

Abschlussbericht

„Ressourcenschonung durch Einsatz eines neuartigen Verfahrens zur Imprägnierung von Verstärkungsfaserstrukturen mit thermoplastischen Matrixmaterialien in kontinuierlichen Prozessen“

gefördert unter dem Az: 32276/01 von der

Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Laufzeit: 01.08.2014 – 31.07.2016

durchgeführt von: Tisora Sondermaschinen GmbH
Nordstraße 46
09113 Chemnitz



Unterauftragnehmer: Steinbeis - Forschungszentrum Automation in
Leichtbauprozessen

Chemnitz im September 2016

06/02

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az **32276_01**

Referat

Fördersumme 106.500 €

Antragstitel **Ressourcenschonung durch Einsatz eines neuartigen Verfahrens zur Imprägnierung von Verstärkungsfaserstrukturen mit thermoplastischen Matrixmaterialien in kontinuierlichen Prozessen**

Stichworte Thermoplastische Verbundwerkstoffe, Imprägnierung, Ultraschall

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
24 Monate	01.08.2014	31.07.2016	1

Zwischenberichte 1

Bewilligungsempfänger Tisora Sondermaschinen GmbH
Nordstraße 46
09113 Chemnitz

Tel + 49 371-461140
Fax + 49 371-4611447

Projektleitung
Gerd Zwinzscher

Bearbeiter
Herr Wickleder

Kooperationspartner

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Politische und ökonomische Ursachen wie z. B. steigende Energiepreise und Klimaschutzziele haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass Leichtbautechnologien auch für Großserienanwendungen z. B. im Automotive Bereich zum Einsatz kommen. Ein besonders hohes Leichtbaupotential kann durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen erschlossen werden, da diese eine belastungsgerechte Konstruktion durch gezielte Faserausrichtung ermöglichen. Zur Reduzierung von Taktzeiten und Erhöhung der Recyclingfähigkeit werden derzeit intensiv Prozessketten zur Verarbeitung thermoplastischer Halbzeuge, bei denen die Fasern bereits vollständig mit dem thermoplastischen Matrixmaterial imprägniert sind (z. B. Organobleche), entwickelt. Die Herstellung der Halbzeuge erfolgt im Moment hauptsächlich auf Doppelbandpressen, indem Kunststofffolien oder Kunststoffpulver mittels Wärmeleitung aufgeschmolzen und durch hohen Druck in die textile Verstärkungsstruktur gepresst werden. Dieses Verfahren weist allerdings erhebliche Nachteile hinsichtlich des Energiebedarfs auf: Es soll daher ein Verfahren entwickelt werden, bei dem der Energieeintrag in den Matrixkunststoff mittels Ultraschall erfolgt. Durch die Substitution des Wirkprinzips werden Energieeinsparungen bei der Imprägnierung von 50 - 55% angestrebt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Bei dem zu entwickelnden Ultraschallimprägnierverfahren wird der Kunststoff durch innere Reibung plastifiziert und durch Mikrobewegungen in die textile Struktur transportiert. Durch den gezielten lokalen Energieeintrag sollen folgende Ziele erreicht werden:

- Verbesserung der Energieeffizienz durch die Vermeidung von Wärmestrahlung und Konvektion an heißen Maschinenteilen
- Verbesserung der Energieeffizienz durch die Vermeidung der variothermen Temperierung von Arbeitsorganen
- Verbesserung der Energieeffizienz durch den Wegfall von Aufheiz- und Abkühlzeiten beim Stillstand der Anlage
- Verbesserung der Energieeffizienz durch Reduzierung der Presskräfte (Linienberührung statt Flächenberührung)
- Verbesserung der Imprägnierqualität durch Ultraschallanregung der Schmelze
- Reduzierung der thermischen Degradation des Matrixmaterials durch kurze Einwirkzeiten

Zum Erreichen der Zielstellung wird mithilfe einer diskontinuierlich arbeitenden Ultraschallanlage eine grundlegende Technologie entwickelt. Basierend auf der Technologie erfolgt die Realisierung einer Demonstratoranlage zur Abbildung des kontinuierlichen Serienprozesses.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des FuE-Vorhabens wurde eine kontinuierliche Ultraschallimprägnieranlage entwickelt, gebaut und erprobt, welche die Plastifizierung der Matrix nach dem Prinzip der inneren Reibung für eine energieeffiziente Imprägnierung thermoplastbasierter Faserverbundhalbzeuge erlaubt. Die Ultraschallschwingungen erzeugen sowohl Materialverformungen, insbesondere im Matrixwerkstoff, als auch Relativbewegungen zwischen den Fasern und der Kunststoffschmelze.

Die Demonstratoranlage auf Basis der innovativen Prozesstechnologie zeigt, wodurch der Kunststoff in einen schmelzeflüssigen Zustand übergeht und unter Druck die Fasern imprägniert. Die Imprägnierqualität bzw. -tiefe ist dabei abhängig vom Aufbau des Faserbettes sowie des verwendeten Matrixmaterials. Die Materialeignung kann mit Hilfe des Flächengewichtes des Textils und des Melt-Flow-Index (MFI) des Matrixwerkstoffes abgeschätzt werden. Für eine vollständige Imprägnierung haben sich aus den Versuchen folgende Materialgrenzwerte für Verbundwerkstoffe aus Glasfasern und Polypropylenmatrix ergeben:

- MFI (130°C, 2.16 kg) > 2,1 g/10 min
- Textilflächengewicht < 120 g/m²

Für eine hohe Produktivität und ein hohen Imprägnierungsgrad wurden in diesem Projekt die optimalen Prozessparameter ermittelt und aufgezeigt. Für die verwendeten Materialien hat sich eine Imprägniergeschwindigkeit von 0,1 m/min eingestellt. Dies ermöglicht eine Austragsmenge der Demonstratoranlage im Labormaßstab von ca. 0,5 m²/h. Durch geeignete Optimierung des Lagenaufbaus bezüglich der Viskosität des Matrixmaterials und der Faserdichte der textilen Verstärkungsstruktur ist eine Steigerung der Imprägniergeschwindigkeit möglich.

Die angestrebte Energieersparnis von ca. 54% wird mit der entwickelten Technologie nicht nur erreicht, sondern auch übertroffen. Für die kontinuierliche Ultraschallimprägnier-Demonstratoranlage wird eine Energieeinsparung von ca. 63% erreicht, die mit einer Reduzierung der CO₂-Emissionen verbunden ist. Eine Neuanlage im industriellen Maßstab ermöglicht eine CO₂-Einsparung von 296 t im Vergleich zu einer herkömmlichen Imprägnierung mit einer Doppelbandpresse, bei der die Plastifizierung des Matrixmaterials mittels Wärmeleitung erfolgt.

Die entwickelte Technologie bietet darüber hinaus Potential für weiterführende Entwicklungen, hierzu können Optimierungen hinsichtlich der Materialqualität und Steigerung der Produktivität durchgeführt werden. So können beispielsweise eine Faserspreizeinrichtung oder Hybridgarn zum Einsatz kommen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die entwickelte Ultraschallimprägnier-Technologie wird mit einem Poster auf der ThermoPre-Fachtagung am 27./28. September 2016 in Chemnitz vorgestellt (siehe Anhang). Des Weiteren sind Veröffentlichungen für die DGM-Verbundwerkstofftagung am 5.-7. Juli 2017 in Bremen und für die TECHNOMER am 9./10. Oktober 2017 in Chemnitz in Vorbereitung. Die Firma TISORA GmbH ist außerdem auf der Messe Hannover vom 24. bis 28. April 2017 zum Thema: Gemeinschaftsstand „Technologie aus Sachsen“ anzutreffen.

Fazit

Die innovative Technologieentwicklung reduziert den Energiebedarf zur Herstellung thermoplastbasierter Hochleistungsfaserverbundhalbzeuge deutlich, durch Einsparung von ca. 63% der Energie im Vergleich zu herkömmlichen Imprägnierungsverfahren mittels Doppelbandpresse. Damit stellt das durchgeführte FuE-Projekt einen wichtigen Beitrag zur energie- und kosteneffizienten Großserienfertigung von imprägnierten, thermoplastischen, textilen Halbzeugen dar, welche insbesondere für die notwendige Entwicklung umwelt- und ressourcenschonende Leichtbautechnologien für Großserienanwendungen im Automotive Bereich eine Grundvoraussetzung darstellen.

Einen zusätzlichen Nutzen bietet die Technologie bei der Herstellung von Halbzeugen in kleinen Mengen für Forschungs- und Musterproduktionen, da bereits mit geringen Materialmengen ein Betrieb der Anlage möglich ist.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Bildern, Abkürzungen und Definitionen	7
1 Zusammenfassung	9
2 Einleitung	10
3 Vorhabensdurchführungen und -ergebnisse	13
3.1 Beschreibung und Bearbeitung der einzelnen Arbeitsschritte und deren Ergebnisse	13
3.1.1 Voruntersuchungen	13
3.1.2 Entwicklung und Realisierung der Demonstratoranlage	16
3.1.3 Untersuchungen zum kontinuierlichen Imprägnieren von textilen Halbzeugen mittels Ultraschall	19
3.1.4 Entwicklung von Prüfmethoden	21
3.2 Diskussion der Ergebnisse	28
3.2.1 Möglichkeiten und Grenzen des Imprägnierverfahrens	28
3.3 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse	30
3.3.1 Versuchsaufbau zur Bewertung der Projektergebnisse	30
3.3.2 Energiebilanz im Vergleich zu konventionellen Verfahren	31
3.3.3 Weitere ökologische Aspekte	33
3.3.4 Ökonomische Bewertung des entwickelten Imprägnierverfahrens	34
3.4 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	35
3.4.1 Präsentation der entwickelten Technologie im Rahmen wissenschaftlicher Tagungen	35
3.4.2 Präsentation auf Messen und in Fachzeitschriften	36
3.4.3 Nutzung von Synergieeffekten in der Zusammenarbeit mit dem Steinbeisforschungszentrum ALP und der TU Chemnitz	36
4 Fazit	38

5	Literaturverzeichnis	41
	Anhänge	43

Verzeichnis von Bildern, Abkürzungen und Definitionen

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipskizze des geplanten kontinuierlichen Ultraschallimprägnierverfahrens	11
Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Ermittlung von Prozesskennwerten im diskontinuierlichen Vorversuch	13
Abbildung 3: Vergleich zwischen dem Prozessverlauf des Ultraschallschweißens links (Her14), und der Ultraschallimprägnierung von Textilien rechts (Hal15)	14
Abbildung 4: CePreg Material.....	14
Abbildung 5: Schliffproben von Vorversuchen mit verschiedenen Imprägnierungsgraden.....	15
Abbildung 6: Probe mit oxidierte Oberfläche	15
Abbildung 7: OIT-Kurven von CePreg im Ausgangszustand (links) und nach der vollständigen Imprägnierung (rechts)	16
Abbildung 8: Prozesskennwertefenster der Vorversuche (Hal15)	16
Abbildung 9: CAD-Modell der entwickelten Demonstratoranlage	17
Abbildung 10: CAD-Modell der zentralen Wirkstelle	17
Abbildung 11: Mechanischer Aufbau der Demonstratoranlage.....	18
Abbildung 12: Temperaturverlauf der Sonotrode	20
Abbildung 13: Längsschliff imprägnierter Glasfasern	20
Abbildung 14: Einspannvorrichtung Zugversuch	22
Abbildung 15: Einspannvorrichtung für T-Schälversuch	23
Abbildung 16: T-Schälversuch einer unzureichend imprägnierten Probe - Kraft-Weg-Diagramm (links) und Bruchbild (rechts).....	23
Abbildung 17: T-Schälversuch einer vollständig imprägnierten Verbundprobe - Kraft-Weg-Diagramm (links) und Bruchbild (rechts)	24
Abbildung 18: links: Abmaße der Faserbündelauszugsproben, rechts: gezielte Faservorschädigung der Faserbündelauszugsproben.....	25
Abbildung 19: unzureichend imprägnierte Faserbündelauszugsprobe - Kraft-Weg-Diagramm (links) und Bruchbild (rechts).....	25

Abbildung 20: Faserbündelauszugsversuchs einer unzureichend imprägnierten Probe - Kraft-Weg-Diagramm (links) und Bruchbild (rechts)	26
Abbildung 21: Utensilien für Wassereindringtest	27
Abbildung 22: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Leistungsmessung	31
Abbildung 23: Energiebedarfsvergleich bei der Imprägnierung von Faserhalbzeugen	32
Abbildung 24: Konsolidierung einzelner, ultraschallimprägnierter Verbundproben zu einem Mehrlagenaufbau	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Potential zur Senkung des Energiebedarfs und des CO ₂ Ausstoßes durch die Anwendung des zu entwickelnden Imprägnierverfahrens.....	12
Tabelle 2: Entwicklung der Bandführung an der Zentralen Wirkstelle vom Konzept zur realisierten Lösung	19
Tabelle 3: Vergleich der Imprägnierqualität in Abhängigkeit des Lagenaufbaus	28
Tabelle 4: Übersicht über geeignete Prozessparameter.....	29
Tabelle 5: Vergleich der Leistung der Demonstratoranlage mit dem Stand der Technik und der Zielstellung des Forschungsprojektes	32
Tabelle 6: Anlagenabsatz und Gesamtbilanz von Energie und CO ₂ -Emission im Vergleich zum konventionellen Imprägnierverfahren mittels Doppelbandpresse (vgl. (Umw15)und (Eur15)).....	35
Tabelle 7: Forschungsansätze zur weiteren Verbesserung des entwickelten Verfahrens.....	40

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Entwicklungsprojektes „Ressourcenschonung durch Einsatz eines neuartigen Verfahrens zur Imprägnierung von Verstärkungsfaserstrukturen mit thermoplastischen Matrixmaterialien in kontinuierlichen Prozessen“ wurde ein neuartiges Verfahren zur Herstellung von thermoplastischen Halbzeugen entwickelt.

Das auf der Ultraschalltechnologie basierende Verfahren ermöglicht die Imprägnierung von bandförmigen textilen Halbzeugen mit thermoplastischen Matrixmaterialien im „film-stacking-Verfahren“. Durch das Aufschmelzen des Kunststoffes mittels innerer Reibung anstatt durch Wärmeleitung erfolgt die Imprägnierung sehr energieeffizient. Die durch den Ultraschall erzeugte Scherung des Materials senkt die Viskosität der Schmelze, wodurch eine im Verhältnis zum Imprägnierdruck und zur Imprägnierdauer hohe Eindringtiefe des Matrixmaterials erreicht wird.

Im Rahmen des Projektes wurde eine zielgerichtete Entwicklung von diskontinuierlichen Machbarkeitsstudien über die Entwicklung einer Demonstratoranlage bis hin zur Erprobung der kontinuierlichen Technologie durchgeführt. Zur Sicherstellung des Projektfortschritts erfolgten projektbegleitend umfangreiche Untersuchungen zur Charakterisierung der Materialien und Prozesse.

2 Einleitung

Politische und ökonomische Ursachen wie z. B. steigende Energiepreise und Klimaschutzziele haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass Leichtbautechnologien auch für Großserienanwendungen z. B. im automotive Bereich zum Einsatz kommen. Ein besonders hohes Leichtbaupotential kann durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen erschlossen werden, da diese eine belastungsgerechte Konstruktion durch gezielte Faserausrichtung ermöglichen.

Die für Großserienanwendungen notwendigen Taktzeiten bei der Bauteilherstellung sind mit den derzeit eingesetzten duroplastischen Matrixsystemen jedoch nicht realisierbar. Ein weiterer Nachteil duroplastischer Werkstoffe ist die Recyclingfähigkeit, da diese nahezu ausschließlich thermisch verwertet werden können.

Thermoplastische Faserverbundwerkstoffe hingegen können am Ende der Produktlebensdauer granuliert und als hochwertiges langfaserverstärktes Material im Spritzgießprozess stofflich verwertet werden. Daher werden derzeit intensiv Prozessketten zur Verarbeitung thermoplastischer Halbzeuge, bei denen die Fasern bereits vollständig mit dem thermoplastischen Matrixmaterial imprägniert sind (z. B. Organobleche), entwickelt.

Die Herstellung der notwendigen Halbzeuge erfolgt nach dem derzeitigen Stand der Technik hauptsächlich auf Doppelbandpressen, indem Kunststofffolien oder Kunststoffpulver mittels Wärmeleitung aufgeschmolzen und mittels Druck in die textile Verstärkungsstruktur gepresst werden. Dieses Verfahren weist allerdings erhebliche Nachteile hinsichtlich der Energieeffizienz auf:

- Große Mengen an Energie, die aus den beheizten Maschinenteilen nicht an die Halbzeuge abgegeben werden, werden über Wärmestrahlung und Konvektion an die Umgebung abgegeben.
- Um ein großflächiges Anhaften der Kunststoffschmelze an der Presse zu verhindern, müssen die Oberflächen der Verbundwerkstoffe und Arbeitsorgane nach der Imprägnierung gekühlt werden.
- Aufgrund der großen Flächen der Presse sind zum Erreichen des zur Imprägnierung notwendigen Drucks große Kräfte notwendig.

- Der Energieeintrag in das Matrixmaterial mittels Wärmeleitung benötigt verhältnismäßig hohe Prozesszeiten, da Kunststoffe nur eine geringe thermische Leitfähigkeit aufweisen; insbesondere bei dicken Halbzeugen ($s > 2 \text{ mm}$).

Aufgrund der Nachteile der Herstellung thermoplastischer Faserverbundhalbzeuge mittels Doppelbandpresse werden derzeit alternative Verfahren erforscht, bei denen der Druck mittels Kalandrierwalzen aufgebracht wird (Hei07). Infolge der kurzen Dauer, die das Halbzeug im Eingriff ist, erfolgt vor allem bei technischen Kunststoffen mit höheren Schmelztemperaturen keine ausreichende Imprägnierung, da der Energieeintrag mittels Wärmeleitung zu gering ist. Daher wird entweder eine Teilimprägnierung in Kauf genommen oder eine vorgelagerte Erwärmung mittels Infrarotstrahlung durchgeführt. Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts wurde daher ein Verfahren entwickelt, bei dem der Energieeintrag in den Matrixkunststoff mittels Ultraschall erfolgt (siehe Abbildung 1).

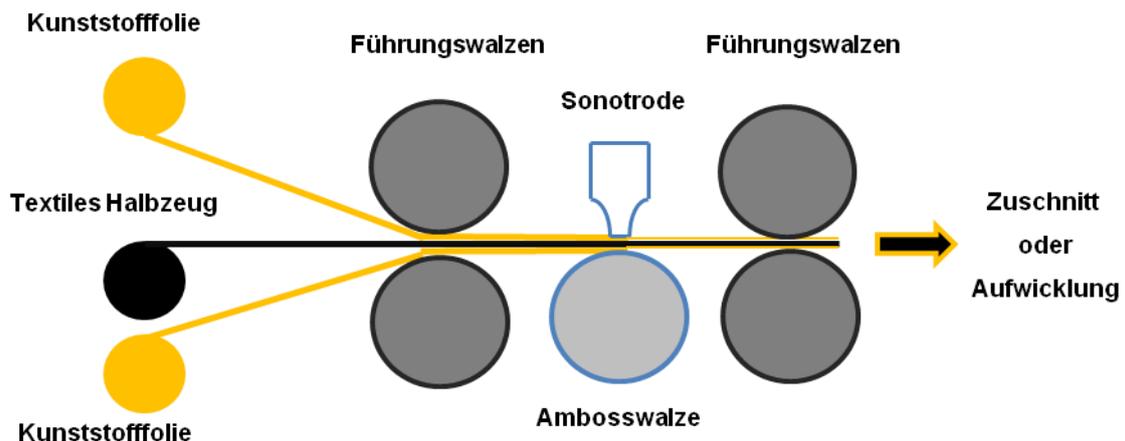


Abbildung 1: Prinzipskizze des geplanten kontinuierlichen Ultraschallimprägnierverfahrens

Dabei wird Kunststoff durch innere Reibung und nicht durch Wärmeleitung plastifiziert. Für das Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurden folgende Zielstellungen gesetzt.

- Verbesserung der Energieeffizienz durch die Vermeidung von Wärmestrahlung und Konvektion an heißen Maschinenteilen,
- Verbesserung der Energieeffizienz durch die Vermeidung der dynamischen Temperierung von Arbeitsorganen,

- Verbesserung der Energieeffizienz durch Reduzierung der Presskräfte (Linienberührung statt Flächenberührung),
- Verbesserung der Imprägnierqualität durch Ultraschallanregung der Schmelze,
- Reduzierung der Faserverschiebung durch Imprägnierung mittels Ultraschall anstelle reiner Krafteinwirkung,
- Reduzierung der Prozesszeit durch Plastifizierung mittels innerer Reibung anstelle von Wärmeleitung.

Bedingt durch die hohen Materialkosten von Faserverbundwerkstoffen ist es für eine wirtschaftliche Bauteilgestaltung notwendig die Prozesskosten während des gesamten Verarbeitungsprozesses deutlich zu reduzieren. Die durchgeführte Entwicklung eines Ultraschallimprägnierverfahrens stellt einen wichtigen Beitrag zur Erfüllung dieser Zielstellungen dar, da es bei einer Weiterentwicklung vom Demonstratorprozess zur Serientauglichkeit eine Reduzierung des Energiebedarfs zur Halbzeugherstellung um ca. 54% ermöglicht, was bei einer Serienanlage eine Energieeinsparung von ca. 422 MWh entspricht. (s. Tabelle 1)

Tabelle 1: Potential zur Senkung des Energiebedarfs und des CO₂ Ausstoßes durch die Anwendung des zu entwickelnden Imprägnierverfahrens

Anlagenparameter einer US-Serienanlage	Symbol	Einheit	Serienanlage mit Ultraschall-imprägnierung
Energiebedarf pro Fläche	W_A	kWh/m ²	1,56
Arbeitsbreite	b	mm	1.000
Vorschubgeschwindigkeit	v	m/min	1,2
Produktionsleistung je h	A_p	m ² /h	72,0
Produktionsdauer im Jahr	t_p	h/a	4.000
Auslastung	I_A	%	80
Produktionsmenge im Jahr	A_p	m ² /a	230.400
Energiebedarf einer Serienanlage im Jahr ($W_M = W_A * A_p$)			
	W_M	kJ/a	1.296.000.000
	W_M	kWh/a	360.000
Energieeinsparung einer Serienanlage im Jahr ($\Delta E_M = \Delta E_A * A_p$)			
	ΔE_M	kJ/a	-1.520.000.000
	ΔE_M	kWh/a	-422.222

3 Vorhabensdurchführungen und -ergebnisse

3.1 Beschreibung und Bearbeitung der einzelnen Arbeitsschritte und deren Ergebnisse

3.1.1 Voruntersuchungen

Als Basis für die Entwicklung der Demonstratoranlage wurden umfangreiche Untersuchungen zur Ermittlung kritischer Kenngrößen der zu entwickelnden Ultraschallimprägnierungstechnologie durchgeführt. Um die Reproduzierbarkeit der Versuche sicher zu stellen, wurde die in Abbildung 2 dargestellte Vorrichtung entwickelt.

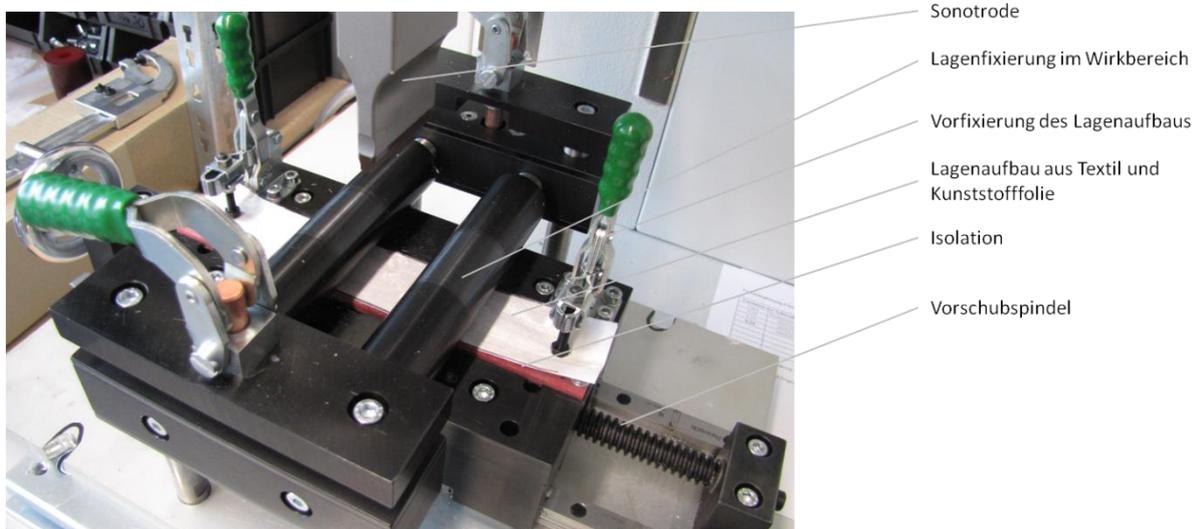


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Ermittlung von Prozesskennwerten im diskontinuierlichen Vorversuch

Mittels dieser Vorrichtung ist es möglich in ausgewählte Lagenaufbauten positionsgenau Ultraschallschwingungen einzubringen. Als Ultraschallquelle diente dabei eine diskontinuierlich arbeitende Ultraschallschweißmaschine. Der für das Imprägnieren von textilen Halbzeugen modifizierte Prozessablauf ist in Abbildung 3 im Vergleich zum konventionellen Schweißverlauf dargestellt.

Die Eigenschaften des herzustellenden thermoplastischen Verbundmaterials werden hauptsächlich durch drei Einflussgrößen bestimmt:

- Matrixmaterial
- Textiles Halbzeug
- Imprägnierprozess

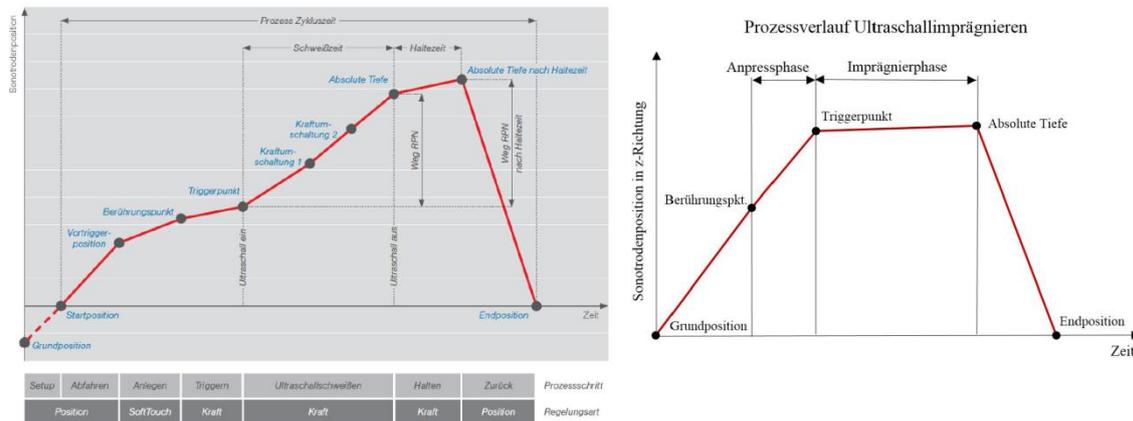


Abbildung 3: Vergleich zwischen dem Prozessverlauf des Ultraschallschweißens links (Her14), und der Ultraschallimprägnierung von Textilien rechts (Hal15)

Um den Prozess anhand des Verbundmaterials unabhängig von den zwei anderen Faktoren bewerten zu können, wurde für die Untersuchungen auf ein vorfixiertes Ausgangsmaterial mit aufgespreizten Fasern (CePreg der Firma CETEX gGmbH) verwendet. Der Aufbau des Materials ist in Abbildung 4 dargestellt.

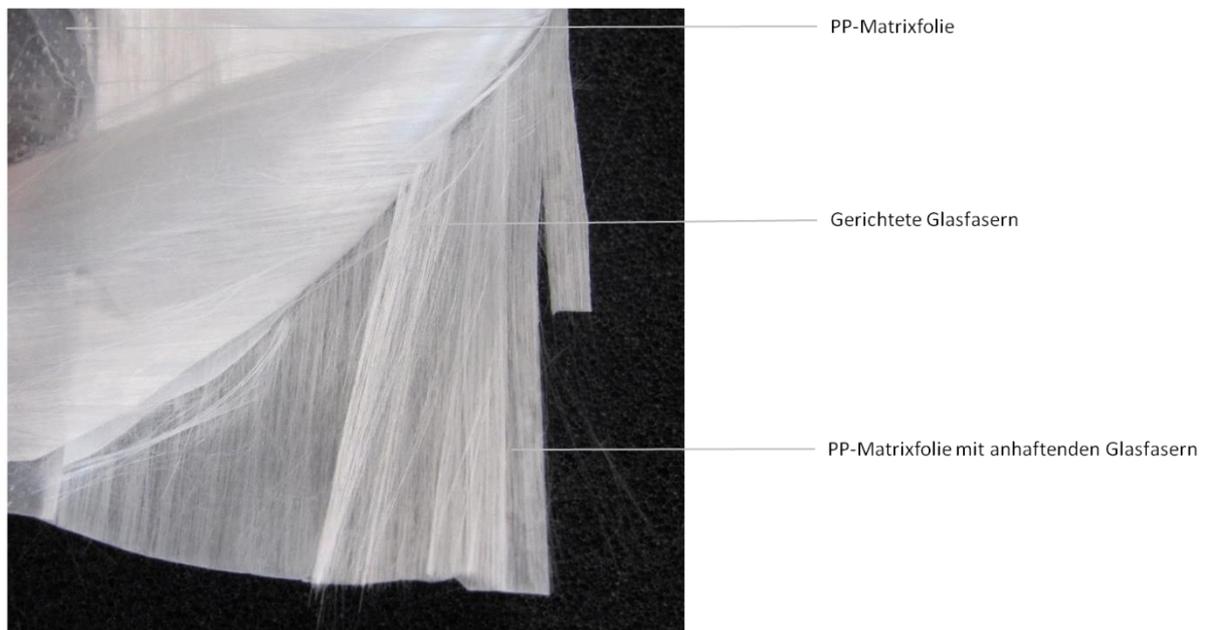


Abbildung 4: CePreg Material

Durch eine systematische Variation der Parameter konnte die Imprägnierung, wie in Abbildung 5 dargestellt, durch eine Steigerung des Energieeintrages in das Material signifikant bis hin zu einer vollständigen Durchdringung des Materials gesteigert werden.

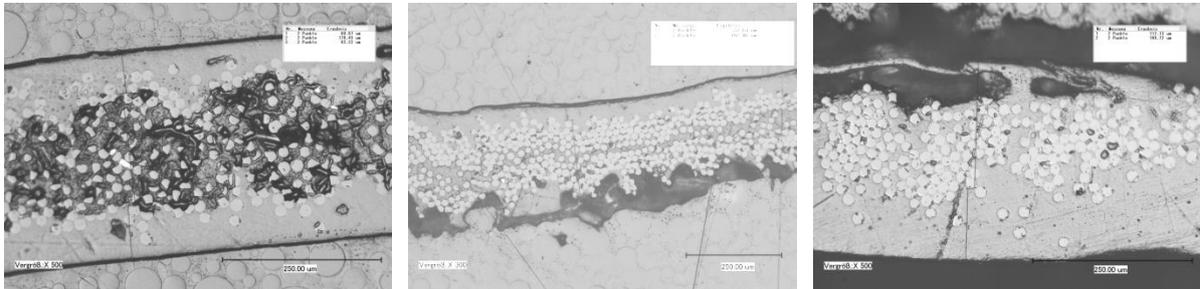


Abbildung 5: Schliffproben von Vorversuchen mit verschiedenen Imprägnierungsgraden

Die obere Grenze der durch Pressdruck, Einwirkzeit und Amplitude definierten Imprägnierleistung bildet die Oxidation der Matrix, welche optisch durch eine bräunliche Verfärbung der Oberfläche sichtbar wird (vgl. Abbildung 6).

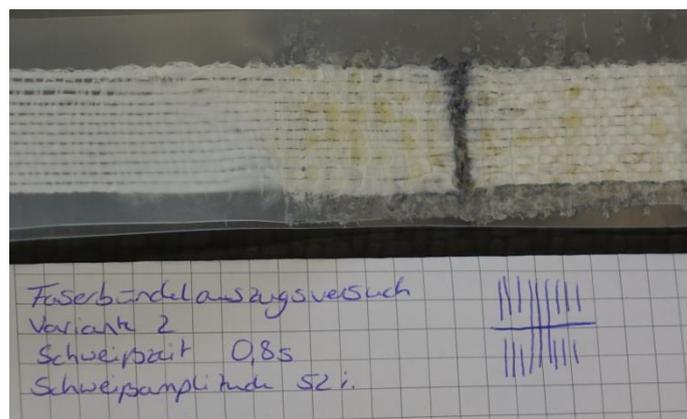


Abbildung 6: Probe mit oxidierter Oberfläche

Der Grad der Oxidation bzw. der Grad des Abbaus der Antioxidationsadditive im Matrixmaterial lässt sich mittels OIT-Analyse ermitteln, bevor sichtbare Verfärbungen auftreten. Anhand der in Abbildung 7 gezeigten isothermen OIT-Kurven lässt sich eine Reduzierung der Schutzdauer vor Oxidation um ca. 25 % durch die Imprägnierung erkennen.

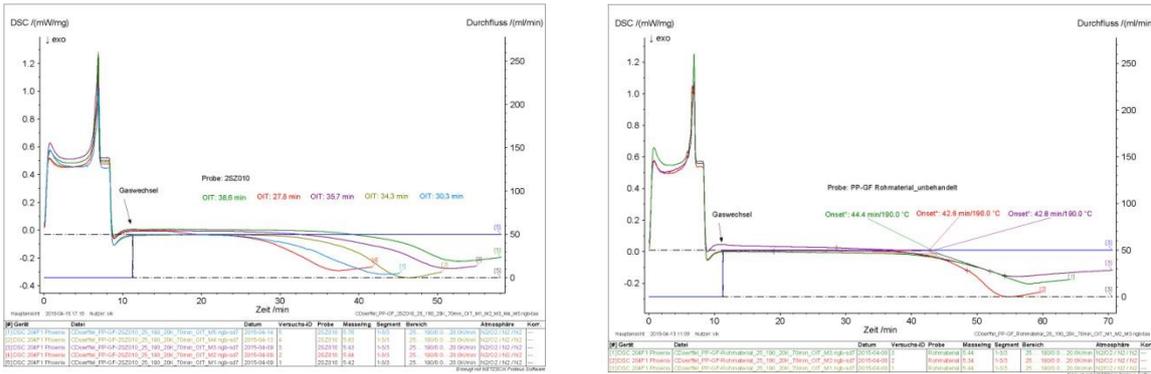


Abbildung 7: OIT-Kurven von CePreg im Ausgangszustand (links) und nach der vollständigen Imprägnierung (rechts)

Aus den Vorversuchen konnte für die verwendeten Materialien das in Abbildung 8 dargestellte Prozesskennwertefenster ermittelt werden.

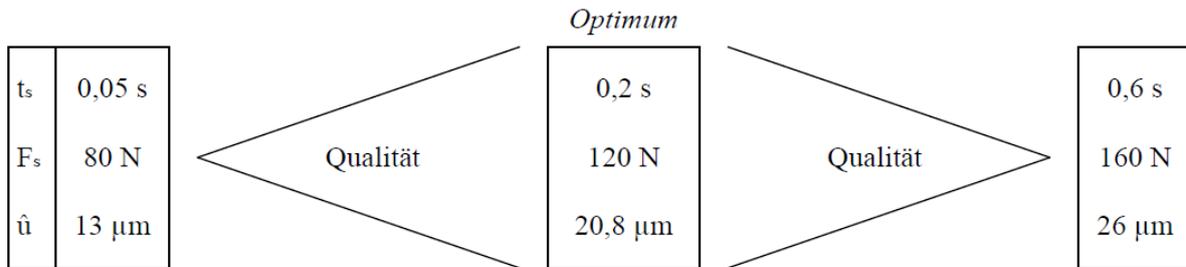


Abbildung 8: Prozesskennwertefenster der Vorversuche (Hal15)

Diese Kennwerte bilden die Grundlage der Demonstratoranlagenentwicklung.

3.1.2 Entwicklung und Realisierung der Demonstratoranlage

Nach Abschluss der Voruntersuchungen wurde mit der Entwicklung der Demonstratoranlage begonnen. Schwerpunkte waren dabei die Entwicklung des Anlagenkonzeptes, wie es in Abbildung 9 dargestellt ist, der Prozesssteuerung und der zentralen Wirkstelle.

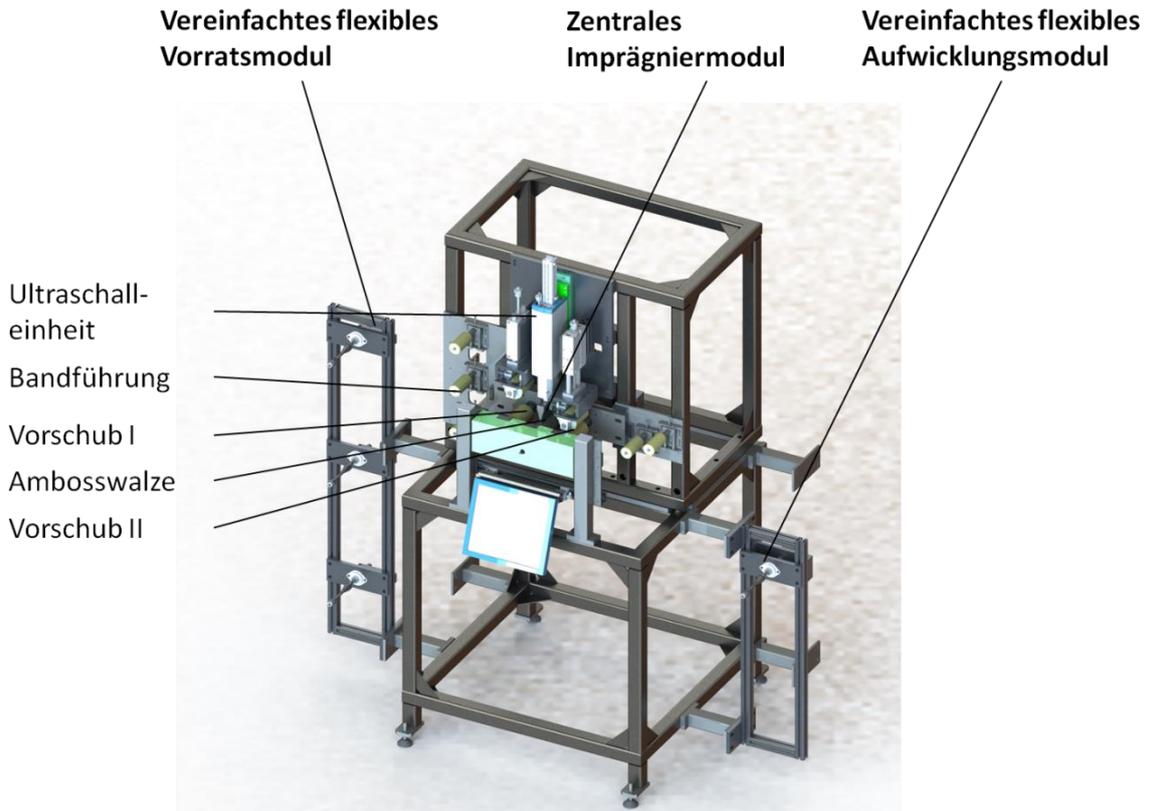


Abbildung 9: CAD-Modell der entwickelten Demonstratoranlage

Diese Zentrale Wirkstelle mit ihren zahlreichen Funktionselementen, die für das Funktionieren des Imprägnierprozesses verantwortlich sind, ist in Abbildung 10 dargestellt.

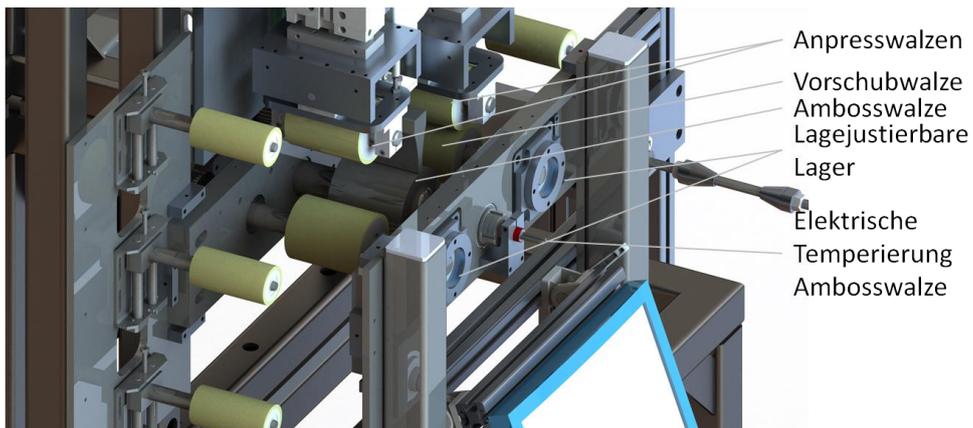


Abbildung 10: CAD-Modell der zentralen Wirkstelle

Die entwickelte Demonstratoranlage wurde realisiert (siehe Abbildung 11) und in Betrieb genommen.

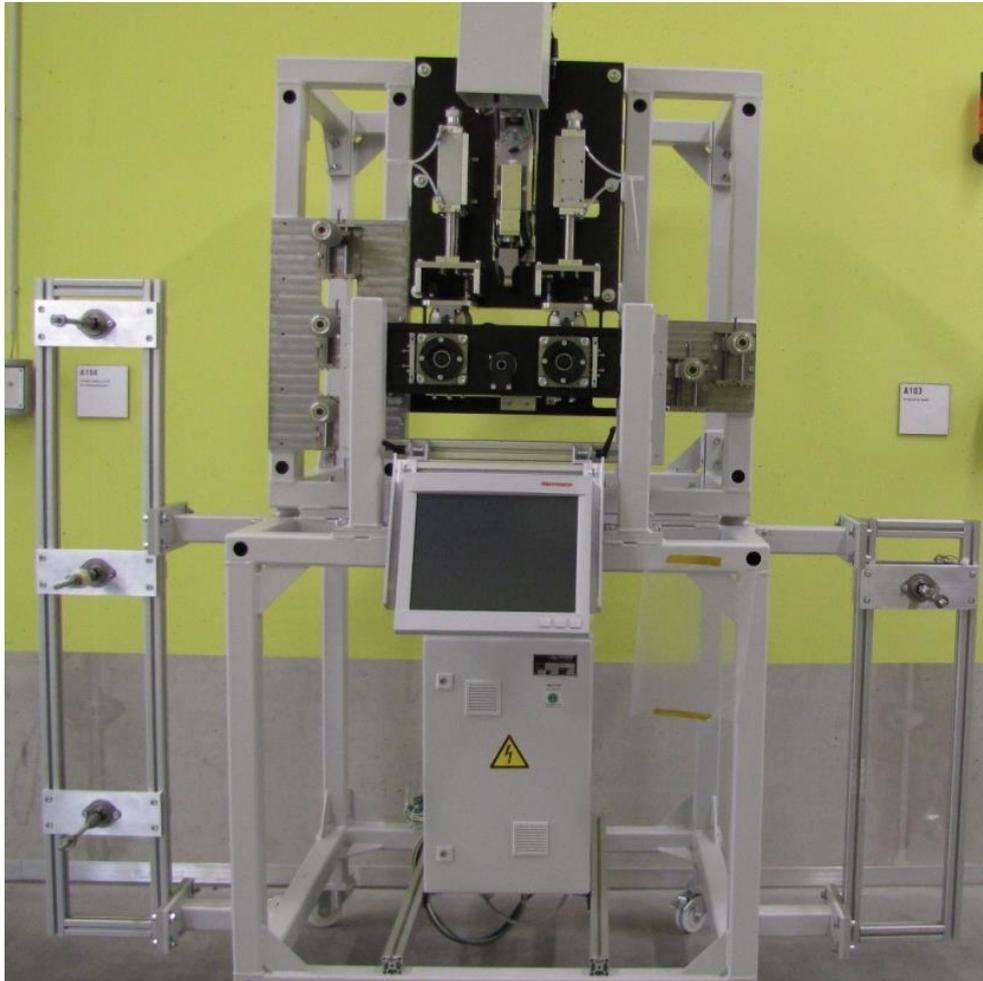
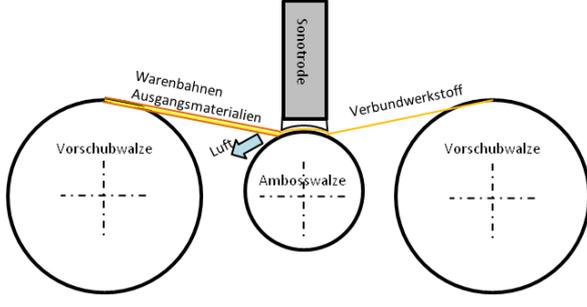
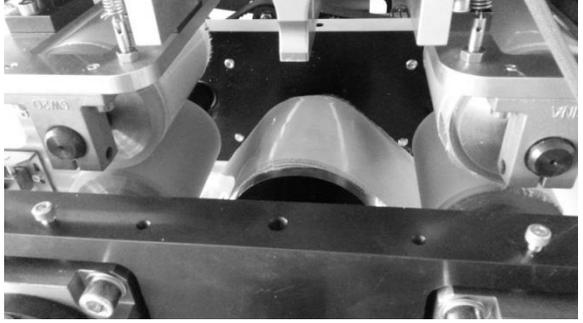


Abbildung 11: Mechanischer Aufbau der Demonstratoranlage

Während der Inbetriebnahme wurde die Anlage, wie in Tabelle 2 am Beispiel der Bandführung an der Wirkstelle dargestellt, den auftretenden Herausforderungen beim Imprägnieren von Textilien mit thermoplastischen Werkstoffen mittels Ultraschall angepasst. Das modulare Anlagen- und Steuerungskonzept ermöglicht hier das notwendige hohe Maß an Flexibilität.

Tabelle 2: Entwicklung der Bandführung an der Zentralen Wirkstelle vom Konzept zur realisierten Lösung

Konzept	Realisierte Lösung
	
<p>Zielstellung: Vergrößerung der Wirkzone des Ultraschalls bei möglichst geringer Kontaktfläche zur Ambosswalze zur Entlüftung</p>	<p>Herausforderungen bei der Anlagenerprobung: Abriss der Foliendecklage an der Sonotrodenkante Schlupf an den Vorschubwalzen</p>
	<p>Lösungsprinzip: Optimierung des Einlaufwinkels an der Ambosswalze Kombination aus Anpressdruck und Umschlingung zur Erhöhung an den Transportwalzen</p>

3.1.3 Untersuchungen zum kontinuierlichen Imprägnieren von textilen Halbzeugen mittels Ultraschall

Zur Charakterisierung der Kennwerte des kontinuierlichen Prozesses wurden umfangreiche Versuchsreihen durchgeführt. Dabei wurden Parameter wie z.B. die Sonotrodentemperatur (s. Abbildung 12), die für die Verarbeitung der Deckfolie von zentraler Bedeutung ist, messtechnisch unter verschiedenen Prozesseinstellungen erfasst. Detaillierte Ergebnisse der Versuchsreihen sind in Punkt 3.2.1 dargestellt und diskutiert.

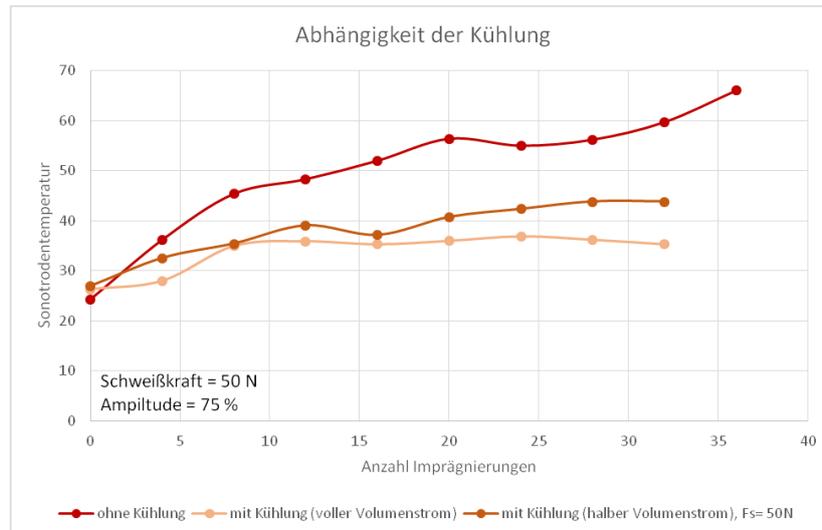


Abbildung 12: Temperaturverlauf der Sonotrode

Aufgrund der hochfrequenten dynamischen Schwelllast, die während des Imprägniervorgangs auf die Verstärkungsfasern wirkt, besteht die Gefahr einer Zerstörung der Fasern während des Imprägniervorgangs. In Abbildung 13 ist deutlich zu erkennen, dass die Integrität der Fasern während des Prozesses erhalten bleibt und Faserbrüche nur im Ausnahmefall auftreten. Die Dämpfungseigenschaften der Matrixfolie und des textilen Aufbaus schützen die Fasern in ausreichendem Maße. Vereinzelt Faserbrüche, wie sie in Abbildung 13 dargestellt sind, haben keinen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit und treten bei allen Verarbeitungsverfahren auf.

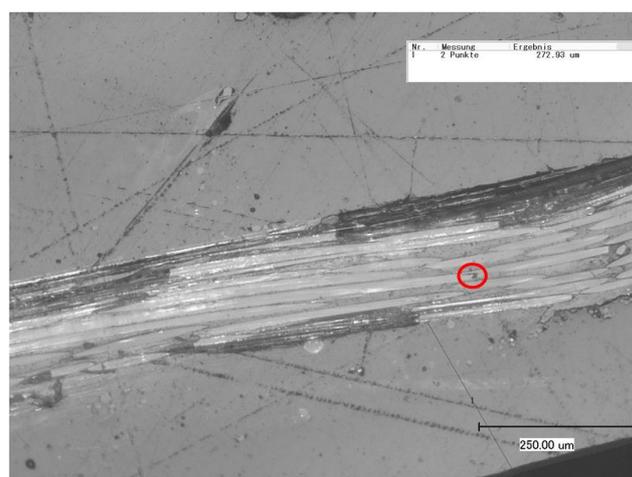


Abbildung 13: Längsschliff imprägnierter Glasfasern

3.1.4 Entwicklung von Prüfmethoden

Aufgrund des hohen Aufwands und des starken Bedienerinflusses bei der Herstellung und Auswertung von Schliffproben, wurden im Rahmen des Projektes Methoden zur Materialcharakterisierung untersucht und für den Anwendungsfall modifiziert.

Die Prüfmethoden wurden hinsichtlich den Qualitätskriterien der Matrixschädigung, den mechanischen Festigkeitskennwerten des Verbundes, der Imprägnierqualität und der damit verbundenen Faser-Matrix Haftung entwickelt und modifiziert.

Zur Charakterisierung der Matrix kam eine isotherme Oxidationsinduktionszeit (OIT)-Messung zum Einsatz. Diese dient zur Bestimmung des Oxidationsverhaltens der Matrix. Für die Untersuchung der isothermen OIT erfolgt die Aufheizung der Proben bei einer Temperatur von 190 °C unter Inertgas. Im Anschluss daran findet ein Gaswechsel statt. Dieser erfolgt von Inertgas auf synthetische Luft. Ab diesem Zeitpunkt wird die Zeit bis zum Start der Oxidation gemessen. Die Oxidation ist als exothermer Abfall in der DSC-Zeit-Kurve ersichtlich. Die Prüfung der Oxidationsbeständigkeit des Matrixmaterials zeigt, dass mit jedem weiteren Verarbeitungsvorgang (Granulatherstellung, Folienextrusion, Ultraschall-imprägnierung des Verbundes, etc.) eine weitere Schädigung des Matrixmaterials auftritt und mit einer Senkung der Oxidationsinduktionszeit einhergeht. Es kommt zur Polymerschädigung durch Wärmeenergie bei Anwesenheit von Sauerstoff. Dies führt wiederum zu Materialversprödung und Vergilbung.

Zur Bestimmung der mechanischen Festigkeitskennwerte des Faserverbundes kann ein Zugversuch zum Einsatz kommen. Der Zugversuch erfolgt in Anlehnung an den Zugversuch für unidirektional faserverstärkte Kunststoffe nach DIN EN ISO 527-5. Der Zugversuch wird an einer statischen Prüfmaschine durchgeführt. Die Einspannlänge der Proben beträgt 70 mm und die Prüfgeschwindigkeit 2 mm/min.

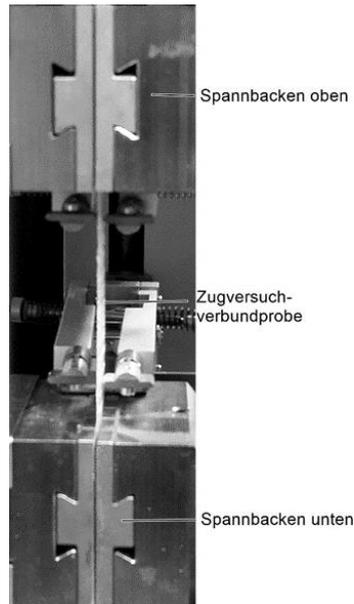


Abbildung 14: Einspannvorrichtung Zugversuch

Mit dem Zugversuch wird das Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgenommen, welches Rückschlüsse auf Materialkennwerte, wie z.B. E-Modul, Zugfestigkeit und Dehnungsvermögen ermöglicht. Die ermittelten Festigkeitskennwerte dienen zum Vergleich und zur Beurteilung mit denen anderer Materialien.

Zur Bestimmung des Imprägnierungsgrades und der Haftung zwischen Faser und Matrix kamen mehrere Prüfmethode zum Einsatz. Aufgrund der für Verbundwerkstoffe kritischen Belastung ist der Schälversuch für diese Untersuchungen von besonderer Bedeutung. Die Durchführung des Schälversuches erfolgt in Anlehnung an die DIN 12814-4. Die Schälprüfung wird an einer statischen Zugprüfmaschine durchgeführt. Dabei werden die Folienoberseite und die Folienunterseite in pneumatische Spannbacken eingespannt. Der Abstand zwischen den pneumatischen Spannbacken beträgt 70 mm und die Prüfgeschwindigkeit 20 mm/min (Meh16).

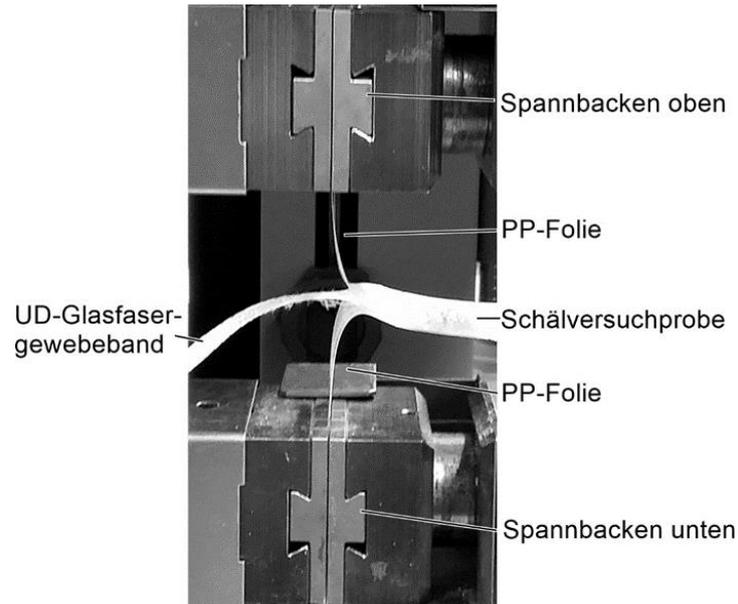


Abbildung 15: Einspannvorrichtung für T-Schälversuch

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass bei einer unzureichenden Imprägnierung eine Schälung des Verbundes auftritt, die Haftung zwischen Faser und Matrix ist somit unzureichend. Die Abbildung 16 zeigt den Kraft-Weg-Verlauf einer unzureichend imprägnierten Probe bei dem T-Schälversuch. Es zeigt sich ein ständiger Anstieg und Abfall des Kraftverlaufes. Das Matrixmaterial dehnt sich bis zu einer gewissen Kraft. Ab Kraftüberstieg beginnt die Matrix zu reißen und schält sich von den Fasern ab, der Verbund schält sich auf.

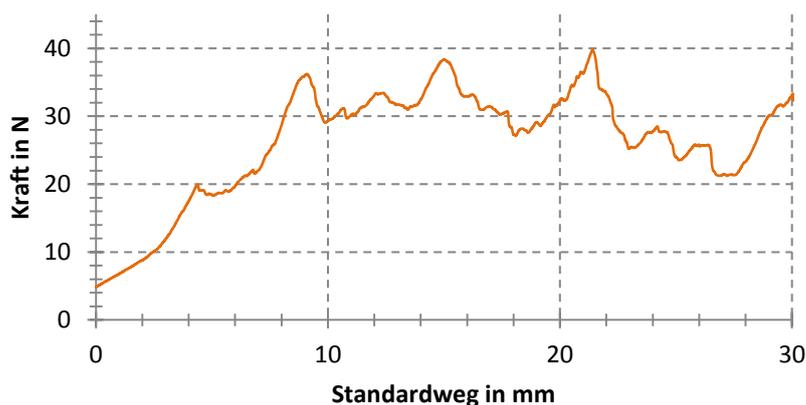


Abbildung 16: T-Schälversuch einer unzureichend imprägnierten Probe - Kraft-Weg-Diagramm (links) und Bruchbild (rechts)

Bei vollständiger Imprägnierung tritt keine Schälung des Verbundes auf. Die Schälfestigkeit des Verbundes ist größer als die Einzelfestigkeit der Verbundmaterialien, meist tritt ein Bruch des Verbundpartners mit geringerer Festigkeit auf. Nach einem einmaligen Kraftanstieg fällt die Kraftkurve ab (siehe Abbildung 17).

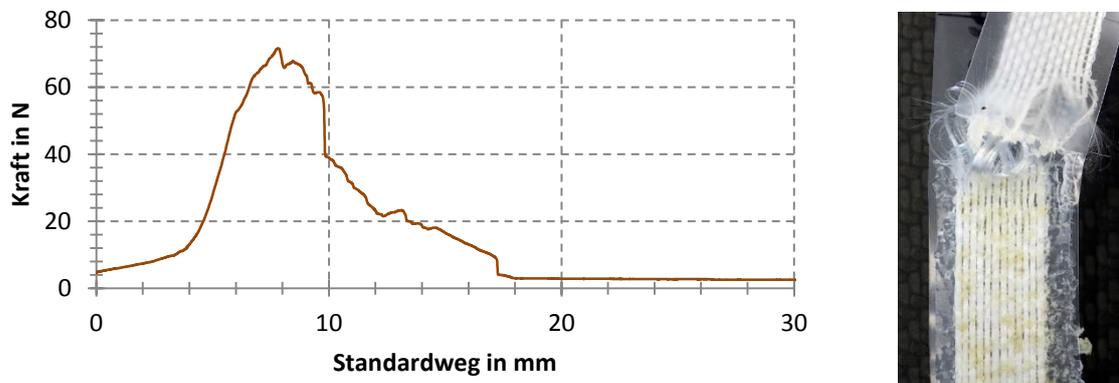


Abbildung 17: T-Schälversuch einer vollständig imprägnierten Verbundprobe - Kraft-Weg-Diagramm (links) und Bruchbild (rechts)

Des Weiteren kann zur Bestimmung des Imprägnierungsgrades und der Haftung zwischen Faser und Matrix ein Faserbündelauszugsversuch eingesetzt werden. In *Mehnert et al.* erfolgte für die verwendeten Glasfaser-Polypropylen-Verbundproben eine Modifizierung der Faserbündelauszugsproben. Die Faserbündel der Faserbündelauszugsproben mussten gezielt vorgeschädigt werden, damit ein Auszug aus dem Verbund möglich ist, ohne dass aufgrund der hohen Faser-Matrix-Haftung ein Faserabriss auftritt. Ohne Vorschädigung ist davon auszugehen, dass die Festigkeit der Fasern kleiner als die Haltekraft des Verbundes ist. Die Abbildung 18 zeigt die Abmaße und die Vorschädigung der Faserbündelauszugsproben. Die Vorschädigung der Faserbündel erfolgt an zwei Faserbündel in der Mitte der Probe. (Meh16)

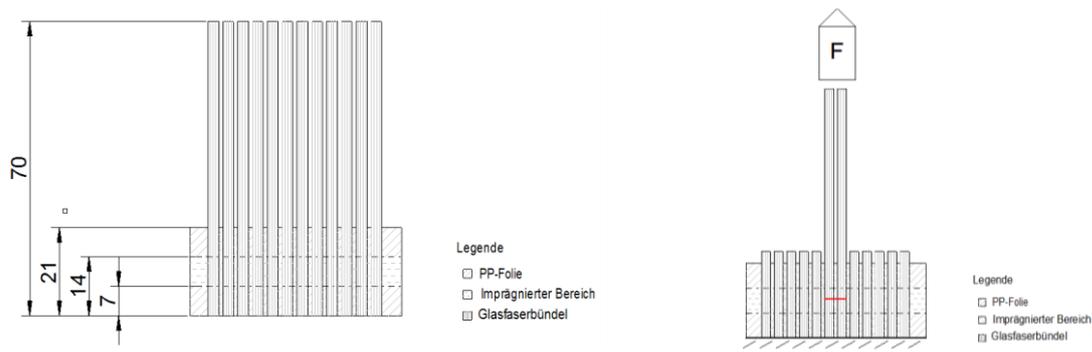


Abbildung 18: links: Abmaße der Faserbündelauszugsproben, rechts: gezielte Faserverschädigung der Faserbündelauszugsproben

Die Untersuchung der Faserbündelauszugsproben erfolgt mit Hilfe einer pneumatischen Zugprüfmaschine. Die vorgeschädigten Faserbündel werden in das obere Spannbackenpaar, bestehend aus einer konvex geformten Aluminiumspannbacke und einer Gummispannbacke, eingespannt. Der Faserbündelauszug erfolgt bei einer Prüfgeschwindigkeit von 20 mm/min.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass bei unzureichender Imprägnierung ein Faserauszug aus dem Verbund möglich ist. Die Haftfestigkeit zwischen Faser und Matrix ist zu gering, um der Faserauszugskraft standzuhalten. Abbildung 20 zeigt das Kraft-Weg-Diagramm einer unzureichend imprägnierten Faserbündelauszugsprobe.

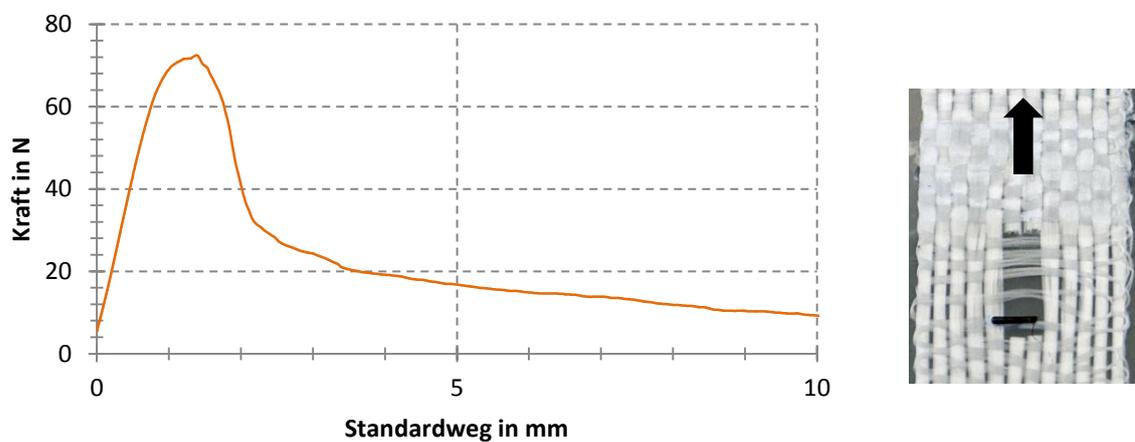


Abbildung 19: unzureichend imprägnierte Faserbündelauszugsprobe - Kraft-Weg-Diagramm (links) und Bruchbild (rechts)

Bei vollständiger Imprägnierung ist kein Auszug der Faserbündel aus dem Verbund möglich. Stattdessen kommt es zum Faserbündelbruch am Übergang zum imprägnierten Bereich (siehe Abbildung 20).

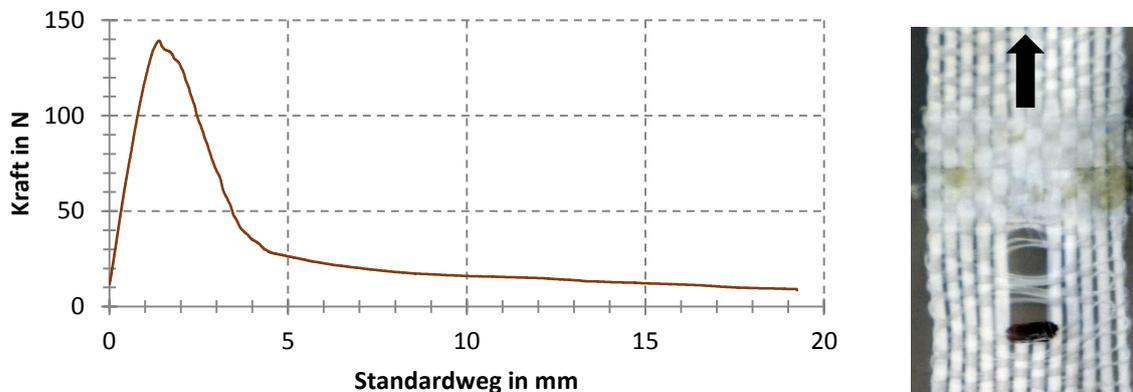


Abbildung 20: Faserbündelauszugsversuchs einer unzureichend imprägnierten Probe - Kraft-Weg-Diagramm (links) und Bruchbild (rechts)

Zur weiteren Bestimmung der Imprägnierqualität kann der Water-Pick-up Test (Wassereindringtest) eingesetzt werden. Bei diesem Versuch wird mit Hilfe eines flüssigen Mediums die Imprägniergüte des Verbundes beurteilt. Dafür erfolgt zuerst die Wägung der Masse einer 2 x 2 cm Probe. Anschließend erfolgt die Trängung der Probe für eine gewisse Zeit in das flüssige Medium. Durch Lufteinschlüsse oder Poren im Verbund kann das imprägnierte Halbzeug das flüssige Medium aufnehmen, welches zu einer Veränderung der Masse der Probe führt. Daraufhin erfolgt eine erneute Wägung der Probe. Für Polypropylen und Glasfasern eignet sich das flüssige Medium Wasser. Als mögliches Ausweichmedium kann Ethanol zum Einsatz kommen. Allerdings ist es möglich, dass Ethanol die Schlichte der Glasfasern angreift. Für Polyamid hingegen könnte Aceton oder „Fit“-Wasser zum Einsatz kommen.



Abbildung 21: Utensilien für Wassereindringtest

Die Ergebnisse des Wassereindringtests zeigen, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der Wasseraufnahmefähigkeit von imprägnierten und unzureichend imprägnierten Verbundproben vorherrscht.

Bei der Gegenüberstellung der drei aufgezeigten Prüfmethode zur Bestimmung der Imprägnierqualität und der damit verbundenen Faser-Matrix-Haftung zeigt sich, dass vor allem der T-Schälversuch als auch der Faserbündelauszugsversuch sowohl zur quantitativen sowie zur qualitativen Beurteilung des Faserverbundes geeignet sind. Durch die Aufnahme der Schälkraft bzw. Faserauszugskraft können die Proben qualitativ miteinander verglichen werden.

Der Wassereindringtest hingegen ist für die untersuchten Materialien ungeeignet. Der Test ist sehr schnell und einfach durchzuführen. Allerdings sind die Ergebnisse mit großer Sorgfalt zu beurteilen.

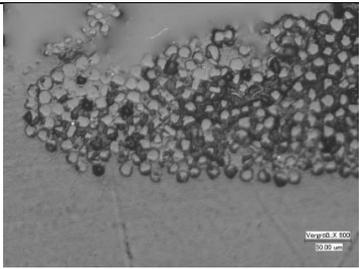
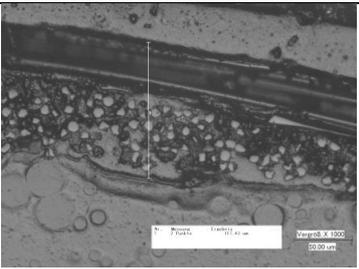
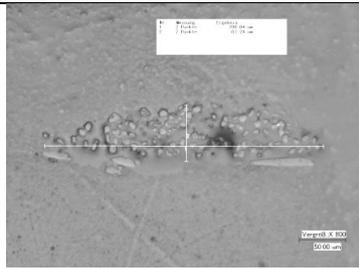
3.2 Diskussion der Ergebnisse

3.2.1 Möglichkeiten und Grenzen des Imprägnierverfahrens

Materialien

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass eine vollständige Imprägnierung von Textilien mit thermoplastischen Materialien mittels Ultraschall möglich ist. Die Imprägnierqualität bzw. Tiefe ist dabei insbesondere vom Aufbau des Faserbettes und den verwendeten Matrixmaterialien abhängig (vgl. (Meh16), (Erm07)). Als Richtwert für die Eignung der Materialien können das Flächengewicht des Textils und der Melt-Flow-Index (MFI) des Matrixwerkstoffes verwendet werden. Diese Abhängigkeit der Imprägnierqualität bei materialspezifisch angepassten Imprägnierungsparametern ist in Tabelle 3 anhand ausgewählter Proben dargestellt.

Tabelle 3: Vergleich der Imprägnierqualität in Abhängigkeit des Lagenaufbaus

Probe II	Probe I	Probe IV
Geringe Imprägnierung	Partielle Imprägnierung	Vollständige Imprägnierung
		
Textil: Glasfasern Silanschlichte UD-Gelege 210 g/m ²	Textil: Glasfasern Silanschlichte Leinwandbindung 120 g/m ²	Textil: Glasfasern Silanschlichte Leinwandbindung 120 g/m ²
Matrixmaterial: Moplen HP 501 H s = 0,3 mm MFI = 2,1 g/10 min	Matrixmaterial: PP unbekannter Typ s = 0,06 mm	Matrixmaterial: Moplen HP 501 H s = 0,3 mm MFI = 2,1 g/10 min

Für eine vollständige Imprägnierung können für den aktuellen Stand der Ultraschallimprägnierung folgende Grenzwerte angenommen werden:

- MFI (130°C, 2.16 kg) > 2,1 g/10 min
- Flächengewicht < 120 g/m²

Diese Werte gelten aufgrund der hohen Materialabhängigkeit für Verbundwerkstoffsysteme, die aus Glasfasern und PP-Matrix bestehen.

Prozess

Für eine möglichst hohe Produktivität bei möglichst hoher Imprägnierqualität ist die Ermittlung der optimalen Prozessparameter von entscheidender Bedeutung.

Für die Verarbeitung der untersuchten PP-Glasfaser-Verbundwerkstoffsysteme haben sich die in Tabelle 4 als geeignet erwiesen.

Tabelle 4: Übersicht über geeignete Prozessparameter

Prozesskennwert	Wert für PP-GF-Systeme	Überschreitung des Prozessfensters	Unterschreitung des Prozessfensters
Amplitude [µm] bei 35.000 Hz	15,7 - 18,6	Oxidation des Matrixmaterial	Unzureichende Imprägnierung
Imprägnierkraft [N]	170 - 190	Riss der Deckfolie vor der Imprägnierung	Unzureichende Imprägnierung
Vorschub [mm/min]	120 - 210	Unzureichende Imprägnierung	Oxidation des Matrixmaterial Starke Verschiebung der textilen Struktur Riss der Deckfolie vor der Imprägnierung
Sonotroden-temperatur [°C]	30 - 50	Riss der Deckfolie vor der Imprägnierung	Unzureichende Imprägnierung
Ambosstemperatur [°C]	50 - 70	-	Unzureichende Imprägnierung

Mit dem derzeitigen Aufbau und den verwendeten Materialien sind vollständige Imprägnierungen bei Imprägniergeschwindigkeiten von ca. 0,1 m/min möglich, was bei der aktuellen Anlagenkonfiguration einer Austragsmenge von ca. 0,5 m²/h entspricht. Eine Steigerung dieser Geschwindigkeit ist durch eine Optimierung des Lagenaufbaus hinsichtlich Viskosität und Faservolumengehalt möglich.

3.3 Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung der Vorhabensergebnisse

3.3.1 Versuchsaufbau zur Bewertung der Projektergebnisse

Die Bewertung der Projektergebnisse erfolgt anhand von drei Hauptkriterien:

- Imprägnierqualität
- Vorschubgeschwindigkeit
- Energiebedarf

Die Imprägnierqualität konnte mit Hilfe von Schliffbildern und den modifizierten Prüfmethode n aus Kapitel 3.1.4 beurteilt werden. Die Ermittlung der Vorschubgeschwindigkeit erfolgte aus der Messung der durchlaufenen Bandmenge in einer definierten Zeit. Für die Messung des Energiebedarfes wurden zum einen der Luftverbrauch, der pneumatischen Kühlung der Sonotrode sowie der Antriebszylinder und zum anderen Strom und Spannung an der Hauptzuleitung gemessen. Aus den über einen längeren Zeitraum ermittelten Leistungen wurde der Energiebedarf pro m² berechnet.

Abbildung 22 zeigt den Versuchsaufbau zur Ermittlung der Leistungsmessung.

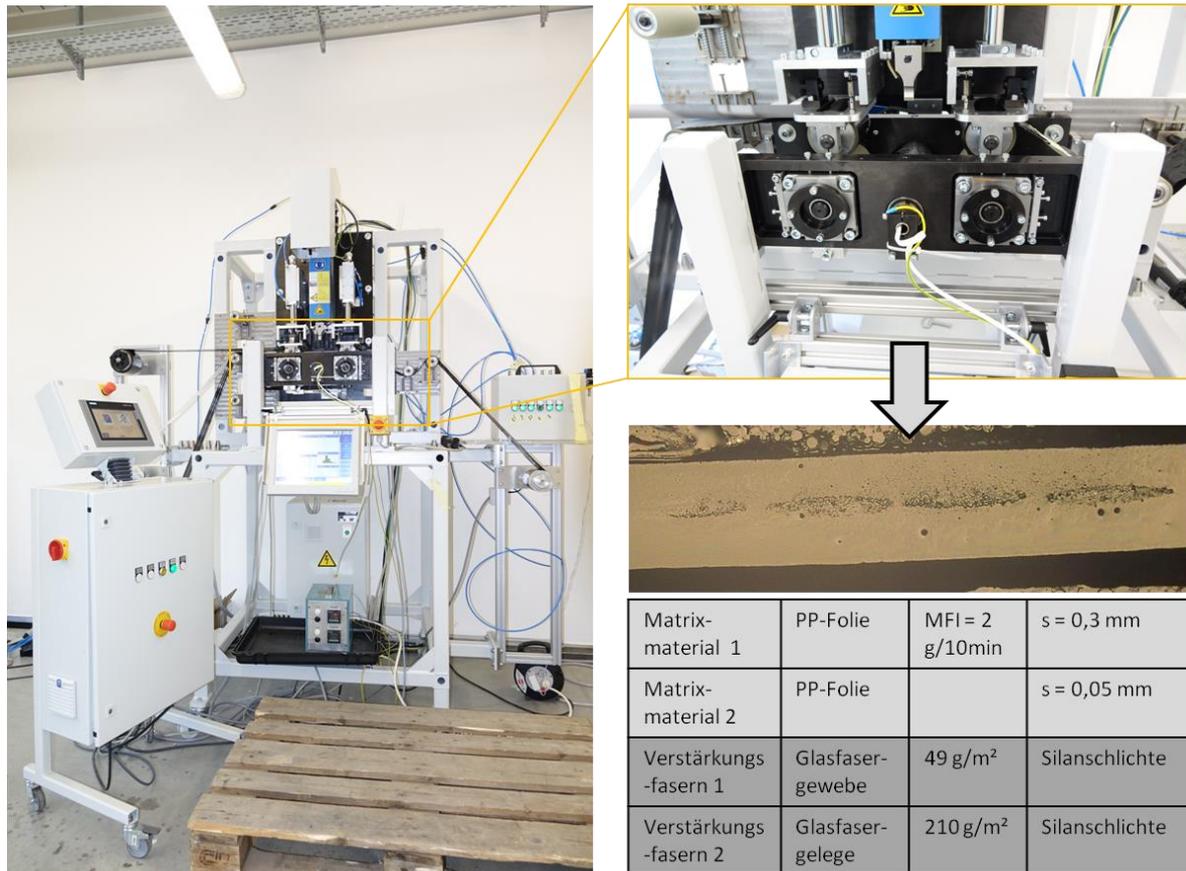


Abbildung 22: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Leistungsmessung

3.3.2 Energiebilanz im Vergleich zu konventionellen Verfahren

Zentrales Kriterium der ökologischen Bewertung des entwickelten Verfahrens ist der Energiebedarf zur Imprägnierung der Textilien. Tabelle 5 zeigt einen Vergleich der Leistungsparameter und des Energiebedarfs der Demonstratoranlage mit dem Stand der Technik und den im Projektantrag beschriebenen Zielkriterien.

Die Gegenüberstellung der Imprägnierverfahren verdeutlicht, dass mithilfe der neuartigen Technologie zur Imprägnierung mittels Ultraschall ein höheres Potential zur Energieeinsparung vorhanden ist, als in der Zielstellung angenommen (siehe Abbildung 23). Die erhöhte Energieeinsparung wird durch den zielgerichteten, effizienten Energieeintrag mittels Ultraschall erreicht.

Tabelle 5: Vergleich der Leistung der Demonstratoranlage mit dem Stand der Technik und der Zielstellung des Forschungsprojektes

Anlagenparameter zum Stand der Forschung	Symbol	Einheit	Doppelband- presse (Stand d. Technik)	UD-Anlage nach Kalanderprinzip (Stand d. Forschung)	US-Anlage mit Ultra- schallimprägnierung (Demonstrator)	US-Anlage mit Ultra- schallimprägnierung (Zielstellung)
Arbeitsbreite	b	mm	1500,00	600,00	80,00	80,00
Vorschubgeschwindigkeit	v	m/min	1,80	1,20	0,12	0,50
Konsolidierungsgrad	k	%	100,00	40,00	90,00	80,00
Anschlussleistung	P ₁	kW bzw. kJ/s	800,00	100,00	1,80	6,00
Betriebsleistung	P ₂	kW bzw. kJ/s	550,00	50,00	0,63	3,00
Druckluftverbrauch	V	l / s	0,00	0,00	0,05	
Energiebedarf Druckluft	P ₃	kW bzw. kJ/s	0,00	0,00	0,02	
Produktionsleistung der Anlagen ($A_p = v * b$)						
	A _p	m ² /s	0,05	0,01	0,00	0,00
	A _p	m ² /h	162,00	43,20	0,58	2,40
Korrekturfaktor Imprägnierungsgrad ($c_k = 1/k$)						
	c _k	-	1,00	2,50	1,11	1,25
Energiebedarf pro Fläche ($W_A = c_k * P_2 / A_p$)						
	W _A	kJ/m ²	12222,22	10416,67	4513,89	5625,00
	W _A	kWh/m ²	3,40	2,89	1,25	1,56
Energieeinsparung pro Fläche ($\Delta E_A = W_A - W_{A1}$)						
	ΔE_A	kJ/m ²	-	-1805,56	-7708,33	-6597,22
	ΔE_A	kWh/m ²	-	-0,50	-2,14	-1,33
Energieeinsparung ($\Delta E = 100\% - (100\% * W_A/W_{A1})$)						
	ΔE_{rel}	%	-	14,77	63,07	53,98

Energiebedarf zur Imprägnierung von Faserhalbzeugen

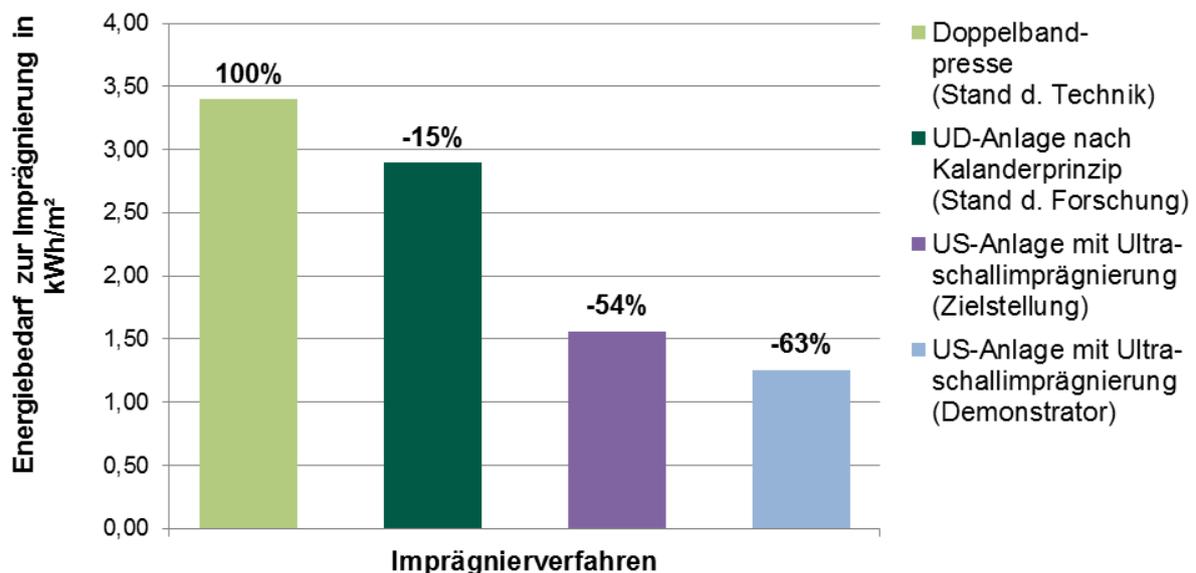


Abbildung 23: Energiebedarfsvergleich bei der Imprägnierung von Faserhalbzeugen

Für eine energieeffiziente Imprägnierung ist die Verwendung eines optimalen Schwinggebildes (Sonotrode und Amplitudentransformationsstück) von entscheidender Bedeutung, da die zur Schwingungserzeugung benötigte Leistung von der Sonotrodengröße abhängig ist, aber aufgrund des Linienkontaktes der Wirkorgane nur ein kleiner Teil der Sonotrodenfläche zur Imprägnierung genutzt wird.

Die derzeit erreichte Produktionsgeschwindigkeit erreicht noch nicht die im Projektantrag angestrebte Obergrenze von 0,5 m/min. Die Untergrenze von 0,1 m/min wird allerdings deutlich überschritten. Eine Steigerung der Produktivität bei nahezu konstantem Leistungsbedarf wird von einer Steigerung des Faservolumengehaltes durch die Verwendung von gespreizten UD-Glasfasertapes in Verbindung mit niedrigviskosen Matrixmaterialien erwartet, da die benötigte Imprägniertiefe und -dauer sinkt.

3.3.3 Weitere ökologische Aspekte

Neben der Reduzierung des Energiebedarfs zur Herstellung von thermoplastischen Halbzeugen und der Kohlenstoffdioxidemissionen treten weitere positive ökologische Effekte auf.

Während des Projektes konnten allerdings auch negative Aspekte hinsichtlich des Emissionsverhaltens beobachtet werden. Da diese aber nur im lokalen Umfeld der Anlage auftreten, können diese durch geeignete Maßnahmen kompensiert werden. Folgende ökologische- und gesundheitsrelevante Aspekte müssen bei einer Überführung der entwickelten Technologie zur Serienreife beachtet werden:

Verzicht auf Hydraulik- und Temperieröle

Da bei der entwickelten Imprägniertechnologie die notwendige Schmelzwärme durch innere Reibung erzeugt wird und aufgrund der Viskositätsabsenkung durch die Scherwirkung in Kombination mit der kleinen notwendigen Wirkfläche nur geringe Prozesskräfte notwendig sind, kann die Anlage vollständig ohne Temperier- und Hydrauliköle betrieben werden. Die häufig notwendige Temperierung der Sonotroden und Schwinggebilde kann aufgrund der niedrigen Temperaturen von max. 60°C mit Wasser oder bewegter Luft erfolgen.

Durch den Verzicht auf diese Medien ist auch kein regelmäßiger mit Leckagen und großen Abfallmengen (mehrere hundert Liter pro Anlage) verbundener Austausch der Öle notwendig. Die entwickelte Technologie trägt somit zur Abfallvermeidung bei und vermindert die Belastung von Gebäuden und Böden im Industriebereich.

Faserstaubbelastung

Bei der Verarbeitung von Textilien treten fast immer Faserstäube auf. Bei der Imprägnierung mittels Ultraschall werden ebenfalls Faserbruchstücke freigesetzt und teilweise durch die Ultraschallanregung stark beschleunigt. Bei der Serienproduktion von Verbundwerkstoffhalbzeugen mittels der entwickelten Technologie müssen daher geeignete Absaug- und Filtereinrichtungen zum Einsatz kommen.

Die zu erwartende emittierte Staubmenge ist geringer als die bei konventionellen Verfahren unter Berücksichtigung der anschließenden Konfektionierung, die bei der Imprägnierung mittels Ultraschall entfallen kann, da auch schmale Tapes effizient hergestellt werden können.

Ultraschallemission

Prinzip bedingt, treten bei dem entwickelten Verfahren Ultraschallemissionen auf, die das Gehör der Mitarbeiter unbemerkt schädigen können. Zur Vermeidung von Schäden ist daher entweder der Aufstellort akustisch so zu gestalten, dass die Ultraschallemissionen nah an der Anlage absorbiert werden, oder die Verwendung persönlicher Schutzausrüstung anzuordnen.

3.3.4 Ökonomische Bewertung des entwickelten Imprägnierverfahrens

Eine Serienanlage zur Imprägnierung von technischen Textilien mittels Ultraschall ermöglicht dem Anwender eine jährliche Kosteneinsparung von ca. 75. 000 Euro (vgl. Tabelle 6). Dies sollte zur sukzessiven Substitution und Ergänzung der bereits bestehenden Technologien der Hersteller für thermoplastische Halbzeuge führen und der TISORA GmbH den in Tabelle 6 dargestellten Markt eröffnen. Die Vermarktung der Technologie erfolgt zielgruppenorientiert auf Messen und Tagungen. Auf diesen Veranstaltungen können auch notwendige Weiterentwicklungen zur Serienreife ermittelt werden.

Tabelle 6: Anlagenabsatz und Gesamtbilanz von Energie und CO₂-Emission im Vergleich zum konventionellen Imprägnierverfahren mittels Doppelbandpresse (vgl. (Umw15)und (Eur15))

Jahr	Neuanlagen [Stk.]	Energieeinsparung kumulativ [kWh]	CO ₂ -Einsparung kumulativ [t]	Kosteneinsparung kumulativ [€]
2018	1	-493.333	-296	-75.332
2019	3	-1.973.333	-1.184	-301.328
2020	3	-3.453.333	-2.072	-527.324
2021	4	-5.426.667	-3.256	-828.652
2022	4	-7.400.000	-4.440	-1.129.980
Gesamtbilanz Anlagenbestand bis 2023	15	-18.746.667	-11.248	-2.862.616

Mit der entwickelten Prozesstechnologie können sowohl schmale als auch breite, bandförmige, thermoplastische Verbundhalbzeuge effizient und ohne zusätzliche Konfektionierprozesse nach der Imprägnierung hergestellt werden. Dieses Alleinstellungsmerkmal eröffnet den Zugang zu neuen Marktsegmenten.

Durch die kompakte Anlagenbauweise, welche die neue Imprägniertechnologie ermöglicht, kann die Menge an nicht genutzten Fasermaterialien beim Anlagenanlauf deutlich reduziert werden.

Aufgrund des geringen Materialbedarfs, der guten Regelbarkeit des Prozesses und der kurzen Anlaufzeit eignet sich die entwickelte Technologie auch hervorragend zur Herstellung von Mustermengen und für den Laborbetrieb, wodurch sich für die TISORA GmbH ein zusätzliches Marktsegment eröffnet.

3.4 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

3.4.1 Präsentation der entwickelten Technologie im Rahmen wissenschaftlicher Tagungen

Die entwickelte Technologie zur Imprägnierung textiler Halbzeuge mit Hilfe von Ultraschall wird auf der thermoPre Fachtagung - Faserverbunde für die Großserie in Chemnitz am 27./28. September 2016 mit einem Poster vorgestellt.

Des Weiteren werden Fachartikel für die DGM-Verbundwerkstofftagung am 5.-7. Juli 2017 und für die TECHNOMER am 9./10. Oktober 2017 zur Veröffentlichung eingereicht.

Durch die Vorstellung der neuen Prozesstechnologie auf den genannten Fachtagungen wird ein großes Fachpublikum angesprochen.

3.4.2 Präsentation auf Messen und in Fachzeitschriften

Die Firma TISORA GmbH stellt auf der Messe Hannover vom 24. bis 28. April 2017 zum Thema: Gemeinschaftsstand „Technologie aus Sachsen“ aus, dabei wird die entwickelte Ultraschallimprägnierungstechnologie ein zentraler Ausstellungsinhalt sein.

Als Referenz wird das erstellte Poster für die thermoPre-Fachtagung im Hause der TISORA ausgehangen. Bei zukünftigen Kundenbesuchen ist ein Verweis auf dieses und entwickelten Technologien möglich.

Die Veröffentlichung in Fachzeitschriften wie z.B. „Kunststoffe“ ist geplant.

3.4.3 Nutzung von Synergieeffekten in der Zusammenarbeit mit dem Steinbeisforschungszentrum ALP und der TU Chemnitz

Die mit dieser Technologie hergestellten thermoplastischen Faserverbundhalbzeuge können für weitere Technologieentwicklungen in Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz und dem Steinbeis - Forschungszentrum ALP genutzt werden. Eine potentielle Forschungsanwendung der mit Hilfe der Demonstratoranlage hergestellten bandförmigen Halbzeuge ist die Weiterverarbeitung im Orbitalwickelverfahren. Mit dem Orbitallegekopf können thermoplastisch, faserverstärkte Prepreg-Tapes zur Erzeugung komplexer Strukturbauteile verwendet werden. Die Orbitalwickelanlage dient zur Herstellung von rotationsunsymmetrischen Strukturbauteilen (Wal16).

Erste Vorversuche zu der dazu notwendigen Warmgaskonsolidierung wurden bereits durchgeführt (vgl. Abbildung 24).

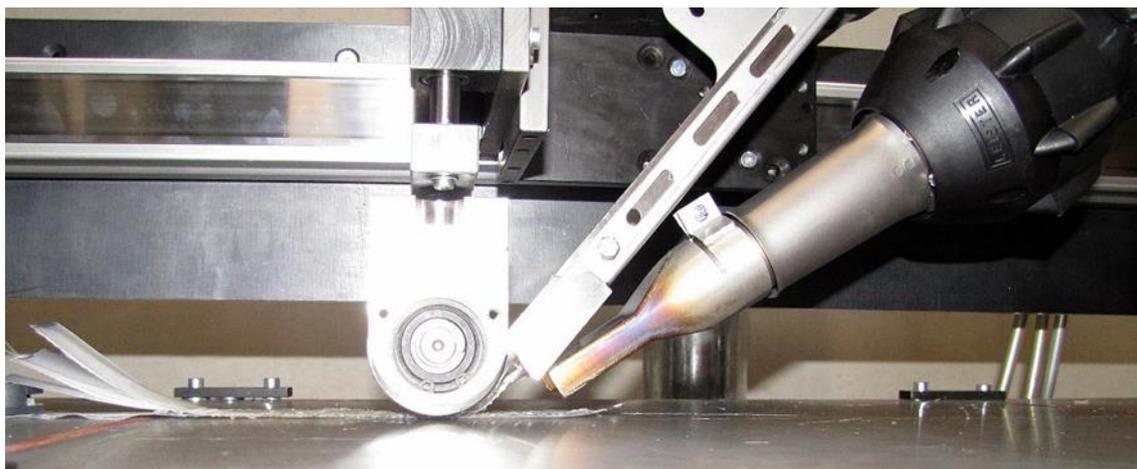


Abbildung 24: Konsolidierung einzelner, ultraschallimprägnierter Verbundproben zu einem Mehrlagenaufbau

Die innovativen Weiterverarbeitungsmöglichkeiten der imprägnierten Faserhalbzeuge ermöglichen den Eintritt in neue Marktsegmente und führen zu einer längerfristigen Umsatzsteigerung.

4 Fazit

Im Rahmen des FuE-Projektes wurde eine Demonstratoranlage zur kontinuierlichen Ultraschallimprägnierung entwickelt, gebaut und erprobt, welche die Plastifizierung nach dem Prinzip der inneren Reibung für eine energieeffiziente Imprägnierung thermoplastbasierter Faserverbundhalbzeuge erlaubt. Die Ultraschallschwingungen erzeugen sowohl Materialverformungen, insbesondere im Matrixwerkstoff, als auch Relativbewegungen zwischen den Fasern und der Kunststoffschmelze.

Die Demonstratoranlage auf Basis der innovativen Technologienentwicklung zeigt, wodurch der Kunststoff in einen schmelzeartigen Zustand übergeht und unter Druck die Fasern imprägniert. Die Imprägnierqualität bzw. -tiefe ist dabei abhängig vom Aufbau des Faserbettes sowie des verwendeten Matrixmaterials. Die Materialeignung kann mit Hilfe des Flächengewichtes des Textils und des Melt-Flow-Index (MFI) des Matrixwerkstoffes eingeschätzt werden. Anhand der vorgenommenen Untersuchungen haben sich für eine vollständige Imprägnierung folgende Materialgrenzwerte für Verbundwerkstoffe aus Glasfasern und Polypropylenmatrix gezeigt:

- MFI (130°C, 2.16 kg) > 2,1 g/10 min
- Textilflächengewicht < 120 g/m²

Für eine hohe Produktivität und einen hohen Imprägnierungsgrad wurden in diesem Projekt die optimalen Prozessparameter ermittelt und aufgezeigt. Für die verwendeten Materialien hat sich eine Imprägnierungsgeschwindigkeit von 0,1 m/min eingestellt. Dies ermöglicht eine Austragsmenge der Demonstratoranlage im Labormaßstab von ca. 0,5 m²/h. Durch geeignete Optimierung des Lagenaufbaus hinsichtlich der Viskosität des Matrixmaterials und der Faserdichte des Textils ist eine Steigerung der Imprägniergeschwindigkeit möglich.

Die entwickelte Technologie reduziert den Energiebedarf zur Herstellung imprägnierter, thermoplastischer, textiler Halbzeuge drastisch. Die Zielstellung der Energiesenkung von 54% im Vergleich der Technologie mit einer Doppelbandpresse wird deutlich übertroffen. Für die kontinuierliche Ultraschallimprägnier-

Demonstratoranlage wird eine Energieeinsparung von 63% erreicht, die mit einer Reduzierung der CO₂-Emissionen verbunden ist. Eine Neuanlage im industriellen Maßstab ermöglicht eine CO₂-Einsparung von ca. 296 t im Vergleich zu einer herkömmlichen Imprägnierung mit einer Doppelbandpresse, bei der die Plastifizierung des Matrixmaterials mittels Wärmeleitung erfolgt.

Die Verbundmaterialien der neu entwickelten Technologie können durch modifizierte Prüfverfahren charakterisiert werden. Von entscheidender Bedeutung für die Verbunde sind die Imprägnierqualität und die damit verbundene Faser-Matrix-Haftung. Geeignete Möglichkeiten zur Charakterisierung dieser Merkmale sind vor allem der T-Schälversuch und der Faserbündelauszugsversuch mit geeigneter Vorschädigung der Faserbündel.

Unter Berücksichtigung von Synergieeffekten mit Projekten der TU Chemnitz und des Steinbeis – Forschungszentrums ALP sind somit Erschließungen neuer potentialstarker Märkte möglich und führt voraussichtlich zur Steigerung des Umsatzes der TISORA GmbH.

Damit stellt das durchgeführte FuE-Projekt einen wichtigen Beitrag zur energie- und kosteneffizienten Großserienfertigung von imprägnierten, thermoplastischen, textilen Halbzeugen dar, welche insbesondere für die notwendige Entwicklung umwelt- und ressourcenschonende Leichtbautechnologien für Großserienanwendungen im automotive Bereich eine Grundvoraussetzung darstellen.

Basierend auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes können für die Optimierung der Materialqualität und der Steigerung der Produktivität folgende Forschungsansätze abgeleitet werden:

Tabelle 7: Forschungsansätze zur weiteren Verbesserung des entwickelten Verfahrens

Forschungsansatz	Verbesserungen des Produktionsprozesses
Verwendung von Faserspreizeinrichtungen	Verzicht auf kostenintensive textile Flächenbildungsprozesse Verarbeitung von Textilien ohne Inhomogenitäten durch Kreuzungspunkte Einstellbarkeit des Faservolumengehaltes
Verwendung von Hybridgarnverfahren / Mischfaserspreizung	Direktes Umschließen der Fasern mit Matrixmaterial statt Imprägnierung von außen
Folienherstellung von Folien aus Kunststoffen mit geringem MFI	Verbessertes Eindringen der Schmelze in die textilen Strukturen Geringere lokale Verarbeitungstemperaturen
Verwendung von Sonotroden mit wirkstellennaher Temperierung	Höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit durch höheren Leistungseintrag

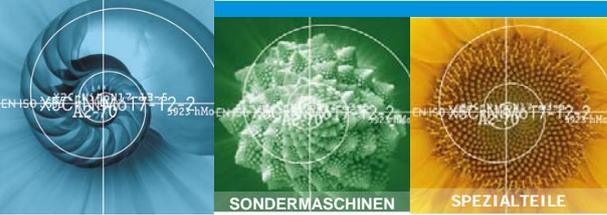
5 Literaturverzeichnis

(Hei07)	Heinrich, H.-J., Grünert, J., Zeidler, G.: Neues Verfahren zur Herstellung von multidirektionalen Gelegen. Chemnitz: 11. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung, 24.-25. Oktober 2007.
(Her14)	N, N: Produktbroschüre HiQ DIALOG SpeedControl. Karlsbad: Herrmann Ultraschalltechnik GmbH & Co. KG, 2014.
(Hal15)	Haller, Jonas: Untersuchung zur Imprägnierung von textilen Halbzeugen mit thermoplastischen Matrixmaterialien mittels Ultraschall. Chemnitz: unveröffentlichte Bachelorarbeit TU Chemnitz, 2015.
(Meh15)	Mehnert, Juliane: Entwicklung von Methoden zur quantitativen Charakterisierung thermoplastischer Imprägnierprozesse. Chemnitz: unveröffentlichte Masterarbeit TU Chemnitz, 2015.
(Erm07)	Ermanni, P.: Die Verarbeitung von FV-Thermoplasten. Zürich: ETH Zürich: Composites Technologien, Zentrum für Strukturtechnologien, 2007.
(Umw15)	Umweltbundesamt. (n.d.). Entwicklung des CO ₂ -Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2015 (in Gramm pro Kilowattstunde). In Statista – Das Statistik-Portal. Zugriff am 22. August 2016, von http://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/ .
(Eur15)	Eurostat. (n.d.). Industriestrompreis in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2015 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde). 2015. In Statista – Das Statistik-Portal. Zugriff am 22. August 2016, von http://de.statista.com/statistik/daten/studie/155964/umfrage/entwicklung-der-industriestrompreise-in-deutschland-seit-1995/ .

(Wal16)	Wallasch, R., Tirschmann, R., Spieler, M., Nendel, W., Kroll, L., Rohde, O., Nendel, S., Heinrich, H.-J.: Pilotanlage der Orbitalwickeltechnologie für die kontinuierliche Fertigung endlosfaserverstärkter Strukturbauteile. Chemnitz: 15. Chemnitz Textiltechnik-Tagung, 31.05. bis 01.06.2016.
---------	---

Anhänge

- Veröffentlichtes Poster ThermoPre Fachtagung
- Entwurf Abstract DGM-Verbundwerkstofftagung 2017
- Entwurf Abstract Technomer 2017



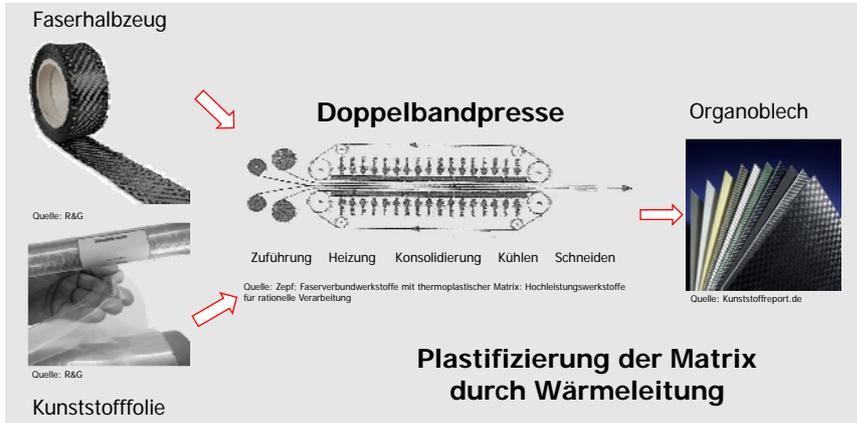
SONDERMASCHINEN

SPEZIALTEILE

Ressourcenschonung durch Einsatz eines neuartigen Verfahrens zur Imprägnierung von Verstärkungsfaserstrukturen mit thermoplastischen Matrixmaterialien in kontinuierlichen Prozessen

Dipl.-Ing. Gerd Zwinzscher, Dipl.-Ing. Steffen Rein TISORA Sondermaschinen GmbH, Chemnitz
 Dipl.-Ing. Christoph Doerffel, M.Sc. Steve Sockol, M.Sc. Juliane Mehnert
 Steinbeis-Innovationszentrum Automation in Leichtbauprozessen ALP, Chemnitz
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Prof. Lothar Kroll, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nendel, Dipl.-Ing. Mirko Spieler
 TU Chemnitz, Institut für Strukturleichtbau, Professur SLK

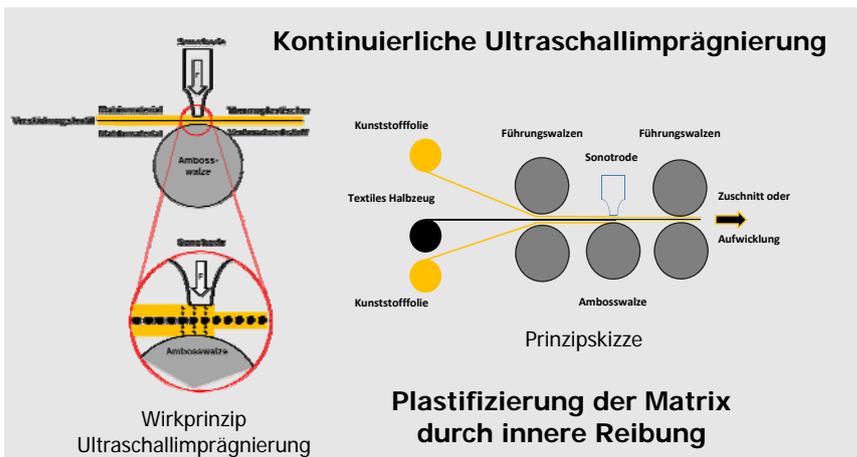
Ausgangssituation



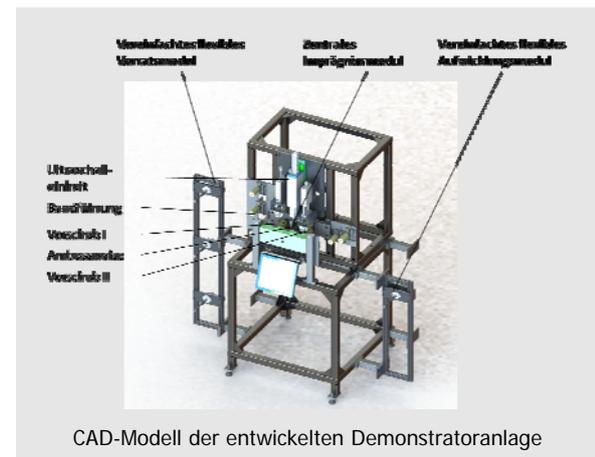
Zielstellung

- Herstellung von schmalen, bandförmigen Faserverbundhalbzeugen mit thermoplastischer Matrix mittels Ultraschall
- Steigerung der Energieeffizienz durch:
 - neuartiges Verfahrensprinzip
 - Vermeidung von Wärmekonvektion
 - Vermeidung dynamischer Temperiervorgänge
- Verbesserung der Imprägniertrate durch Ultraschallanregung der Schmelze (Viskositätsverringern infolge Scherwirkung im Imprägnierverfahren)
- Reduzierung der Prozesszeit

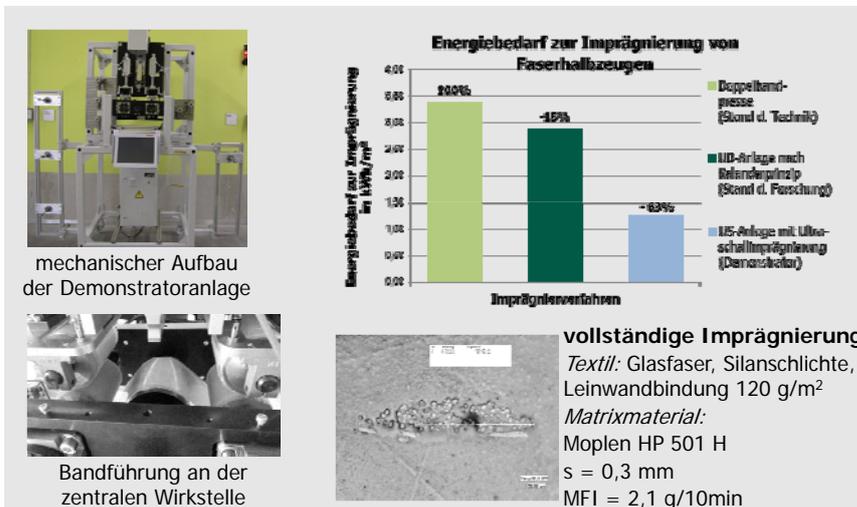
Prozessentwicklung



Demonstratoranlage



Ergebnisse



Zusammenfassung

- Imprägnierung schmaler bandförmiger textiler Halbzeuge mit thermoplastischen Matrixmaterialien im Film-Stacking-Verfahren
- Energieeffiziente Kunststoffaufschmelzung mittels innerer Reibung durch Ultraschall

Ausblick

Verwendung von

- Faserspreizeinrichtungen
- Hybridgarnverfahren und Mischfaserspreizung
- Kunststofffolien mit geringem MFI
- Sonotroden mit wirkstellennaher Temperierung

authors:

Dipl.-Ing. Doerffel, Christoph¹

M.Sc. Sockol, Steve¹

M.Sc. Mehnert, Juliane¹

Dipl.-Ing. Spieler, Mirko¹

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Prof. Kroll, Lothar¹

Prof. Dr.-Ing. Nendel, Wolfgang¹

Dipl.-Ing. Zwinzscher, Gerd²

Dipl.-Ing. Rein, Steffen²

¹ Institut Strukturleichtbau, TU Chemnitz, Deutschland

² TISORA Sondermaschinen GmbH, Chemnitz, Deutschland

Creating thermoplastic Compounds by ultrasonic-impregnation

Thermoplastic compounds have got a high potential for applications in big scale light weight processes because of their low processing times and the simple recycling process. Other advantages are the low emissions during the manufacturing process, the easy handling and storing of the semi finished materials.

Two sub-processes are necessary for creating compound of fibers and thermoplastic matrix-materials: the plastification of the matrix-material and the impregnation of the textiles with the melt. At the current state of technology both sub-processes are done by Double belt presses with high processing temperatures and high processing forces. A huge amount of energy is needed to create these forces by hydraulic cylinders and electric heating. A lot of this energy gets lost by convection, infrared-radiation and cooling (dynamic) tempered machine parts. Especially the process for generating the hydraulic pressure has got a low grade of efficiency. For economic and ecologic reasons it is necessary to develop energy-efficient impregnation processes.

The impregnation of textiles with thermoplastic matrix materials in a film stacking process by ultrasonic vibrations is such a technology. The quick plastification of the thermoplastic films by the ultrasonic vibrations enables to use a new flexible machine concept, which can be scaled from small to large scale processes. A prototype was developed in a research project and first material samples have been produced and characterized in order to describe the process.

M. Sc. Juliane Mehnert
Chemnitz

Energieeffiziente Faserimprägnierung mittels Ultraschall

Aufgrund ihrer guten Recycling- und Prozessfähigkeit erlangen thermoplastische Faserverbundwerkstoffe eine zunehmende Bedeutung in Leichtbauanwendungen mit hohen Stückzahlen. Einen besonders hohen Leichtbaugrad ermöglichen Endlosfaser verstärkte Verbundwerkstoffe. Einem Einsatz dieser Werkstoffe in der Großserie stehen aber nach dem aktuellen Stand der Technik häufig noch die hohen Materialkosten entgegen. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Herstellungskosten von thermoplastischen Halbzeugen ist die Verbesserung der Energieeffizienz des Imprägniervorgangs.

Im Rahmen eines von der Deutschen Bundestiftung Umwelt geförderten Forschungsprojektes der TISORA GmbH in Zusammenarbeit mit dem Steinbeisforschungszentrum ALP und der TU Chemnitz, wurde ein innovatives Ultraschallverfahren zur Imprägnierung von textilen Halbzeugen im Film-Stacking-Verfahren entwickelt. Die Erprobung und Charakterisierung des Verfahrens erfolgte auf einer für das Projekt entwickelten Forschungsanlage, auf der textile Bandmaterialien und thermoplastische Folien im Film-Stacking-Verfahren zu Verbundwerkstoffen verarbeitet werden können.

Die Verwendung von Ultraschall zur Plastifizierung und Reduzierung der Viskosität der Matrixmaterialien mittels Scherwirkung stellt einen aktuellen Forschungsansatz zum Erreichen dieses Ziels dar. Durch das innovative Verfahrensprinzip erfolgt die Plastifizierung des Matrixmaterials und das Imprägnieren der Fasern auf engstem Raum mit sehr geringen Prozesskräften. Dadurch ist im Vergleich zu einer konventionellen Plastifizierung mittels Wärmeleitung und einer Imprägnierung durch hohen Pressdruck auf großer Fläche, wie sie derzeit bei Doppelbandpressen erfolgt, eine Energieeinsparung von bis zu 60% möglich. Für die hohe Steigerung des Wirkungsgrades sind durch die Reduzierung der notwendigen Antriebsleistungen der Wirkorgane und den Verzicht auf große, dynamisch temperierte Bauteile möglich.

Kontakt:

M. Sc. Juliane Mehnert

Firma: Steinbeis Forschungszentrum ALP

Telefon: 0371-5347490

Fax: 0371-5347491

E-Mail: juliane.mehnert@stw.de

