

## Schlussbericht zu 8.2

|  |  |
|--|--|
| <b>Zuwendungsempfänger:</b><br>Clean-Lasersysteme GmbH    | <b>Förderkennzeichen:</b><br>01QE0906B |
| <b>Vorhabensbezeichnung:</b><br>Verbundprojekt: „ <i>Portable Laser basierte Reparatereinheit für Verbundmaterial</i> “<br>Teilprojekt: „Entwicklung eines portablen, kurzgepulsten und ggf. wellenlängenangepassten Lasersystems zum Abtragen und Reparieren von CFK“ |  |
| <b>Laufzeit des Vorhabens:</b> 01.08.2009 bis 30.11.2012   |  |
| <b>Berichtszeitraum:</b> 01.08.2009 bis 30.11.2012   |  |

Gefördert von:



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# INHALTSVERZEICHNIS

## Inhalt

|              |  |             |
|--------------|--|-------------|
| <b>1</b>     | <b><u>AUFGABENSTELLUNG</u></b>   | <b>1.3</b>  |
| <b>2</b>     | <b><u>VORAUSSETZUNGEN</u></b>  | <b>2.4</b>  |
| <b>3</b>     | <b><u>PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS</u></b>   | <b>3.5</b>  |
| <b>4</b>     | <b><u>WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE</u></b>   | <b>4.6</b>  |
| <b>5</b>     | <b><u>ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN</u></b>   | <b>5.7</b>  |
| <b>6</b>     | <b><u>ERGEBNISSE</u></b>   | <b>6.8</b>  |
| <b>6.1</b>   | <b>DEFINITION DER ANFORDERUNGEN AN DAS LASERSYSTEM UND DER BEARBEITUNGS-<br/>PARAMETER</b>                                       | <b>6.8</b>  |
| <b>6.2</b>   | <b>LASERSYSTEMENTWICKLUNG BASIEREND AUF „ALL-IN-ONE KONZEPT“</b>   | <b>6.10</b> |
| <b>6.3</b>   | <b>PROBLEME UND GRENZEN BEI DER REALISIERUNG DES ALL IN ONE KONZEPTE</b>   | <b>6.14</b> |
| <b>6.4</b>   | <b>LASERSYSTEMENTWICKLUNG BASIEREND AUF 2-MODULKONZEPT</b>   | <b>6.20</b> |
| <b>6.4.1</b> | <b>ENTWICKLUNG EINES GEEIGNETEN BEARBEITUNGSKOPFES FÜR DAS LASERSYSTEM UND DIE<br/>REPARATUR ANWENDUNG</b>                       | <b>6.20</b> |
| <b>6.4.2</b> | <b>ENTWICKLUNG UND IMPLEMENTIERUNG EINES SOFTWARE BASIERTEN CONTROL SYSTEMS<br/>FÜR DAS LASERSYSTEM UND DEN BEARBEITUNGSKOPF</b> | <b>6.22</b> |
| <b>6.5</b>   | <b>DEMONSTRATION VON REPARATORSITUATIONEN MITTELS LASERSYSTEM</b>  | <b>6.23</b> |
| <b>7</b>     | <b><u>VORAUSSICHTLICHER NUTZENS, INSBESONDERE DER VERWERTBARKEIT DES<br/>ERGEBNISSES</u></b>                                     | <b>7.26</b> |
| <b>8</b>     | <b><u>FORTSCHRITT AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN</u></b>   | <b>8.28</b> |
| <b>9</b>     | <b><u>VERÖFFENTLICHUNG DER ERGEBNISSE</u></b>  | <b>9.29</b> |

# 1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines portablen, kurzgepulsten und ggf. wellenlängenangepassten Lasersystems zum Abtragen und Reparieren von CFK

Die Aufgabenschwerpunkte des hier bei cleanLASER durchgeführten Teilprojekts bezogen sich dabei auf folgende Aspekte:

- Erstellung eines Gerätekonzeptes sowie Entwicklung der Technologie
- Definition der erzielbaren Laserparameter
- Entwicklung und Erprobung des System-Konzeptes
- Aufbau eines Demonstratorsystems
- Validierung der Einsatzfähigkeit des Demonstrators

Die gesamten Entwicklungsarbeiten waren unter dem Aspekt einer späteren Einsatzfähigkeit des Systems im Umfeld der Reparatur und Klebevorbehandlung in der Luftfahrtindustrie durchzuführen. Hierzu wurden folgende Kriterien als Parameter definiert:

1. Kompakter und mobiler Aufbau des Systems
2. Flexible Einsatzfähigkeit
3. Sichere Einhausung gegen den Austritt gefährlicher Laserstrahlung
4. Einsatz auf ebenen und gekrümmten Oberflächen
5. Einsatz zur optimierten Vorbehandlung von Faserverbundwerkstoffen im besonderen CFK
6. Einsatz zum schichtweisen Abtrag von CFK (Schäften) zur Vorbereitung von Reparaturbereichen
7. Einfache, bedienerfreundliche Handhabung

Die nachfolgend dargelegten Lösungsansätze und Ergebnisse orientieren sich an den hier aufgeführten Zielsetzungen der Aufgabenstellung.

## 2 Voraussetzungen

Die Laser-Ablation als abtragender Prozess zur großflächigen Bearbeitung von CFK war zu Beginn des Projekts ein neuartiger Ansatz. Bisherige Verfahren griffen auf manuelle, mechanische Prozesse zurück wie z.B. das Schleifen.

Es war bereits aufgrund interner bilateraler Untersuchungen mit Kunden bekannt, dass die Entfernung von Epoxidharz von CFK mit gepulst emittierenden Lasern möglich ist. Auch war generell bekannt, dass ein schichtweiser Abtrag von CFK möglich war.

Dabei konnten in ersten Zug-Scherversuchen gute Haftungswerte auf Laserbearbeiteten Proben erzielt werden, die gegenüber einer geschliffenen Oberfläche vergleichbare Klebe-Festigkeiten aufweisen.

Des Weiteren waren zu dem Zeitpunkt bereits Lasersysteme zur Oberflächenreinigung von Trennmittelkontaminierten, faserverstärkten Polyurethan Bauteilen im industriellen Einsatz.

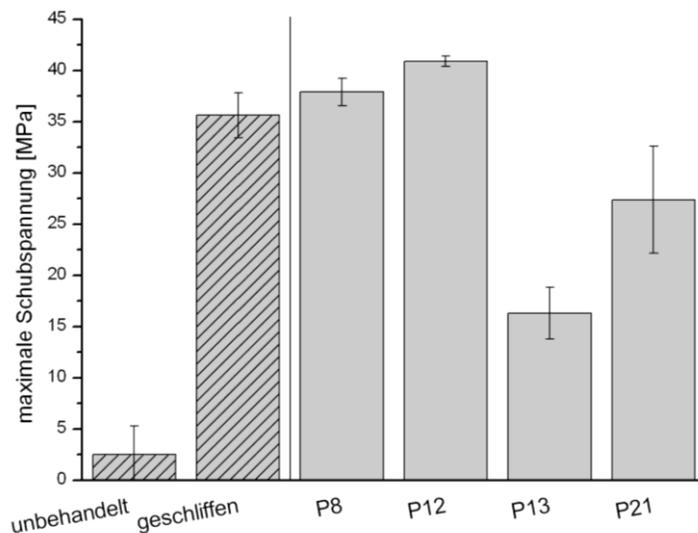


Abbildung 1: Partiiell Lasergereinigtes Bauteil aus faserverstärktem Polyurethan (Klebevorbehandlung zur Kaschierung), Rechts: Zugscherfestigkeiten nach DIN 1465 bei laservorbehandelten CFK Proben (Referenz: manuelles Schleifen)

Ein geeignetes System zur strukturellen Klebevorbehandlung **UND** Reparaturvorbereitung (im Sinne von stufenweisem Abtrag) von CFK war nicht verfügbar.

### 3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die im Teilprojekt durchzuführenden Arbeiten gliedern sich in folgenden Arbeitspunkte die aufeinander aufbauen.

Die Arbeitspunkte 2 bis 4 stellen dabei neben der aktiven Teilnahme an den Projekttreffen zur Abstimmung der Arbeiten die wesentlichen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte von cleanLASER dar.

1. Definition der Bearbeitungsparameter und Festlegung von standardisierten Werkstücken hinsichtlich Ihrer geometrischen Abmessung und Krümmung
2. Entwicklung eines geeigneten Lasersystems zur Oberflächenbearbeitung von CFK bestehend aus den Modulen:
  - a. Strahlquelle
  - b. Bearbeitungsoptik
  - c. Steuerungstechnik und Software
  - d. Handhabungstechnik
3. Aufbau und Erprobung des Lasersystems
4. Validierung des Demonstrators
5. Auswertung der erzielten Ergebnisse bei der Bauteilbearbeitung

Die angewandten Technologien und Softwaretools bei der Entwicklung des Systems sind in der nachfolgenden Ergebnisbeschreibung erläutert.

Im Rahmen der Systementwicklung wurde zunächst die Entwicklung eines hochintegrierten Systems bestehend aus Laser und Bearbeitungsoptik angestrebt. Im späteren Projektverlauf musste aufgrund von technischen Grenzen von diesem Konzept wieder Abstand genommen werden, so dass final ein System aus physikalisch separierten Modulen Strahlquelle und Bearbeitungsoptik realisiert wurde.

## **4 Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde**

Zu Beginn des Projekts wurden CFK-Strukturen aus der Luftfahrtindustrie durch manuelle, mechanisch trennende Verfahren wie das Schleifen oder Fräsen abgetragen, um sie für eine Reparatur oder Nachbearbeitung vorzubereiten. Dies war zu Projektstart der Stand der Technik.

Ein wesentlicher Nachteil dieses Verfahrens ist der hohe Anteil an manueller Arbeit. Außerdem ist CFK ein sehr harter Werkstoff, der zu einem erhöhten Verschleiß bei kontaktbasierten Werkzeugen führt. Durch die Entwicklung eines Laserprozesses zur CFK-Bearbeitung sollte die Reparaturvorbereitung automatisiert und durch eine Verringerung der manuellen Arbeit reproduzierbarer werden. Hinzu kam, dass der Laser kontakt- und somit verschleißfrei arbeitet.

Der selektive, schichtweise Abtrag von CFK mittels Laserstrahlung war zu Beginn der Arbeiten noch nicht prozesssicher möglich. Geeignete kompakte Systeme standen nicht zur Verfügung.

## 5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes wurde von cleanLASER (CLS) mit:

- GMI Aero SAS, Paris (GMI)
- Laser Zentrum Hannover e.V. (LZH)
- National Technical University of Athens, Athen (NTUA)

kooperiert.

GMI koordinierte das Verbundprojekt und war somit maßgeblich für die Auswahl und Definition von Materialien und Reparaturszenarien zuständig. Die NTUA war als Unterauftragnehmer von GMI zuständig für die durchzuführenden Materialtests. Am LZH wurde neben der Bearbeitung von Testmustern auch die Definition von geeigneten Bearbeitungs-Parametern ausgeführt.

Die Koordination der Arbeiten erfolgte im Rahmen von regelmäßigen Projekt- und Arbeitstreffen die bei den Partnern CLS, GMI und LZH durchgeführt wurden. Darüber hinaus wurden zur Senkung der Reisekosten auch Telefonkonferenzen abgehalten.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Definition der Anforderungen an das Lasersystem und der bearbeitungs-Parameter

Basierend auf den vom LZH gemachten Voruntersuchungen wurden 2 industriell verfügbare und technisch mögliche Wellenlängen für die Anwendung evaluiert:

1.: ca. 1064nm (NIR). Diese Nah-Infrarot Wellenlänge weist folgende **Vorteile** auf:

- relativ einfache technische Erzeugbarkeit mittels Faser oder Festkörperlaser
- relativ gute Wirkungsgrade erzielbar
- vergleichsweise hohe mittlere Leistungen erreichbar
- Übertragbarkeit mittels Lichtwellenleiter

Nachteilig ist jedoch die geringe Absorption in der Epoxy Matrix des CFK's und die dadurch reduzierte Wirkeffizienz auf dem Bauteil

2.: 532 nm Diese Wellenlänge im sichtbaren Bereich (grün) weist folgende **Nachteile** auf:

- relativ aufwändige technische Erzeugbarkeit durch zusätzliche Frequenzkonvertierung
- ca. 70% geringere Wirkungsgrade erzielbar
- dadurch vergleichsweise geringe mittlere Leistungen erreichbar
- eingeschränkte Übertragbarkeit mittels industriell verfügbarer Lichtwellenleiter

Vorteilhaft ist jedoch die bessere Absorption in der Epoxidharz Matrix des CFK's und die dadurch erhöhte Wirkeffizienz auf dem Bauteil. Durch die im Vergleich zum NIR Laser kleineren Wellenlänge lassen sich geringere Fokusdurchmesser und bessere Bearbeitungspräzisionen sowie eine bessere Dosierbarkeit des Abtrags erreichen.

Die entsprechende Bewertungsmatrix wurde vom LZH aufgestellt.

Der Einsatz Frequenzverdreifacher oder vervielfacher Festkörperlaser zur Bearbeitung im UV Wellenlängenbereich scheidet aus Gründen der Handhabbarkeit (keine Übertragbarkeit mittels Lichtwellenleiter) sowie der erwarteten Kosten aus.

Die Lasersysteme müssen zur minimale thermischen Schädigung des Substrates gepulst betrieben werden können (Pulsdauer max. 100ns sind anzustreben) sowie über eine gute Strahlqualität  $M^2 < 6$  verfügen. Gleichzeitig sollten bei 1064 nm Wellenlänge mindestens 30 Watt mittlere Strahlquellenleistung und bei 532nm mindestens 10 Watt Strahlquellenleistung erzielbar sein.

Im Rahmen einer ersten Vorabkonzeptes wurde ein mögliches Laserkonzept definiert. Ziel des Konzeptes ist der Aufbau eines Ultra-kompakten Systems das portabel einsetzbar sein soll. Zur Bearbeitung muss an den Laser ein 2D Strahlableitungs-system angeschlossen sein um eine Strahlableitung auf der Bauteiloberfläche zu gewährleisten.

Nachfolgende Abbildung zeigt das integrierte „All in One“ Konzept:

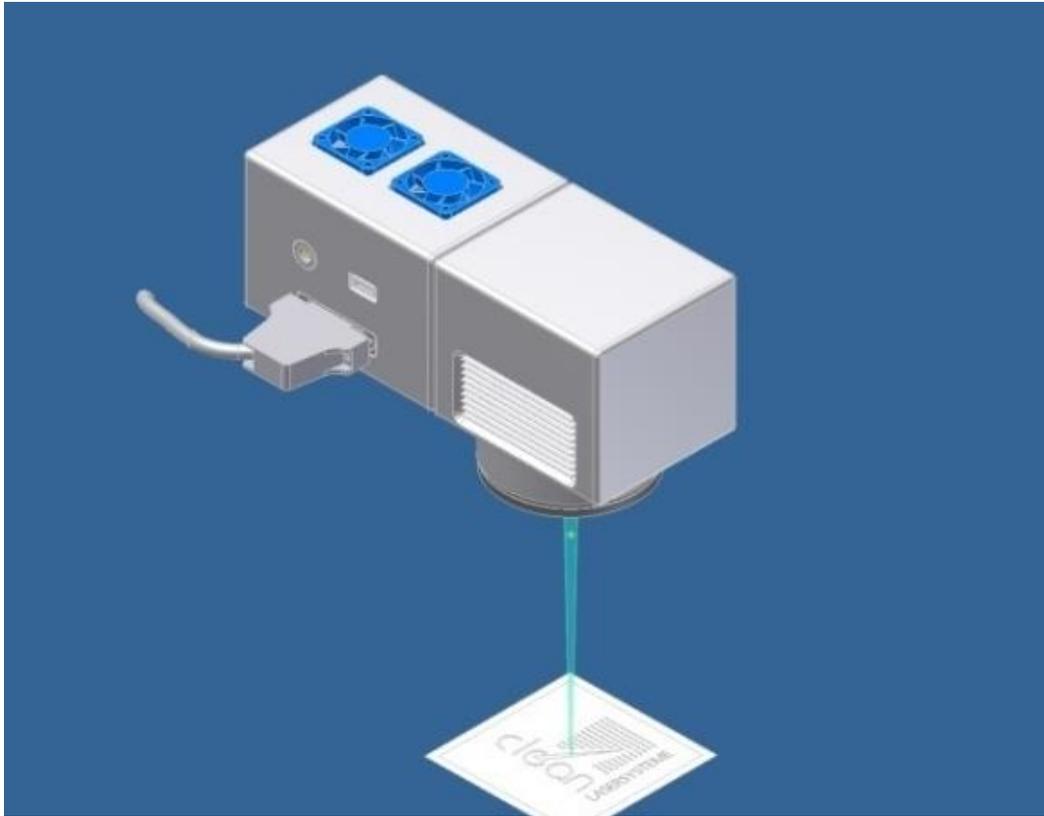


Abbildung 2: CL Kompakt Laser-Bearbeitungssystem Grundkonzept („All in One“ System)

Die Besonderheit besteht neben den kompakten Abmessungen (Lasersystem einschl. aller Steuerungseinheiten (geplant ca. 140x80x90mm, zzgl. Strahlableitung/Bearbeitungskopf) auch in der komplett luftgekühlten Bauweise. Dabei sollte die Mittlere Laserleistung des Systems ausreichend dimensioniert sein um eine effiziente Bearbeitung zu ermöglichen. Eine spätere optionale Trennung von Strahlquelle und Bearbeitungsoptik und einer Strahlübertragung per Lichtwellenleiter wurde ebenfalls untersucht.

Aufgrund der nicht erfolgreichen Ergebnisse bei der Strahlquellenentwicklung des grundsätzlich vielversprechenden „All-in-One Konzeptes“ (siehe nachfolgende Beschreibung) wurde als weiterer Lösungsansatz auch die Trennung von Laser und Optik mit Einsatz eines fasergekoppelten Lasers verfolgt. Auf diesem Ansatz basieren auch die später erzielten Bearbeitungsergebnisse die eine erfolgreiche Fortführung des Projektes ermöglichten.



Abbildung 3: Alternatives Laser-Bearbeitungssystem mit getrennter Strahlquelle und Bearbeitungsoptik

Die im Rahmen des Projektes ermittelten Möglichkeiten und Grenzen beider Konzepte sind nachfolgend aufgeführt:

**Konzept 1:** „All-in-ONE“ Version des integrierten Laserkopfes bestehend aus ultrakompaktem Laserkopf einschl. Controller und Strahlableiteneinheit in einem Gehäuse. Nachteil bei diesem Konzept: Eine voll luftgekühlte Version ist nunmehr auf mittlere Leistungen von <20 Watt beschränkt. Auch führten technische Komplikationen bei der Entwicklung nicht zu einer Nutzung des Konzeptes. Potenzieller Vorteil: kompakte und sehr preisgünstige Lösung.

**Konzept 2:** 2-Modul Lasersystem bestehend aus 2 separaten Modulen (Basisgerät und Bearbeitungsoptik) sowie Verbindung über Lichtwellenleiter. Vorteil bei diesem Konzept: Erzielung einer mittleren Laserleistung von bis zu 50 Watt mittels kommerziell verfügbarer Strahlquellen. Dadurch potenziell hohe Abtragraten erzielbar.

## 6.2 Lasersystementwicklung basierend auf „All-in-one Konzept“

Im Rahmen der integrierten Systemtechnik war ein wesentlicher Bestandteil die Entwicklung einer kompakten Laserstrahlquelle:

Im Rahmen der Laserauslegung beschäftigte sich cleanLASER aktuell mit folgenden Arbeitspunkten:

- a. Auslegung des Resonator-Designs zur Erzielung kurzer Laserpulse
- b. Effiziente Dioden-Pumptechnologie
- c. Entwicklung der Laser Controller Technologie
- d. Adaption einer kompakten, teilintegrierten Bearbeitungsoptik

Im Rahmen der Resonator Auslegung wurden Bewertungen mit Hilfe im Hause verfügbarer Programme zur Simulation und Auslegung von Laserstrahlquellen und optischen Systemen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass für die zur Bearbeitung von CFK notwendigen hohen Pulsleistungen mit ggf. sehr kurzen Pulsen im Bereich von wenigen Nanosekunden effizient mit einem gütegeschaltetem, endgepumpten Festkörperlaser mit kurzer Resonatorlänge erzielt werden können. Entsprechende Resonator-Simulationen ergeben, dass dieses Strahlquellenkonzept sowohl für 1064nm als auch für frequenzverdoppelte Systeme realisierbar ist.

Zur effizienten Anregung des Lasermediums ist eine optische Pumpquelle mit hohem Wirkungsgrad und hoher Leistungsdichte notwendig. Prinzipiell kommen 3 verschiedene Pumptechnologien in Betracht:

1. Kantenemitter (klassische Laserbarren)
2. Vertikal emittierende Diodenarrays (VCSEL)
3. Fasergekoppelte Pumpmodule (basierend auf Kantenemittern)

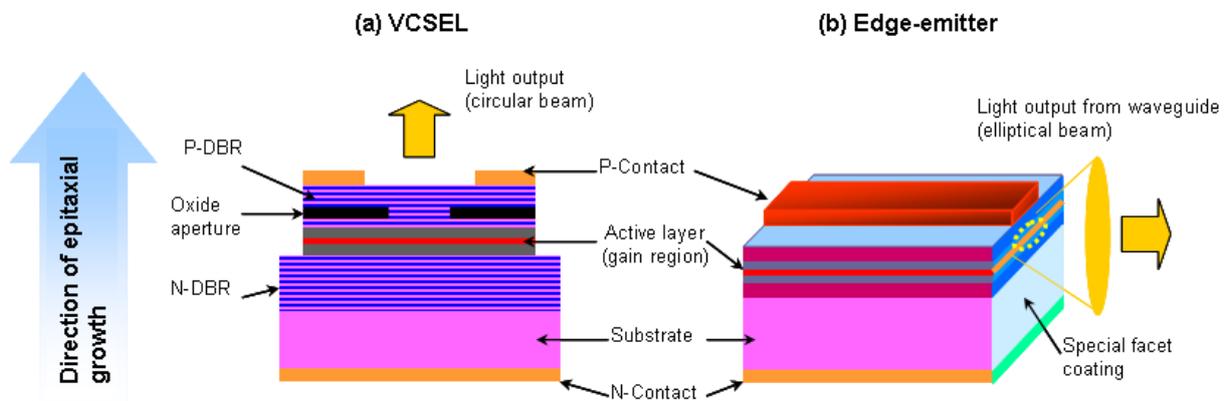


Abbildung 4: Technologievergleich Kantenemitter vs. VCSEL Dioden

Der Einsatz von VCSEL Dioden als Pumpquelle ist für ein portables, luftgekühltes System vielversprechend. Der wesentliche Vorteil dieser Technologie besteht in der relativ hohen zulässigen Betriebstemperatur der Dioden (bis zu 80°C) und somit einer optimalen Voraussetzung für den Einsatz eines einfachen, kompakten Kühlkonzeptes.

Zum Pumpen ist eine entsprechende Linsentechnologie einzusetzen die ebenfalls im Rahmen der Optikentwicklung konzipiert wurde. Dadurch ergibt sich eine entsprechend gewünschte Strahlverteilung im Lasermedium bzw. im Strahlfokus.



Abbildung 5: Optisches System mit Pumpdioden sowie Strahlverteilung im Fokus (Simulation)

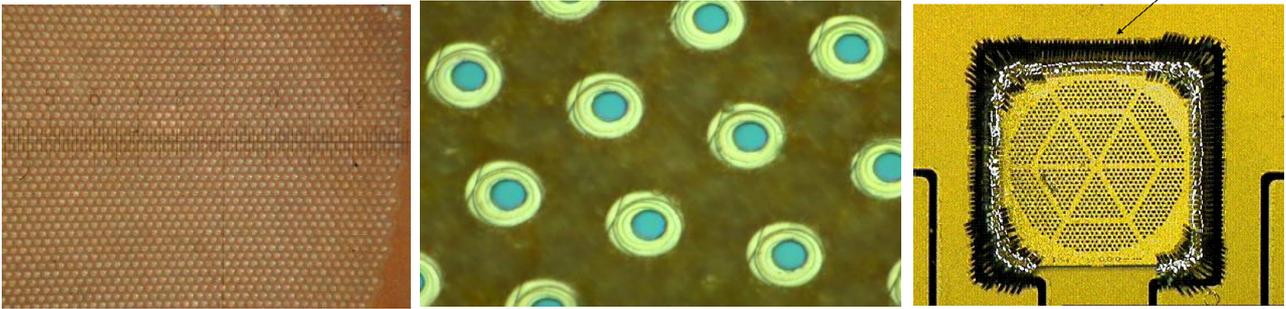


Abbildung 6: Detailaufnahmen und Übersicht Vertikal emittierender Diodenarrays (VCSEL), Durchmesser der Emittor ca.  $3\mu\text{m}$

Das System soll neben der „all in one“ Controller-Platine für den Laser auch mit einem weiteren Modul zur Strahlableitung direkt betrieben werden können. Die Besonderheit dieses Moduls besteht in der on-Board Leistungselektronik für die (Pump-) Laserdioden.

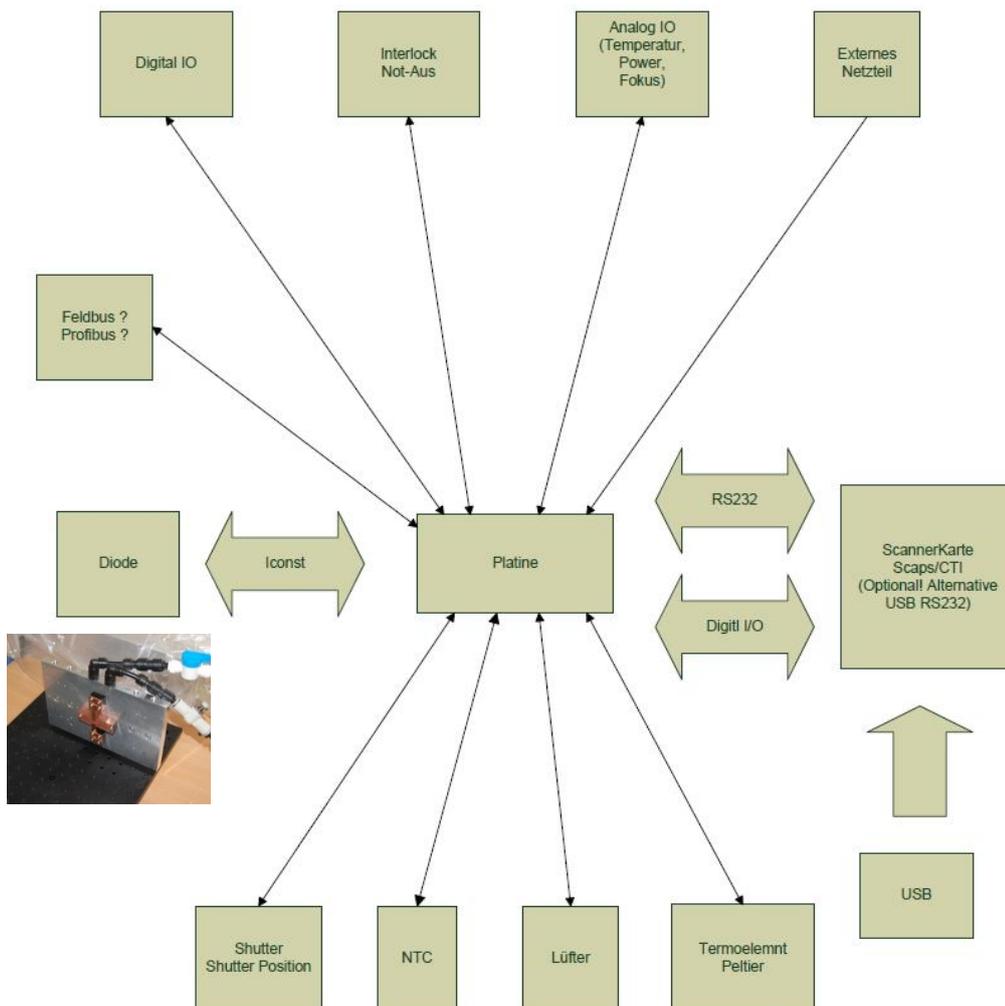


Abbildung 7: Konzept des „All-in-one“ Laser Controllers

Im Rahmen der Laser und Controller Entwicklung konnte eine „all in one“ Controller-Platine für den Laser realisiert werden. Diese wird mit einem marktverfügbaren weiteren Modul zur Strahl-  
ablenkung direkt Verbunden. Die Besonderheit dieses Moduls besteht in der on-Board Lei-  
stungselektronik für die (Pump-) Laserdioden. Sowie der kompakten Bauweise. Darüber hinaus  
konnte ein am Markt verfügbares Strahlableitmodul selektiert werden das den folgenden An-  
forderungen genügt:

- Kompakte Bauweise
- Einfache Einbindung in die Steuerung
- Flexible Parametrierung
- Hohe Strahlableitdynamik
- Strahlableitung geeignet für das zu realisierende Lasersystem nach o.g. Konzept 1

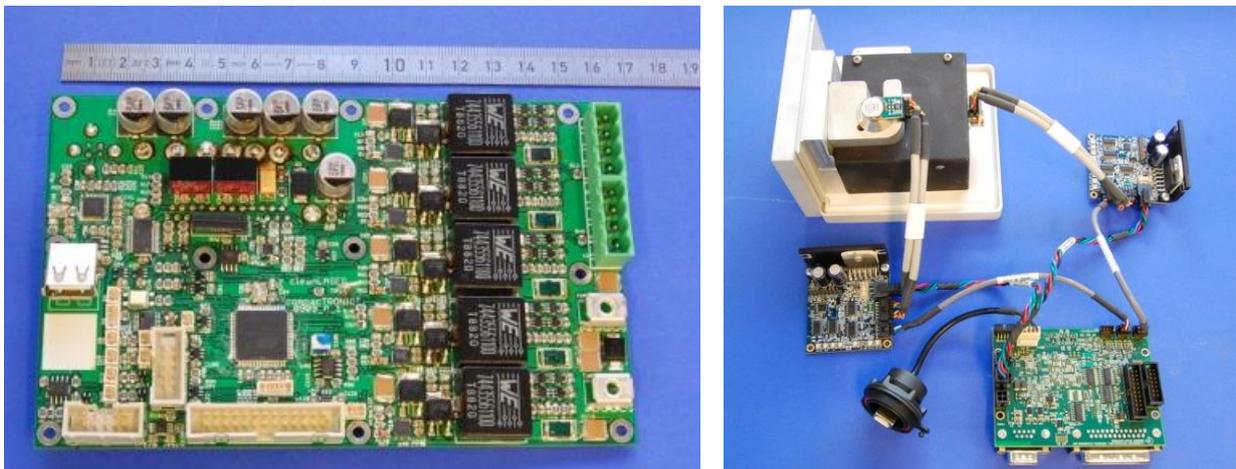


Abbildung: kompakte Controller Platine mit off-the-shelf Scanneransteuerung in kompakter Bauweise (Module des Lasersystems)

Die oben aufgeführten Module wurden unter dem Aspekt der Realisierung eines kostengünstigen und kompakten Systems entwickelt und ausgewählt.

Dabei wurde auf einen hohen Integrationsgrad und eine weiterhin kompakte Bauform Wert gelegt. Erste Design entwürfe stellten sich wie nachfolgend aufgeführt dar:

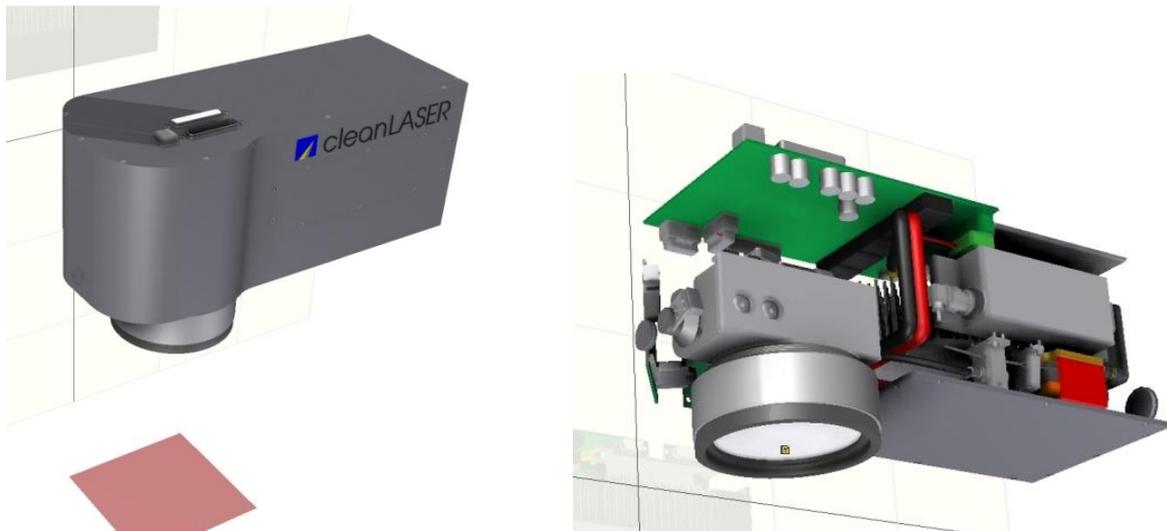


Abbildung 8: Kompaktlaser im „All-in-One“-Design zur CFK Bearbeitung

### 6.3 Probleme und Grenzen bei der Realisierung des All in One Konzeptes

Der ursprüngliche Vorgehensschwerpunkt betrachtet den Einsatz von VCSEL Dioden als Pumpquelle. Der wesentliche Vorteil dieser Technologie besteht in der hohen Betriebstemperatur der Dioden und somit einer optimalen Voraussetzung für den Einsatz eines einfachen, kompakten Kühlkonzeptes.

Im Rahmen der Validierung dieses Pumpkonzeptes zeigte sich jedoch dass die seitens des US-Amerikanischen Herstellers gemachten Datenblatt-Angaben sich nicht mit den realen Effizienzen in den typischen Betriebspunkten deckten. Darüber hinaus ließ sich das beschaffte Modul aufgrund eines Produktionsfehlers nicht in Betrieb nehmen. Die nachhaltig nicht abstellbare Diskrepanz zwischen den Lieferzusagen und den gelieferten Komponenten führte letztlich zu einem Konzeptwechsel bei der Pumptechnik. Die nachfolgenden Bilder zeigen die beschädigten VCSEL Diodenmodule.

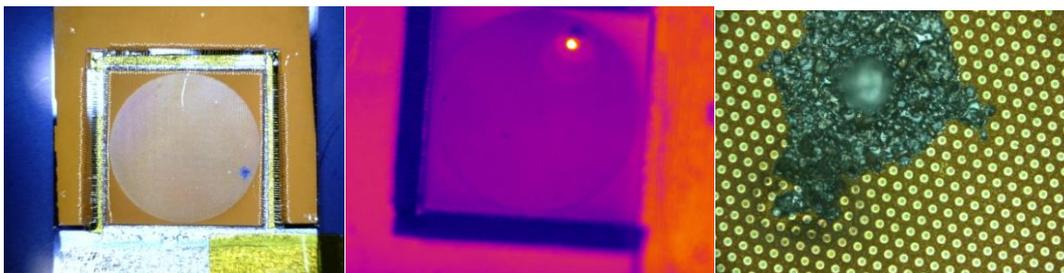


Abbildung 9: Detailaufnahme der defekten VCSEL Emitter.

Aus diesen Gründen wurde das folgende alternative Pumpkonzept verfolgt:

Insbesondere das Pumpen mit Barren bietet zwar Potenziale hinsichtlich höherer Ausgangsleistungen. Der Nachteil dieses Konzeptes gegenüber VCSEL besteht in der geringeren Betriebstemperatur (typ.  $<30^{\circ}\text{C}$ ) und in der daraus resultierenden Notwendigkeit ein flüssiges Kühlmedium unterzubringen. Dadurch ist die potenzielle Kompaktheit des Systems reduziert. Somit wurde der Schwerpunkt auf dem Einsatz eines Pig-Tail Moduls, das mittels Transportfaser die Leistung der integrierten Diodenlaser an den Laserkristall transportiert gelenkt.

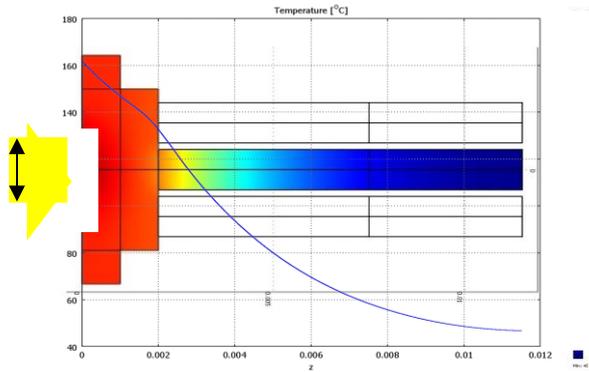


Abbildung: Untersuchungen zu alternativen Pumpkonzepten: links Pig-Tail Diodenlaser, rechts Wärmeverteilung bei effizientem Flüssigkeitskühler für Laserdioden

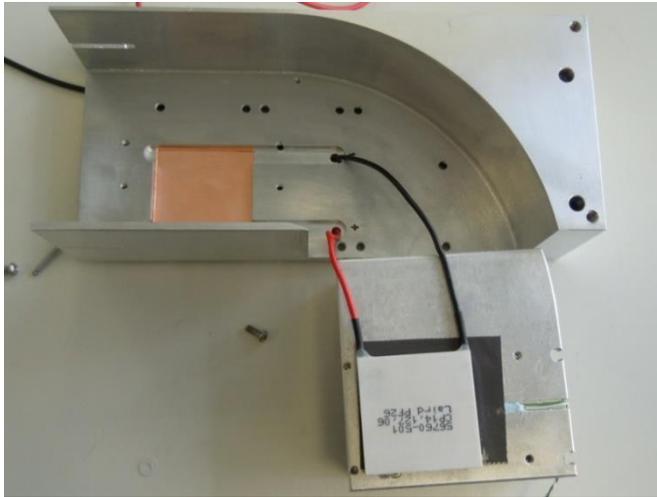
Nach den dokumentierten Probleme im Bereich der VCSEL Pumpdiode-technik wurde im Rahmen der „All-in-One“ Entwicklung die Untersuchung der Laser-Medienanregung mittels „Pigtail“ gekoppeltem Lasersystem vorangetrieben.

Hierzu wurde ein Versuchsresonator aufgebaut der potenziell in das bereits konstruierte Design passt und thermisch an die Luftwärmesenke angebaut.



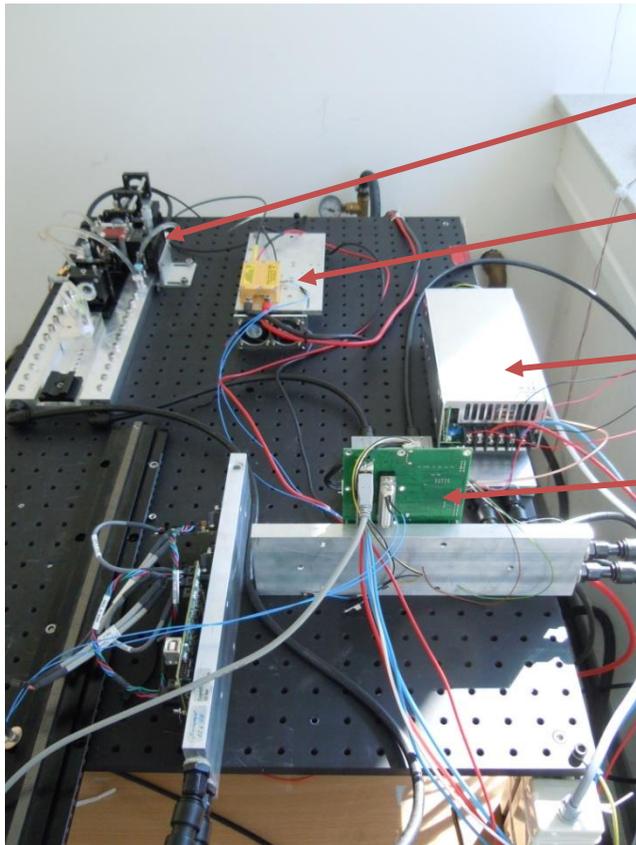
Abbildung 10: Kompaktlaser im solid Block mit integriertem Pump Laser (Diodenlaser mit Pig-Tail Faser), unterseitig an Luftkanal montiert

Im Rahmen zahlreicher Versuche wurde der Luft- und Kühlkanal aufgebaut um die thermischen Rahmenbedingungen nachzustellen und gleichzeitig die Einsatzmöglichkeiten zu untersuchen.



*Abbildung 11: Luftkanal Prototyp zur Simulation der Kühlkonditionen mit angeflanschem Peltier Element zum Abtransport der Verlustleistung*

Mit den aufgebauten Prototyp-Modulen wurde dann der Test-Resonator-Aufbau betrieben



- Pumpquelle mit Luftkühler
- Netzteil
- Steuerungsplatine
- Resonator Detailansicht mit Güteschalter (rot)
- AO-Güteschalter

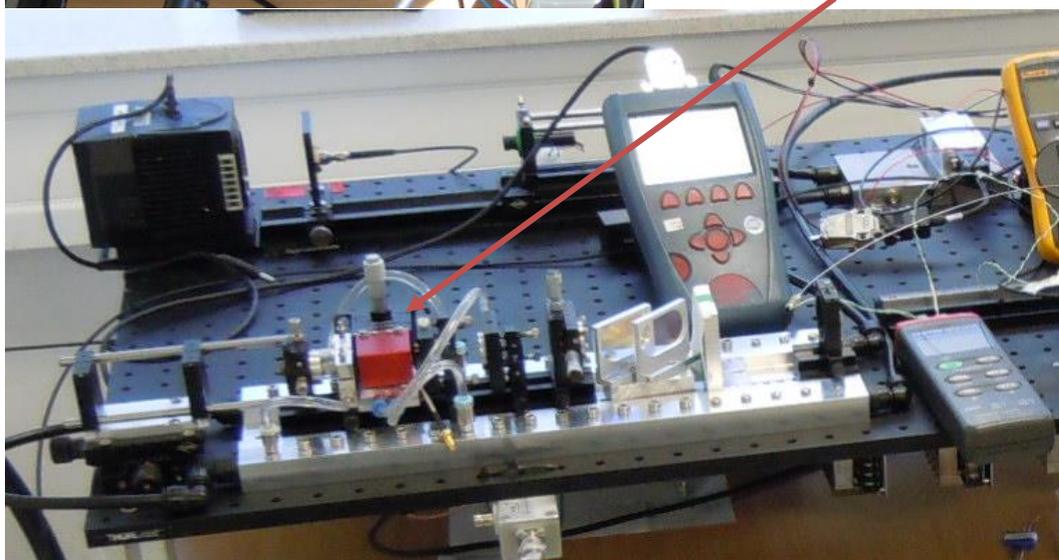


Abbildung 12: Resonator Testaufbau zur Validierung des Pump-, Kühl- und des optischen Konzeptes

Mittels des Testaufbaus wurden unterschiedliche Resonatorkonfigurationen, Kühlkonzepte des Laserkristalls sowie die Eignung bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht.

Folgende Tabelle zeigt die erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Strahlqualität:

| BEAM QUALITY                |                          |                |                                 |                       |                                 |              |                        |
|-----------------------------|--------------------------|----------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------|------------------------|
| DISTANCE FIBER TO LENS [mm] | LENS FOCUS DISTANCE [mm] | PUMP-POWER [W] | RESONATOR LENGTH Variation [mm] | MIRROR REFLECTION [%] | BEAM DIAMETER [ $\mu\text{m}$ ] | $M^2$        | MAX. AVERAGE POWER [W] |
| 7                           | 15,5                     | 18,75          | +0                              | 50                    | 360-380                         | 4,5 - 5      | 10,8                   |
| 9                           | 12                       | 18,75          | +0                              | 50                    | 270-280                         | 3-3,3        | 10,8                   |
| 9                           | 12                       | 18,75          | +10                             | 50                    | 260-265                         | 2,9-3,1      | 10,37                  |
| 9                           | 12                       | 18,75          | +20                             | 50                    | 245-255                         | 2,8-2,9      | 8,9                    |
| 11                          | 9,5                      | 16             | +2                              | 50                    | 150-155                         | <b>1,8-2</b> | 6                      |
| 11                          | 9,5                      | 18,75          | -0,2                            | 50                    | 160-165                         | <b>1,9-2</b> | 8                      |
| 11                          | 9,5                      | 18,75          | -3,2                            | 50                    | 175-185                         | <b>2-2,1</b> | 8,1                    |

Tabelle 1: Ergebnisse der Strahlqualitätsoptimierung des Testlasers in Abhängigkeit von der Resonatorlänge

Im Rahmen dieser Versuche zeigte sich, dass sich mittlere Leistungen bis zu 8 Watt mit einer sehr guten Strahlqualität (nahe Grundmode) erzielen lassen.

Weitere Versuche zur Pulsdauer und zur thermischen Abhängigkeit wurden ebenfalls durchgeführt. Es ließen sich vergleichsweise kurze Pulse im Bereich von 6-15ns erzielen.

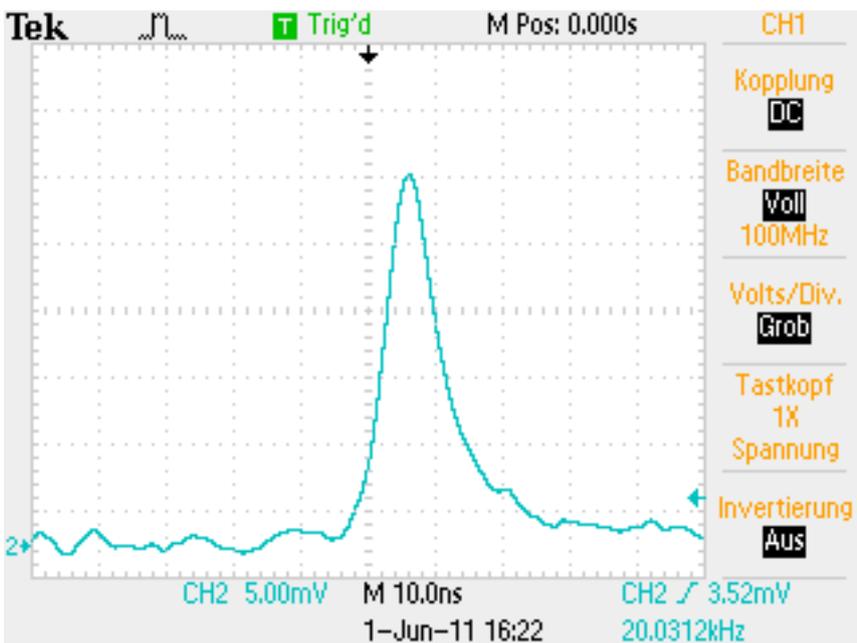


Abbildung 13: Pulsdauer (ca. 11ns FWHM) gemessen mit Testresonator

Weitere Messungen zum nutzbaren Temperaturbereich wurden ebenfalls durchgeführt. Dabei wurde der Strom am wärmetransportierenden Peltier Element in verschiedenen Arbeitspunkten über die Zeit variiert. Zur Wärmegenerierung diente ein Lastwiderstand.

| TIME  | TEMP. DIODE MODULE | TEMP COOLER | DT   | PELTIER CURRENT | PELTIER VOLTAGE | POWER PELTIER | AMBIENT TEMP. | FAN VOLTAGE | FAN CURRENT | HEATER RESISTOR VOLTAGE | HEATER RESISTOR CURRENT | HEATER POWER |
|-------|--------------------|-------------|------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------------------|--------------|
|       | [°C]               | [°C]        | [°C] | [A]             | [V]             | [W]           | [°C]          | [V]         | [A]         | [V]                     | [A]                     | [W]          |
| 12h49 | 27,1               | 34,4        | 7,3  | 5,0             | 5,5             | 27,7          | 26,7          | 24          | 0,23        | 14,5                    | 1,55                    | 22,5         |
| 13h00 | 26,9               | 35,3        | 8,4  | 5,5             | 6,2             | 34,1          | 26,7          | 24          | 0,23        | 14,5                    | 1,55                    | 22,5         |
| 13h16 | 26,7               | 36,3        | 9,6  | 6,0             | 6,8             | 41,0          | 26,7          | 24          | 0,24        | 14,5                    | 1,55                    | 22,5         |
| 13h45 | 27,1               | 37,8        | 10,7 | 6,5             | 7,5             | 48,6          | 26,7          | 24          | 0,23        | 14,5                    | 1,55                    | 22,5         |
| 14h00 | 26,6               | 35,9        | 9,3  | 6,0             | 6,8             | 40,8          | 26,7          | 27          | 0,27        | 14,5                    | 1,55                    | 22,5         |

Tabelle 2: Optimale Einstellung und Ermittlung des Peltier Wirkungsgrades an einer thermischen Last

Der Versuch zeigt, dass der Luftkanal in der Lage ist die Abwärme des Lasers von 22W in Kombination mit einem Single Peltier Element stabil abzutransportieren. Bei Einsatz von 2 Peltierelementen und eine Diodentemperatur von Max. 30°C lässt sich die Verlustleistung des Lasers bei einer Umgebungstemperatur von bis zu 36°C mit einem rein luftgekühlten System in dieser kompakten Bauweise nur noch grenzwertig abtransportieren. Somit wird sich aufgrund der Gesamtwirkungsgrade des Systems, die maximal erzielbare Laserleistung bei der nunmehr notwendigen Verwendung der Pig-Tail diodengepumpten Anregungsquelle etwas weiter reduzieren. Gleichzeitig ist aufgrund des erforderlichen Temperatur Deltas ein hoher Luftvolumenstrom mit einer resultierenden Luftgeschwindigkeit von >15m/s erforderlich.

Diese für einen technischen Serieneinsatz ungünstigen Rahmenbedingungen (gewünscht wäre für den Prozess eine Leistung von Mindestens 20 Watt und eine Umgebungstemperatur von 40°C) führen aus unserer Sicht zu einer nur sehr eingeschränkten Nutzbarkeit des „All-in-One“ Konzeptes in Kombination mit konventioneller Pumpquelle anstelle von VCSEL Dioden.

Aufgrund der Tatsache, dass sich basierend auf dem optischen Pumpen mittels Pig Tail eine Mittlere Laserleistung von geforderten >20 Watt nicht mehr als passiv luftgekühlte Version bei üblichen Umgebungstemperaturen realisierbar wäre wurden weitere Entwicklungen in diesem Bereich trotz guter Grundlagenergebnisse und einem technisch-wissenschaftlich vielversprechendem Konzept eingestellt.

## 6.4 Lasersystementwicklung basierend auf 2-Modulkonzept

Zur Fortführung des Projektes und zur Sicherstellung der Demonstratorversuche wurden basierend auf einem im Hause cleanLASER verfügbaren Faserlasersystemprodukt (Strahlquelle von einem Fremdanbieter) die weiteren Entwicklungen basierend auf einem 2-Modul Konzept durchgeführt. Als Laser-Basisgerät kam ein bereits im Hause verfügbares –und nicht aus Projektmitteln finanziertes- CL50 Lasersystem zum Einsatz. Anstelle der manuellen Standardoptik wurde der speziell für die CFK Repair Anwendung konzipierte Bearbeitungskopf bestehend aus Bearbeitungsoptik und lokaler Schutzhaube mit Absaugvorrichtung entwickelt und realisiert.

### 6.4.1 Entwicklung eines geeigneten Bearbeitungskopfes für das Lasersystem und die Reparatur Anwendung

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgte die Entwicklung, Konstruktion und Realisierung einer lasersicheren, portablen, lokalen Schutzhaube mit integrierter Ablufführung und Sicherheitsabschaltung.

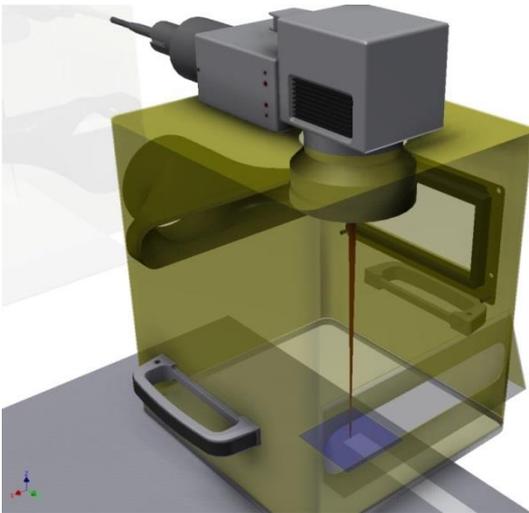


Abbildung 14: Schutzhaube (Entwurf) mit Bearbeitungsoptik für Handhabungs- und Erprobungsversuche.

Die Haube soll sowohl als Handhabungshilfe dienen, als auch eine effiziente und reproduzierbare Bearbeitung einschließlich lasersicherer Einhausung darstellen. Die Beurteilung der Lasersicherheitsaspekte erfolgte im Rahmen von Restemissionsmessungen und einer FMEA bewertung.

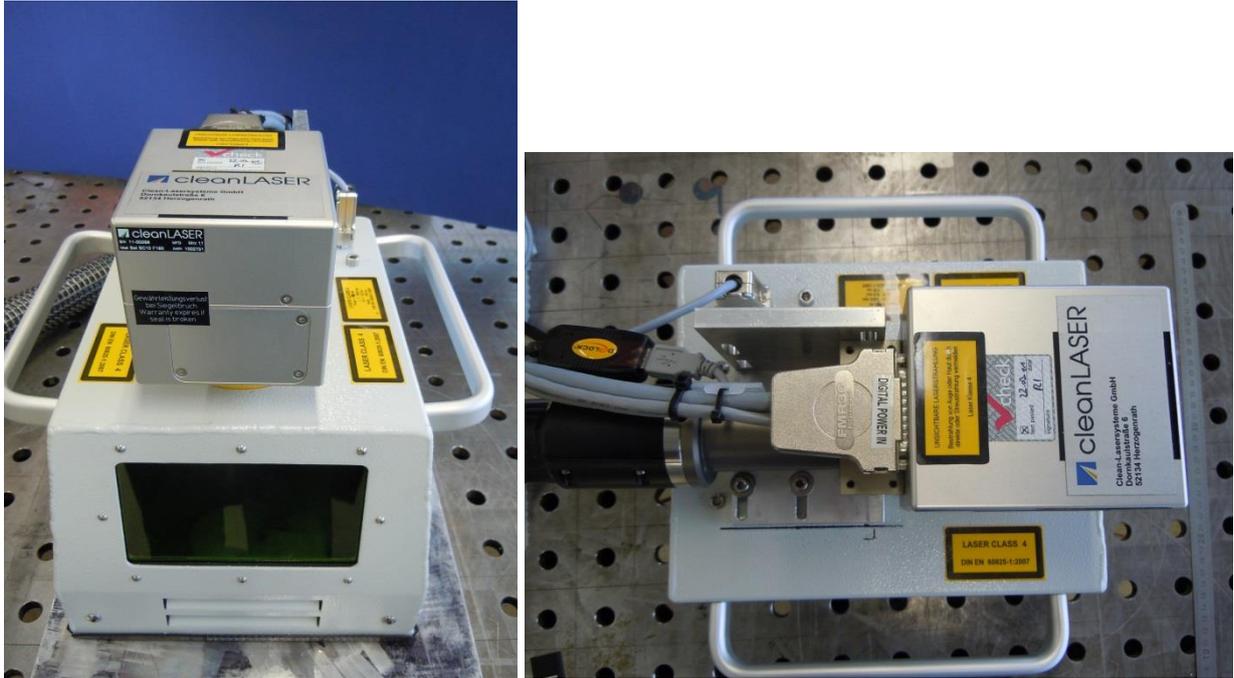


Abbildung 15: Schutzhaube mit Bearbeitungsoptik für Handhabungs- und Erprobungsversuche. Gesamtgewicht der Anordnung (ohne Laser Basisgerät) ca. 4,5 kg



Abbildung 16: Varianten der Schutzhaube mit integrierter Laser-Bearbeitungsoptik

Die realisierte Haube mit integrierter Bearbeitungsoptik dient als Handhabungshilfe und stellt auch eine lasersichere Einhausung dar. Das Werkzeug kann direkt auf die Oberfläche des Bauteils aufgesetzt werden. Durch die integrierten Kontaktschalter ist eine Abschaltung des Lasers bei fehlerhaftem Abheben des Kopfes sichergestellt.

Im Rahmen einer nach Projektende und durchgeführten Weiterentwicklung der Haube die mit einer pneumatischen Saugvorrichtung und einem Beobachtungsmonitor versehen wurde, konnte die Industriefähigkeit und Verwertungsmöglichkeit bereits gezeigt werden

## 6.4.2 Entwicklung und Implementierung eines Software basierten Control Systems für das Lasersystem und den Bearbeitungskopf

Für das 2-Modulkonzept wurde die Steuerungssoftware des Lasersystems angepasst sowie eine CFK-Reparaturkonforme Erweiterung einer bestehenden Scanner-Steuerungssoftware realisiert.

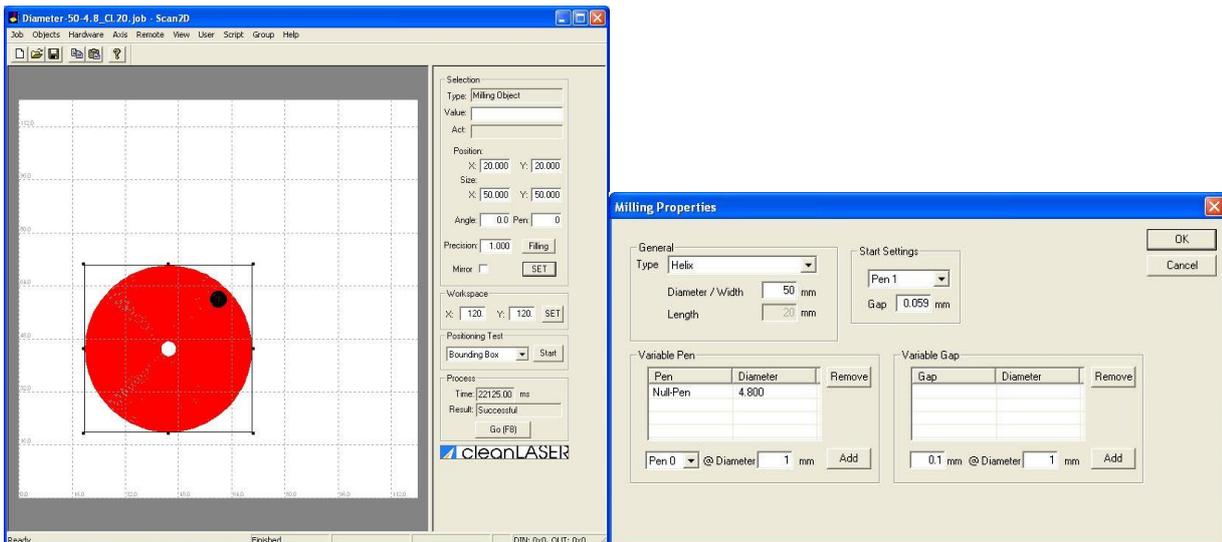


Abbildung 17: Anpassung der Scanner Steuerungssoftware zur optimalen Bearbeitung von CFK Bauteilen



Abbildung 18: Modifizierte Laser-Steuerungssoftware (Menügeführte Bedienung des Basisgerätes für das 2-Modulkonzept)

## 6.5 Demonstration von Reparatursituationen mittels Lasersystem

Im Rahmen des Arbeitspaketes „Labortest/Demonstration“ des laserbasierten Reparatursystems konnten Testmuster erfolgreich hergestellt werden. Sowohl rechteckige Schäftungen als auch konzentrische Schäftungen konnten in unidirektionales Material (UD) eingebracht werden.

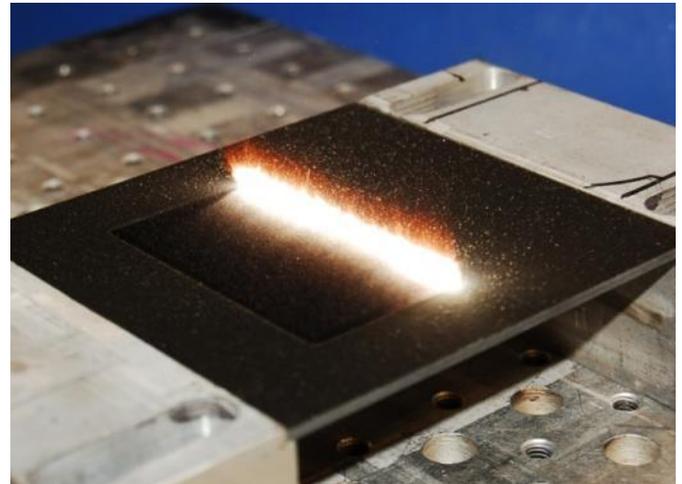
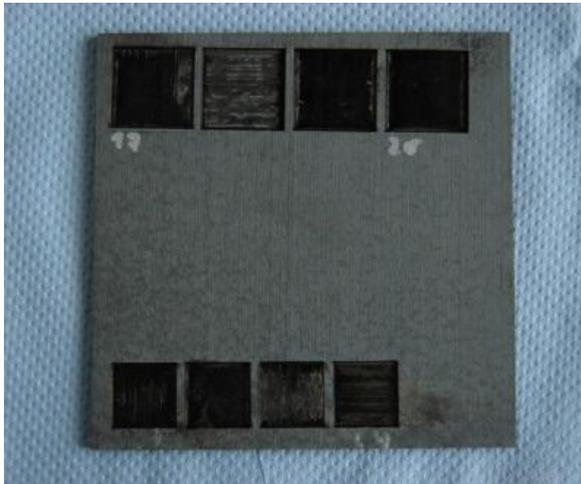


Abbildung 19: Testplatte CFK (UD-Material) , rechts Laserbearbeitung

Laborversuche zeigten dabei, dass die Effizienz des Abtrags sowohl von der Überlappung als auch von der eingebrachten Energiedichte abhängt. Zwar ist der Abtrag bei moderaten Intensitäten effizienter, die resultierende Streckenenergie führt allerdings aufgrund der thermischen Wechselwirkung zu Verbrennungen anstelle zur Sublimation und damit zu stärkerer Schädigung des Grundmaterials. Die Ergebnisse diesbezüglich wurden durch die Projektpartner analysiert.

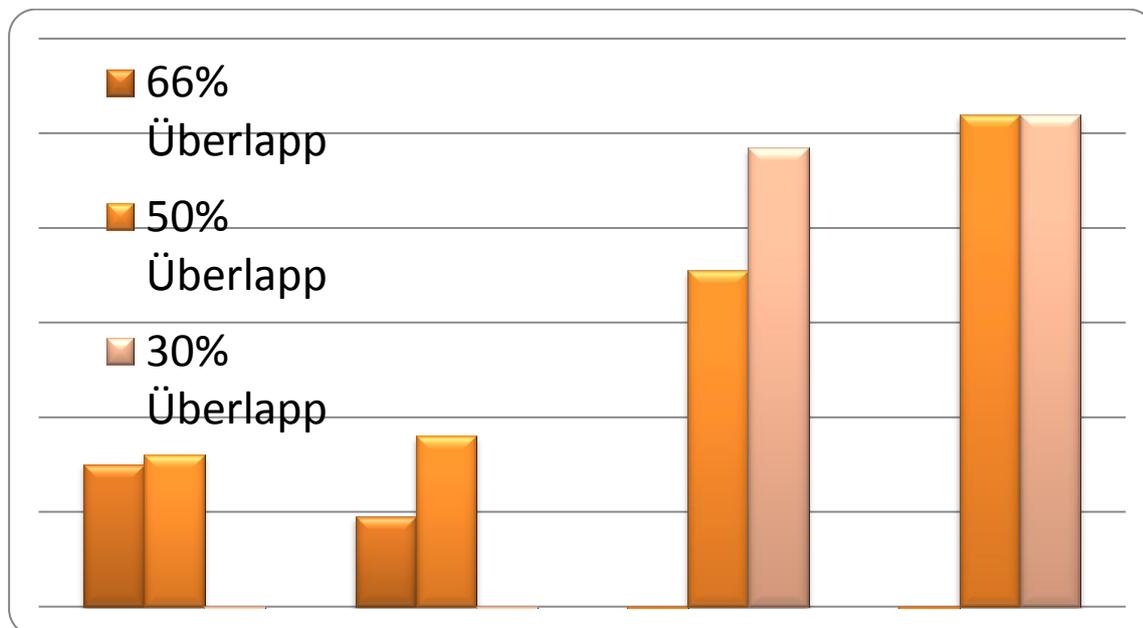


Tabelle 3: Untersuchung zur Prozesseffizienz(Säulen) (von links nach rechts: Aufsteigende Intensität in Kombination mit unterschiedlicher Überlappung der Pulse

Unter dem Aspekt einer optimalen visuellen Qualität lassen sich folgende Ergebnisse bereits erzielen:

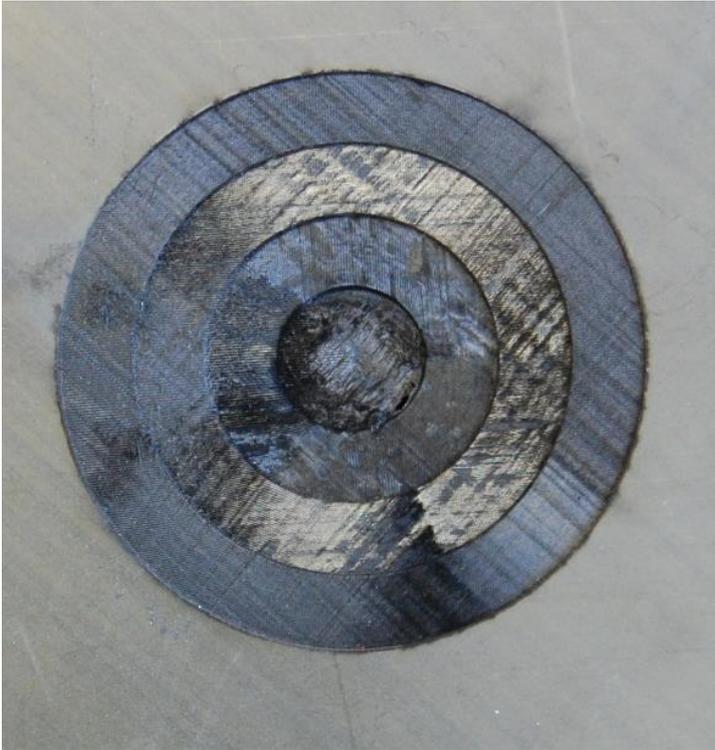


Abbildung 20: Konzentrische Schäftung in CFK (UD-Material), im Bild erkennbar die „lagenweise“ Entfernung des Materials

Die Ergebnisse der Materialbearbeitung zusammengefasst:

- Durch den Einsatz eines CL50 mit höheren Laserintensitäten konnte ein guter Abtrag erzielt werden
- Eine zu hohe Laserintensität führt zu „Haarbildung“ infolge von Mikrobeschädigung der Faserfilamente an den Bearbeitungsändern, eine zu geringe Intensität führt zu einer Verbrennung der Oberfläche
- Die Bearbeitungszeit für eine Fläche (Durchmesser ca. 50mm), wie auf dem Foto rechts dargestellt, dauert etwa 22 min und damit im Vergleich ca. 2-fach länger als konventionelles Schleifen, unter Bezugnahme der kürzeren Rüstzeiten ist das Verfahren bei kleiner Geometrie annähernd gleich schnell. Bei großen Vorbehandlungsbereichen ist das laserbasierte Verfahren beim aktuellen Stand der Technik allerdings deutlich benachteiligt.
- Die Bearbeitung der Ränder bedarf noch einer weiteren Optimierung, da hier das Material der untersten Faserlage beschädigt wurde

Im Rahmen der Projekt-Laufzeitverlängerung wurde das Demonstratorsystem an einer konkreten Kundenapplikation (Luftfahrtbauteil erprobt und auf Eignung für das Reparaturverfahren hin untersucht:

Dabei konnte folgendes Ergebnis erzielt werden:

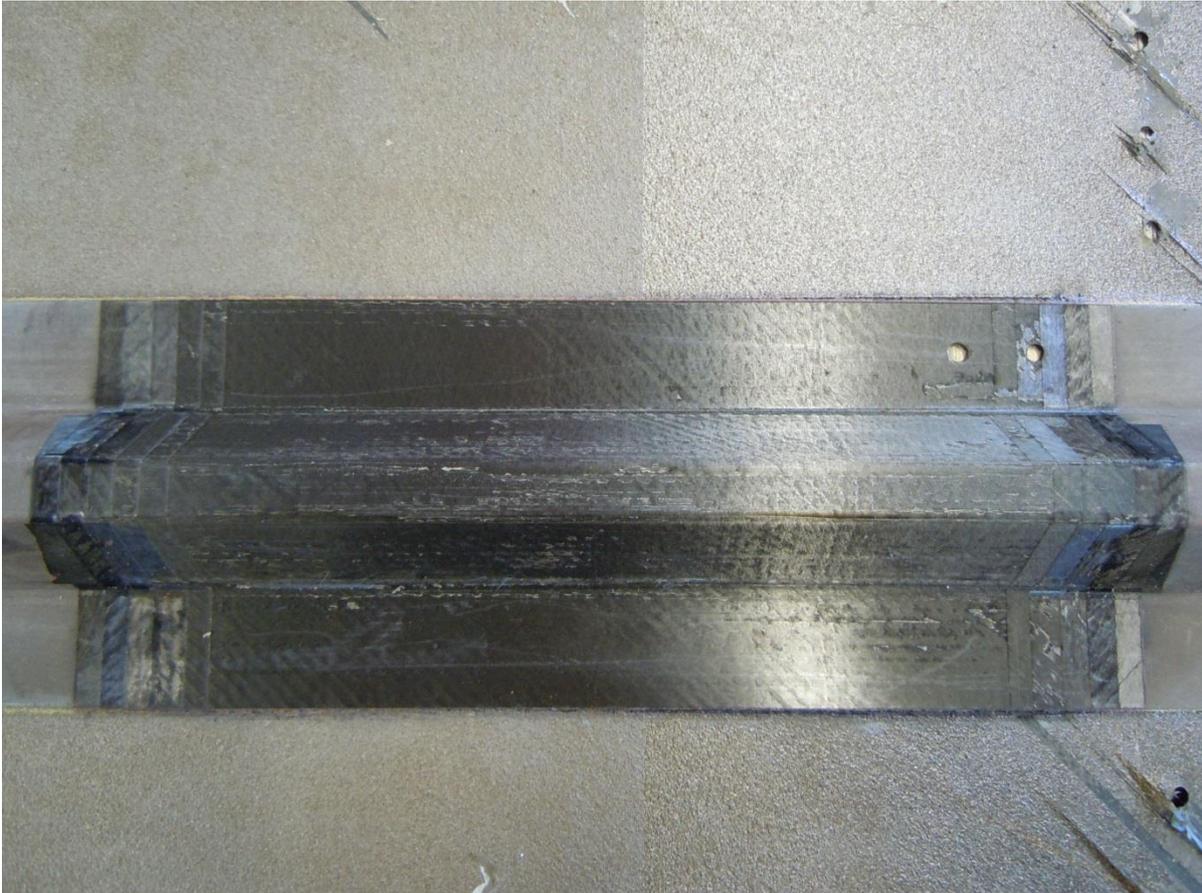


Abbildung 21: selektiv abgetragenes CFK Material zur Simulation einer Reparaturstelle

Bis zum Projektende lagen die Kleb- und Reparaturtechnischen Ergebnisse des bearbeiteten Demonstrator-Bauteils leider noch nicht vor.

Generell lässt sich jedoch festhalten, dass die Eignung des Laserverfahrens prinzipiell nachgewiesen wurde. Dennoch bestehen im Vergleich zu alternativen konventionelle nach wie vor einige Nachteile:

- Relativ geringe Prozess- und Abtraggeschwindigkeiten im Vergleich zur mechanischen Ablation
- Thermische Belastung des Grundmaterials kann latent zu einer Schädigung der Lagenfestigkeit führen und demzufolge zu einem Bauteilversagen im G1C Test.

Vorteilhaft ist jedoch der Abtrag der oberen Harzlage mit Freilegung der CFK Matrix. Dieser erste Prozessschritt führt zu einer sehr geringen thermischen Belastung und ist gleichzeitig sehr effizient. Im Versuch konnten Bearbeitungsdaten für die reine Klebevorbehandlung durch Abtrag der obersten, Trennmittelkontaminierten Harzschicht –ohne CFK Faserabtrag- von bis zu  $5\text{cm}^2/\text{s}$  bei Einsatz eines 50 Watt Lasers dargestellt werden.

## 7 Voraussichtlicher Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses

Basierend auf den dargestellten Ergebnissen hat sich gezeigt, dass die Einsatzmöglichkeiten der entwickelten Technik aus aktueller Perspektive weniger im ursprünglichen Einsatzfeld der Reparatur von CFK Bauteilen liegen sondern vielmehr im Bereich der Klebevorbehandlung von Verbundmaterial erkennen lassen.

Darüber hinaus ergeben sich weitere Einsatzmöglichkeiten:

- Entlacken von CFK zur Massekontaktierung auf Blitzschutzableitern
- Klebevorbehandlung von Stringern als Alternative zum Autoklav Prozess
- Klebevorbehandlung von Fixierelementen, insbesondere bei nicht Biegebelasteten Oberflächen (z.B. Kabelfixierungen)
- Lackiervorbehandlung von CFK bei pigmentierter Harz-Matrix

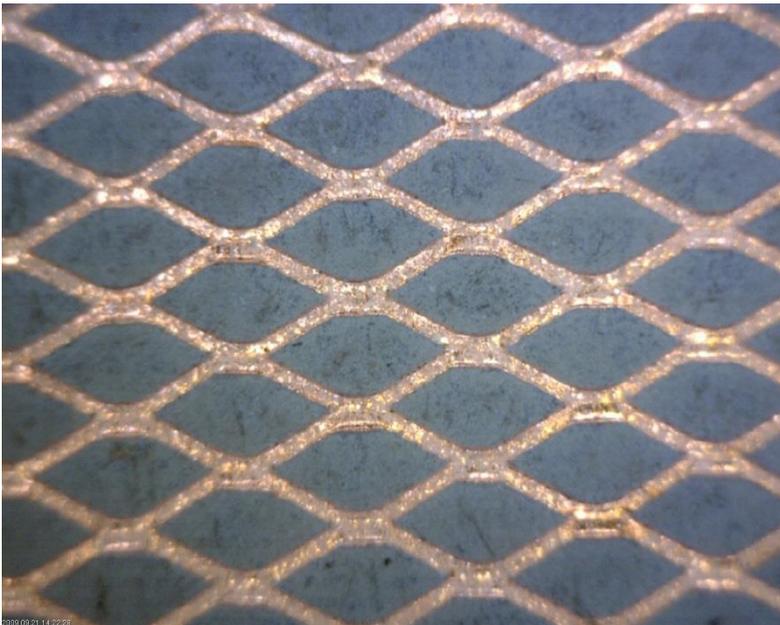


Abbildung 22: Laserentlackung zur Oberflächenkontaktierung auf CFK/Kupfer Verbundmaterial

Zur optimalen Bearbeitung einer solchen Oberfläche wurde das 2-Modul basierte System nach Projektende für eine Kundenanwendung mit weiterer Technik ausgestattet wie z.B.: Vakuumsauger, Kameraüberwachung des Arbeitsbereiches etc. Die so weiterentwickelte Technologie konnte bereits für die zuvor beschriebene Massekontaktierung und auch zur Klebevorbehandlung erfolgreich am Markt abgesetzt werden.



Abbildung 23: industrielle Weiterentwicklung des Bearbeitungskopfes nach Projektende (Innenansicht des Bearbeitungskopfes)

## **8 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Im Bereich der flächigen CFK-Bearbeitung als Vorbereitung für Reparaturen von CFK-Bauteilen wurden beim Besuch von CFK-Fachmessen Fortschritte bei den Nicht-Laser-Technologien bemerkt. Die konventionelle mechanische Bearbeitung verfügt mittlerweile über automatisierte Prototypen-Anlagen. Darüber hinaus befinden sich portable Lösungen in der Entwicklung, wobei erste Systeme bereits auf dem Markt angeboten werden. Auch das Abtragen mittels abrasiven Wasserstrahls befindet sich in der Entwicklung, jedoch ist hier über den Fortschritt bei portablen Lösungen nichts bekannt.

Im Bereich der Laser-Technologie ist von zwei weiteren Stellen bekannt, dass sie an der Entwicklung eines Prozesses zur Vorbereitung von CFK-Reparaturen mit Hilfe des Lasers arbeiten: Liverpool John Moores University in Kooperation mit JK Lasers und GKN Aerospace zusammen mit SLCR Lasertechnik GmbH. Im Zuge des Projekts von GKN und SCLR wird ein Roboter geknüpftes Verfahren entwickelt. Nachteil dieses Verfahrens ist allerdings die Kombination von Laser mit Bürstverfahren sowie die Lasertechnisch bedingte nicht Portabilität der Technik

## 9 Veröffentlichung der Ergebnisse

Über die Ergebnisse wurde bereits auf zahlreichen Konferenzen und Fachtagungen berichtet. Seitens cleanLASER sind hier insbesondere vorzuheben:

- Diverse Klebtechnische Kolloquien
- Münchener Klebtagung
- European Automotive Laser Application Conference (EALA)

Darüber hinaus wurde ein Projekt-Flyer realisiert der zahlreichen Kunden zugestellt wurde (Siehe Anlage)

## EU-PROJECT: PLASER

### Portable LASER system for Surface preparation of composite Repairs

The Eurostars Programme is powered by EUREKA and the European Community



The project „PLASER“ was funded within the EUREKA-program of the European Union (reference number 01QE906). On the one hand the proximity of place French-German consortium of two SME's and one research institute enables efficient team coordination. On the other hand the experiences of the consortium in the fields of composite repair, portable laser systems and laser process development promise a suitable repair tool with the following main features:

- Mobile laser system** ✓ „in field repair“
- Intelligent processing head** ✓ cuts cured boards and prepreg piles
- Capability for automation and certification**
- Expected gain**
  - ✓ time reduction up to 80 %
  - ✓ cost reduction up to 60 %



#### Clean-Lasersysteme GmbH

cleanLASER is both manufacturer and technology leader in the field of industrial laser beam surface technology.

Dornkaulstr. 6 · DE-52134 Herzogenrath near Aachen  
Tel. +49 2406 90970  
info@cleanlaser.de · www.cleanlaser.de

#### Laser-Zentrum Hannover e.V. (LZH)

LZH is one of Europe's leading institutes for laser technology. Its intention is to bring research and practical experience together.

Hollerithallee 8 · DE-30419 Hannover  
Tel. +49 511 27880  
info@lzh.de · www.lzh.de  
(Subject: Composites Group)

#### GMI Aero Ltd.

GMI is as well manufacturer as technology leader regarding mechanical abrasive tools for repair of CFRP components.

9 rue Buffault · F-75009 Paris  
Tel : +33 142821144  
gmi@gmi-aero.com · www.gmi-aero.com



## LASER BASED REPAIR APPROACH FOR CFRP COMPONENTS

### CONTACTLESS MACHINING AND PRE-TREATMENT FOR BONDED REPAIR

A novel laser based method enables effective ply-by-ply removal and surface pre-treatment of CFRP for structural bonded repair, e.g. for adhesive bonding of clips and clamps or structural stepped bonding. The mechanical strength properties realized in the process allow superior structural bonding behavior e.g. for aviation industries.

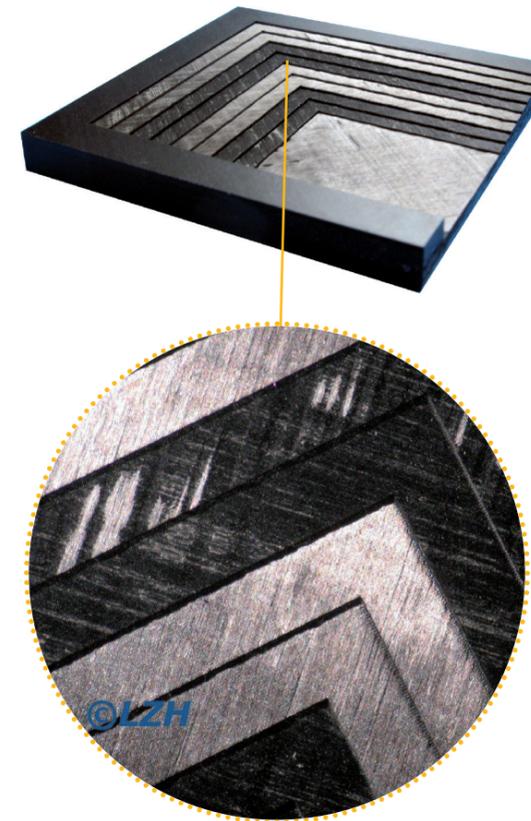


Figure 1: Laser based machining of stepped structure (ply-by-ply ablation) for bonded repair

#### Features are:

- Excellent cleaning and ablation results and speed
- Enhanced bonding strength
- Innovative robust diode-pumped laser technology
- Very low running costs (generally 1-3 €/h)
- No gas consumption, "Plug & Go"-technology
- Flexible application due to portable technology
- Maintenance free technology
- High reliability, no "human error" factor, potential for automation & certification

#### ECOLOGICAL EFFECTS

- No abrasives, no chemicals
- No waste except of removed CFAP plies
- Low noise application



## STATE OF THE ART

### CONVENTIONAL METHODS VERSUS LASER TECHNOLOGY

The surface preparation of damaged areas on composite parts is today a lengthy, cumbersome and delicate process, taking into consideration the detailed processing requirements specified in the SRMs. This is due to the need for the achievement of very specific and sometimes complex geometries (i.e. gradually increasing in diameter stepping or scarfing of the damaged area etc.) on a very strong and brittle material, such as carbon epoxy composites. Such processing is today achieved by means of high performance drilling equipment, fit on special (usually diamond coated) toolings that allow for delicate operations on the damaged structure. Due to the hard carbon fibers the expensive tools wear out very quickly, causing a non-reproducible surface quality. Therefore, the high fatigue requirements for a successful repair process are often difficult to meet.

Grinding contaminates fibers and the fabric structures with abrasive dust, therefore bonding by a repair patch doesn't show high resistance. Resistance of CFRP components which are bonded using conventional methods decreases by up to more than 30 % compared to the intrinsic fatigue resistance.

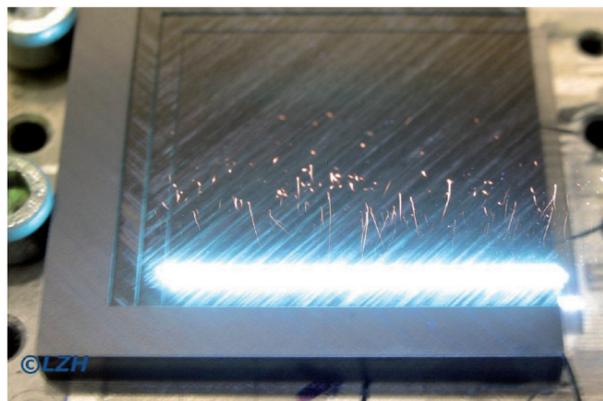


Figure 2: Laser machining of stepped structure

### OUR GOAL ...

... is to design a mobile, portable laser system for repair of CFRP components.

One of the outstanding features of the innovative tool is its operational flexibility. The tool will be mountable on aircraft structures even in-field, which allows for repairs without disassembly of the part itself. Consequently, a faster, more reliable and fully automated composite repair method is possible for the aeronautical industry.

In order to reduce the required area for the repair, the step width can be varied easily. Additionally, the new technology is environmentally friendly and easy to operate.



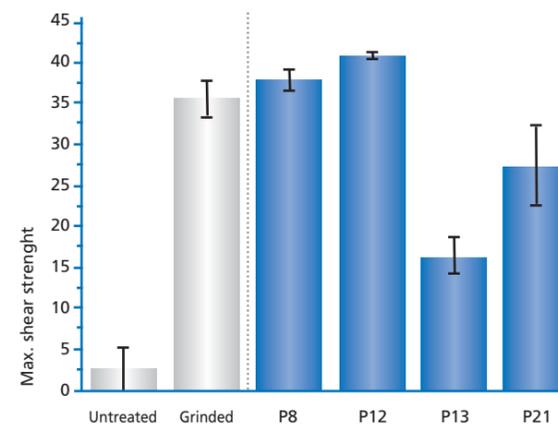
Figure 3: Adhesive bonding preparation by selective ablation of resin



## ACHIEVEMENTS

### PROCESS DEVELOPMENT

Parameter studies regarding removal in layers and pre-treatment of CFRP surfaces were completed. On the basis of these analysis the optimized and most appropriate parameters for CFRP repair were evaluated and selected. An adapted laser system and a corresponding machining optical system were designed. Both are suited for optimized surface preparation. Finally, the achieved outstanding results of the laser based technique were evaluated on real parts.



### CURRENT RESULTS OF THE STUDIES

CFRP components can be consistently prepared with the presented innovative laser based tool. Furthermore, significant improvement of bonding strength has been demonstrated.

- CFRP plies can be selectively removed by means of laser radiation.
- Cleared fibers are activated by means of high intensity. Hereby, a joint strength in bonding can be increased by up to 20 %.
- Surface quality is reproducible and can be generated automatically by means of adequate laser technology.
- A fiber coupled laser handling system prototype was designed and created (fig. 5) which can be applied for trials of laser based repair.

Figure 4: Shear stress of bonded CFRP flat test pieces after preparation with different laser parameters (P8-P21).

### Figure 5: CFRP laser repair tool:

The fiber coupled machining head is connected to a laser system. The head is put on the component's surface and fixed by vacuum grippers.

By means of powerful laser radiation the damaged area is removed layer by layer (stepped repair) and surface activated to ensure optimal bonding strength.

The ablated material is directly extracted from the tool's environment and filtered by an adequate local exhaust ventilation connected to the laser.

