbau.

Die durchgehend oder partiell thermoplastische Oberfläche matrixhybrider Composites bietet weitere Vorteile neben dem Schweißen:

- Fertigung hochkomplexer Bauteile durch Komplettierung im Spritzgieß-Verfahren,
- Fertigung hochkomplexer Bauteile durch Komplettierung im 3D-Druck-Verfahren,
- Fertigung hochkomplexer Bauteile durch Komplettierung mit metallischen Fügepartnern.

Neue Aufgabengebiete und Technologieoptionen sind für folgende Branchen zu erwarten:

- Erweitertes Produktportfolio für Textilproduzenten mit Spezialgeweben zur Matrix-Kopplung, evtl. auch in der Ausrüstungsstufe „thermoplastisch teilkonsolidiert“,

- Teilkonsolidierte und hybride Prepregs als neue Halbzeuge für Prepreg-Hersteller,
- Hersteller und Zulieferer von Composite-Bauteilen mit hochkomplexem Vorfertigungsgrad bei geringeren Fügekosten,
- Eigenschafts- und Kostenvorteile bei Finalproduzenten und im Gebrauch.

Bereits während der Laufzeit wurde das Projekt auf Messen und Fachtagungen z. B. durch Vorträge präsentiert. Für die Zukunft sind weitere Veröffentlichungen und gemeinsame Messeauftritte der Projektpartner auf nationaler und internationaler Ebene geplant.

## ➤ Ausblick

Mit dem Projekt wurden die Grundlagen zum Schweißen duroplastischer FVK-Strukturen geschaffen. Dieser innovative Werkstoff- und Technologieansatz ist noch nicht serienreif. Das Projekt Matrixhybride war insbesondere werkstoffseitig Luftfahrt-getrieben. Das schließt auf Grund der extremen Sicherheitsvorschriften lange Entwicklungszeiten bis zur Anwendung in der aktuellen Flugzeug-Generation ein. Bis zur Anwendung in der nächsten Airbus-Generation sind weitergehende Forschungsarbeiten

notwendig. Um die entsprechende Zertifizierung zu erhalten, muss der neue Werkstoff alle Prüfnormen der Luftfahrt durchlaufen. Weitere Entwicklungsarbeiten sind auch in etwas weniger ambitionierten Branchen zu leisten. Das betrifft andere Thermoplast-Duroplast-Kombinationen und den jeweils konkreten Anwendungsfall mit dem zugehörigen Anforderungsprofil. Dazu sind kundenspezifische Entwicklungen in Form von Forschungsprojekten oder auch direkten Industrieaufträgen möglich.

## ➤ Impressum

### **Konsortialführer Projekt futureTEX:**

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

### **Postanschrift:**

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

### **Besucheradresse:**

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

### **Kontakt:**

Projektleitung: Dirk Zschenderlein  
E-Mail: [dirk.zschenderlein@stfi.de](mailto:dirk.zschenderlein@stfi.de)  
Tel.: +49 371 5274-283  
Fax: +49 371 5274-153  
[www.futuretex2020.de](http://www.futuretex2020.de)

### **Verbundkoordinator Umsetzungsvorhaben Matrixhybride:**

Cotesa GmbH  
Bahnhofstraße 67  
09648 Mittweida  
Ansprechpartner: Dr. Jakob Schulz  
Tel.: +49 3727 9985-161  
E-Mail: [schulz@cotesa.de](mailto:schulz@cotesa.de)

### **Lektorat und Gestaltung:**

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

**10/2021**

