



Clean-Lasersysteme GmbH, Herzogenrath

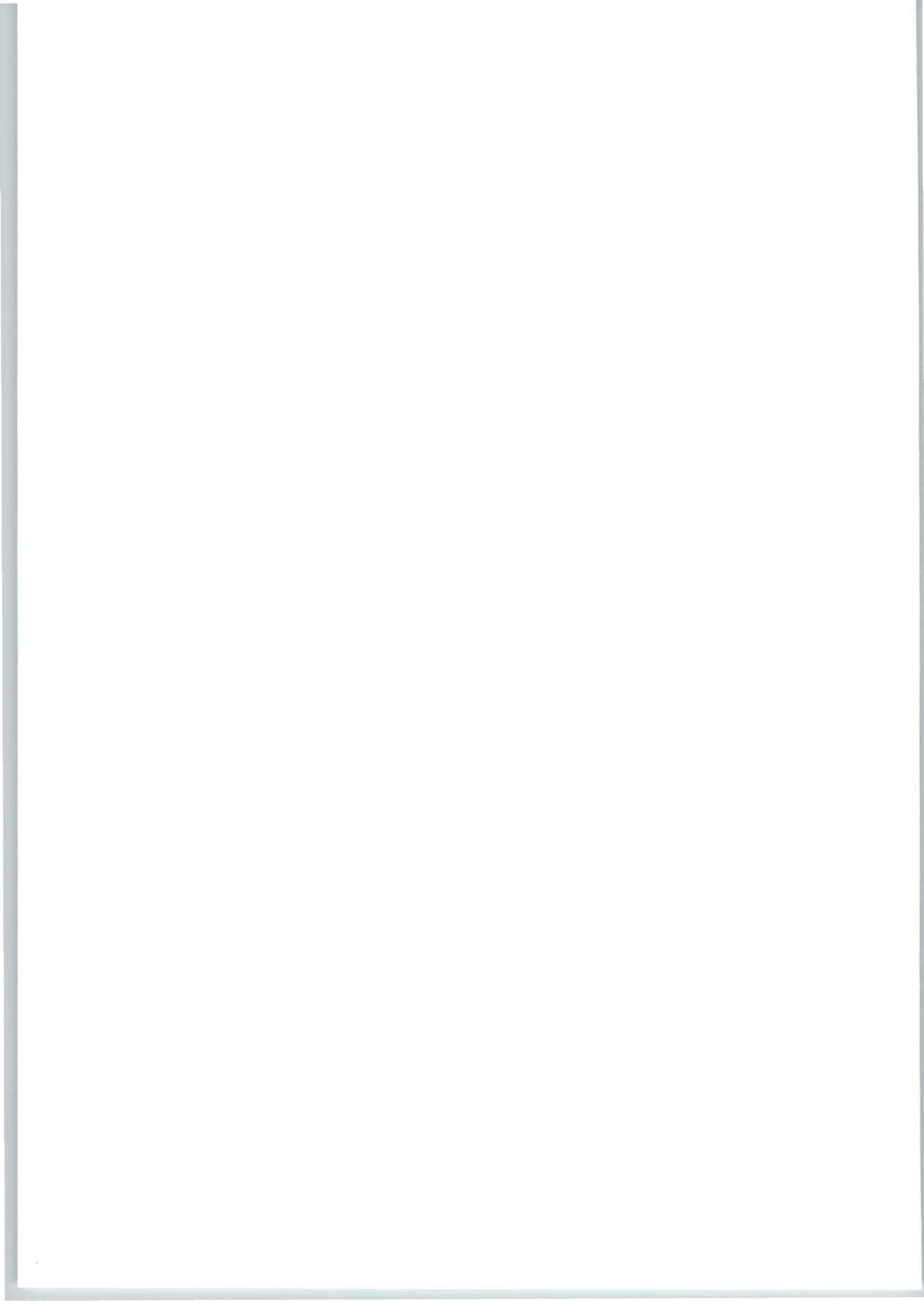
**Entwicklung eines
Hochleistungs-Laserstrahl-Reinigungsgerätes zur Ressourcen
schonenden Entschichtung von Oberflächen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 16884
von
der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing., Dipl.-Kfm. Edwin Büchter

Herzogenrath bei Aachen, 27. April 2004



Clean-Lasersysteme GmbH, Herzogenrath

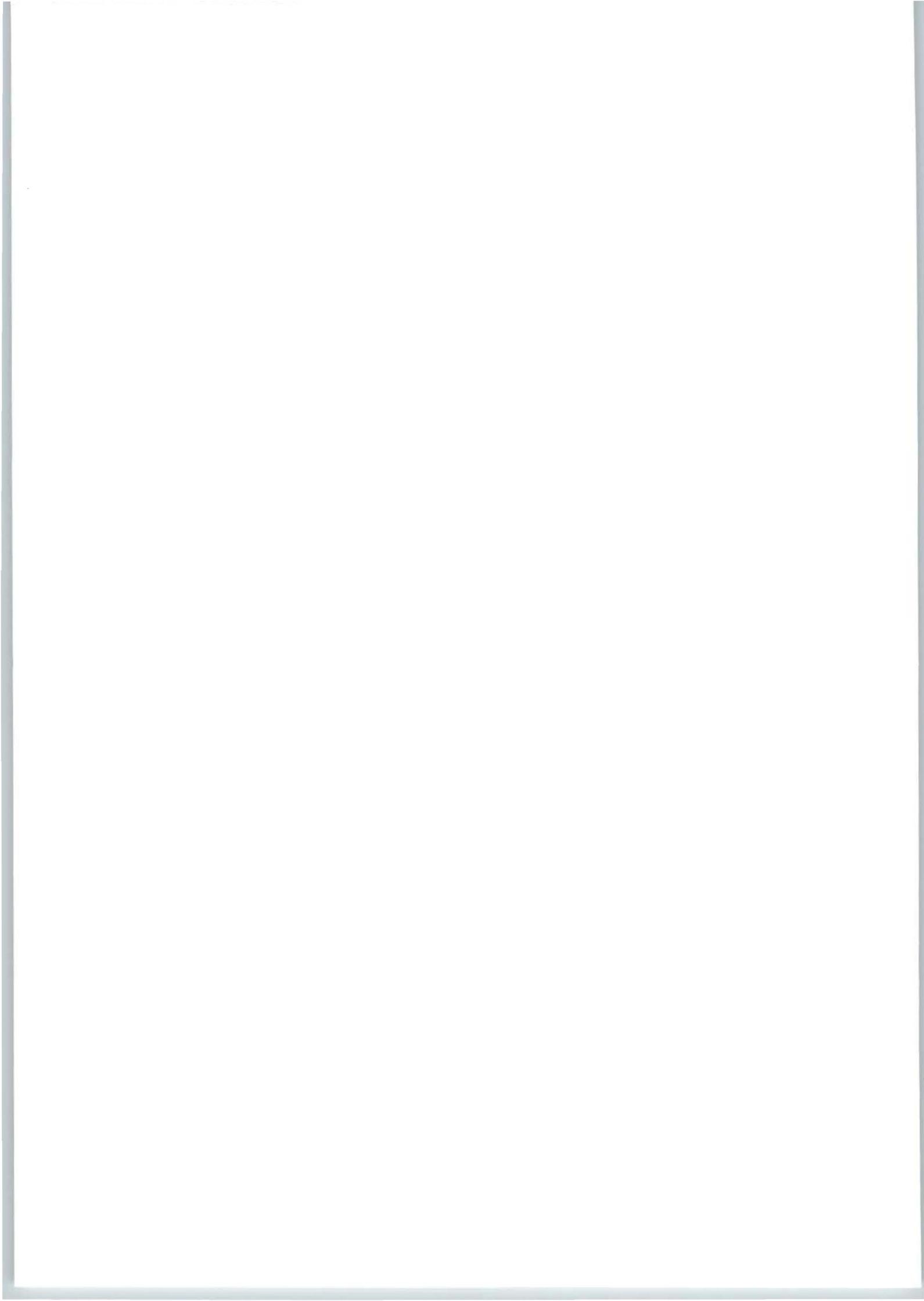
**Entwicklung eines
Hochleistungs-Laserstrahl-Reinigungsgerätes zur Ressourcen
schonenden Entschichtung von Oberflächen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem AZ: 16884
von
der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing., Dipl.-Kfm. Edwin Büchter

Herzogenrath bei Aachen, 27. April 2004



Projektkennblatt

10/97 Projektkennblatt		der Deutschen Bundesstiftung Umwelt		 UMWELT STIFTUNG	
Az	16884	Referat	21/0	Fördersumme	934.500,00 DM 477802,26 €
Antragstitel		Entwicklung eines Hochleistungs-Laserstrahl-Reinigungssystems zur Ressourcen schonenden Entschichtung von Oberflächen			
Stichworte		Verfahren Reinigung, Ressource, Laser, Kühlung			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
36 Monate	04/00	Geplant: 04/03 Verlängert bis: 31.12.03	2		
Zwischenberichte	halbjährlich				
Bewilligungsempfänger		Clean-Lasersysteme GmbH Kaiserstr. 100 52134 Herzogenrath ehemals: Steinbachstr.15, 52074 Aachen	Tel	02407/9097-0	
			Fax	02407/9097-11	
			Projektleitung Dr. Barkhausen		
			Bearbeiter Dipl.-Ing. Büchter		
Kooperationspartner					
 Zielsetzung und Anlass des Vorhabens Entwicklung eines leistungsfähigen, kompakten und mobilen, gepulsten Festkörper-Lasersystems zur effizienten und leistungsstarken Entschichtung von technischen Oberflächen mittels Laserstrahlung. Technologieentwicklung zur Schonung von Ressourcen (Wasser, Luft, Energie) die zur Zeit bei Verwendung konventioneller industrieller Entschichtungstechnik in hohem Maße verbraucht werden.					
 Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden Die Entwicklung des Gesamtsystems teilt sich in <u>2 Phasen</u> auf: 1. Entwicklung einer leistungsstarken gepulsten Laserstrahlquelle 2. Entwicklung einer geeigneten Lasersteuerungs- und Kommunikationselektronik einschl. Software 3. Entwicklung eines geeigneten Strahlübertragungssystems auf Basis von Hochleistungs-Lichtwellenleittechnik 4. Entwicklung einer Hochleistungs-Laserstrahl-Bearbeitungsoptik für manuelle Anwendungen 5. Entwicklung geeigneter Absaugtechnologie zur effizienten Partikelerfassung 6. Entwicklung eines funktionsfähigen Gesamtsystems zur Anwendungserprobung <u>Nur Phase 2:</u> 7. Qualifizierung einer Bearbeitungsoptik zur industriellen Anwendung 8. Anwendungsgerechte Erprobung und Optimierung des Gesamtsystems					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bormau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Die Entwicklung und Realisierung eines funktionierenden Gesamtsystems konnte erzielt werden. Zum Abschluss des Projektes steht ein leistungsfähiges Laserstrahlreinigungs- und Entschichtungssystem bereit. Dabei wurden im Rahmen der Entwicklung neben der eigentlichen Strahlquelle auch die zugehörigen Nebenaggregate und Peripheriekomponenten eines einsatzfähigen Gesamtsystems industriegerecht realisiert. Insbesondere die unter **Berücksichtigung anwendungsspezifischer Anforderungen** seitens der potenziellen Anwender konnte ein industrielles Lasersystem realisiert werden, das den hohen Ansprüchen der industriellen Reinigungstechnik genügt.

Mit Abschluss des Projektes liegen dem Bewilligungsempfänger mehrere Fertigungsaufträge für Hochleistungs-Lasersysteme vor.

Neben dem wirtschaftlichen Erfolg des Projektes ist insbesondere der umweltrelevante Nutzen der Technologie evident und nachhaltig gewährleistet. Bereits durch den Einsatz dieser ersten beauftragten Hochleistungslaser wird ein signifikantes Einsparungspotenzial von Ressourcen und Abprodukten realisiert.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das neue Lasersystem wurde in mehreren Fachzeitschriften bereits redaktionell erwähnt (z.B. Industrieanzeiger, JOT (Journal für Oberflächentechnik), besser lackieren, diverse ausländische Fachzeitschriften etc.)

Öffentlich vorgestellt wurde das System auf der Hannover-Messe Industrie (HMI 2002), dem AKL sowie mehreren Fachkongressen im In- und Ausland wie z.B. ISGATECH, Overflatedagene (Norwegen), Parts2Clean. Außerdem fand die ressourcenschonende Lasertechnik sehr positive Resonanz auf der von der Bundesstiftung organisierten „Woche der Umwelt 2002“ in Berlin.

Fazit

Die Erfüllung des Projektes in nahezu allen Planungspunkten konnte erfolgreich realisiert werden.

Lediglich die zum Projektbeginn 1999 geplante Leistungsfähigkeit der Laserstrahlquelle von ca. 800 Watt wurde aufgrund des über den geplanten Mittelumfang hinausgehenden Budgetrahmens nur konzeptionell nachgewiesen. Die Realisierung der Leistung stellt jedoch unter technischen Gesichtspunkten prinzipiell kein Problem mehr dar. Im Hinblick auf eine möglichst weitreichende Umsetzung der Technologie wurde der Schwerpunkt der Gesamtsystem-Entwicklung kostenneutral auf anwendergerechte Bearbeitungsstrategien und eine Anpassung der Bearbeitungsoptik verlagert. Dazu wurden in der Endphase des Projektes neben der verbesserten Handhabung der manuell führbaren Bearbeitungsoptik die Weiterentwicklung der Bearbeitungsoptik zu extrem robusten, automatisiert einsetzbaren Bearbeitungsoptiken umgesetzt.

Somit lassen sich durch die anwendergerechte Ausführung des Projektes in Zukunft große industrielle Anwendungsfelder erschließen und die Laserstrahltechnik als ressourcenschonende, emissionsarme Technologie einsetzen.

Inhaltsverzeichnis

<u>Projektkennblatt</u>	4
<u>Bilderverzeichnis</u>	7
<u>Tabellenverzeichnis</u>	8
<u>Zusammenfassung</u>	9
<u>Einleitung</u>	10
<u>Hauptteil</u>	14
<u>Prinzipieller Aufbau und Funktion eines Laserstrahl-Reinigungssystems</u>	14
<u>Technische Beschreibung des Hochleistungs-Lasersystems und der Entwicklungsergebnisse</u>	18
Entwicklung und technische Ausführung des Lasergehäuses	18
Entwicklung und technische Ausführung der Laserstrahlquelle (Laserresonator)	21
Entwicklung und technische Ausführung des Steuerungssystems	24
Entwicklung eines leistungsfähigen Faserkopplungssystems	25
Entwicklung einer manuellen High-Power Bearbeitungsoptik	26
Entwicklung einer automatisierten High-Power Bearbeitungsoptik	28
Entwicklung und Auswahl einer leistungsfähigen Absaugtechnologie	29
<u>Erprobung und Qualifizierung des Lasersystems sowie Projektbewertung</u>	32
<u>Erprobungs- und Qualifizierungsversuche mit dem High-Power System</u>	33
Selektives Entfernen von Anstrichen als Vorbehandlung zur Lackierung	33
Vorbehandeln von PUR Bauteilen mit High-Power Laserstrahlung	35
<u>Zielerreichung und Ausblick</u>	38
<u>Ausblick auf Weiterentwicklungen und zukünftige Anwendungsfelder</u>	39
<u>Fazit</u>	40
<u>Anhang</u>	41
<u>Leistungsdaten High-Power Laser</u>	41

Bilderverzeichnis

<u>Abbildung 1: Abtragen von Deckschichten mit Laserstrahlung</u>	11
<u>Abbildung 2: Basisgerät eines kompakten Laserstrahl-Reinigungssystems</u>	14
<u>Abbildung 3: Kompakte Bearbeitungsoptik für mittlere Laserstrahl-Leistungen bis 120 Watt (Typ OS H 20L)</u>	16
<u>Abbildung 4: Kompaktes Absaugsystem mit integriertem mehrstufigem Filtersystem und Hochvakuumturbine für Entschichtungsapplikationen mit geringen Emissionen</u>	17
<u>Abbildung 5: Gehäuse des Hochleistungs-Lasersystems</u>	18
<u>Abbildung 6: Geöffnete Elektronikhaube mit Verteilermodulen</u>	19
<u>Abbildung 7: Geöffnete Resonatorhaube mit Laserstrahlquelle</u>	19
<u>Abbildung 8: Luftgedämpfte Montagepuffer zur Aufnahme des Laser-Resonators</u> ...	20
<u>Abbildung 9: Montagebereich für 19“ Zusatzmodule des Lasersystems</u>	20
<u>Abbildung 10: High-Power Laser-Resonator mit $P_m > 500$Watt Laserleistung</u>	22
<u>Abbildung 11: Schematische Darstellung des High-Power Laser-Resonator mit $P_m > 500$Watt Laserleistung</u>	23
<u>Abbildung 12: IMC Zentralsteuerung und Gliederungsstruktur des Hauptmenüs</u>	24
<u>Abbildung 13: Einkoppeloptiken mit angeschlossener Kühlwasserzufuhr und Lichtleitkabeln</u>	26
<u>Abbildung 14: Prinzip-Darstellung der manuellen Bearbeitungsoptik</u>	26
<u>Abbildung 15: Bearbeitungsoptik Typ OSH 70L</u>	27
<u>Abbildung 16: Entschichten von Stahlprofilen (Teile eines Hochspannungsmastes) mit dem neuen High-Power-Lasersystem</u>	28
<u>Abbildung 17: High-Power Bearbeitungsoptik für automatisierten Einsatz</u>	28
<u>Abbildung 18: Versuche zur Emissionsmessung</u>	29
<u>Abbildung 19: Partikelverteilung beim Abtragen von Lackschichten</u>	30
<u>Abbildung 20: Aufbau eines kompakten Absaugsystems</u>	31
<u>Abbildung 21: Entfernung von Oxidationen und Prozessrückständen von einer Aluminium-Walze</u>	32
<u>Abbildung 22: Anstrich-Vorbehandlung mit dem High-Power Laser</u>	34
<u>Abbildung 23: Minimale Abfallmenge beim strahlmittelfreien Laser-Entschichten</u>	35
<u>Abbildung 24: Oberflächenstruktur eines vorbehandelten Bauteiles (vergrößerte Aufnahme)</u>	36
<u>Abbildung 25: Laserstrahl-Vorbehandlung von PUR im Laborversuch</u>	37

Tabellenverzeichnis

<u>Tabelle 1: Klebe- Vorbehandlung von PUR-Bauteilen.....</u>	36
<u>Tabelle 2: Antizipierte Verbreitungszahlen der High-Power Lasersystemtechnik.....</u>	39
<u>Tabelle 2: Leistungsdaten High-Power Laser.....</u>	41

Zusammenfassung

Im Rahmen eines durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten zweiphasigen Entwicklungsprojektes wurde ein Hochleistungs-Laserstrahl-Reinigungssystem zur Ressourcen schonenden Entschichtung von Oberflächen entwickelt. Die Zielsetzung des hier beschriebenen abgeschlossenen Projektes bestand in folgenden Punkten:

1. Entwicklung eines leistungsstarken Laserstrahlsystems mit einer mittleren Strahlleistung von ca. 500 Watt in einer ersten Entwicklungsstufe.
2. Realisierung einer für die Laserstrahlleistung qualifizierten Laserstrahlübertragungstrecke sowie einer kompakten Handhabungsoptik
3. Auslegung und Erprobung einer effizienten Filter- und Absaugtechnik
4. Optimierung und Qualifizierung des Lasersystems sowie der angeschlossenen Bearbeitungsoptik zu einem zuverlässigen, leistungsfähigen, industriell einsatzfähigem Gesamtsystem

Die o.g. Ziele wurden im Rahmen des Projekts vollständig erfüllt.

Eine ursprünglich angestrebte weitere Leistungssteigerung auf bis zu 800 Watt Laserstrahlquellenleistung konnte ebenfalls prinzipiell nachgewiesen werden. Zur endgültigen Realisierung muss jedoch die Beschaffung einer angepassten Zentralkomponente erfolgen, die aus Budgetgründen derzeit nicht im Kosten/Nutzen-Verhältnis zur aktuellen Marktnachfrage steht. Über das eigentlichen Projektziel hinaus konnte zum Ende und unmittelbar im Anschluss eine weiterentwickelte Bearbeitungsoptik für die vollautomatische Nutzung der Technologie fertiggestellt werden.

Das Entwicklungsprojekt wurde eigenverantwortlich von der Firma Clean-Lasersysteme GmbH abgewickelt. Die Entwicklung geschah in enger Zusammenarbeit mit potenziellen späteren Anwendern der Technologie um den Kundenbedarf frühzeitig in die Produktqualifizierung einfließen lassen zu können. Eine Kooperation mit Partnern im eigentlichen Sinne wurde nicht durchgeführt.

Das Projekt wird bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unter dem Aktenzeichen 16884 geführt.

Einleitung

Zu Beginn des Projektes wurden zur industriellen Reinigung und Entschichtung von metallischen Bauteilen im wesentlichen die bekannten konventionellen Reinigungsverfahren eingesetzt. Diese Verfahren lassen sich i.W. gliedern in:

- chemische Verfahren
wie z.B. Beizen oder Waschen,
- mechanische Verfahren
wie z.B. Partikelstrahlen oder Bürsten,
- oder thermische Reinigungs- bzw. Entschichtungsverfahren
wie z.B. Pyrolyse (Abbrennen).

Diese o.g. Beispielverfahren weisen große Nachteile im industriellen Einsatz auf:

Dies sind z.B.:

- Hoher Energieverbrauch
- Hoher Ressourcenverbrauch
- Irreversible Vermischung mit den Reinigungsmedien
- Freisetzung und schlechte Kollektierbarkeit der Abprodukte
- Staubbelastung
- Lärmbelastung
- Arbeitsplatzbelastung
- Schlechte on-line-Integrationsfähigkeit der Verfahren in den industriellen Ablauf
- Hohes Beschädigungsrisiko für das Grundmaterial

Durch die Verwendung der Laserstrahl-Reinigungstechnik lassen sich prinzipbedingt nahezu alle o.g. Probleme bei der Entschichtung metallischer Materialien deutlich reduzieren oder sogar vollständig vermeiden.

Da beim Laserstrahl-Entschichten ein fokussierter, gepulster Laserstrahl auf die lichtabsorbierende Oberfläche trifft und schlagartig die Deckschicht verdampft, lässt sich eine Beschädigung der reflektierenden metallischen Oberfläche durch die Wahl richtiger Prozessparameter vermeiden. Durch die Verwendung von Licht als Strahlmedium ist eine Vermischung mit einem Reinigungsmedium und eine großvolumige Entsorgung nicht notwendig. Der Auftreffpunkt des Laserstrahls ist genau bekannt und somit ist eine effiziente Erfassung und Entsorgung der verdampften Partikel mittels einer effizienten Absaugung sehr gut möglich.

Um eine flächige Bearbeitung der Oberfläche zu ermöglichen wird bei den Lasersystemen der Firma Clean-Lasersysteme eine Bearbeitungsoptik verwendet, die den Strahl mindestens in eine Richtung mittels eines elektromechanisch bewegten Spiegels oszillierend linienförmig ablenkt. Gleichzeitig werden vom Laser mehrere tausend Laserpulse pro Sekunde emittiert, so dass zahlreiche „Abtraggpulse“ punktförmig nebeneinander auf einer Linie platziert werden. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Laserstrahl-Entschichtung in der Praxis. Deutlich zu erkennen ist die „leuchtende Abtraglinie“ die aus dem Plasmaleuchten des verdampften Deckschichtmaterials resultiert.



Abbildung 1: Abtragen von Deckschichten mit Laserstrahlung

Zu Projektbeginn waren Laserstrahl-Reinigungssysteme, die auf dem oben beschriebenen Funktionsprinzip basierten, lediglich mit einer maximalen mittleren Leistung von etwa 100 Watt Laserleistung beim Antragsteller verfügbar. Da die erzielbare Flächenrate beim Abtragen mit Laserstrahlung wesentlich von der eingesetzten mittleren Laserstrahlleistung abhängt, lag ein weitreichender industrieller Einsatz mit einer ausreichenden Entschichtungsgeschwindigkeit der Technik zu diesem Zeitpunkt vielfach außerhalb eines wirtschaftlichen Bereiches.

Das Hauptziel des Projektes bestand somit in der Steigerung der industriellen Verbreitung der Technik, um damit die Ressourcen schonenden Potenziale zu nutzen. Hieraus lassen sich folgende technische Ziele an die Technologieentwicklung ableiten:

1. Entwicklung eines mobilen, kompakten und ressourcen-schonenden Laserstrahl-Entschichtungssystems mit einer hohen mittleren Laserleistung ($P_m > 500W$) bzw. in der Endversion bis zu einer mittleren Laserstrahlleistung von 800W
2. Realisierung einer für die Laserstrahlleistung qualifizierten Laserstrahlübertragungstrecke sowie einer kompakten und anwendungsfreundlichen Handhabungsoptik
3. Auslegung und Erprobung einer effizienten Filter- und Absaugtechnik

Gleichzeitig mussten hierbei kaufmännische Rahmenbedingungen erfüllt werden, um einen späteren wirtschaftlichen Einsatz des Systems zu ermöglichen.

Um die o.g. Projektziele zu erfüllen lassen sich folgende Aufgaben und daraus resultierende Arbeitspunkte ableiten.

In der ersten Projektphase sind dies:

- Entwicklung einer leistungsstarken Laserstrahlquelle, die wiederum aus verschiedenen Einzelkomponenten und Versorgungsmodulen besteht.
- Entwicklung einer Lasersteuerung, die Steuerungs- und Überwachungsfunktionen der Systemkomponenten ausführt.
- Entwicklung einer angepassten und leistungsfähigen Bearbeitungsoptik.
- Entwicklung einer leistungsfähigen Strahlübertragungsstrecke auf Basis flexibler Lichtwellenleitertechnik zur Verbindung der Strahlquelle mit der Bearbeitungsoptik.
- Neben der Entwicklung der lasertechnischen Komponenten besteht eine weitere wesentliche Aufgabe in der Entwicklung einer leistungsfähigen und effizienten Absaugtechnologie zur Erfassung und Kollektion der abgetragenen Deckschichten.

Um eine weitreichende Einführung und damit verbundene umweltrelevante Nutzung der Technologie ermöglichen zu können ist die technische Qualifizierung basierend auf den Ergebnissen der ersten Projektphase besonders wichtig. Zu diesen Qualifizierungsaufgaben gehören insbesondere:

- Erprobung und Optimierung der Bearbeitungsoptik unter den Gesichtspunkten
 - Ergonomie
 - Zuverlässigkeit
 - Bedienerfreundlichkeit
 - (Umwelt-)Technische Einsatzfähigkeit
- Die Erprobung des Gesamtsystems in Rahmen von Feldversuchen sowie die iterative Verbesserung und Qualitätsoptimierung folgender Systemkomponenten in Hinblick auf eine weitreichende industrielle Nutzung.

Es ergeben sich somit für das Projekt somit folgende Arbeitspunkte:

In der ersten Projektphase:

1. Entwicklung einer leistungsfähigen Strahlquelle mit $P_m > 500W$ Strahlquellenleistung
2. Entwicklung eines Lasersteuerungs- und Interfacemoduls
3. Entwicklung eines Faserkopplungssystems zur Strahlübertragung
4. Entwicklung einer High-Power Laserstrahl-Bearbeitungsoptik
5. Entwicklung einer leistungsfähigen und effizienten Absaugtechnologie

In der anschließenden 2. Projektphase:

6. Qualifizierung einer Bearbeitungsoptik zur industriellen Anwendung
7. Anwendungsgerechte Erprobung und Optimierung des Gesamtsystems

Da im Rahmen des vorliegenden Zwischenberichtes zur 1. Projektphase bereits auf die Ziele, Inhalte und Ergebnisse der Arbeitspunkte 1-5 detailliert Bezug genommen wurde, beschreibt der hier vorliegende Abschlussbericht insbesondere den Arbeitspunkt 7 sowie die im Gesamtsystem enthaltenen Komponenten. Da die Bearbeitungsoptik einen -wesentlichen Teil- des Gesamtsystems darstellt wird der o.g. Arbeitspunkt 6 im nachfolgenden Hauptteil besonders ausführlich dargelegt.

Im Rahmen des nachfolgenden Hauptteiles werden insbesondere folgenden Systemkomponenten erläutert:

- Entwicklung und technisches Konzept des Basissystems bestehend aus:
 - o Gehäuse
 - o Resonator (Laser-Strahlerzeuger)
 - o Kühlsystem
 - o Peripherie- und Versorgungskomponenten (Netzteil, HF-Einheit)
 - o Steuerungskonzept und Sensorik sowie Menüstruktur der Bedieneinheit
- Entwicklung und technisches Konzept der Bearbeitungsoptik sowie der Lichtwellenleitertechnik zur Anbindung der Optik an die Strahlquelle
- Absaugsystemtechnik und Auswahlkriterien

Des weiteren wird im Hauptteil auf folgende Aspekte eingegangen:

- Ergebnisse der Erprobungs-, Qualifizierungs- und Feldversuche
- Bewertung des ökologischen, ökonomischen und technischen Potenzials der neuen Technologie anhand typischer Einsatzbeispiele
- Bewertung des Zielerreichungsgrades
- Exemplarische Darstellung der Verbreitung der Vorhabensergebnisse
- Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen und zukünftige Anwendungsfelder der Technologie sowie die damit verbundenen positiven ökologischen Auswirkungen

Hauptteil

Prinzipieller Aufbau und Funktion eines Laserstrahl-Reinigungssystems

Ein Laserstrahl-Reinigungssystem besteht aus zwei wesentlichen Systemkomponenten:

1. Laserstrahl-Basisgerät
2. Bearbeitungsoptik

Das Basisgerät enthält die wesentlichen lasertechnischen Komponenten sowie die zum Betrieb des Strahlerzeugers (Laserresonator) notwendigen Peripheriegeräte. Somit setzt sich das Basisgerät vereinfacht beschrieben aus folgenden Elementen zusammen:

- robustes und stabiles Gehäuse zur Aufnahme der Gerätekomponenten
- Laser-Resonator zur Erzeugung der Laserstrahlung einschließlich eines oder mehrerer integrierter Güteschalter zur Pulsmodulation des Resonators
- Wasser-Luftkühlsystem zur autarken Kühlung des Laserstrahl-Resonators und der weiteren verlustbehafteten Peripheriekomponenten
- Steuerungssystem zur Überwachung und Steuerung des Resonators und der weiteren Peripheriekomponenten
- geregeltes Lasernetzteil zur Versorgung des Laser-Resonators mit elektrischer Energie
- Hochfrequenzmodulator zum Betrieb des/der im Laser-Resonator untergebrachten Güteschalter
- diverse Sensoren zur Überwachung und Kontrolle von Betriebszuständen

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Basisgerät eines industriellen Laserstrahl-Reinigungssystems (CL 120 Q).



Abbildung 2: Basisgerät eines kompakten Laserstrahl-Reinigungssystems

Zur Bearbeitung technischer Oberflächen muss die vom Basisgerät erzeugte gepulste Laserstrahlung mittels einer Bearbeitungsoptik auf der Oberfläche fokussiert werden. Durch die Fokussierung werden die zur Entschichtung notwendigen Schwellintensitäten erzeugt, die zur Verdampfung lichtabsorbierender Deckschichten führt. Kurze Einwirkdauern der Laserstrahlung (typische Pulslänge ca. 70-500ns) vermeiden eine Ableitung der thermischen Energie in das Grundmaterial. Da der Durchmesser des fokussierten Laserstrahles typischerweise zwischen 100µm und 900µm beträgt, ist eine rein manuelle flächige Verteilung bei Laser-Pulsfrequenzen (Repetitionenraten) von bis zu 50kHz nicht praktikabel.

Aus diesem Grund wird die von der Bearbeitungsoptik fokussierte Strahlung gleichzeitig mittels integrierter Strahlablenktechnik linienförmig ein- oder zweidimensional abgelenkt und die Laserpulse in einem festen Abstand nebeneinander, leicht überlappend auf der Oberfläche positioniert (siehe Abbildung 1).

Die Bearbeitungsoptik enthält somit folgende wesentliche Elemente:

- Leichtes, stabiles und ergonomisch geformtes Gehäuse zur Aufnahme der elektronischen und optischen Komponenten
- Strahlführungs- und Umlenkelemente zur „starr“ Umlenkung der Laserstrahlung
- Scannerspiegel und Galvanometrischer Antrieb zur gesteuerten Strahlablenkung
- Elektronik zur Signalgenerierung und Regelung der gesteuerten Strahlablenkung
- Messsensorik
- Fokussiermodul zur Bündelung der Laserstrahlung
- Weitere optische Komponenten zur Strahlformung innerhalb der Optik
- Strömungstechnisch angepasste Absaugkanäle und Düsen (integriert oder extern angeflanscht) zur effizienten Partikelerfassung und zum Anschluss eines Absauggerätes

Je nach Anwendungs- und Leistungsbereich können die Bearbeitungsoptiken angepasste Geometrien aufweisen. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine kompakte Bearbeitungsoptik für Anwendungen mit eingeschränkter Zugänglichkeit bei Einsatz von Strahlquellen mit bis zu 120 Watt Laserleistung. Die maximale Ablenkbreite des Laserstrahls beträgt in der Fokussierebene ca. 20mm.



Abbildung 3: Kompakte Bearbeitungsoptik für mittlere Laserstrahl-Leistungen bis 120 Watt (Typ OS H 20L)

Für das im Projekt zu entwickelnde High-Power-Lasersystem können die zu Projektbeginn bereits verfügbaren Bearbeitungsoptiken nicht benutzt werden, da diese aus technischer Sicht nicht für den Betrieb mit hohen mittleren Laser-Leistungen von über 150 Watt spezifiziert sind.

Die Verbindung zwischen der Bearbeitungsoptik und dem Basisgerät lässt sich bei Festkörper-Laserstrahlsystemen mittels flexibler Lichtwellenleiter realisieren. Fasern aus koaxialen Quarzglas mit unterschiedlichem Brechungsindex und einem Durchmesser von unter 0,5 mm sorgen dabei für eine hochflexible nahezu verlustfreie Übertragung der Laserstrahlung auch über weite Strecken. Bei leistungsstarken Strahlquellen und hohen Pulsleistungen wirken jedoch besondere Beanspruchungen auf die Endflächen der Lichtwellenleiter und erhöhen das Beschädigungsrisiko.

Neben den lasertechnischen Komponenten umfasst ein Laserstrahl-Entschichtungs-systems noch eine geeignete Absaugtechnik, die für eine effiziente Erfassung der abgetragenen (verdampften) Partikel im Arbeitsbereich sorgt. Durch geeignete Filtersysteme werden die geringen Partikelmengen erfasst und umweltgerecht von der Umgebungsluft und dem Arbeitsbereich ferngehalten.

Bei Lasersystemen mit Leistungen im Bereich von 100 Watt reichen für diese Aufgabe in der Regel kleine konventionelle Schweißbrauchabluftsysteme aus. Da aufgrund der geringen mittleren Laserstrahlleistung nur etwa eine Partikelmenge von $10\text{-}30\text{cm}^3/\text{h}$ entsteht, stellt die effiziente Erfassung und Kollektion der Partikel nur ein geringes Problem dar.



Abbildung 4: Kompaktes Absaugsystem mit integriertem mehrstufigem Filtersystem und Hochvakuumturbine für Entschichtungsapplikationen mit geringen Emissionen

Bei Laserstrahlleistungen mit $P_m > 500$ Watt hingegen sind jedoch aufgrund überproportionaler Effekte Volumenabtragsraten von mehreren $100 \text{ cm}^3/\text{h}$ möglich.

Aus dem oben beschriebenen Aufbau und der Funktionsweise eines Laserstrahl-Reinigungssystems lassen sich folgende Arbeitsschritte für die Entwicklung eines Hochleistungs-Laserstrahl-Reinigungsgerätes direkt ableiten:

1. Entwicklung einer leistungsfähigen Strahlquelle mit einer mittleren Leistung von $P_m > 500$ Watt, die gleichzeitig über einen möglichst hohen Wirkungsgrad verfügt um eine ökologische und ökonomische Alternative darzustellen.
2. Entwicklung einer leistungsfähigen zentralen Steuereinheit zur sicheren Überwachung aller relevanten Betriebszustände und Steuerung/Kommunikation der einzelnen Systemkomponenten
3. Entwicklung einer leistungsfähigen Strahlübertragungsstrecke in Form einer geschützten, robusten Lichtwellenleiterverbindung (Faserkopplungssystem) zwischen Basisgerät und Bearbeitungsoptik.
4. Entwicklung einer angepassten High-Power Bearbeitungsoptik für die manuelle oder automatisierte Bearbeitung von Bauteilen
5. Auswahl und Entwicklung einer effizienten und leistungsfähigen Absaugtechnologie zur möglichst vollständigen Erfassung und Kollektion der abgetragenen Partikel
6. Qualifizierung des Gesamtsystems unter industriellen Einsatzanforderungen
7. Qualifizierung der Bearbeitungsoptik hinsichtlich Ergonomie und Verfügbarkeit

Technische Beschreibung des Hochleistungs-Lasersystems und der Entwicklungsergebnisse

Das Laserstrahl-Basisystem des entwickelten High-Power-Lasers besteht aus folgenden Komponenten, auf deren technische Umsetzung im Nachfolgenden eingegangen wird:

- Gehäuse zur Aufnahme der mechanischen Komponenten
- Resonator (Laser-Strahlerzeuger)
- Kühlsystem
- Peripherie- und Versorgungskomponenten (Netzteil, HF-Einheit)
- Steuerungskonzept und Sensorik sowie Menüstruktur der Bedieneinheit

Die Systemkomponenten müssen unter wirtschaftlichen, technischen und Zuverlässigkeitsaspekten optimiert werden.

Entwicklung und technische Ausführung des Lasergehäuses

Um die empfindlichen elektronischen und optischen Komponenten sicher und zuverlässig vor äußeren Einflüssen zu schützen müssen unter anderem folgende Anforderungen erfüllt sein:

- Hohe mechanische Stabilität
- Stoßabsorbierend
- Leichte Bauweise
- Oberflächenbeschichtung gegen Korrosion
- Leichte allseitige Zugänglichkeit zu den Gerätekomponenten insbesondere zu den elektrotechnischen und optischen Modulen
- Sicherer Staubschutz der optischen Komponenten
- Wahlweise mobile oder stationäre Aufbauweise
- Hohe Flexibilität und Erweiterungsreserve bezüglich technischer Varianten und Erweiterungen

Bei dem realisierten Gehäuse wurden die o.g. Anforderungen berücksichtigt.



Abbildung 5: Gehäuse des Hochleistungs-Lasersystems

Das Gehäuse des Basisgerätes besteht aus einem Edelstahl-Rohrrahmen mit äußeren Abdeckungen die verschließbar sind und einen nicht autorisierten Zugriff auf die Gerätekomponenten verhindern. Durch räumliche Trennung der Bereiche Kühler, Peripheriegeräte und Resonatorbereich wird sowohl eine thermische als auch schmutzbedingte Beeinträchtigung der Komponenten innerhalb des Gerätes vermieden. Alle metallischen Komponenten sind des Weiteren mit einer Pulverlackbeschichtung versehen. Der mobile Aufbau auf Luftrollen stellt eine gute Schockentkopplung gegenüber äußeren mechanischen Einflüssen beim Transport dar.

Durch die Unterbringung der zentralen Verdrahtung und Schnittstellen in der frontseitig zu öffnenden „Elektronikhaube“ ist sowohl eine gute Montage als auch Servicefreundlichkeit sichergestellt. Durch die Abdichtung der Haube und eine gezielte Wasserführung ist der Einsatz des Gerätes im Außenbereich ohne Beeinträchtigung der Elektronik möglich.

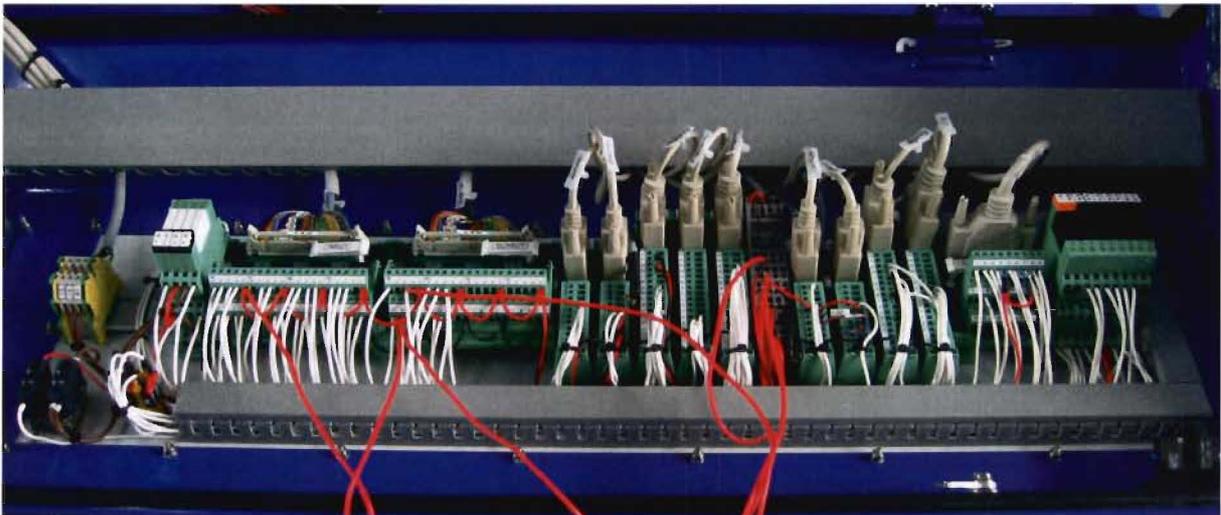


Abbildung 6: Geöffnete Elektronikhaube mit Verteilermodulen

Die auf der Geräterückseite befindliche abgedichtete „Resonatorhaube“ dient zum Schutz des empfindlichen und mit optischen Komponenten ausgestatteten Laser-Resonators. Um eine besondere mechanische Entkopplung des Resonators zu gewährleisten verfügt das Gehäuse über luftgedämpfte Montagepuffer.



Abbildung 7: Geöffnete Resonatorhaube mit Laserstrahlquelle

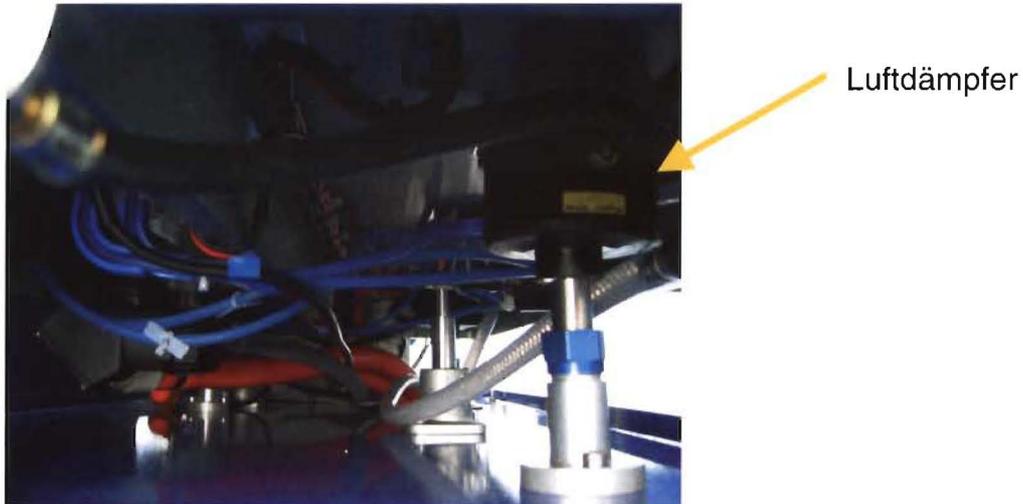


Abbildung 8: Luftgedämpfte Montagepuffer zur Aufnahme des Laser-Resonators

Der untere Bereich des Lasergehäuses ist in zwei Zonen aufgeteilt. In dem im Bild dargestellten linken Bereich befinden sich entkoppelt vom rechts angeordneten Kühlerbereich standardisierte Aufnahmeschienen zur Montage der 19“ Peripheriekomponenten (HF-Einschub und Netzteil). Durch die Modulbauweise ist im Servicefall ein schneller Austausch defekter Komponenten gewährleistet.

Wahlweise lässt sich in dem Lasergehäuse ein Luftkühlsystem oder - bei stationärer Verwendung - ein Wasserkühlsystem einsetzen. Lediglich eine Modifikation der Gehäusetüren (Entfall der Kühlluftlamellen) ist in diesem Fall erforderlich.



Abbildung 9: Montagebereich für 19“ Zusatzmodule des Lasersystems

Ebenfalls im linken Bereich des Gehäuses befinden sich die Vorrattanks für die Kühlwasserversorgung. Durch die gute Zugänglichkeit von der Frontseite ist eine einfache Befüllung realisierbar.

Entwicklung und technische Ausführung der Laserstrahlquelle (Laserresonator)

Vor der Konzeptionierung der Laserstrahlquelle wurden folgende wichtige Voraussetzungen aufgestellt:

1. wirtschaftliche Fertigungsmöglichkeit der Laserstrahlquelle durch Verwendung marktüblicher, industrietauglicher Komponenten und Module
2. Skalierbar- oder Kaskadierbarkeit der Strahlquellenkomponenten zur weiteren Leistungssteigerung
3. mittel- und langfristige Lieferbarkeit der Module
4. neueste, zukunftssträchtige Technologie

Ende der 90-er Jahre zeigte sich im Bereich der industriellen Festkörper-Laserstrahl-Technik ein deutlicher Trend zu diodengepumpten Laserstrahlquellen. Durch den Einsatz von Halbleiterlasern als Anregungsquelle des Festkörperlasers kann im Gegensatz zu lampengepumpten Festkörperlasern eine deutliche Verbesserung des Wirkungsgrades der Strahlquellen erzielt werden. Zu Projektbeginn wurden von einem deutschen Strahlquellenhersteller leistungsfähige diodengepumpte cw-Laser für Schweißapplikationen eingeführt. Diese Laser emittierten damals kontinuierliche Laserstrahlung in der Leistungsklasse von 550 Watt bis zu 4400 Watt. Für verschiedene Leistungsanforderungen wurden ein oder mehrere der sogenannten „Pumpmodule“ eingesetzt. Jedes dieser Pumpmodule erzeugt jeweils eine mittlere Leistung von ca. 550 Watt. Seit kurzem sind sogar leistungsgesteigerte, baugleiche Einzelmodule mit Ausgangsleitungen von ca. 1000 Watt verfügbar.

Durch den Einsatz des marktverfügbaren Pumpmoduls konnten wesentliche Entwicklungskosten unter Erfüllung der o.g. Kriterien eingespart werden.

Im einfachsten Fall besteht ein kontinuierlich emittierender leistungsstarker Festkörper-Laser-Resonator aus:

- Lasermedium (z.B. Nd:YAG-Kristall) mit Anregungsquelle (z.B. Diodenlaser)
- Kühlwasserkanälen zur effizienten Konvektion der Verlustleistung
- 100% reflektierendem Rückspiegel
- 60-90% reflektierendem Auskoppelspiegel

Ein oben beschriebener Laserresonator ist lediglich in der Lage kontinuierliche Laserstrahlung (cw-Betriebsart) zu emittieren. Um die für den Abtragprozess notwendige gepulste Laserstrahlung zu erzeugen werden weitere optische Elemente in den Strahlengang des Resonators eingebracht.

Spezielle Kristalle (sogenannte akusto-optische Güteschalter oder Q-Switch-Kristalle) verändern den Strahlengang des Resonators nur unwesentlich. Legt man jedoch ein leistungsstarkes hochfrequentes Signal an den Kristall an, so verändert sich durch Beugung der optische Weg im Resonator. Der resonante Zustand des Lasers ist aufgehoben und man spricht in diesem Fall von einem „gesperrten“ Resonator. In diesem Fall ist eine stimulierte Emission von angeregten Elektronen und die unmittelbar daraus resultierende Strahlungsemission unterbunden. Gleichwohl kommt es durch die von den Pumpdioden kontinuierlich eingebrachte Anregungsenergie zu einer hohen Ladungsdichte im Lasermedium aufgrund der kontinuierliche energetischen Anregung der Elektronen.

Wird die hochfrequente Energiequelle ausgeschaltet, befindet sich der Resonator wieder im resonanten Zustand und es kommt unmittelbar zu einer schlagartigen, intensiven „Entladung“ des Lasermediums. Die Strahlquelle emittiert einen kurzen Laserpuls (typisch 60-900ns) mit einer Spitzenleistung im Bereich von mehreren kW. Güteschalter lassen sich je nach Bauart mit Pulsfrequenzen von bis zu 100kHz ein- und ausschalten. Hierdurch ist eine variable Einstellung der Laser-Pulsfrequenz f_p möglich. Da in einem weiten Arbeitsbereich des Lasers in Näherung der Zusammenhang:

$$P_p \sim 1 / f_p$$

gilt, bestimmt die eingestellte Pulsfrequenz wesentlich die für das Entschichtungsergebnis entscheidende Spitzenintensität des Laserstrahl-Systems.

Im Rahmen von zahlreichen intensiven Versuchsreihen wurden mit einem Versuchsresonator verschiedene Resonatorkonfigurationen und die Auswirkungen auf die emittierende Laserstrahlung untersucht.

Variiert wurde in den Versuchen unter anderem:

- Eingespeiste Elektrische Leistung (Diodenstrom)
- Länge des Resonators
- Reflektionsgrad des Auskopplerspiegels
- Anzahl und Anordnung der Güteschalter im Strahlengang
- Eingespeiste HF-Leistung
- Austastfrequenz der Güteschalter

Bewertet wurde hierbei:

- mittlere Laserleistung der Strahlquelle
- Strahlqualität M^2
- Divergenz der emittierenden Laserstrahlung
- Rohstrahldurchmesser an unterschiedlichen Punkten
- Pulsleistung der Laserstrahlquelle
- Pulsdauer der Laserpulse

Die Ergebnisse der Voruntersuchung flossen in das Design und den technischen Aufbau der nachfolgend abgebildeten Laserstrahlquelle ein.



Abbildung 10: High-Power Laser-Resonator mit $P_m > 500$ Watt Laserleistung

Mit dem aufgebauten Resonator konnten bereits Spitzenwerte von **über 600 Watt Laserstrahlleistung** im Dauerstrich-Betrieb (cw) erzielt werden. Für den gepulsten Betrieb wurde aus Stabilitätsgründen die mittlere Laserstrahlleistung auf ca. 500 Watt limitiert.

Der schematische Strahlengang im Resonator wird anhand der nachfolgenden Abbildung deutlich:

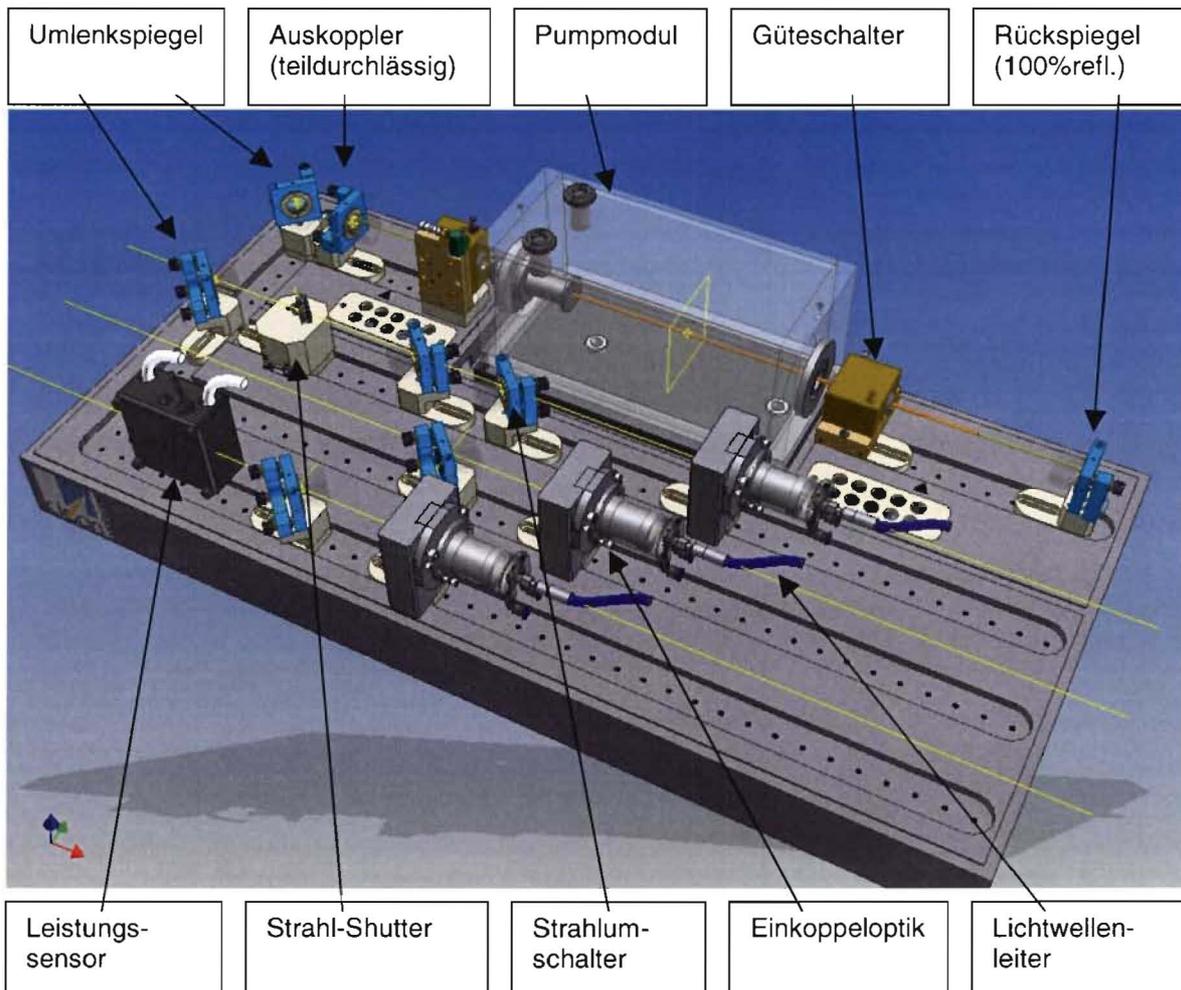


Abbildung 11: Schematische Darstellung des High-Power Laser-Resonator mit $P_m > 500$ Watt Laserleistung

Durch die im Strahlengang der Strahlquelle integrierten Strahl-Umschalter lässt sich die Laserstrahlung zeitversetzt zu mehreren Einsatzpunkten schalten. Somit lassen sich z.B. zur optimalen Handhabung verschiedene Optiken an den Laser mittels eines Lichtwellenleiters (Kabel) anschließen, um effiziente und qualitativ hochwertige Ergebnisse zu erzielen.

Entwicklung und technische Ausführung des Steuerungssystems

Die Akzeptanz eines technischen Gerätes ist nicht zuletzt auch abhängig von der Transparenz der Bedieneinheit. Da die Bedienung eines Reinigungs- und Entschichtungssystems oftmals von angelerntem, gering technisch qualifiziertem Personal durchgeführt wird, wurde bei der Konzeption der Steuerung auf eine einfach verständliche, visuelle Benutzerführung Wert gelegt.

Die menübasierte Zentralsteuerung auf PC-Industriestandard (Siemens IMC) erweist sich im praktischen Einsatz und auch in der Erprobungsphase als zuverlässig und lässt eine leicht erlernbare und einfache Bedienung des Systems zu.

Nachfolgende Bilder zeigen die Zentralsteuerung sowie das Hauptmenü:

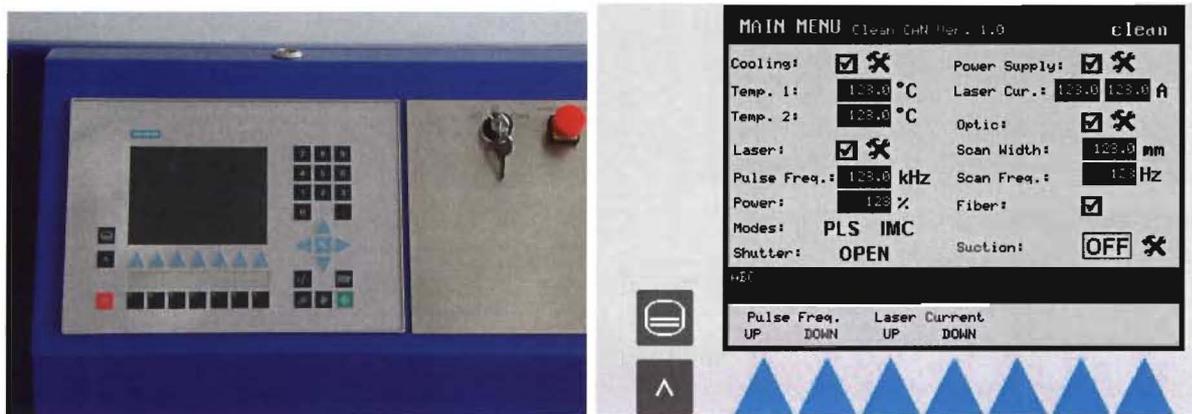


Abbildung 12: IMC Zentralsteuerung und Gliederungsstruktur des Hauptmenüs

Die Gliederungsstruktur des Hauptmenüs orientiert sich dabei am physikalischen Aufbau des Lasersystems und seiner Module. Das Hauptmenü besteht aus folgenden Untermenüpunkten:

- Kühlsystem (cooling)
- Lasernetzteil/Energieversorgung (power supply)
- Laser-Strahlquelle (laser)
- Bearbeitungsoptik (optic)
- Externes Absauggerät (suction)

In den jeweiligen Untermenüs lassen sich verschiedene system- oder prozessrelevante Daten und Parameter einstellen oder die Kommunikation des Lasers mit externen angeschlossenen Geräten (z.B. eines externen Absauggerätes oder der Bearbeitungsoptik) beeinflussen.

Durch die im Hauptmenü angezeigten Klartext-Fehlermeldungen ist der Bediener bei Abweichung der Prozess- und Laserparameter unmittelbar in der Lage direkte Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Wichtig ist auch, dass mit dem echtzeitbasierten Steuerungskonzept eine Überwachung aller relevanter Betriebszustände des Lasers gewährleistet sind. Dazu gehören z.B. die Überwachung der Kühlwassertemperaturen im internen Kühlsystem, die ordnungsgemäße Funktionsüberwachung von Netzteil und HF-Modul oder die

Kommunikation mit der Bearbeitungsoptik über den internen seriellen Industriebus (CAN-Bus) Im Falle eines Fehlers (z.B. Überhitzung des Systems oder Defekt einer Gerätekomponente) führt die Steuerung eine unmittelbare Abschaltung des Lasers aus und informiert den Bediener über die Fehlerursache und mögliche Gegenmaßnahmen.

Entwicklung eines leistungsfähigen Faserkopplungssystems

Um die in der Strahlquelle erzeugte Laserstrahlung effizient, verlustarm und gleichzeitig handhabbar zur Bearbeitungsstelle zu übertragen, werden Lichtwellenleiter mit möglichst geringem Durchmesser eingesetzt. Durch kleine Faserdurchmesser lassen sich zum Einen eine hohe Flexibilität und zum Anderen eine optimale Fokussierbarkeit der Strahlung -und somit eine hohe Bearbeitungsintensität- erzielen.

Geringe Faserdurchmesser erfordern jedoch eine hohe Präzision bei der Justage des Laserstrahls und gleichzeitig eine hohe Standfestigkeit der empfindlichen Glas-Endflächen der Fasern.

Durch neue Auswahl und Justagemethoden ist es gelungen die hohe Pulsleistung von bis zu 400.000Watt über Lichtleitfasern mit einem (Kern-)Durchmesser von 300µm zu übertragen.

Durch Einbau der Einkoppeloptiken im schwingungsentkoppelten Resonator ist der Einfluss äußerer mechanischer Einwirkungen und die damit verbundene De-Justage minimiert.

Eine effiziente Wasserkühlung der Optiken eliminiert gleichzeitig das Risiko einer thermisch bedingten Beschädigung der Optiken. Die beim „Einkoppeln“ der Laserstrahlung in den Lichtwellenleiter entstehende Abwärme i.H. von ca. 30 Watt wird effizient abgeführt.

Im nachfolgend gezeigten Bild ist eine Beamswitch-Version des Resonators mit zwei Einkoppeloptiken dargestellt. Die externen Schlauchleitungen dienen zur Leitung des Kühlwassers.

Die Einkoppeloptiken und die daran angeschlossenen Lichtwellenleiter wurden für den Betrieb mit gepulster Laserstrahlung angepasst und optimiert. Im eingebauten Zustand befinden sich die Einkoppeloptiken unter einer metallischen Abdeckung die neben der äußeren Resonatorhaube vor mechanischen Einwirkungen und dem Eindringen von Schmutz schützt.



Abbildung 13: Einkoppeloptiken mit angeschlossener Kühlwasserzufuhr und Lichtleitkabeln

Neben erfolgreich durchgeführten Belastungstests der Faser konnte auch eine Justage-Methode zur Einkopplung vereinfacht werden.

Zum mechanischen Schutz des Lichtwellenleiters ist der LWL zusammen mit Energie und Datenleitungen in einem schützenden, biege- und trittsicheren Schutzschlauch untergebracht. Hierdurch ist auch in der rauen industriellen Umgebung ein optimaler Schutz für das Lichtleitkabel gewährleistet.

Entwicklung einer manuellen High-Power Bearbeitungsoptik

Die für manuelle Anwendungen entwickelte Bearbeitungsoptik konnte bereits für Applikationserprobungen erfolgreich eingesetzt und intensiv getestet werden.

Nachfolgende Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau der Bearbeitungsoptik:

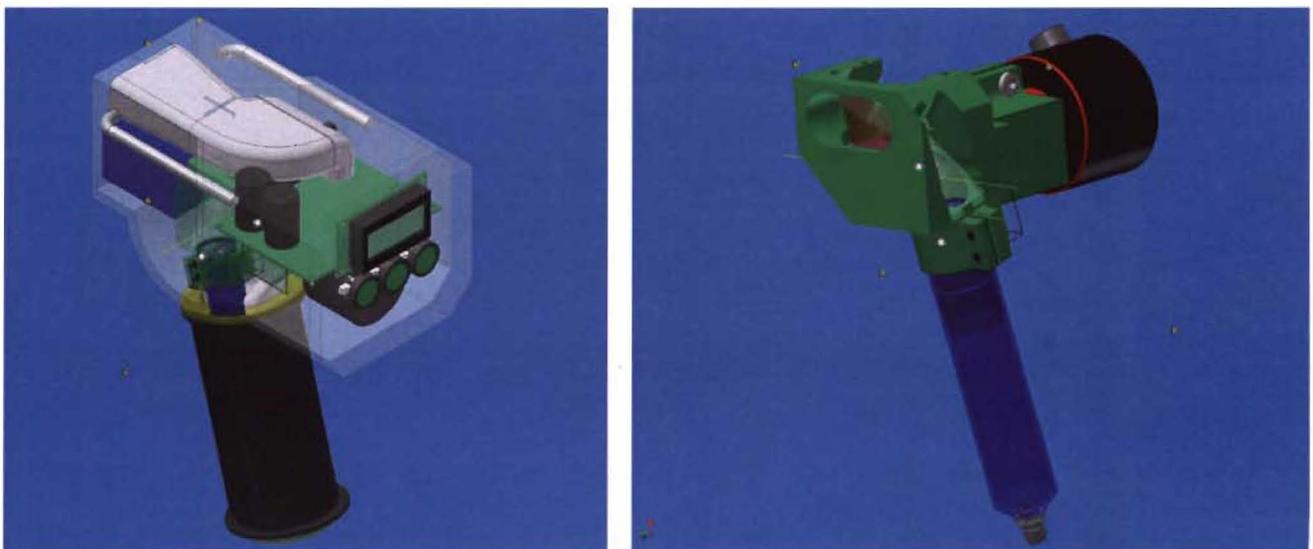


Abbildung 14: Prinzip-Darstellung der manuellen Bearbeitungsoptik

Die Optik weist folgende technische Besonderheiten und Eigenschaften aus:

- Robustes, gewichtsoptimiertes und nahezu stoßfestes Leichtmetallgehäuse (Gewicht ca. 2kg)
- Integrierter Hochleistungsscanner mit Treiberelektronik (closed-loop Prinzip)
- Hochwertige Quarzglasoptiken zur Strahlformung und Führung der Laserstrahlung innerhalb der Optik stabil und soweit technisch möglich stoßgeschützt befestigt
- Integriertes μC basiertes Steuerungssystem zur Signalgenerierung und Ansteuerung des Strahlableitensystems
- Integrierte Sensoren zur Überwachung von Temperaturen und Laserleistung
- CAN-Bus Kommunikation zum Datenaustausch mit dem Basissystem
- Komfortable Bedienung und Parametereinstellung über Drucktaster
- LCD-Display zur komfortablen Darstellung von Parametereinstellungen und Informationen für den Bediener
- Integrierter metallischer Absaugkanal zur effizienten Abführung der abgetragenen Materialpartikel und Dämpfe
- Laserstrahl Ablenkbreite bis zu 70mm bei $f=160\text{mm}$ Brennweite

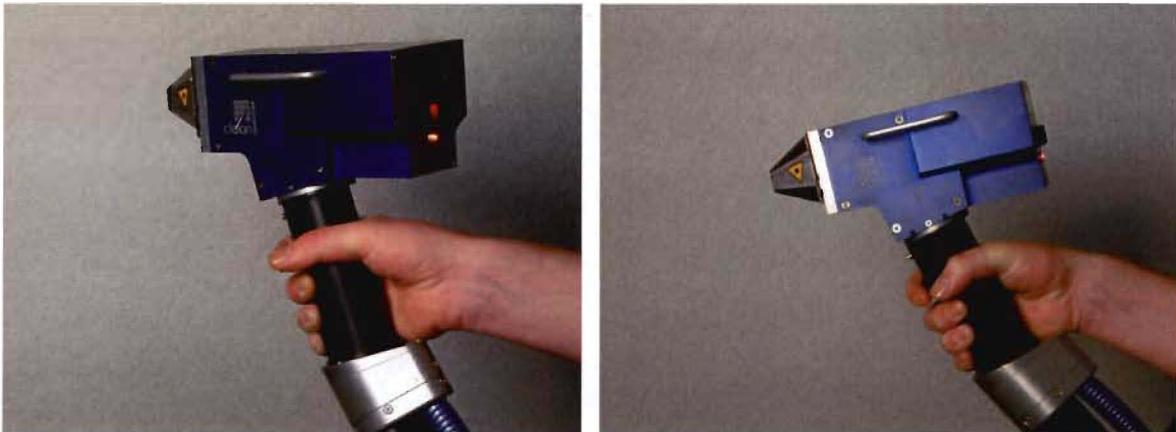


Abbildung 15: Bearbeitungsoptik Typ OSH 70L

Technisch bedingt entsteht im Innern der Bearbeitungsoptik durch Strahlungsverluste (Reflexions- und Transmissionsverluste an den Laseroptiken) sowie durch Verlustleistung an den integrierten Leistungselektroniken innerhalb der Bearbeitungsoptik Verlustwärme, die ohne eine gezielte aktive Abfuhr zur Zerstörung der Optik führt.

Da eine Wärmeableitung mittels Kühlflüssigkeit (z.B. Kühlwasser) aus Gewichts- und Ergonomiegründen nicht akzeptabel ist, wurde der Abluftstrom des angeschlossenen Absauggerätes gleichzeitig zur Kühlung herangezogen. Mit Hilfe modernster Fertigungsmethoden (3D rapid Prototyping-Verfahren) war es möglich einen metallischen Freiform-Saugkanal mit guter Wärmeleitfähigkeit so zu gestalten, dass eine thermische Anbindung der Wärmequellen realisiert wird. Hierdurch ist es möglich bei minimalem Gewicht und optimaler Ergonomie eine Funktionsstabilität im Dauerbetrieb zu gewährleisten.

Aufgrund der Abfrage des Betriebszustandes des Absaugsystems ist neben der effizienten Abluftkollktion auch die Kühlung der Bearbeitungsoptik sichergestellt. Nachfolgendes Bild zeigt die manuelle Bearbeitungsoptik im Einsatz.



Abbildung 16: Entschichten von Stahlprofilen (Teile eines Hochspannungsmastes) mit dem neuen High-Power-Lasersystem

Entwicklung einer automatisierten High-Power Bearbeitungsoptik

Aufgrund der zum Projektende gestiegenen Anfragen seitens der potenziellen industriellen Anwender nach automatisiertem Einsatz der High-Power Lasertechnik wurde noch im Rahmen des Entwicklungsprojektes mit einer Anpassungsentwicklung einer automatisiert fhrbaren Bearbeitungsoptik begonnen.

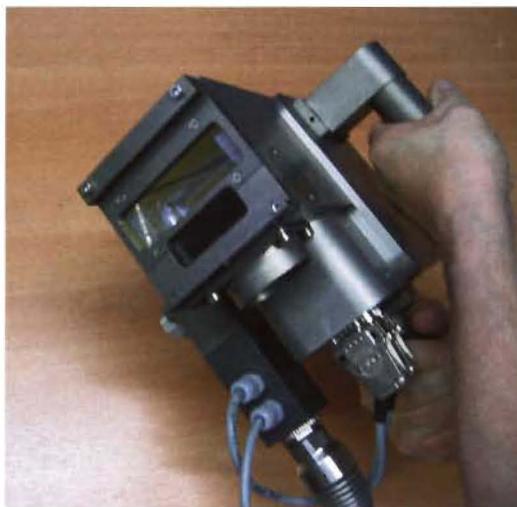


Abbildung 17: High-Power Bearbeitungsoptik für automatisierten Einsatz

Die Optik zeichnet sich neben der integrierten Wasserkühlung zur effizienteren Wärmeabfuhr und einer deutlich höheren Robustheit auch durch eine erhöhte Strahlbreite aus. So lassen sich Ablenkbreiten von $>100\text{mm}$ bei $f=160\text{mm}$ Brennweite erzeugen. Das Gewicht der automatisiert fährbaren Optik liegt bei ca. 4,5 kg. Hinsichtlich weiterer technischer Daten entspricht das System ansonsten im Wesentlichen der manuellen Ausführungsform.

Entwicklung und Auswahl einer leistungsfähigen Absaugtechnologie

Im Bereich der Absaugtechnik wurden die folgenden wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse gewonnen:

Die gute Partikelerfassung beim Abtragen mit Laserstrahlung lässt sich subjektiv bestätigen. Die strömungstechnisch optimierte Kanalführung des Absaugkanals im Handkopf erweist sich als ideal, um eine Erfassung der Partikel auch bei geringen Absaugvolumenströmen zu erzielen. Die beim Abtragprozess kaum wahrzunehmende Geruchsbelastung bestätigt die effiziente Partikel-Erfassung. Messungen zur Ermittlung der exakten Werte werden zur Zeit vorbereitet.

Im Bereich der Absaugtechnik wurden die folgenden wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse gewonnen:

In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ILT (Aachen) und der RWE AG wurden am LZH (Hannover) MAK-Untersuchungen zum Entschichten von Anstrichen auf Hochspannungsmasten durchgeführt. Eingesetzt wurde ein mobiles 80 Watt Lasersystem der aktuellen Produktreihe.



Abbildung 18: Versuche zur Emissionsmessung

Dabei wurde neben zahlreichen Informationen zur Zusammensetzung der Entschichtungsprodukte (Partikelgröße, chemische Zusammensetzung etc.) auch

eine Prognose über die zu erwartende Partikelkonzentration beim Abtrag abgegeben. Basierend auf dieser Prognose lassen sich die notwendigen Erfassungs- und Filteranforderungen zur Einhaltung der MAK-Werte ermitteln. Aus dem Diagramm wird sehr deutlich, dass es sich um stark zink- bzw. bleihaltige Anstriche handelt. Die Staubbelastung, die beim Abtrag durch die Verdampfung entsteht, ist kritisch und muss im Rahmen weiterer Versuche näher betrachtet werden. Aus dem Diagramm wird deutlich, dass der Einsatz einer effizienten Absaugung und eine möglichst vollständige Kollektion der Abprodukte unumgänglich ist um die MAK-Werte einhalten zu können.

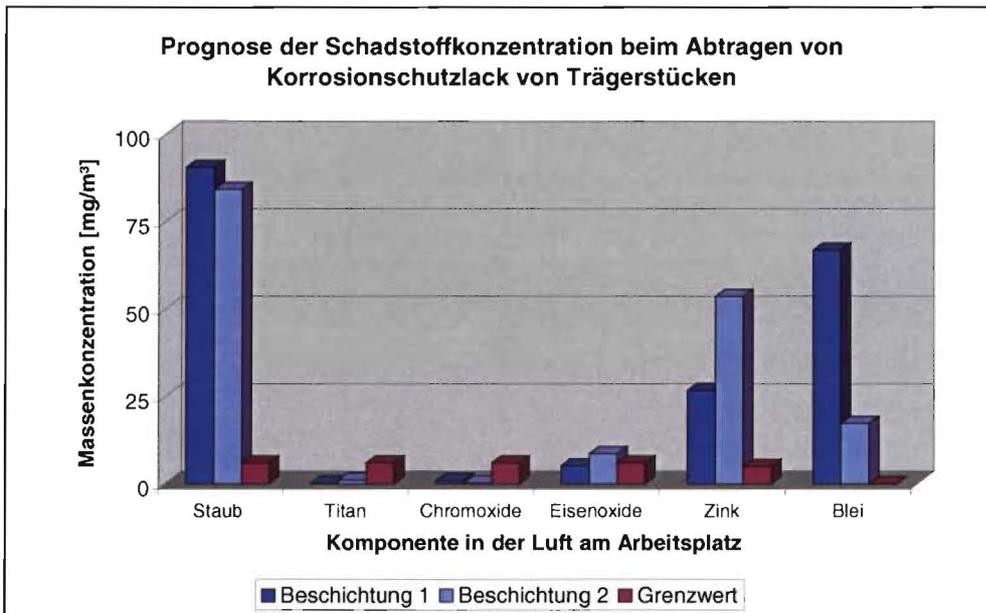


Abbildung 19: Partikelverteilung beim Abtragen von Lackschichten

Um den bei High-Power Entschichtungsanwendungen gestiegenen Anforderungen an die Absaugtechnik zu entsprechen ist der Einsatz geeigneter Filtersysteme mit leistungsstarken Turbinen zu empfehlen.

Die Absaugtechnik sollte dabei folgende Anforderungen erfüllen:

1. Leistungsfähige Turbinen mit einer hohen Pressung und einem auf die Anwendung abgestimmten Abluft-Volumenstrom zur effizienten Erfassung nahezu aller Partikel und Gase
2. Filtertechnik mit selbstabreinigenden Partikelfiltern mit einer Filteroberfläche von mindestens 10m^2 und nachgeschalteten oder optional einsetzbaren Rauchfiltern (Aktivkohlefilter)
3. Kompakte Abmessungen

Die minimalen Abmessungen eines geeigneten Filtersystems betragen typischerweise $40 \times 40 \text{cm}$ bei einer Gerätehöhe von ca. 100cm .

Bei großen Partikelmengen und mehrschichtigem Einsatz der Technologie sind Geräte mit einem größeren Filtervolumen und angepassten Absaugturbinen vorzusehen. Die typische Leistungsaufnahme eines geeigneten Absaugsystems liegt bei $1,5$ bis 3kW Turbinenleistung. Neben dem Einsatz geeigneter, auf die

Anwendung angepasster Filtertechnik ist bei der Auswahl der Absaugung auch auf eine entsprechende Schallsolierung der Geräte zu achten.

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein kompaktes, geeignetes Absaugsystem. Gut sichtbar ist dabei die leicht zugängliche Sammelschublade für die kollektierten Partikel. Durch einen Druckstoß wird der interne Filter zyklisch von Partikelansammlungen befreit. (Bild: Firma Teka Absaugtechnik, Velen)



Abbildung 20: Aufbau eines kompakten Absaugsystems

Erprobung und Qualifizierung des Lasersystems sowie Projektbewertung

Die 2. Projektphase war wesentlich durch die Erprobung des Lasersystems und die daraus resultierenden Ergebnisse bestimmt. Im Rahmen der Anwendungserprobung ließen sich bereits erste ökologisch und ökonomisch sinnvolle Einsatzfelder für die Hochleistungs-Laserstrahlreinigungstechnik aufdecken.

Insbesondere die schnelle Markteinführung der Technologie im Folgejahr des Projektabschlusses bestätigt die erfolgreiche Umsetzung des Entwicklungsprojektes.

Potenzielle Anwendungsfelder lassen sich bereits jetzt in folgenden Bereichen erkennen:

- Reinigung und Entschichtung großer Werkzeuge und empfindlicher Produktionsmittel (Entfernen von Prozessrückständen und Belägen) im Maschinenbau und in der Nahrungsmittelindustrie (siehe nachfolgendes Photo)
- Vorbehandlung von Bauteilen zum Bekleben und Fügen
- Selektive großflächige Entschichtung von verwitterten oder verschmutzten Anstrichen als Vorbehandlung zur effizienten Aufbringung neuer Beschichtungen
- Entlacken von Bauteilen z.B. in der Luftfahrt und Automobilindustrie

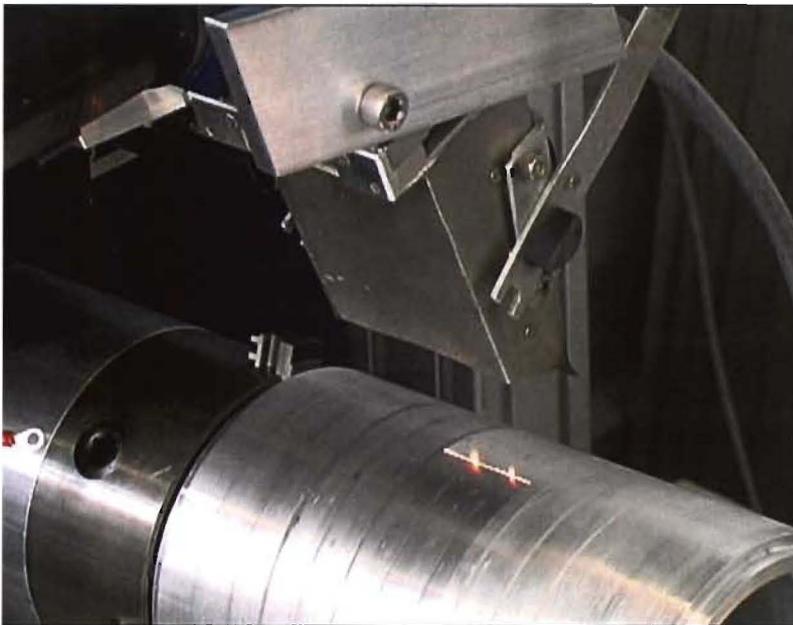


Abbildung 21: Entfernung von Oxidationen und Prozessrückständen von einer Aluminium-Walze

Erprobungs- und Qualifizierungsversuche mit dem High-Power System

Im Rahmen der Voruntersuchung wurden in unterschiedlichen Anwendungsfeldern Erprobungen der Technik durchgeführt. Exemplarisch wird nachfolgend anhand von zwei Anwendungs- und Erprobungsbeispielen das Einsatzpotenzial und die Bewertung der Technologie durchgeführt:

1. Reinigen und simultanes selektives Entschichten einer Wandbeschichtung im Innenbereich einer Nahrungsmittelproduktion.
2. Vorbehandeln von Bauteilen zum Verkleben mit Textilien im Rahmen der Automobilproduktion

Selektives Entfernen von Anstrichen als Vorbehandlung zur Lackierung

Im Rahmen einer mehrtägigen Erprobungsstudie wurde das High-Power Lasersystem in einer Erdnussrösterei eingesetzt. Durch die mehrjährige Beaufschlagung mit Öl und Fettdämpfen war es auf dem Wandanstrich zu einer gleichmäßigen Befettung gekommen. Um den hygienischen Anforderungen in der Nahrungsmittelindustrie zu genügen müssen Wandanstriche in zyklischen Abständen erneuert werden, um Pilzbefall etc. vorzubeugen.

Durch die Befettung der Farbschichten ist eine Aufbringung eines neuen Anstriches ohne geeignete Vorbehandlung nicht möglich.

Zielsetzung der Vorbehandlung ist es eine ausreichende Adhäsion der „neuen“ Farbe auf der Oberfläche zu gewährleisten. Dazu muss:

1. Eine vollständige Entfernung der Fettschichten gewährleistet sein.
2. Die oberste Farbschicht in einer Tiefe von ca. 15-20µm abgetragen werden, um die vom Öl durchtränkten und verwitterten Farbschichten zu entfernen.

Mit dem Laserverfahren ist diese Vorbehandlung trocken und ohne Strahlmittel möglich. Nur dadurch ließ sich der ansonsten aus hygienischer Sicht notwendige Ausbau der Nahrungsmittel-Produktionsmaschinen vermeiden.



Abbildung 22: Anstrich-Vorbereitung mit dem High-Power Laser

Die Demontage der Maschinen und die damit verbundenen Aufwendungen hätten nach Abschätzung des Anwenders bereits ca. 50-60.000€ betragen und wären mit einem Produktionsausfall von ca. 15 Tagen verbunden gewesen.

Die Laserstrahl-Entschichtung konnte innerhalb von ca. 200 Netto-Betriebstunden realisiert werden. Bei einer Gesamtfläche von ca. 1800m² konnte somit eine mittlere Flächenrate von ca. 9m²/Stunde erzielt werden. Dies entspricht typischen Leistungen gängiger Partikelstrahlverfahren mit mittlerer Leistungsfähigkeit.

Bei laufenden Betriebskosten von etwa 5€ pro Stunde (Stromaufnahme und Verschleißkosten) sowie einem kalkulatorischen Abschreibungsanteil von ca. 20-40€ pro Stunde ergeben sich somit für den Einsatz des Lasersystems Gesamtkosten i.H. von 5.000 bis 9.000€. Bei Ausführung der Arbeiten mit 2 Personen und einem Stundensatz von ca. 40€ pro Stunde und Person ergeben sich somit Gesamtkosten von etwa 20-25.000€ für das Vorbehandlungsprojekt. Damit ist durch die Einsparung der Demontage bereits eine signifikante Wirtschaftlichkeit direkt erkennbar!

Neben der wirtschaftlichen Einsparung verdeutlicht das nachfolgende Bild bereits qualitativ die Reduzierung der Abfallmengen auf ein Minimum:
Die Abbildung zeigt die Verschmutzung der in der Absaugung befindlichen Partikel-Sammelschublade nach einer Einsatzdauer des Lasers von ca. 3 Stunden (entspricht ca. 27m² Bearbeitungsfläche). Wie ersichtlich ist entstehen lediglich geringe Mengen abgetragenen pulverisierten Lackes als Abfall. Durch den Verzicht auf ein Partikelstrahlverfahren konnte die Gesamt-Abfallmenge auf ein Volumen von:

$$20\mu\text{m} \times 1800\text{m}^2 = 0,036\text{m}^3 = 36\text{l} \text{ beschränkt werden!}$$

Nach Abschätzung des Anwendungspartners hätte eine konventionelle Strahltechnik mindestens ein Abfallvolumen von 2-4kg pro m² = 3.600 bis 7.200 kg erfordert. Dies entspricht bei Sand etwa einem Volumen von 1000 bis 2000l. Somit konnte das Abfallvolumen ca. um den Faktor 30 bis 50 reduziert werden!

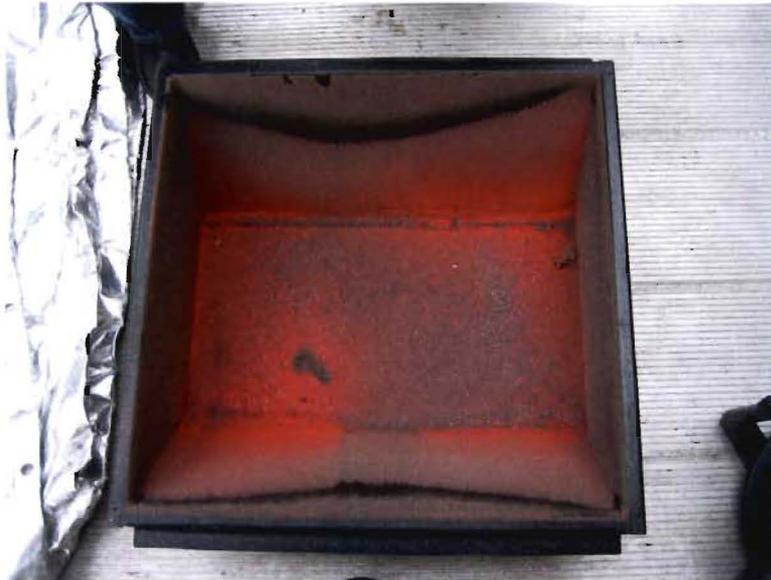


Abbildung 23: Minimale Abfallmenge beim strahlmittelfreien Laser-Entschichten

Vorbehandeln von PUR Bauteilen mit High-Power Laserstrahlung

In der Automobilindustrie kommen zur Gewichts- und Kosteneinsparung anstelle metallischer Bauteile auch Glasfaser verstärkte Polyurethane zum Einsatz.

Durch die höhere Flexibilität eines PUR Gussteils lassen sich insbesondere komplexe Strukturen und Geometrien in den Bauteilen einfacher als bei einem metallischen Tiefziehteil erzeugen. Ein Anwendungsgebiet eines PUR-Bauteils ist z.B. die Fondsitz Rückenlehne im PKW.

Durch die zum Entformen auf der Formoberfläche aufgetragenen Trennmittel sind die produzierten Bauteile mit einer Trennmittel-Restschicht (Wachs) versehen. Aus diesem Grunde ist ein adhäsives Fügen der Bauteile nicht möglich. Aus dekorativen Gründen wird die Rückseite der Sitzlehnen in der Regel jedoch mit einem Textilbelag (Teppich) versehen, der vom Kofferraum des Fahrzeuges aus sichtbar ist.

Bei der Vorbehandlung ist es wichtig für den Klebstoff Haftungsunkte zu erzeugen, an denen eine gute Adhäsion zum Grundmaterial gegeben ist. Eine vollständige flächige Reinigung des Bauteiles ist nicht zwingend erforderlich. Durch die Strahlablenkstrategie der Clean-Lasersysteme lassen sich mit hoher Geschwindigkeit „Rasterstrukturen“ auf der Bauteiloberfläche erzeugen. An diesen Punkten ist eine gute Benetzbarkeit durch den Klebstoff gewährleistet.,

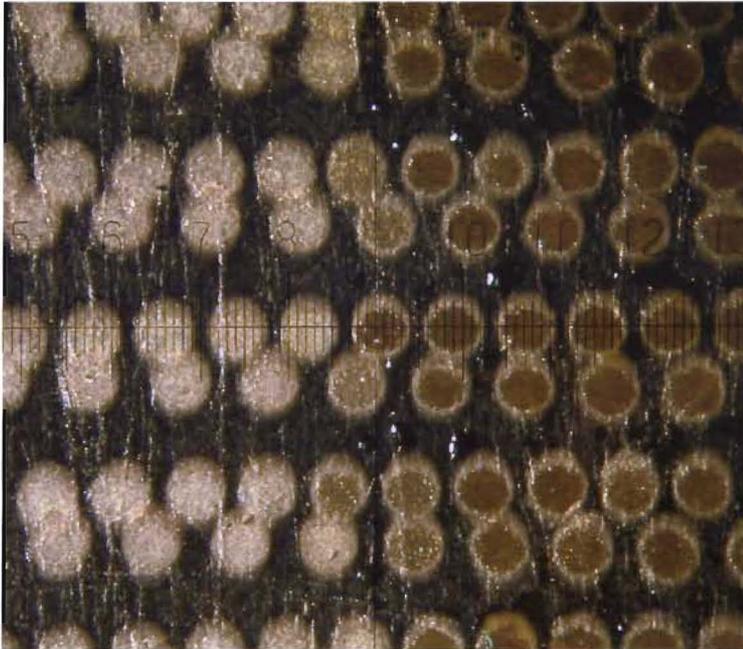


Abbildung 24: Oberflächenstruktur eines vorbehandelten Bauteiles (vergrößerte Aufnahme)

Im Rahmen von Laborversuchen wurde das High-Power Lasersystem zur Klebevorbehandlung eingesetzt. Dabei wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Kriterium	Ergebnis
Haftungsqualität der Klebstoffe	Sehr gut
Erzielbare Flächenrate	Bis zu 65m ² /Stunde
Taktzeit zur Reinigung eines Teils	ca. 60s
Energieverbrauch pro Teil (Laser einschl. Absaugung)	0,158kWh
Variable Reinigungskosten pro Teil	ca. 9ct
Technische Verfügbarkeit des Lasers	>96%
Netto-Abfallmenge pro Bauteil	1-3g
Coatierungsmittel pro Bauteil	Ca. 5g

Tabelle 1: Klebe- Vorbehandlung von PUR-Bauteilen

Um die vorwiegend gasförmigen Emissionen effizient sammeln zu können kommt für die industrielle Umsetzung des Verfahrens ein Filtersystem mit Pre-Coatierung zum Einsatz. Dabei wird die Filteroberfläche mit Kalkstaub eingesprüht, der dann die „klebrigen“ Wachskondensate bindet und ein Verschließen der Filterporen verhindert.



Abbildung 25: Laserstrahl-Vorbehandlung von PUR im Laborversuch

Beim Einsatz konventioneller Partikelstrahltechnik lassen sich folgende Nachteile nicht vermeiden:

- Verschleppung des Strahlgutes in die Nachfolgeprozesse
- Entstehung großer Abfallmengen (ca. 40-200g/Bauteil)
- Hoher Energieverbrauch (ca. 30kWh)
- Geringe Verfügbarkeit (<95%) und hoher (mechanischer) Verschleiß
- Lärm- und Staubemission

Aufgrund der überzeugenden Vorteile der Laserstrahl-Technologie wurde vom potenziellen Anwender bereits eine Laseranlage erworben.

Der Einsatz der Technologie in der automobilen Serienproduktion ist ab Juni 2004 geplant.

Zielerreichung und Ausblick

Durch die Anwender- und marktorientierte Durchführung des Entwicklungsprojektes konnte eine erfolgreiche Umsetzung und Zielerfüllung erreicht werden.

Die wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile des neuen High-Power Entschichtungssystems führen zu einer hohen Akzeptanz der Produkte am Markt. Erste Fertigungsaufträge für das neue System sind bereits an den Hersteller und Bewilligungsempfänger erteilt worden. Durch den in Kürze beginnenden Einsatz der Technologie ist somit eine optimale Verwertung und Nutzung der ökologischen Vorteile sicher gestellt.

Eine weitere Verbreitung der Technologie auf nationaler und internationaler Ebene soll neben bereits intensiv durchgeführter Werbe- und Verbreitungsmaßnahmen durch den Bewilligungsempfänger (siehe Projektkennblatt) auch durch einen Ausbau des Vertriebsnetzes des Herstellers realisiert werden.

Aufgrund des relativ hohen Invests in die Anlagentechnologie (Basispreis ab ca. 235T€) ist eine hohe Auslastungsquote der Systeme erforderlich. Um auch mittelständischen Unternehmen die Nutzungsmöglichkeit zu geben wurde im Rahmen eines Modellversuches die Einrichtung eines Vermietungs-Centers in Zusammenarbeit mit einem niederländischen Partner initiiert.

Die Firma Laser CS (www.lasercs.nl) setzt die Technologie vorwiegend im Bereich der Maler- und Anstricharbeiten ein und stellt in Kürze ein erstes System weiteren Unternehmen zur Verfügung.

Die internationale Verbreitung wird durch den Abschluss von Kooperationsverträgen mit einem Amerikanischem Service und Vertriebspartner (www.adapt-laser.com) und einem japanischen Vertriebspartner sichergestellt (www.samac.co.jp). Während im asiatischen Raum verstärkt Anwendungsfelder im Bereich der Backindustrie evident werden zeigt sich im US-Amerikanischen Bereich eine starke Nachfrage im Bereich der Restaurierung und Fassadenreinigung sowie der Luftfahrtindustrie. Sowohl in den USA als auch in Japan werden zur Mitte des Jahres 2004 erste Systeme in der Industrie eingesetzt.

Ausblick auf Weiterentwicklungen und zukünftige Anwendungsfelder

Zukünftige Weiterentwicklungen der Technologie werden sich insbesondere auf folgende Bereiche beziehen:

- Entwicklung weiterer angepasster Bearbeitungsoptiken (z.B. für die Reinigung spezieller Produktionsformen)
- Realisierung weiterer Leistungssteigerungen der Laserstrahlquelle
- Anpassungsentwicklungen zu frei programmierbaren Workstations und vollautomatischen Systemen mit verbundener Automationstechnik

Dadurch lassen sich weitere Anwendungsbereich z.B. in der:

- Luftfahrtindustrie
- Kunststoff- und Elastomerindustrie
- Backindustrie
- Automobil- und Automobilzuliefer-Industrie erwarten

Auch im Bereich der Klebevorbehandlung von Leichtmetallen zur strukturellen Verklebung stehen neue Anwendungsfelder in Aussicht.

Folgende Verbreitungszahlen der neuen Technik in den kommenden Jahren werden vom Bewilligungsempfänger erwartet:

Jahr	2004	2005	2006	2007
Anzahl Lasersysteme	4	5	8	12
Davon im Ausland	2	2	5	7

Tabelle 2: Antizipierte Verbreitungszahlen der High-Power Lasersystemtechnik

Fazit

Im Rahmen eines durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten zweiphasigen Entwicklungsprojektes wurde ein High-Power Laserstrahl-Reinigungssystem zur Ressourcen schonenden Entschichtung von Oberflächen entwickelt. Die Zielsetzung des Projektes wurde erreicht:

1. Entwicklung eines leistungsstarken Laserstrahlsystems mit einer mittleren Strahlleistung von ca. 500 Watt Laserleistung.
2. Realisierung einer für die Laserstrahlleistung qualifizierten Laserstrahlübertragungstrecke sowie einer kompakten Handhabungsoptik.
3. Auslegung und Erprobung einer effizienten Filter- und Absaugtechnik.
4. Qualifizierung des Gesamtsystems für eine industrielle Nutzung.

Als besonderer Erfolg des Projektes konnte die Realisierung eines mobilen, kompakten und robusten Hochleistungslasers gewertet werden, der über folgende technische Eckdaten verfügt (siehe Anhang):

- Mittlere Laserstrahlquellenleistung (cw) $P_m > 500 \text{ W}$
- Maximale Pulsspitzenleistung der Strahlquelle $P_p > 400 \text{ kW}$
- Per Lichtwellenleiter übertragene Spitzenleistung $P_{pF} > 300 \text{ kW}$
- Gesamtwirkungsgrad des Lasersystems einschließlich Kompressorkühlung ca. 7,5%.

Besonders hervorzuheben ist die schnelle industrielle Einführung der Technologie in drei industriellen Anwendungsfällen: Klebevorbehandlung, Reinigung von Backformen, Entlackung von Flugzeugen. Mittelfristig ist mit einem deutlichen Erfolg der Technologie und somit mit einer effizienten Einsparung von Ressourcen zu rechnen.

Die Verbreitung und Einführung der Technik auf nationalen als auch internationalen Märkten kennzeichnet den durch die erfolgreiche Umsetzung des Projektes realisierten technischen Vorsprung.

Die High-Power Lasertechnik stellt für Clean Lasersysteme ein wichtiges wirtschaftliches Feld dar und wird bei dem mittelständischen Unternehmen intensiv weiter verfolgt. Durch konsequente Anpassungsentwicklungen und Verbesserungen der Neuen High-Power Lasertechnik lassen sich auch in Zukunft immer neue Anwendungsbereiche aufdecken und erschließen. Eine umfangreiche Verwertung und gesamtwirtschaftlicher Rückfluss der bewilligten und ausgeschütteten Fördermittel ist somit sichergestellt.

Anhang

Leistungsdaten High-Power Laser

Clean CL 500 Q

(related to optical system)

Parameter list Focal-Diameter (Spot)[mm]:
resulting focal area [cm²]

1000
0,00785

(all parameters at max. lamp current)

pulse-frequency	average-laser-power [W]	pulse-length [ns]	peak-power [kW]	Puls-Intensity [W/cm ²]
35000	532	190	80,0	1,0E+07
30000	515	170	101,0	1,3E+07
25000	505	140	144,3	1,8E+07
20000	490	120	204,2	2,6E+07
15000	475	75	422,2	5,4E+07

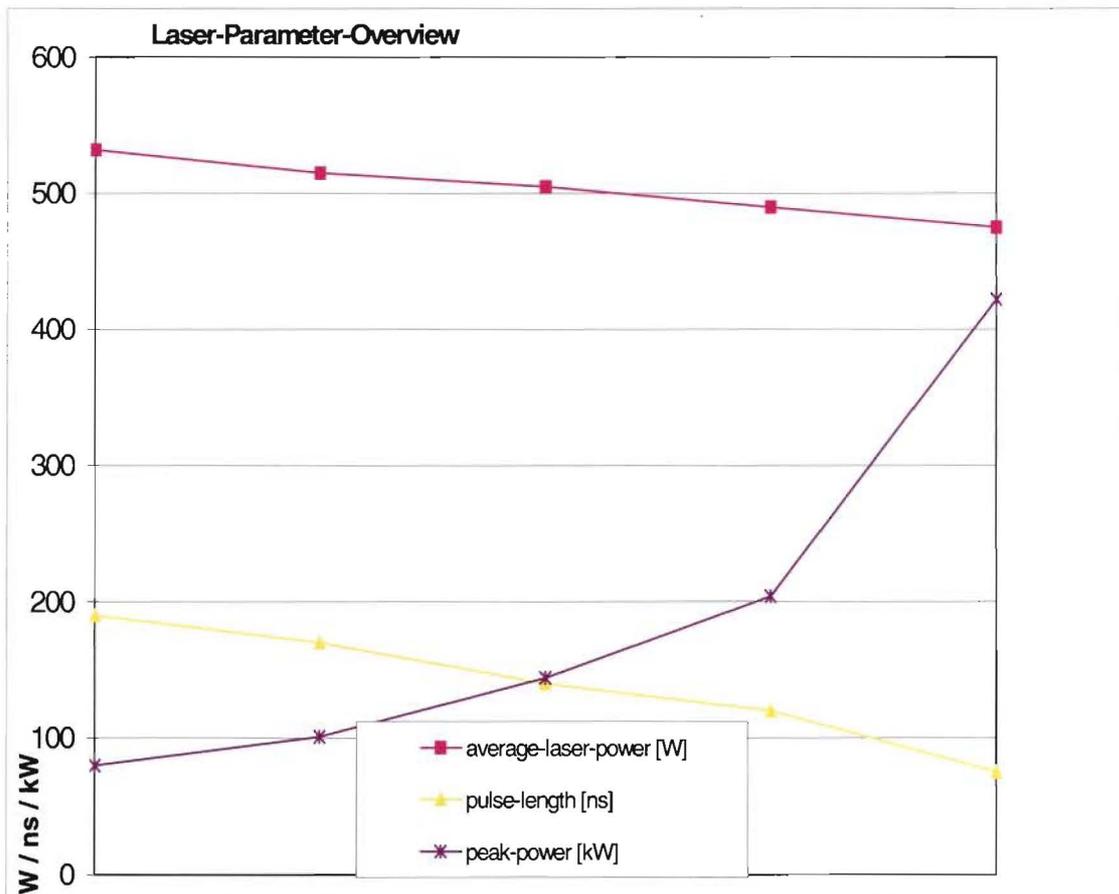


Tabelle 3: Leistungsdaten High-Power Laser