

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

„Laser-Remote-Schneiden zur Automatisierung und Verkürzung der Taktzeiten bei der Fertigung von Fahrzeugen und Fahrzeugbauteilen in CFK-Bauweise“ (REMOTE-C)

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
Förderkennzeichen 01MX12049C



Teilvorhaben

„Prozessentwicklung für das Laser-Remote-Schneiden von faserverstärkten Kunststoffen und Halbzeugen“

(Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2012 bis 30.09.2015)

Inhalt

1. Kurze Darstellung.....	3
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Voraussetzungen	3
1.3 Inhaltliche Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4 Stand der Wissenschaft und Technik	6
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
2. Eingehende Darstellung.....	7
2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	7
2.1.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsliste.....	7
2.1.2 Arbeitspaket 2: Anforderungen an die Bearbeitungsqualität.....	7
2.1.3 Arbeitspaket 3: Anlagenkonzept und Realisierung eines Aufbaus zum Remote-Trennen von CFK.....	8
2.1.4 Arbeitspaket 4: Prozessentwicklung Halbzeuge	9
2.1.5 Arbeitspaket 5: Prozessentwicklung Lamine	11
2.1.6 Arbeitspaket 6: Demonstration	15
2.1.7 Zielerfüllung.....	16
2.2 Zahlenmäßiger Nachweis	17
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	17
2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	18
2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	18
2.6 Veröffentlichungen	19
3. Literatur.....	20

1. Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung des Teilvorhabens „Prozessentwicklung für das Laser-Remote-Schneiden von faserverstärkten Kunststoffen und Halbzeugen“ bestand darin, ein detailliertes Prozessverständnis für die Laser-Remote-Bearbeitung von Faserverbundkunststoffen zu erlangen und einen großserientauglichen Laser-Remote-Trennprozess bereitzustellen, der die Anforderungen des Automobilbaus erfüllt. Die erarbeiteten Parameter, Kenngrößen, Prozessgrenzen und das Prozessverständnis sollen den OEMs und Zulieferern zur Verfügung stehen und wissenschaftliche Verwertung in der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse und der Einbringung in die universitäre Lehre finden.

Folgende Teilziele werden bei dem Vorhaben verfolgt:

- Spezifizierung der Anlagentechnik bestehend aus Strahlquelle, Strahlführung und –Ablenkung, Spanntechnik und Absaugung sowie der Demonstratorteile derart, dass die Anforderungen der anderen Partner erfüllt werden können und gleichzeitig die technische Machbarkeit gegeben ist.
- Bereitstellung eines geeigneten spanntechnischen Konzepts für 2D-Trennaufgaben, insbesondere der Werkstoffe CFK-Gewebe, CFK-Gelege, Preforms und Prepregs für die Versuchsdurchführung, inklusive einer Lösung für die Abstandsregelung. Darüber hinaus besteht die Zielsetzung, qualitative und quantitative Kenntnis über die entstehenden Emissionsprodukte zu gewinnen.
- Kenntniserwerb über die Interaktion verschiedener Strahlquellen sowie deren Parametern und gewählten Materialien. Das anschließende Teilziel besteht folglich in der Auswahl geeigneter Laser- und Anlagensystemtechnik. Abschließendes Ziel im Bereich des Systemaufbaus ist die Installation sowie der Test und somit die Bereitstellung eines funktionsfähigen Laser-Remote-Schneidsystems.
- Bereitstellen des Prozessverständnisses für das Laser-Remote-Schneiden von ein- und mehrlagigen sowie trockenen und vorimprägnierten Halbzeugen (Gewebe, Gelege, Preforms, Prepregs) und Kenntniserwerb über die wesentlichen Einflussfaktoren und bestehende Prozessgrenzen.
- Erlangung des grundlegenden Prozessverständnisses des Laser-Remote-Schneidens der ausgehärteten CFK-Laminat, der entsprechenden Einflussfaktoren sowie der Prozessgrenzen.
- Aufzeigen der Prozessfähigkeit für 3D-Anwendungen, zunächst grundsätzlich und später anhand des Demonstrators.

1.2 Voraussetzungen

In ihrem zweiten Bericht gibt die Nationale Plattform Elektromobilität das Ziel aus, Deutschland als Leitanbieter und Leitmarkt für Elektromobilität bis zum Jahr 2020 zu etablieren. Um dieses Ziel erreichen zu können, sind sämtliche Technologien zur Produktion von Elektrofahrzeugen und der entsprechenden Komponenten zur

Serienreife zu führen und für den Massenmarkt zu qualifizieren. Eine Problemstellung heutiger Elektrofahrzeuge und Elektrofahrzeugkonzepte ist die signifikante Massezunahme aufgrund der im Fahrzeug anzuordnenden Batterie. Diese gilt es durch entsprechende Leichtbaukonzepte zu kompensieren, da die hohe Fahrzeugmasse den Energieverbrauch erhöht, die Reichweite des Fahrzeugs reduziert und die Fahrdynamik negativ beeinflusst.

Kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) kommt vor diesem Hintergrund durch ihre hervorragende Steifigkeit bei geringem Gewicht besondere Bedeutung zu. Die heute noch vielfach manuellen Fertigungsverfahren, die ihren Ursprung häufig in der Luftfahrtbranche haben, führen jedoch bei der CFK-Bauweise zu Kosten, die einen wirtschaftlichen Einsatz im Fahrzeugbau zurzeit nicht zulassen. Hinzu kommt bei der mechanischen Bearbeitung von CFK ein hoher Werkzeugverschleiß, der die Kosten pro Bauteil weiter in die Höhe treibt. Entsprechend sind Konzepte und Verfahren gesucht, die eine automatisierte, kostengünstige CFK-Fertigung im Automobilbau erlauben und diese somit auch für den Massenmarkt zugänglich machen.

Die Lasermaterialbearbeitung, die heute im Automobilbau für das Fügen und Trennen von metallischen Werkstoffen bereits weit verbreitet ist, bietet aufgrund der verschleißfreien Wirkungsweise, der hohen Automatisierbarkeit und Produktivität großes Potential, diese Problemstellung zu lösen. Daher soll im Rahmen dieses Vorhabens das Laser-Remote-Schneiden von CFK unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Automobilbaus entwickelt und demonstriert werden. Als sogenannte „enabling technology“ kann die Lasermaterialbearbeitung einen wichtigen Beitrag zum von der Nationalen Plattform Elektromobilität vorgeschlagenen Leuchtturm „Leichtbau“ leisten und zur Weiterentwicklung der Elektromobilität in Deutschland beitragen.

Das Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik (iLAS) verfügt durch die Unterstützung zahlreicher Industrieunternehmen und die enge Kooperation mit dem Laser Zentrum Nord über eine hochmoderne und einzigartige Ausstattung an Lasersystemtechnik. Hierzu gehören Laserstrahlquellen für die Materialbearbeitung mit Leistungen zwischen 50 W und 30 kW. Zur Entwicklung automatisierter Lösungen kann auf verschiedenste mehrachsige Bearbeitungszentren sowie Robotersysteme zurückgegriffen werden. Für die erfolgreiche Umsetzung des Vorhabens kann somit auf die umfassende Anlagentechnik und Expertise des Instituts zurückgegriffen werden.

1.3 Inhaltliche Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ist in sieben Arbeitspakete gegliedert, (siehe Abbildung 1).

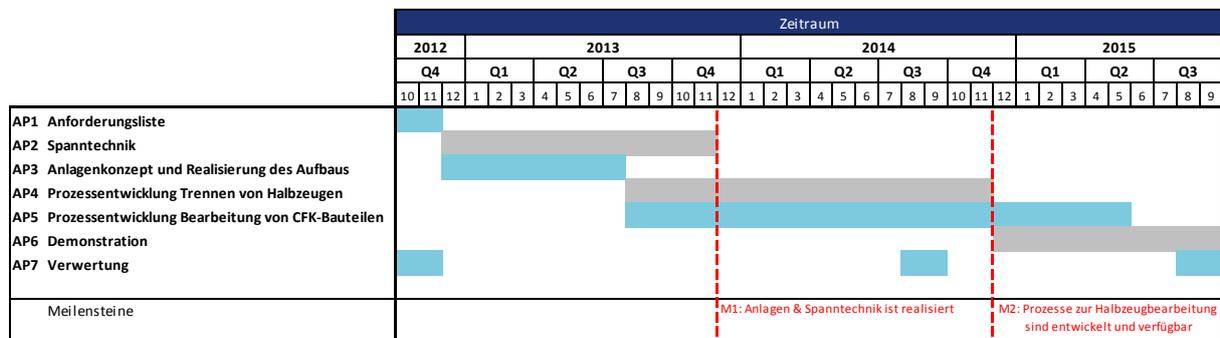


Abbildung 1: Arbeitsplan und zeitliche Abfolge der Arbeitspakete

Für den Großteil der zu bearbeitenden Arbeits- bzw. Unterarbeitspakete des Projektes ist das iLAS Institut zuständig, weshalb das Institut mitverantwortlich für die Erstellung der Anforderungsliste (Arbeitspaket 1) ist. Hierbei werden in Abstimmung mit dem Anwender Volkswagen, Anforderungen an den Prozess bzw. die Bearbeitungsqualität, die notwendige Spann- und Anlagentechnik, die Absaugung und schließlich die Voraussetzungen für die Integration des Gesamtsystems in die Fertigungskette definiert. Arbeitspaket 2 umfasst die Identifikation der geeigneten Spann- und Absaugtechnik durch erste Schneidversuche am Institut. Vor der notwendigen Prozessentwicklung muss ein Anlagenkonzept erstellt und der Aufbau am Institut realisiert werden (Arbeitspaket 3). Wesentlicher Inhalt des Arbeitspaketes ist die Identifikation einer geeigneten Strahlquelle sowie Bearbeitungsoptik, wobei auf die Infrastruktur des Instituts zurückgegriffen werden kann. Es folgt die Konzeption der Gesamtanlagentechnik, die Zusammenführung der Einzelkomponenten und abschließende Testläufe. Der wesentliche inhaltliche Projektbeitrag des iLAS innerhalb Remote-C besteht in der Prozessentwicklung für Halbzeuge und Laminat (Arbeitspakete 4 und 5). Am Institut werden zunächst 2D-Prozesse für das Trennen von Halbzeugen und Laminaten entwickelt. Dabei müssen die wesentlichen Prozessparameter dahingehend so variiert werden, dass die in Arbeitspaket 1 festgelegten Qualitätskriterien bestmöglich eingehalten werden. Dabei sollen die Prozessgrenzen identifiziert werden, durch die Variation der Laminatdicke bzw. der Lagenanzahl bei den Halbzeugen. An CFK-Laminaten sollen zusätzlich Abtragversuche sowie Versuche mit verklebten Bauteilen durchgeführt werden. Abschließend müssen die gewonnenen Ergebnisse auf einen 3D-Prozess übertragen, und die Schnittqualität anhand der in Arbeitspaket 1 festgelegten Qualitätskriterien beurteilt werden. Abschließend muss der Prozess an der am Institut installierten Anlagentechnik anhand eines Demonstrators in Form einer Reisemobiltür demonstriert werden. Dies geschieht sowohl für das Halbzeug, als auch das CFK-Laminat inklusive Ausschnitten und Bohrungen. Hierzu muss eine Roboterbahnplanung erfolgen, um den Prozess automatisiert ablaufen zu lassen. Abschließend werden die Demonstratoren erneut auf die Erfüllung der Anforderungen geprüft. Arbeitspaket 7 beinhaltet schließlich die Verwertung der Projektergebnisse. Diese sollen in Form wissenschaftlicher Veröffentlichungen, Messeauftritten und Publikationen in Fachzeitschriften erfolgen.

Für das Teilvorhaben werden die folgenden Meilensteine definiert:

- M1: Systemtechnik montiert und in Betrieb genommen (31.07.2013). Abbruchkriterium: Systemtechnik ist nicht funktionsfähig und auch nicht mit vertretbarem Aufwand in einen funktionsfähigen Zustand zu versetzen.
- M2: Prozessentwicklung Halbzeuge abgeschlossen, Prozessfenster identifiziert und Grenzen definiert (30.11.2014). Abbruchkriterium: Anforderungen der Anwender - wie in AP1 definiert - werden gänzlich nicht erfüllt. Es ist in diesem Fall separat zu prüfen, ob eine Fortführung beschränkt auf die Bauteilbearbeitung geeignet ist, die Anforderungen der Anwender zu erfüllen.
- M3: Prozessentwicklung Bauteile abgeschlossen, Prozessfenster identifiziert und Grenzen definiert (31.05.2015). Abbruchkriterium: Anforderungen der Anwender - wie in AP1 definiert - werden gänzlich nicht erfüllt.

Der Zeit- und Arbeitsplan wurde innerhalb des Projektes im Wesentlichen eingehalten. Lediglich Meilenstein 1 musste in das Jahr 2014 verschoben werden. Die Vorversuche haben hier gezeigt, dass eine Reduzierung des Fokusbereichs notwendig war, um die erwünschte Qualität zu erreichen. Aus diesem Grund musste eine Scanneroptik mit den gewünschten Eigenschaften beschafft werden. Zudem musste die Optik durch den Hersteller in die Laserzelle integriert werden.

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Im Bereich der Bearbeitung von Faserverbundwerkstoffen, insbesondere von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen (CFK), sind Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide Stand der Technik. Nachteil dieser Verfahren ist jedoch der hohe Werkzeugverschleiß, der durch die abrasive Wirkung der Verstärkungsfasern verursacht wird. Dies führt zu hohen Kosten für die Bearbeitung bei gleichzeitig unzureichender Produktivität. Eine Alternative, die insbesondere in der Luftfahrtindustrie diskutiert wird, stellt das Wasserstrahlabrasivschneiden dar, wobei die erreichbaren Geschwindigkeiten im Bereich von wenigen m/min und das aufwändige Handling des Wasser-Abrasivmittel-Gemisches einem Einsatz in der Serienfertigung im Automobilbereich entgegenstehen.

Ein vielversprechender Ansatz zur Lösung dieser Problemstellung ist das Laserstrahlschneiden, da neben der Verschleiß- und Kräftefreiheit des Verfahrens auch hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten von > 10 m/min erreichbar sind, und mit einer hohen Automatisierbarkeit und Flexibilität (3D-Fähigkeit) einhergehen. In vorausgegangen Versuchen konnte die generelle Machbarkeit und das Potential des Laserstrahlschneidens von CFK bereits von verschiedenen Arbeitsgruppen aufgezeigt werden [GOE10, KAT10, KLO11, NII11, STU11]. Der thermische Schneidprozess führt dabei zur Ausbildung einer Wärmeeinflusszone (WEZ), die in ihrer Ausdehnung mit zunehmender Bearbeitungsgeschwindigkeit abnimmt, wodurch wiederum die Schnittqualität zunimmt [GOE10]. Herzog et. al. haben dabei bereits nachgewiesen, dass mittels Laser bearbeitete CFK-Lamine bei statischer Zug- und Biegebelastung keine signifikante Reduzierung der Festigkeiten im Vergleich zu konventionell oder mit Wasserstrahlabrasivschneiden getrennten Proben aufweisen [HER08].

Der Einsatz der Remote Technik, bei der nur der Laserstrahl und nicht der gesamte Bearbeitungskopf über das Material mit hohen Vorschubgeschwindigkeiten verfahren wird, verspricht eine weitere Verbesserung der Schnittkantenqualität und zusätzlich eine große Steigerung der Produktivität. Diese Produktivitätssteigerung konnte im Bereich der Blechbearbeitung und dem Remote-Schneiden von textilen Materialien bereits aufgezeigt werden. Für glasfaserverstärkte Werkstoffe sind erste Untersuchungen von Lütke et al. dokumentiert [LÜT09], die einerseits die Verfahrenseignung aufzeigen, andererseits aufgrund des im Vergleich zu CFK deutlich unterschiedlichen Materialverhaltens von GFK nicht ohne weiteres auf die hier vorgeschlagenen Arbeiten übertragbar sind. Entsprechend wurde für die Versuche eine CO₂-Laserstrahlquelle mit einer Ausgangsleistung von 2 kW eingesetzt. Für die CFK-Remote-Bearbeitung existieren erste, grundlegende Untersuchungen von Klotzbach et al. [KLO11], die die Verfahrenseignung auch für diesen Werkstoff grundsätzlich nachweisen. Der hier vorgestellte Ansatz soll daher das Laserstrahl-Remote-Schneiden von CFK für den Einsatz im Automobilbereich weiterentwickeln, dabei erstmalig Hochleistungsstrahlquellen im Leistungsbereich bis zu 30 kW einsetzen und die Einsatzmöglichkeiten entlang der Prozesskette zur Herstellung von Bauteilen des Automobilbaus ganzheitlich betrachten.

Relevante Schutzrechte auf den Prozess, oder wesentliche Prozessansätze, die einer Verwertung entgegenstehen könnten, sind nicht bekannt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Firma Plasmo Industrietechnik GmbH unterstützte das Institut bei der Durchführung von Vorversuchen zur diodenbasierten durch das Bereitstellen von Messhardware und Versuchsbegleitung. Die Airbus AG stellte Prepreg-Material für die Durchführung von Stichversuchen zur Verfügung.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

2.1.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsliste

Innerhalb des ersten Arbeitspaketes wurden die Anforderungen an den Trennprozess aus automobiler Großserientechnik qualitativ und quantitativ definiert. Die Anforderungen unterteilen sich in Randbedingungen, Bearbeitungsqualität, Prozessanforderungen, Spanntechnik, Anlagentechnik, Absaugung sowie Fertigungsintegration. Entsprechend sind die Anforderungen durch alle beteiligten Projektpartner aufgestellt worden.

2.1.2 Arbeitspaket 2: Anforderungen an die Bearbeitungsqualität

Im Arbeitspaket 2 wurden seitens des iLAS zunächst Voruntersuchungen hinsichtlich einer geeigneten Absaugtechnik durchgeführt. Hierbei sind in den Vorversuchen unterschiedliche Absaugtechniken (siehe Abbildung 2) erprobt und hinsichtlich ihrer Effektivität bewertet.

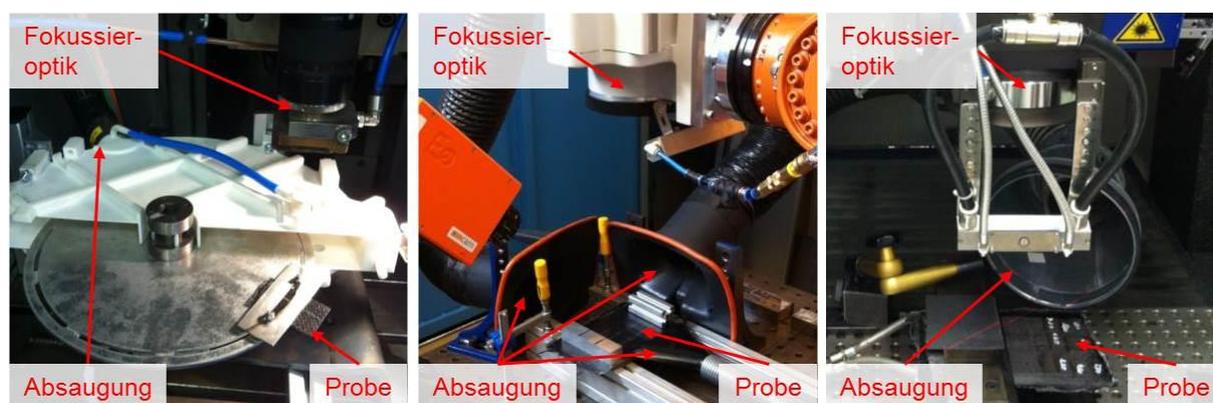


Abbildung 2: Untersuchung verschiedener Absaugtechniken

Ergebnis ist, dass eine möglichst prozessnahe Absaugung erforderlich ist, welche während und nach dem Prozess kontinuierlich mit hohen Volumenströmen die Prozessemissionen entfernt.

Die entstehenden Prozessemissionen wurden vom Laser Zentrum Hannover in einem Unterauftrag analysiert. Dabei wurde sowohl die Konzentration der Gefahrstoffe (Aerosole, VOCs, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Acrylnitril, p-Chloranilin, Bisphenol A) in der Arbeitsumgebung (Lasierzelle), sowie die Partikelgrößenverteilung, jeweils für Lamine und Preformlinge untersucht. Dabei konnte sowohl die Gesamtkonzentration, als auch der Anteil der lungengängigen Partikel bestimmt werden.

2.1.3 Arbeitspaket 3: Anlagenkonzept und Realisierung eines Aufbaus zum Remote-Trennen von CFK

In Arbeitspaket sind zunächst Voruntersuchungen hinsichtlich der geeigneten Systemtechnik durchgeführt worden. Es wurden unterschiedliche Lasersysteme und unterschiedliche Scannersysteme bei gleich bleibendem Materialaufbau getestet. Die untersuchten Lasersysteme sind in Abbildung 3 dargestellt. Aufgrund der Forderung von Volkswagen wurden innerhalb des Projekts nur Festkörperlaser untersucht.

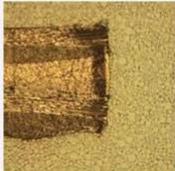
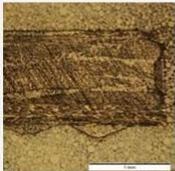
Spezifikation Parameter	1 (TruLaser)	2 (DMG)	3 (IPG IXION)	4 (Trumpf PFO)	5 (IPG Scanner)
Lasertyp	Festkörper	Festkörper	Festkörper	Festkörper	Festkörper
Betriebsart	Dauerstrich	gepulst	Dauerstrich	Dauerstrich	Dauerstrich
Prozessart	Kontur-Trennen	Remote-Abtragen	quasi-Remote-Trennen	Remote-Trennen	Remote-Trennen
Laserleistung / max. Laserleistung	5.000 / 6.000 W	150 / 200 W	2.000 / 5.000 W	5.000 / 6.000 W	5.000 / 5.000 W
Vorschub	<6 m/min	<246 m/min	<300 m/min	<384 m/min	<48 m/min
Brennweite	80 mm	163 mm	200 mm	255 mm	~500 mm
Fokusbereich	130 µm	55 µm	150 µm	170 µm	~200 µm
Schliffbild getrenntes Laminat					

Abbildung 3: Verwendete Lasersysteme für die Voruntersuchungen

Ergebnis ist, dass für die Erreichung der in AP1 definierten Anforderungen ein System mit hoher Leistung, kleinem Fokusbereich und hoher Geschwindigkeit nötig ist. Auf dieser Grundlage wurde das Anlagenkonzept erarbeitet und die Komponenten ausgewählt. Abbildung 4 zeigt den Versuchsstand für die 2D-Versuche mit den Anlagenkomponenten.



1	100 µm Laserlichtkabel, Anschluss an Trumpf TruDisk 6001 6 kW
2	Optik: Trumpf PFO 33 mit 255 mm Brennweite, Fokusbrenndurchmesser 170 µm
3	Crossjet
4	Probenaufnahme
5	Z-Achsen-Verstellung (300mm)
6	Absaugung Handte mit Abscheidung über Precoating Material (Fa. Trumpf)
7	Mobiler Versuchsstand

Abbildung 4: Anlagenkomponenten für 2D-Schneidversuche

Die von Bergmann & Steffen konzipierte Scanfeld-Absaugung wurde mittels 3D-Druckverfahren hergestellt und an der Optik installiert, siehe Abbildung 5.

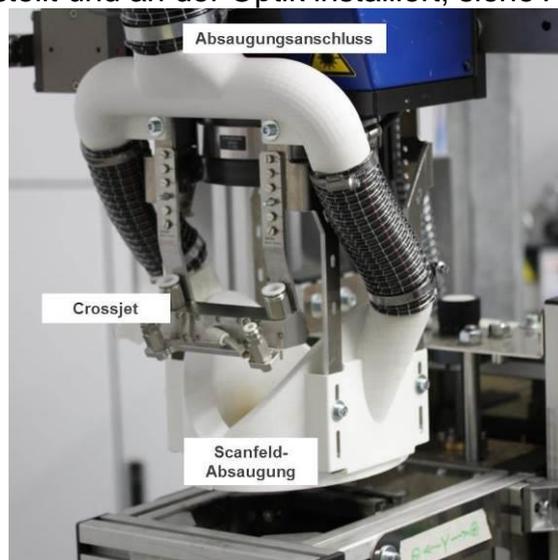


Abbildung 5: Absaugung an der Scanneroptik

Nach dem Aufbau der Anlagentechnik wurde eine Strahlvermessung vorgenommen um die genaue Lage des Laserfokus zu kennen. Testschnitte an Laminaten und Halbzeugen konnten die Funktionsfähigkeit des Systems sicherstellen, außerdem konnte so die erreichbare Schnittqualität beurteilt werden.

2.1.4 Arbeitspaket 4: Prozessentwicklung Halbzeuge

In umfangreichen Parameterstudien wurden Qualitätskriterien für die Beurteilung der Schnittkante von getrennten Halbzeugen definiert und der Einfluss der Trennparameter auf diese Qualitätsparameter ermittelt. Als Kriterien wurden das Aufstellen der Schnittkante, der Rückgang des Nähfadens, sowie das Anhaften der Fasern definiert (vgl. Abbildung 6). Außerdem wurde die Auswirkung des Laserstrahlschneidens auf

die Folgeprozesse (RTM-Injektion, Handling der Gelege und Drapierbarkeit) untersucht.

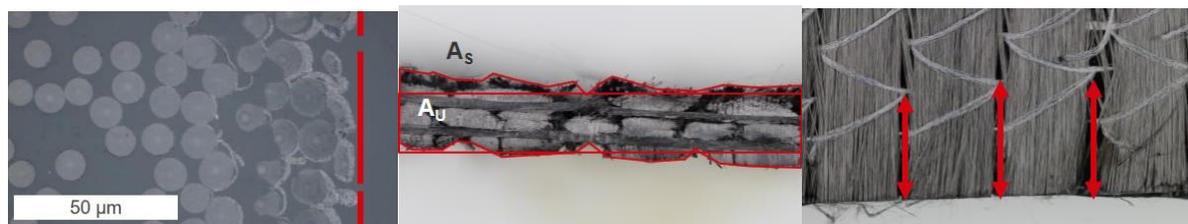


Abbildung 6: Untersuchte Phänomene beim Laserstrahlschneiden von CFK-Halbzeugen; Anhaften der Fasern (links), Aufstellen der Schnittkante (mitte) und Rückgang des Nähfadens (rechts)

Für die im Projekt definierten trockenen Halbzeuge und Preformlinge wurde je ein Parametersatz ermittelt, der zu den besten Trennergebnissen führt und den Anforderungen aus AP 1 gerecht wird. Es zeigte sich, dass die Qualität der Schnittkante mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit und Leistung zunimmt. Bei hoher Leistung und Vorschub „franst“ die Kante zunehmend aus. Die Schnittkantenfläche ist bei niedriger Leistung in ihrer Größe unverändert, während sie sich bei hoher Leistung durch Aufbauschen nahezu verdoppelt. Außerdem nimmt die Prozesseffizienz ab ca. 2 kW deutlich ab. Bei Variation der Leistung und damit auch der Geschwindigkeit, sind keine Auswirkungen auf den Nähfadenrückgang erkennbar. Das Anhaften der Fasern an der Schnittkante ist mit zunehmender Leistung deutlich geringer ausgebildet, was durch die geringere Länge zusammenhängender Bereiche zu erkennen ist. Dieses Anhaften der Fasern an der Schnittkante erleichtert das Bauteilhandling. Abbildung 7 zeigt einen lasergetrennten Preformling.



Abbildung 7: Lasergetrennter Preformling, 2D-Demonstrator

Der Prozess des Laserstrahltrennens hat keine negative Einwirkung auf die Drapierbarkeit der Gelege, die Faseranhaftungen bleiben an Roving-Enden bestehen. Auch die Injektion im RTM-Verfahren wird durch den Beschnitt mittels Laser nicht negativ beeinflusst. Die lasergetrennten Proben können im RTM-Verfahren sogar auf Endkontur injiziert werden, vgl. Abbildung 8.

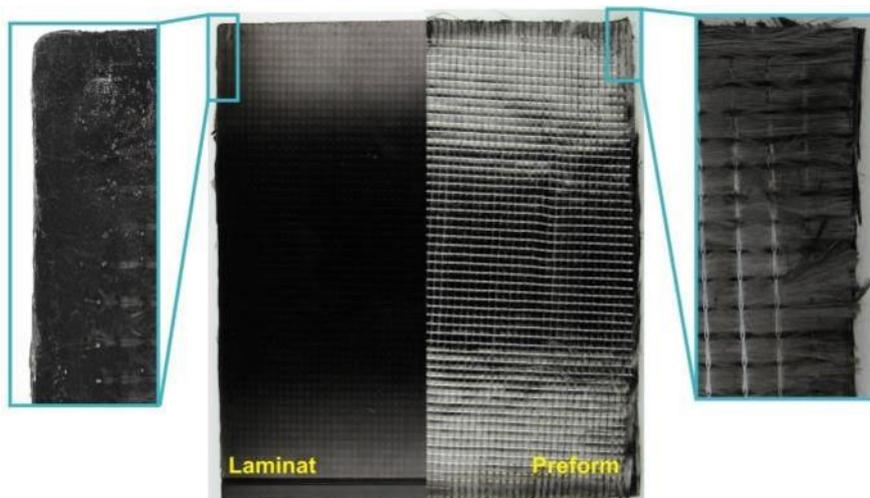


Abbildung 8: Lasergetrennter Preformling und mittels RTM-Verfahren hergestelltes Laminat

Der eingestellte Prozess wurde im weiteren Projektverlauf für den 3D-Trennprozess verwendet. Ein wichtiges Ergebnis der Prozessentwicklung ist, dass die Prozessparameter relativ tolerant gegenüber der Fokuslage sind, was der 3D-Prozessentwicklung entgegenkommt. Es konnte ein robuster Trennprozess für dreidimensionale, großflächige Halbzeuge entwickelt werden, der tolerant gegenüber dem Aufbauschen der Preformlinge an den Radien ist.

Neben der Prozessentwicklung für die im Projekt verwendeten Materialien wurde auch die Materialdicke variiert. Hier stellte sich heraus, dass der Prozess mit zunehmender Materialdicke an Effizienz abnimmt.

2.1.5 Arbeitspaket 5: Prozessentwicklung Lamine

In Arbeitspaket 5 wurde entsprechend Arbeitspaket 4 ein 2D-Trennprozess für Lamine entwickelt und auf die 3D-Anwendung übertragen. Wesentlicher Arbeitsinhalt waren die Parameterstudien zur Suche der optimalen Prozessparameter. Ziel war die Minimierung der Wärmeeinflusszone und Maximierung des Vorschubs.

Ein wichtiges Ergebnis ist, dass sich beide Ziele nicht gegenseitig ausschließen sondern im Gegenteil begünstigen. Es ist somit zu erwarten, dass zukünftige Anlagen mit einer höheren Laserleistung und höherer verfügbarer Scanner-Geschwindigkeit nochmals bessere Kantenqualitäten erreichen können. Mit der vorliegenden Anlagentechnik konnte eine Wärmeeinflusszone in einen Bereich zwischen 100-200 μm erreicht werden. Dies entspricht den Anforderungen, die in AP1 definiert wurden ($<200 \mu\text{m}$). Außerdem konnte die Lackierbarkeit der Kanten ohne Nachbearbeitung nachgewiesen werden, womit eine weitere Anforderung des Projekts erfüllt wurde.

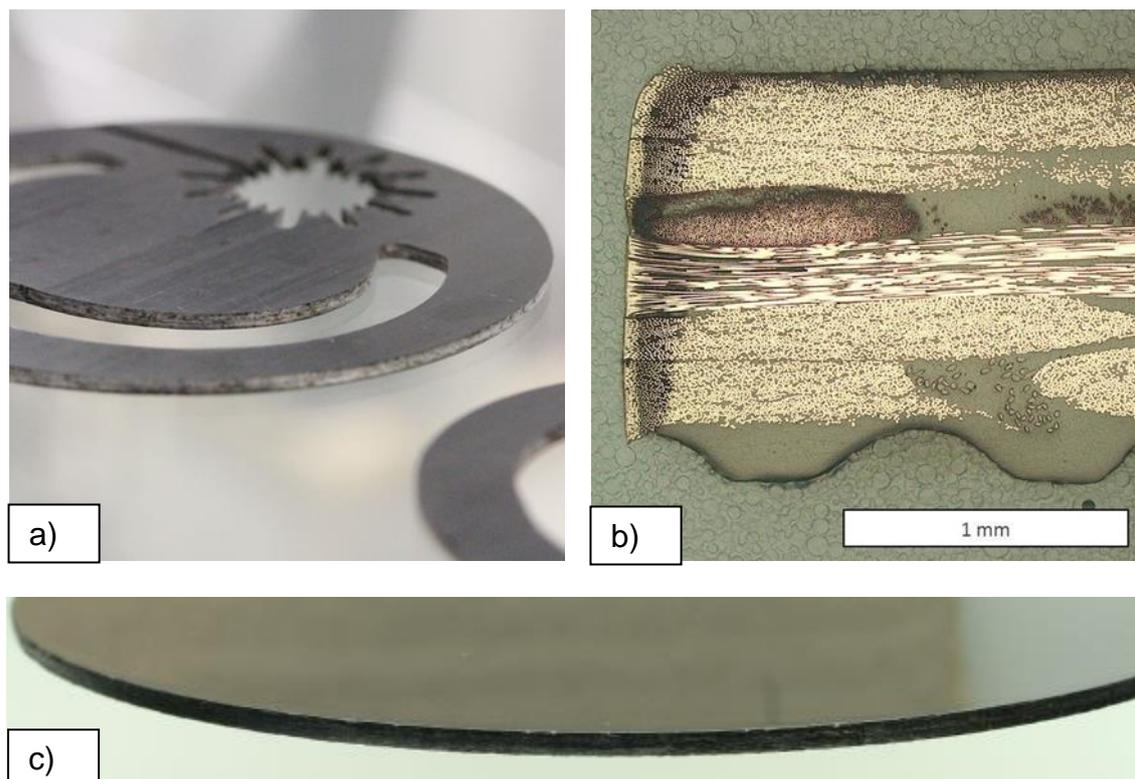


Abbildung 9: a) Lasergetrenntes CFK-Laminat, 2D-Demonstrator; b) Querschliff eines lasergetrennten CFK-Laminats; c) Lackierte Schnittkante eines lasergetrennten CFK-Laminats

Weiterer Arbeitsinhalt war die Übertragung der Parameter auf höhere Laminatdicken. Hier wurde in 3 Ansätzen die maximal trennbare Laminatstärke ermittelt. Ergebnis war, dass Laminatstärken >10 mm getrennt werden konnten, jedoch nimmt ab einer Dicke von 6 mm die erreichbare effektive Vorschubgeschwindigkeit drastisch ab. Das liegt daran, dass es ab dieser Dicke nicht mehr ausreichend ist, die Belichtungsanzahl zu erhöhen. Wie zu erwarten wird der Laserstrahl von der Schnittkante abgeschattet, wodurch eine breitere Schnittfuge nötig ist. Als positives Ergebnis ist hervorzuheben, dass auch bei hoher Materialdicke die Wärmeeinflusszone konstant bei etwa $200\ \mu\text{m}$ bleibt. Bisher galt das Laserstrahlschneiden von CFK als dickenbegrenzt bis zu Materialstärken von ca. 4-5 mm. Innerhalb des Projekts konnte somit eine wesentliche Erweiterung der Prozessgrenzen erreicht werden.

CFK-Bauteile im Automobilbau müssen teilweise auch abtragend bearbeitet werden. Dies ist bei Sacklöchern oder Nuten der Fall. Aus diesem Grund wurde in einem Unterarbeitspaket dieser Punkt bearbeitet (UAP 5.7). Konventionell wird beim Materialabtrag mit gepulsten Lasersystemen gearbeitet. Ziel in diesem Arbeitspaket war der Materialabtrag mit dem zum Trennen verwendeten cw-System. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Materialabtrag und das Einbringen von Kavitäten möglich ist, jedoch die Wärmeeinflusszone relativ hoch ist. Auch die Schädigung durch Schmauch und Ablagerungen sind deutlich zu erkennen (vgl. Abbildung 10).



Abbildung 10: Mittels Abtragen eingebrachte Kavität in einem CFK-Laminat

Hier besteht weiteres Potential durch eine geeignete Scannerstrategie die Ergebnisse deutlich zu verbessern. Insbesondere das zwischenzeitliche Abkühlen durch die Wahl eines Delays kann zu deutlich besseren Ergebnissen führen.

Wesentlicher Arbeitsinhalt von AP5 war neben der Prozessentwicklung auch die Materialentwicklung. Die Einbringung von Fabulase hat sich als eine vielversprechende Möglichkeit zur Verbesserung der Schnittkantenqualität erwiesen (vgl. Abbildung 11).

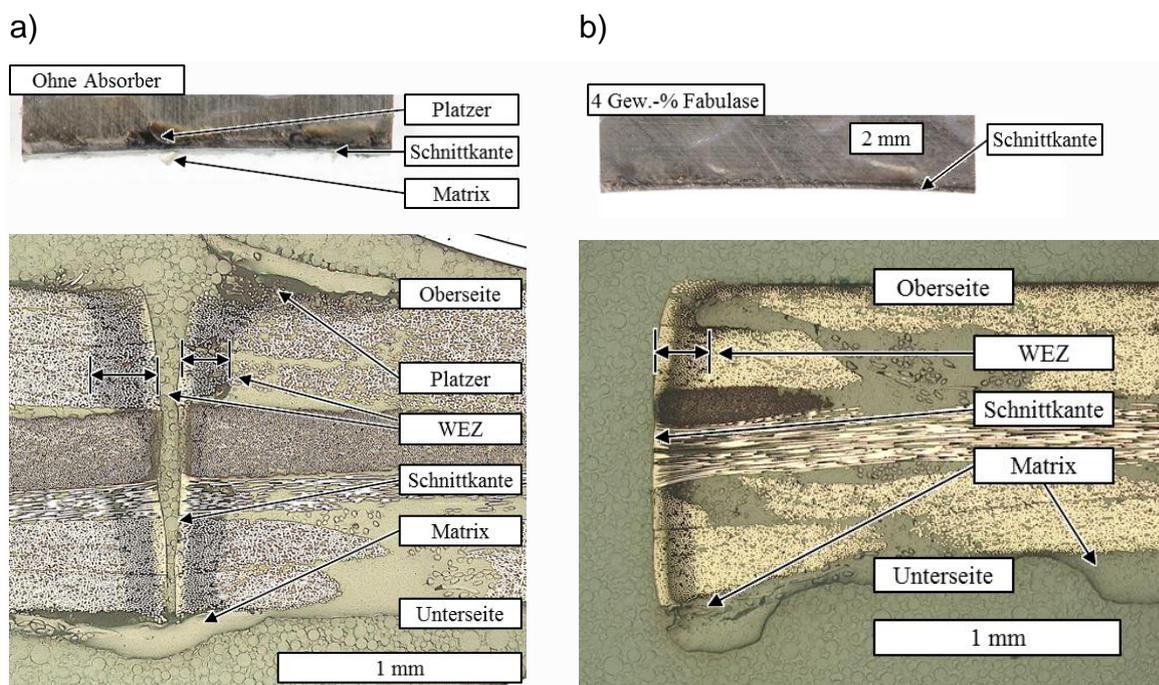


Abbildung 11: a) Bearbeitungsqualität ohne Absorber; b) Reduzierte Wärmeeinflusszone und Strukturschäden durch Absorbereinsatz

Dafür wurden in Zusammenarbeit mit dem Partner Rhein Composite unterschiedliche Strategien verfolgt um das Fabulase in das CFK-Material zu bringen. In ersten Versuchen zeigte sich, dass das Fabulase im Infusionsprozess durch die Fasern herausgefiltert wurde. Dies konnten Transmissionsmessungen an den durch Rhein Composite hergestellten Platten am iLAS nachweisen. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Ansätze getestet, das Fabulase-Material zu mahlen und zu dispergieren. Letztlich konnte durch das Mahlen erreicht werden, dass die Partikelgröße signifikant reduziert wurde und damit der Filtereffekt nicht mehr auftritt. Letztlich konnte eine Kombination aus Herstellprozess und Rohstoff ermittelt werden, die

während der weiteren Bearbeitung des Projekts, inklusive der Herstellung der 3D-Demonstratoren verwendet wurde.

Neben den Erkenntnissen zu Material und Prozess wurde auch die Scanneroptik untersucht. Hierbei stand die Konturtreue im Vordergrund. Da die Optik werksseitig nur auf Bearbeitungsgeschwindigkeiten bis 1 m/s ausgelegt ist, wurde untersucht, welche Konturgenauigkeit die Optik bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten hat. Dabei wurde die Konturgenauigkeit, sowie die Start-Stop-Verzögerung in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit ermittelt. Diese Erkenntnisse sind für die Bahnplanung der 3d-Demonstration in AP6 erforderlich, da die Optik bei hohen Vorschüben keine rechtwinkligen Geometrien mehr abbilden kann, es entstehen Radien bis ca. 5 mm. Außerdem Belichtet die Optik bei hohen Vorschüben teilweise mehr als 2 mm über die Sollkontur hinaus.

Um den Einfluss der Absaugung auf den Schneidprozess abschätzen zu können, wurde Abstand der Absaugung von der Probenoberfläche von variiert (20 – 60 mm) und der Schneidprozess mit identischen Parametern mit einer Spiegelreflexkamera aufgezeichnet, um die Nachbrenndauer messen zu können. Die Dauer der Laserbelichtung ist bekannt. Anhand der Gesamtdauer, vom Beginn der Belichtung, bis zum vollständigen Erlöschen der Flamme kann die Nachbrenndauer berechnet werden (Auflösung der Kamera 0,04s). Es ist eine deutliche Abhängigkeit der Flambildung vom Einfluss der Absaugung zu erkennen. Bei geringerer Entfernung der Absaugung von der Probenoberfläche ist die Flambildung geringer, die Qualität der Schnittkanten deutlich besser. Bei einem Abstand der Absaugung von 60 mm ist der Schnitt nicht mehr vollständig, die Probe muss aus dem Laminat gedrückt werden.

Der Vorversuch eines Trennprozesses unter Stickstoffatmosphäre führte ebenfalls zu einer Verschlechterung des Schnittergebnisses.

Da in der industriellen Anwendung vielfach auch verklebte Bauteile bearbeitet werden, wurden innerhalb des Projektes auch Stichversuche mit verklebten CFK-Mustern durchgeführt. Dabei kamen zwei verschiedene Klebstoffe zum Einsatz: *BÜFA Bonding Paste 0110* (Vinylester-Basis) und *Körapur 125* (Polyurethan-Basis). Beide Klebstoffe weisen in Trennversuchen keine Absorption des Lasers auf, das Aufschmelzen des Klebers findet nur durch Wärmeübertragung aus dem Laminat auf. In Folge dessen ist ein extrem hoher Energieeintrag zum Schneiden der verklebten Muster notwendig. Der Klebstoff quillt dabei auf, das Laminat wird thermisch stark geschädigt. Dieses Problem kann ebenfalls durch die Einbringung von Fabulase in den Klebstoff umgangen werden. Der Laser wird so vom Klebstoff absorbiert, es entstehen saubere und glatte Schnittkanten.

Der 2D-Trennprozess konnte erfolgreich auf die 3D-Bearbeitung übertragen werden. Zur experimentellen Untersuchung der 3D-Fähigkeit und der Entwicklung eines Prozessfensters, wurden CFK-Proben unter unterschiedlichen Winkeln zum auftreffenden Laserstrahl eingespannt. Anhand der entwickelten 2D-Parameter, konnte die Trennkantur unter verschiedenen Auftreffwinkeln des Lasers untersucht werden, vgl. Abbildung 12.

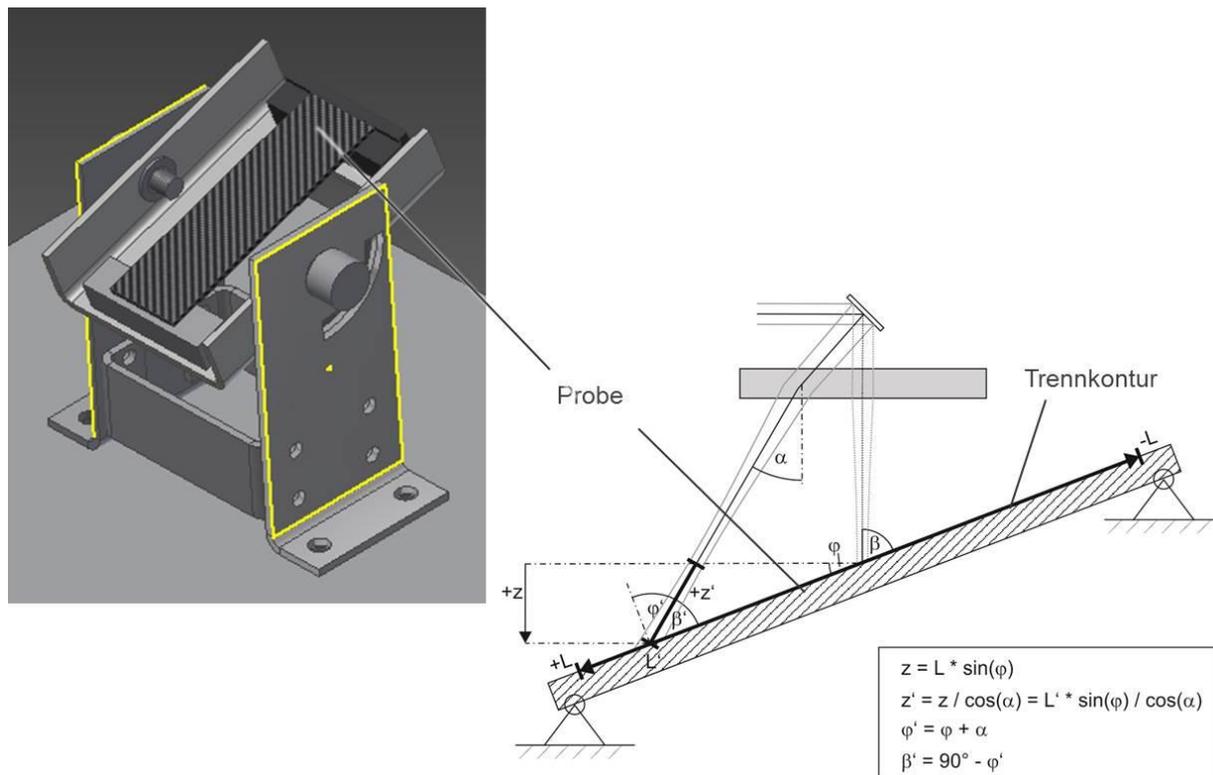


Abbildung 12: Versuchsaufbau zur experimentellen Ermittlung des 3D-Prozessfensters

Anhand der Versuche konnte ein Prozessfenster für vollständige Schnitte in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels sowie des Abstandes der Probenoberfläche von der Fokuslage des Lasers entwickelt werden.

2.1.6 Arbeitspaket 6: Demonstration

Der entwickelte Prozess wurde an der Herstellung einer Außenschale einer Caravantür, vom Beschnitt des Preformlings, dessen Injektion im RTM-Prozess bis zur anschließenden Besäumung des Laminats demonstriert. Dafür musste zunächst die Systemtechnik eingerichtet werden. Die Scanneroptik wurde an einem KUKA-6-Achs-Roboter installiert, die Spannvorrichtung auf einem Drehkipptisch (2-Achsen) befestigt. Die Roboterbahn wurde online, am Bauteil programmiert. Die Schnittkontur wurde abschnittsweise über die maximale Länge des Scanfeldes der Optik belichtet, und mittels Roboter anschließend zur Belichtung des Folgeabschnittes umpositioniert. Abbildung 13 zeigt die verwendete Anlagentechnik, sowie die erzielten Resultate des beschnittenen Preformlings und Laminats.

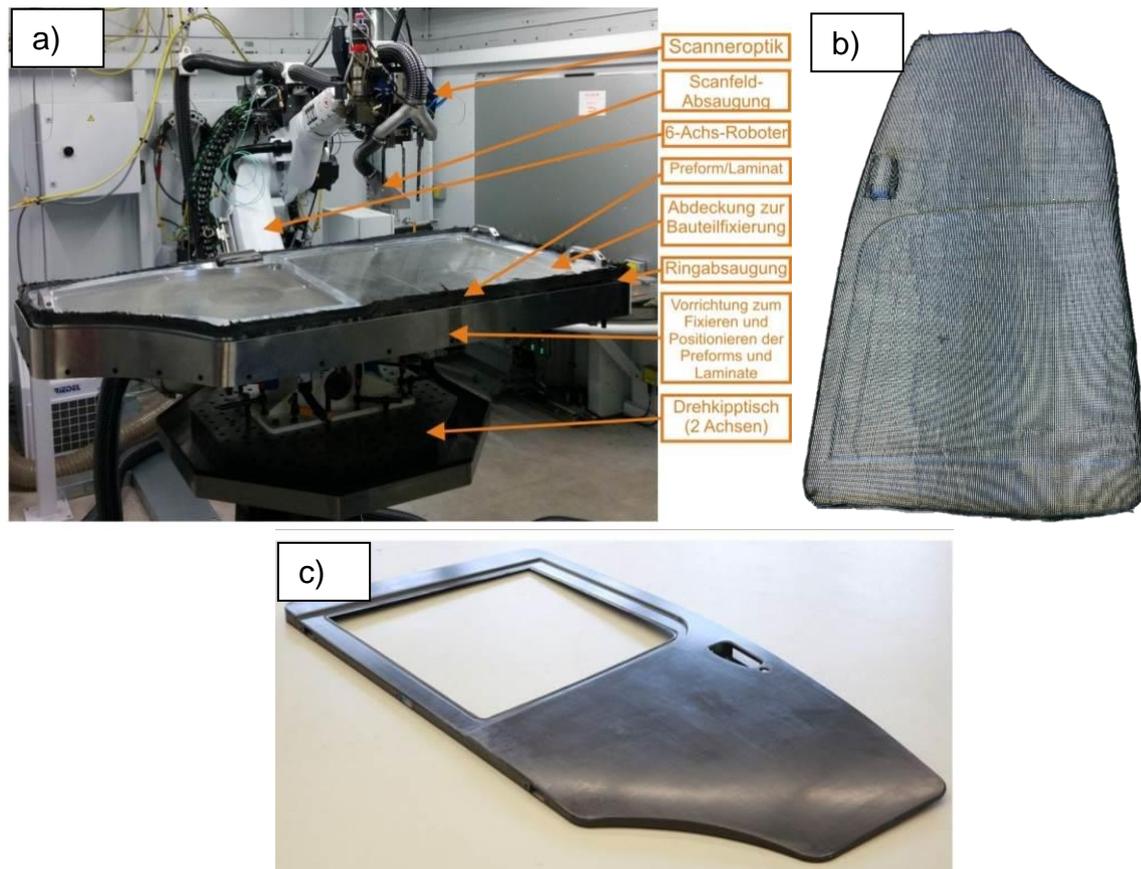


Abbildung 13: a) Anlagentechnik; b) besäumter 3D-Preformling; c) besäumte Demonstrator-Tür

Der Prozess war sowohl für die Preformlinge, als auch die Laminare robust und reproduzierbar, die Kantenqualität vergleichbar zu den 2D-Demonstratoren. Der RTM-Prozess war auch am großflächigen, dreidimensionalen Preformling inklusive Additiveinbringung möglich.

2.1.7 Zielerfüllung

Die Zielerfüllung des Teilvorhabens ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Zielerfüllung iLAS

Bezeichnung	Ziel erreicht			Anmerkung
	ja	nein	teilweise	
Prozess - Anforderungen an die Bearbeitungsqualität				
Anf. an die Bearbeitungsqualität	x			Wärmeeinflusszone <200µm, keine Nachbearbeitung
Anf. an den Prozess	x			Automatisierter Prozess, 3D-Fähigkeit, flexible Materialdicken, Konzept für Überwachung/Regelung
Anf. an die Spanntechnik	x			Vollständige Zugänglichkeit der Schnittkontur, Schutz aller Bauteiloberflächen,

				Reproduzierbarkeit, kein Umspannen
Anf. an die Anlagentechnik	x			
Anf. an die Absaugung	x			Erfassung der Emissionen nach BGR 121
Anf. für Integration in Fertigungskette des Anwenders	x			Eff. Vorschub min 10m/min, Arbeitssicherheit
Demonstration				
Softwareseitige Umsetzung/Abbildung der Geometrie			x	Konzept für die softwareseitige Umsetzung im CAD-System entwickelt, praktische Umsetzung mittels Online-Programmierung
laserseitige Fertigung der Demonstratoren	x			
Prüfung der Anforderungserfüllung	x			

2.2 Zahlenmäßiger Nachweis

Die Kostenplanung wurde innerhalb des Projektes eingehalten. Die größte Position stellen die Personalkosten für wissenschaftliche Mitarbeiter (Pos. 0812) und Techniker (Pos. 0820) mit insgesamt ca. 73% des Gesamtvolumens dar. Gefolgt von Ausgaben für Verbrauchsmaterial, im Wesentlichen Materialien zur Herstellung von CFK-Laminaten und Labormaterial (ca. 13% am Gesamtvolumen). Auf die Vergabe von Aufträgen (Nachrüstung und Integration der Scanneroptik, Emissionscharakterisierung, CFK-Workshop) entfallen ca. 8%, die Tötigung weiterer Investitionen 4%. Der Rest verteilt sich auf Reisekosten (Messen, Tagungen, Projekttreffen) sowie kleinerer Anschaffungen (Gegenstände bis 410€).

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Der Automobilbau stellt besondere Anforderungen an Qualität und Wirtschaftlichkeit bei der Herstellung von Fahrzeugteilen. Außerdem verfügen die OEMs über hohe Standards bezüglich des Arbeitsschutzes. Aus diesem Grund war die exakte Definition der Anforderungen hinsichtlich Prozess, Qualität, Emissionen und Integration in die Fertigungskette notwendig.

Bei der Lasermaterialbearbeitung von CFK, insbesondere mit Matrixsystemen auf Epoxidbasis, entstehen gesundheitsschädliche Emissionen. Um den hohen Anforderungen der Automobilbauer hinsichtlich der Arbeitssicherheit gerecht zu werden, war eine umfangreiche Analyse der entstehenden Emissionen und deren Abführung notwendig. Deshalb wurden am Institut zunächst Vorversuche mit verschiedenen Absaugsystemen durchgeführt, um anschließend die Prozessemissionen eingehend zu analysieren.

Um die erreichbare Schnittqualität hinsichtlich der Anforderungen von VW abschätzen zu können, mussten verschiedene Strahlquellen und Optiken untersucht und eine Auswahl getroffen werden. Hierfür wurden verschiedene am Institut vorhandene Lasersysteme in Stichversuchen getestet und das Ergebnis hinsichtlich Schnittqualität und Vorschubgeschwindigkeit beurteilt.

Anhand dieser Ergebnisse fiel die Entscheidung, die 2D Optik von Trumpf (PFO33) in Kombination mit dem Festkörperlaser (TruDisk 6001) für alle weiteren Versuche innerhalb des Projektes zu verwenden. Es mussten keine Komponenten zugekauft

werden, der Laser war am Institut vorhanden, die Optik kam als Leihgabe von Volkswagen. Die Optik ist kompatibel mit dem am Institut vorhandenen Roboter (KUKA KR30HA). Es mussten lediglich zwei notwendige Umbaumaßnahmen von Trumpf getroffen werden: Die Optik musste mit der kleinsten verfügbaren Brennweite ausgestattet werden, um den Fokusbereich bzw. die Energiedichte zu erreichen, die für das Sublimieren des CFK-Materials notwendig ist. Für die 3D-Versuche und die Demonstration musste die Optik außerdem durch Trumpf am Roboter installiert werden.

Ein Großteil der umfangreichen Versuche zur Prozessentwicklung von Halbzeugen und Laminaten, die für die Einhaltung der Qualitätskriterien und Sicherstellung der 3D-Fähigkeit notwendig waren, wurden am Institut durch verschiedene studentische Arbeiten abgedeckt. Das CFK-Versuchsmaterial konnte größtenteils am Institut durch die vorhandene Ausrüstung mittels Vakuuminfusionsverfahren hergestellt werden. Entsprechend des Arbeitsplans wurde die Eignung des Prozesses für die Einbringung von Kavitäten (Abtragen), sowie die Bearbeitung von verklebten Bauteilen und glasfaserverstärkten Kunststoffen anhand von Stichversuchen nachgewiesen. Die Lackierbarkeit der geschnittenen Kanten (Vorgabe Volkswagen) konnte durch den Projektpartner RheinComposite nachgewiesen werden.

Alle erforderlichen Versuche konnten somit am Institut im angemessenen Umfang durchgeführt werden.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Prozessentwicklung und das daraus gewonnene Prozessverständnis der Halbzeug- und Laminatbearbeitung wurden in einer Vielzahl wissenschaftlicher Publikationen verwertet, nebenbei fand die Verbreitung der Projektergebnisse in Fachzeitschriften und Konferenzen statt (Kapitel 2.6). Das Vorgehen zur Additivierung des Matrixmaterials, die eine wesentliche Qualitätssteigerung zur Folge hatte, wurde patentrechtlich geschützt. Alle innerhalb des Projektes gewonnenen Erkenntnisse tragen zu einer erheblichen Steigerung des Prozessverständnisses der Lasermaterialbearbeitung von CFK bei und können somit für die Akquise neuer Projekte verwendet werden. Das erarbeitete Wissen kann in Folgeprojekten vertieft und in weitere konkrete Anwendungen überführt werden.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Seit dem 1.8.2013 ist das Projekt „HoLQueSt 3D“ (3D Hochleistungs-Laserbearbeitung zur Qualitäts- und Durchsatzsteigerung für die prozesssichere, automatisierte Fertigung von CFK – Leichtbau – Strukturen) unter der Koordination der Volkswagen AG gestartet. Im Rahmen des Projekts „HoLQueSt 3D“ werden Prozess- und Anlagentechnologien für die kostengünstige Herstellung und Reparatur von Bauteilen aus CFK für den Automobilsektor erforscht. Projektziel ist eine automatisierte, prozesssichere 3D-Lasermaterialbearbeitung, die es erlaubt, CFK mit hoher Geschwindigkeit schadigungsarm zu bearbeiten. Infolge der stark unterschiedlichen Eigenschaften der Kohlenstofffasern und des die Fasern umgebenden Kunststoffs bei Wechselwirkung mit Laserstrahlung kann es durch starke Wärmeentwicklung zu Schädigungen der Bauteile in der Bearbeitungszone kommen. Um dies zu verhindern, sollen gepulste Hochleistungslaser mit Pulsdauern im Nanosekundenbereich (1 Nanosekunde = 10^{-9} Sekunden) eingesetzt werden. Haupt-Unterscheidungsmerkmale zum Projekt Remote-C sind zum einen die grundsätzlich andere Laserquelle sowie die untersuchten Werkstoffe. Während im Projekt HoLQu-

eSt 3D der Trennprozess hauptsächlich an ausgehärteten Bauteilen untersucht wird, liegt in Remote-C der Fokus auf dem Trennprozess entlang der gesamten Fertigungskette.

Für das Projekt „HoLQueSt 3D“ konnten im Rahmen eines Tagungsbesuchs (I-CALEO) weitere Details / Charakteristika des verwendeten Lasersystems und Prozessansatzes in Erfahrung gebracht werden. Der in „HoLQueSt 3D“ verwendete Ansatz nutzt aufgrund der gepulsten Laserstrahlquelle wesentlich größere Prozessfaserdurchmesser (technische Limitation durch die hohen Intensitäten), wodurch auf dem Bauteil ein Spot von ca. 1 mm erreicht wird. Der in Remote-C entwickelte Ansatz zeigt diesbezüglich deutliche Vorteile, da mit dem entwickelten System Spotdurchmesser von < 200 µm erreicht werden können.

2.6 Veröffentlichungen

Eine Erfindungsmeldung zum Thema „Verfahren zum Trennen von faserverstärkten Kunststoffen mittels Laserstrahlung durch Zugabe von Additiven“ wurde durch die TuTech GmbH (Ein Unternehmen der Technischen Universität Hamburg Harburg) beim Patentamt angemeldet.

Durch die Veröffentlichung der Aktivitäten und Ergebnisse des Projekts fand eine umfangreiche Verbreitung dieser Inhalte statt. Dazu sind konkret Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Magazinen und Fachzeitschriften sowie auf fachspezifischen Tagungen und Messen erfolgt, weitere sind geplant:

- Emmelmann, C.; Herzog, D.; Canisius, M.: Laser-Remote-Schneiden – Großserienfähiges Trennverfahren für Faserverbundkunststoffe. In: 19. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e.V. – Faserverbundwerkstoffe in der Energiewende. 27.-28. Februar 2013, Hamburg, S.68-70. ISBN 978-3-941492-58-5
- Herzog, D.; Canisius, M.; Schmidt-Lehr, M.; Rörig, B.; Schlude, N.; Hammer, T.; Emmelmann, C.: Großserientauglicher Trennprozess – Endkonturzuschnitt an CFK-Bauteilen durch Laser-Remote-Bearbeitung. In: Kunststoffe , 6/2014 , S. 46-49
- Herzog, D.; Canisius, M.; Schmidt-Lehr, M.; Rörig, B.; Schlude, N.; Hammer, T.; Emmelmann, C.: Cutting Process Suitable for High-Volume Production. In: Kunststoffe International, 6/2014, S. 28-31
- Herzog, D., Canisius, M.; Schmidt-Lehr, M.; Oberlander, M.; Tasche, J.; Emmelmann, C.: Laser Cutting of CFRP using a 30 Kw Fiber Laser. In: ICALEO 2014.
- Herzog, D., Canisius, M., Schmidt-Lehr, M., Hergoss, P., Daniel, C., Hallmann, S., Emmelmann, C., Scherner, M.V.: Investigations on the 3D laser cutting of CFRP using a nanosecond pulse fibre laser. Applied Polymer Composites. Vol. 2, No. 4, 2014
- Canisius, M.; Herzog, D.; Schmidt-Lehr, M.; Oberlander, M.; Direnga, J.; Emmelmann, C.: Laser cutting of carbon fiber-reinforced plastic with an absorber transparent for visible spectrum. Journal of Laser Applications, Band 27, 2015, Seite 032003.
- Schmidt-Lehr, M.; Oberlander, M.; Herzog, D., Canisius, M.; Radek, M.; Emmelmann, C.: Investigations on the process strategy of laser remote cutting of carbon reinforced plastics with a thickness of more than 3 mm. ICCM20 in Copenhagen, 2015

- Herzog, D.; Schmidt-Lehr, M.; Canisius, M.; Oberlander, M.; Emmelmann, C.: Influence of laser cutting on handling, drape and infusion characteristics of preforms. ICCST/10, 2015
- Oberlander, M.; Schmidt-Lehr, M.; Herzog, D.; Canisius, M.; Emmelmann, C.: Laser-remote-cutting of large-scale semi-finished carbon-fiber products using a solid state laser. Tagungsband, Lasers in Manufacturing Conference, 21.-25. Jun. 2015, München, Deutschland, Beitrag 137.
- Canisius, M.; Oberlander, M.; Herzog, D.; Schmidt-Lehr, M.; Ploog, P.; Albert, F.; Emmelmann, C.: Correlation between Temperature Field and Heat Affected Zone during Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Polymers. Tagungsband, Lasers in Manufacturing Conference, 21.-25. Jun. 2015, München, Deutschland, Beitrag 260.
- Oberlander, M.; Herzog, D.; Canisius, M.; Schmidt-Lehr, M.; Emmelmann, C.: Highspeed-Trennprozess für 3D-CFK-Bauteile im Großformat. In: *Plastverarbeiter*, 02/2016, S. 52-55
- Herzog, D.; Schmidt-Lehr, M.; Oberlander, M.; Canisius, M.; Radek, M.; Emmelmann, C.: Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of high thickness. ICCM/20

3. Literatur

- GOE10 Goeke, A.: *Laserstrahltrennen von Faserverbundkunststoffen*. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 2010
- HER08 Herzog, D.; Jäschke, P.; Meier, O.; Haferkamp, H.: Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP. *Int J on Machine Tools & Manufacture*, 48 (2008) 1464– 1473
- KAT10 Katayama, S.; Jung, K.-W.; Kawahito, Y.: High power laser cutting of CFRP, and laser direct joining of CFRP to metal. 29th International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, ICALEO 2010 - Congress Proceedings, Volume 103, 2010, Pages 333-338
- KLO11 Klotzbach, A.; Hauser, M., Beyer, E.: Laser cutting of carbon fiber reinforced polymers using highly brilliant laser beam sources. *Physics Procedia*, Vol. 12, Issue PART 1, 2011, Pages 572-577
- LÜT09 Lütke M.; Klotzbach, A.; Wetzig, A.; Beyer, E.: Laserschneiden von Faserverbundwerkstoffen, *LTJ* (3) 2009, S. 25f
- NII11 Niino, H.; Kurosaki, R.: Laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) by UV pulsed laser ablation. *Proceedings of SPIE*, Volume 7920, 2011, Article number 792019
- STU11 Stute, U.: Die Hoffnung Laser. *Laser-Community* 11/2011, S.14-16

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Laser-Remote-Schneiden zur Automatisierung und Verkürzung der Taktzeiten bei der Fertigung von Fahrzeugen und Fahrzeugbauteilen in CFK-Bauweise (REMOTE-C) Teilvorhaben: Prozessentwicklung für das Laser-Remote-Schneiden von faserverstärkten Kunststoffen und Halbzeugen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Oberlander, Max Herzog, Dirk Canisius, Marten Schmidt-Lehr, Matthias Emmelmann, Claus	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2015
	6. Veröffentlichungsdatum 30.11.2015
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Technische Universität Hamburg-Harburg Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik Denickestr. 17 21073 Hamburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 01MX12049C
	11. Seitenzahl 20
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 11019 Berlin	13. Literaturangaben 7
	14. Tabellen 1
	15. Abbildungen 13
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Bei der Bearbeitung von Faserverbundwerkstoffen, insbesondere von Kohlenstofffaserverbundwerkstoffen (CFK), sind Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide Stand der Technik. Nachteil dieser Verfahren ist der hohe Werkzeugverschleiß, der durch die abrasive Wirkung der Verstärkungsfasern verursacht wird. Dies führt zu hohen Kosten für die Bearbeitung bei gleichzeitig unzureichender Produktivität. Eine Alternative stellt das Wasserstrahlabrasivschneiden dar, wobei die erreichbaren Geschwindigkeiten im Bereich von wenigen m/min und das aufwändige Handling des Wasser-Abrasivmittel-Gemisches einem Einsatz in der Serienfertigung im Automobilbereich entgegenstehen. Ein vielversprechender Ansatz zur Lösung dieser Problemstellung ist das Laser-Remote-Trennen, da neben der Verschleißfreiheit des Verfahrens auch hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten von > 10 m/min erreichbar sind, und mit einer hohen Automatisierbarkeit und Flexibilität (3D-Fähigkeit) einhergehen. Unter diesem Gesichtspunkt befasste sich das Projekt Remote-C mit der Entwicklung eines großserienfähigen Laser-Remote-Trennprozesses für großflächige, dreidimensionale CFK-Bauteile. Das Institut für Laser- und Anlagensystemtechnik war mit der Zielsetzung an dem Projekt beteiligt, den Trennprozess für zwei- und dreidimensionale Halbzeuge und Laminare, unter Einhaltung der Anforderungen des Automobilbaus hinsichtlich Bearbeitungsqualität, zu entwickeln und zu demonstrieren. Die 2D-Scanneroptik wurde zu diesem Zweck an einem Roboter installiert. Die Schnittkontur wurde abschnittsweise über die maximale Länge des Scandfeldes der Optik belichtet, und mittels Roboter anschließend zur Belichtung des Folgeabschnittes umpositioniert. Sowohl für CFK-Laminare, als auch Halbzeuge konnte innerhalb des Projektes ein 3D-fähiger Trennprozess entwickelt werden, der alle notwendigen Anforderungen an den Prozess und die Bearbeitungsqualität erfüllt. Der entwickelte Prozess wurde an der Herstellung einer Außenschale einer Caravantür, vom Beschnitt des Preformlings, dessen Injektion im RTM-Prozess bis zur anschließenden Besäumung des Laminats demonstriert. Die Einhaltung der Vorgaben seitens Volkswagen erlaubt somit künftig eine Integration des Prozesses in die automobilen Fertigungskette.	
19. Schlagwörter Elektromobilität, Leichtbau, CFK, Laser-Remote-Trennen	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN intended	2. type of document (e.g. report, publication) Final report	
3. title Laser-Remote-Cutting for the Automation and Reduction of the cycle times with the Production of Vehicles and Vehicle parts in CFRP Construction (REMOTE-C) Subproject: Process development for laser-remote-cutting of fiber-reinforced plastics and semi-finished products		
4. author(s) (family name, first name(s)) Oberlander, Max Herzog, Dirk Canisius, Marten Schmidt-Lehr, Matthias Emmelmann, Claus	5. end of project 30.09.2015	6. publication date 30.11.2015
	7. form of publication Report	
	8. performing organization(s) (name, address) Hamburg University of Technology Institute of Laser and System Technologies Denickestr. 17 21073 Hamburg	
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry for Economic Affairs and Energy 11019 Berlin	9. originator's report no.	
	10. reference no. 01MX12049C	
	11. no. of pages 13	
13. no. of references 5	14. no. of tables 2	
	15. no. of figures 3	
	16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract In the processing of fiber-reinforced composites, especially of carbon-fiber reinforced plastics (CFRP), processes with geometrically defined cutting edge are state of the art. The disadvantage of this process is the high tool wear caused by the abrasive effect of the reinforcing fibers. This leads to high process costs as well as insufficient productivity. An alternative is the water-jet-cutting with achievable speeds up to just a few m / min. This and the time-consuming handling of water-abrasive mixture preclude a use in series production in the automotive sector. A promising approach for solving this problem is the laser-remote-cutting, because in addition to the wear-free process, high processing speeds of > 10 m are achievable, accompanied with a high automation and flexibility (3D capability). The project Remote-C dealt with the development of a laser-remote-cutting-process for large-scale, three-dimensional CFRP parts in large series production. The Institute of Laser and System Technologies has been involved with the objective of the project to develop the cutting process for two and three dimensional semi-finished products and laminates, according to the demands of the automotive industry regarding cutting quality. For this purpose the 2D scanning optics was installed on a robot. The contour was exposed section-wise on the maximum length of the scanning field of the optics, and then repositioned by the robot to expose the remaining section. Both for CFRP laminates, as well as semi-finished products, a 3D-capable cutting process could be developed within the project, fitting all requirements for the process and the processing quality. The process was demonstrated by manufacturing an outer part of a caravan door, from trimming the preforms through their injection within an RTM process to final trimming of the laminate. The process fulfils all requirements by Volkswagen and allows future integration of the process in the automotive manufacturing chain.		
19. keywords electromobility, lightweight construction, laser-remote-cutting, cfrp		
20. publisher	21. price	