

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

Projekt:

„Reduzierung des Ressourceneinsatzes beim Feuerverzinken
durch Kombination eines neuen Flussmittels mit einer innovativen
Flussmittelaufbereitungsanlage“

von

Dipl.-Ing Herwig GmbH
Wasserloses Tal 47
D-58093 Hagen

Juni 2009

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

Projekt:

„Reduzierung des Ressourceneinsatzes beim Feuerverzinken
durch Kombination eines neuen Flussmittels mit einer innovativen
Flussmittelaufbereitungsanlage“

von:

Dipl.-Ing Herwig GmbH
Wasserloses Tal 47
D-58093 Hagen

Juni 2009

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | |
|------------------------------|--------------------|--|-----------------|---|
| Az | 26521-21/0 | Referat | Fördersumme | 28.800,-€ |
| Antragstitel | | Reduzierung des Ressourceneinsatzes beim Feuerverzinken durch Kombination eines neuen Flussmittels mit einer innovativen Flussmittelaufbereitungsanlage | | |
| Stichworte | | Flussmittel, Verzinken | | |
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) | |
| 8 Monate | August 2008 | April 2009 | 4 | |
| Zwischenberichte | | | | |
| Bewilligungsempfänger | | Dipl.-Ing. Herwig GmbH Wasserloses Tal 47 58093 Hagen | | Tel 02331 91555 Fax 02331 15504 Projektleitung Dipl.-Ing. H.Herwig Bearbeiter |
| Kooperationspartner | | | | |

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Während des Verzinkungsprozesses fallen Zinkasche und Hartzink als Abfallstoffe aus. Diese entstehen vor allem durch Verunreinigungen des Flussmittels, in welches die zu verzinkenden Teile vor dem eigentlichen Zinkbad eingetaucht werden. Daher muss das Flussmittel in regelmäßigen Abständen aufbereitet werden. Dies geschieht heute noch überwiegend in externen Aufbereitungsanlagen, was jedoch Produktionsstillstände während des Flussmittelwechsels, als auch Flussmitteltransporte auf der Straße nach sich zieht. Eine interne Aufbereitung in Verzinkereien ist zwar schon möglich, jedoch technisch und chemisch sehr aufwendig. Dieses Projekt soll nun eine kontinuierliche interne Aufbereitung vereinfachen und großtechnisch möglich machen.

Dadurch können neben Chemikalien zur Aufbereitung und Transporten, durch kontrollierte Reinhaltung des Flussmittels, auch Rohstoffe wie Zink eingespart werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Es besteht zwar bereits eine Versuchsanlage, jedoch haben sich hier auch erkennbare Probleme ergeben, die nun im weiteren Verlauf bis zur Marktreife in den Griff bekommen werden müssen.

Ein sehr dringendes Problem stellt die Pumpentechnik dar. Die bisher verwendeten Pumpen, und auch andere Anlagenteile, kommen mit Dauerbetrieb nicht zurecht. Oft setzen sich diese Anlagenteile mit dem Schlamm zu oder bringen nicht die benötigte Kraft auf, das Flussmittel kontinuierlich in den Absatzbehälter oder aus diesem wieder heraus zu pumpen. Das führt unter anderem zu einer weiteren Fragestellung, die es gilt zu beantworten. Diese wird die Frage sein, auf welche Art und Weise eine dauerhafte und effiziente Filtration erreicht wird. Weiterhin müssen Untersuchungen zu Menge und Zusammensetzung des Abfalles, also des Schlammes, gemacht werden. Auch die bisher gemachten Ergebnisse zum KCl-Gehalt im Flux müssen über längere Zeit überprüft werden. Es wird sich zeigen, ob durch Optimierung der eingesetzten Techniken auch die Menge der Einsatz- bzw. Abfallstoffe und die Einsparungen weiter optimiert werden können. Der Zinkeinsatz soll weiterhin um 1 kg/t Durchsatz reduziert, also auf eine Ersparnis von insgesamt 5 kg Zink pro Tonne Durchsatz erhöht werden.

Ergebnisse und Diskussion

1. Während des Versuches traten in erster Linie Probleme bei den Pumpen auf. Die eingesetzten Membranpumpen waren zu klein und mussten gegen größere Pumpen ausgetauscht werden. Ein weiteres Problem stellte sich bei der Pressluft ein. Die Pressluft war nicht, wie zugesagt, getrocknet. Dies hatte zur Folge, dass die Pumpen vereist sind und hierbei die Membranen zerstört wurden. Nach der Behebung dieses Problems traten keine weiteren Pumpenstörungen mehr auf.
2. Die Zuführung der Ferrokilllösung musste ebenfalls verändert werden. Ursprünglich war eine Mischeinrichtung in der Zuführungsleitung für das Ferrokill vorgesehen. Es stellte sich jedoch heraus, dass das Ferrokill zu spontan reagiert und die Mischeinrichtung mit dem ausgefallenen Eisenhydroxid verstopft hat. Nach der Demontage des Mischers trat diese Problem nicht mehr auf.
3. Eine weitere Erkenntnis war die Umpumpmenge des zu behandelten Flussmittels. Hier war die erste Menge von 1000 l/h zu hoch angesetzt. Im Laufe des Versuches wurde die Menge auf 400 l/h reduziert. Letztendlich ist die Umpumpmenge vom Durchsatz und dem Fe-Gehalt in der Spüle abhängig.
4. Ein weiteres Problem waren die Pneumatik für die Membranpumpen. Es traten starke Erschütterungen auf, die die Rohrverbindungen beschädigt haben. Nach Einbau von Druckausgleichsbehältern wurde dieses Problem gelöst.
5. Das Gesamtkonzept des in Serie gehenden Fluxomaten hat sich auf Grund der Versuchsdurchführung erheblich verändert, so dass, wie ursprünglich vorgesehen, keine der in der Versuchsanlage eingesetzten Teile wieder verwendet werden.
6. Die Menge der Abfallstoffe (Schlamm) und des Ferrokillverbrauches wurde während des Großversuches bestimmt. Der Schlammfall beträgt 0,363 kg/to Durchsatz und der Ferrokillverbrauch 1 kg/to. Aus der Schlammmenge errechnet sich, dass das Ferrokill ca. 80 g Fe pro kg Ferrokill ausfällt.
7. Es soll auch bei längerem und dauerhaftem Einsatz keine Anreicherung bestimmter Stoffe erfolgen. Das Ergebnis zeigt, dass nur eine im ppm liegende Anreicherung von Mangan im der Fluxlösung erfolgt ist. Das Kaliumchlorid und Zinkchlorid ist in Lösung im Flux. Die Analysen zeigen, dass auch nach längerem Gebrauch keine merkbare Erhöhung des KCl-Gehaltes im Flux festgestellt wurde.
8. Die Zinkeinsparung wurde am Ende des Großversuches mit 4,26 kg Zink pro to Durchsatz festgestellt. Aus den Kennzahlen ist zu ersehen, dass die Reduzierung der Zinkasche und des Hartzinks eine Einsparung des Zinkverbrauches von ca. 2 kg pro to Durchsatz ergeben hat.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Vorstellung anlässlich nationaler und internationaler Fachtagungen (z.B. Intergalva 2009, Madrid); Werbung auf der Homepage.

Fazit

In den über 8 Monate laufenden Versuch wurden die angestrebten Werte bezüglich Zinkasche und Hartzink erreicht bzw. unterschritten. Die in diesen Betrieb vorhandenen Betriebsdaten sind in der Relation zu der Mehrheit der Verzinker schon vor dem Versuch mit dem Fluxomaten sehr gut gewesen. Deshalb ist die Einsparung um so höher einzuschätzen. Bei dem Großteil der Verzinkereien liegen der Zinkverbrauch bei 55-75 kg/to und der Hartzinkanfall bei 5-9 kg/to und Zinkasche bei 6-10 kg/to

Inhaltsverzeichnis

1. Angaben zum Unternehmen
2. Einleitung
3. Umweltschutz
4. Projektverlauf
5. Großversuch (Hauptteil)
6. Fazit
7. Literaturverzeichnis
8. Anlagen
9. Fotos
10. Fließbild

1. Angaben zum Unternehmen

Die Dipl.-Ing. Herwig GmbH wurde 1989 durch Helmut Herwig gegründet. Sie berät und beliefert die feuerverzinkende Industrie seitdem unter anderem mit Entfettungs- und Flussmitteln, Zinklegierungen und Zinkreinigungsmitteln. Seit 1994 ist auch Flussmittelrecycling ein Teil des Angebotes.

Das Unternehmen ist weltweit tätig, neben Deutschland u.a. in der Schweiz, Süd- und Osteuropa, Russland, USA, Südamerika, Mexiko, Mittlerer Osten, Afrika und Südostasien.

Dipl.-Ing. Herwig GmbH hat in Deutschland einen Marktanteil von ca. 75 %. Ca. 2/3 des Umsatzes werden durch Exporte ins Ausland erzielt.

Das Unternehmen beschäftigt neben den beiden Geschäftsführern, Helmut Herwig und Oliver Herwig, 4 Mitarbeiter.

Jahresumsatz: 7,5 Mill. €

Ansprechpartner ist Herr Helmut Herwig

Dipl.-Ing. Herwig GmbH

Wasserloses Tal 47

D-58093 Hagen

2. Einleitung

Während des Verzinkungsprozesses fallen Zinkasche und Hartzink als Abfallstoffe an. Diese entstehen vor allem durch Verunreinigungen des Flussmittels, in welches die zu verzinkenden Teile vor dem eigentlichen Zinkbad eingetaucht werden.

Das Flussmittel hat folgende Aufgaben:

- Schutz des Verzinkungsgutes gegen Reoxidation.
- Lösen der restlichen aus dem Spülbad an dem Verzinkungsgutes haftendem Eisensalze.
- Nachreinigen des Verzinkungsgutes während des Eintauchen in das Zinkbad.
- Umwandlung des sich bildenden Zinkoxides während des Verzinkungsvorganges, in das besser abkochende Zinkchlorid und Auflösen des sich an der Zinkbadoberfläche gebildeten Zinkoxydes

Damit vorgenannte Aufgaben übernommen werden können müssen neben der richtigen Flussmittelkonzentration auch möglichst saubere Flussmittellösungen zur Verfügung stehen.

Die Flussmittel sollen möglichst frei von Eisen sein (max. 10 g/l).

Hohe Eisengehalte haben folgende Nachteile:

- a) Schlechtere Trocknungseigenschaften
- b) Erhöhten Ascheanfall
- c) Erhöhter Hartzinkanfall
- c) Schlechtere Abkocheigenschaften

Dipl.-Ing. H. Herwig von der Dipl.-Ing. HERWIG GmbH hat ein Verfahren entwickelt, mit dem der Anteil des beim Feuerverzinken benötigten Zink und der anfallenden Abfallstoffe Zinkasche und Hartzink wesentlich reduziert werden kann.

Die Verzinkungsqualität ist von einer einwandfreien Oberflächenvorbehandlung vor dem Verzinkungsprozeß abhängig.

Zu einer optimalen Behandlung der Stahloberfläche gehören folgende Verfahrensschritte:

Entfetten - Spülen - Beizen - Spülen - Fluxen - Trocknen

Zunächst müssen die zu verzinkenden Stahlteile von Fetten und Ölen befreit werden. Dies geschieht in einem Entfettungsbad.

Das anschließende Spülbad vermindert das Verschleppen von Entfettungsmitteln in das Beizbad.

Im Beizbad werden die Stahlteile von Rost und Zunder befreit. Dies geschieht durch verdünnte Salzsäure (HCl).

Auch hieran ist ein Spülbad angeschlossen.

Das Spülwasser reichert sich durch Einschleppung mit Säure und Eisensalzen an. Diese Bestandteile sind unerwünscht, weil sie im Endeffekt auch im nachgeschalteten Flussmittelbad zu finden sind

Wird das Flussmittel durch den Eintrag von Eisen (Eisenchlorid) zunehmend verunreinigt, so kann ein Teil des Eisens auch in das Zinkbad gelangen und die bereits erwähnten Nachteile erzeugen. (Lit1)

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

Beim Feuerverzinken entstehen beim Tauchen der Stahlteile in einer Zinkschmelze von ca. 450°C infolge Legierungsbildung zwischen Stahl und der Schmelze festhaftende Schichten mit unterschiedlichem metallurgischem Aufbau.

Direkt auf dem Stahlteil entsteht durch chemische Reaktion die δ_1 -Phase (sehr hoher Fe-Anteil). Darüber lagert die ξ -Phase die in die η -Phase (Reinzinkschicht) übergeht. (Lit2)

Ziel des Verzinkens ist eine möglichst dünne gut haftende Zinkschicht zu erzielen, da Zink ein teurer Rohstoff ist, der effizient eingesetzt werden sollte. .

Wird nun zusätzliches Eisen aus dem Flussmittel in das Zinkbad eingeschleppt, so entstehen vermehrt Zinkasche, Hartzink und dickere Zinkschichten (Lit1, Lit3).

Da dickere Schichtdicke aus wirtschaftlichen- und Qualitätsgründen vermieden werden sollten und Hartzink- bzw. Zinkascheanfall mit Zinkverlust einhergehen, muss das Flussmittel in regelmäßigen Abständen ausgetauscht und extern aufbereitet werden.

Da die externe Aufbereitung mit Produktionsstillständen, Transporten und somit mit Kosten verbunden ist, weiterhin die Zinkasche und das ausfallende Hartzink als Materialverlust angesehen werden muss, soll in diesem Projekt das Flussmittel besonders betrachtet werden.

Laut Vorschrift seitens des Stahlbaus sollen nicht mehr als 10 g Eisen in einem Liter Flussmittel enthalten sein. Bei erhöhtem Eisengehalt ist das Flussmittel auszutauschen. Das alte Flussmittel wird per Tanklastzug zu einer Aufbereitungsanlage gefahren, neues oder aufbereitetes Flussmittel wird von dieser Anlage ebenfalls per Tanklastzug angeliefert und in das Flussmittelbecken gegeben.

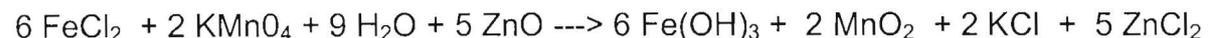
Da ein Austausch für die externe Aufbereitung mit Produktionsausfall und Kosten für Transport und Aufbereitung verbunden ist, wird dieser nicht regelmäßig, sondern nur bei Bedarf durchgeführt. Das heißt, dass das neue bzw. aufbereitete Flussmittel direkt nach dem Wechsel eine gute Qualität besitzt und kaum Eisen enthält. Mit zunehmendem Gebrauch verschlechtert sich jedoch die Qualität und die Eisenkonzentration im Flussmittel steigt an. Das wirkt sich natürlich unmittelbar auf den Zinkverbrauch aus.

Das von Dipl.-Ing. HERWIG GmbH entwickelte, innovative Verfahren besteht aus der Kombination des Flussmittels „Hegaflux Ferrokill“ und der Flussmittelaufbereitungsanlage „Fluxomat“.

Das neue Ferrokill basiert auf einer Permanganatmischung, die es ermöglicht das in das Flussmittel eingeschleppte Eisen direkt auszufällen. Das Flussmittel wird ständig von Flussmittelbad zu Absetzbecken und zurück gepumpt. Der Hegaflux Ferrokill wird im Absetzbecken dem Flussmittel zugesetzt, so dass das enthaltene Eisen als Schlamm ausfällt. Dieser Schlamm muss deponiert werden.

Eine Schemazeichnung des Fluxomat liegt im Anhang bei.

Die Eisenfällung erfolgt nach folgender Reaktion:



Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

Die Reaktion erfolgt über Mangan-II-chlorid als Zwischenprodukt.

Für einen groß-technischen Einsatz wurde eine Mischung mit 2% Kaliumpermanganat gewählt.

Dadurch sollen die Eisenwerte im Verlauf der Betriebsdauer gegen Null gedrückt werden, um dann mit Kaliumpermanganatüberschuß eine Entmanganisierung des Fluxbades zu erreichen.

Durch die Oxidation wird Eisenhydroxid und Mangandioxid, sowie Kaliumchlorid gebildet. Außerdem bildet sich $ZnCl_2$ durch die Reaktion der bei der Eisenoxidation frei werdende Säure (HCl) mit dem im Flux enthaltenden ZnO. Das ZnO verhindert damit auch eine Chlorgasbildung.

Das Mangandioxid (Braunstein) findet man im Eisenhydroxidschlamm.

Das Kaliumchlorid und Zinkchlorid ist in Lösung im Flux.

Durch die kontinuierliche Eisenfällung wird der Eisengehalt des Flussmittels niedrig gehalten und somit weniger Eisen in das Zinkbad eingeschleppt, was zur Folge hat, dass weniger Abfälle wie Hartzink und Zinkasche entstehen.

Das üblicherweise in den Verzinkereien bevorzugte Verfahren der pH-Einstellung mit Ammoniakwasser und der Oxidation mit Wasserstoffperoxid wird vereinfacht.

Die neue Technik unter Verwendung des Fluxomaten hat folgende Vorteile:

- einfache Anwendung ohne zusätzlichen Chemikalieneinsatz. Es entfällt die Verwendung von Ammoniak (NH_3) und Superwasserstoffperoxyd (H_2O_2)
- kontinuierlich Eisenausfällung aus dem Flussmittel.
- Austausch des Flussmittels und der damit verbundenen Produktionsunterbrechung entfällt.
- konstante Führung der Fluxbadparameter wie z.B.:
 - den pH-Wert
 - die Flussmitteldichte
 - das Verhältnis $ZnCl_2 : NH_4Cl$
- Verringerung der Zinkschichten, des Zinkasche- und Hartzinkanfalls und den damit verbundenen Zinkverbrauch.
- keine Produktionsunterbrechung durch die Zugabe des Flussmittels, da Zudosierung über die Flüssigphase erfolgt.
- bei Verwendung des Fluxomaten wird das Flussmittel kontinuierlich gefiltert und das schädliche Eisenhydroxid entfernt. Dadurch bessere Trocknungseigenschaften des Flussmittels.
- gute Eignung für Ni-, Al-Zinklegierung.
- keine Gefahrguttransporte.

3. Umweltrelevanz

Das Umweltbundesamt ist Herausgeber der Internet-Datenbank „Probas“ und der Broschüre „KEA-Mehr als eine Zahl“. Die Inhalte dieser beiden Quellen liegen, unter anderem, nachfolgenden Berechnungen zugrunde.

1. Durch den Wegfall der Flussmitteltransporte zur Aufbereitungsanlage und wieder zurück können insgesamt 60.000 km Fahrtstrecke (200 Transporte á 300 km) eingespart werden. Die KEA-Zahl der LKW-Transporte (durchschnitt aus LKW nah und LKW fern) wird mit 1,1 MJ/t*km angegeben. Dies bedeutet bei 2.400 t transportiertes Flussmittel im Jahr und 60.000 km 158,4 TJ/a oder 44.000 MWh/a. Diese Energieaufwendung und die damit verbundene Freisetzung von Emissionen können durch die interne Aufbereitung des Flussmittels unnötig werden. Geht man von einer CO₂-Freisetzung von nur 0,2 kg pro kWh aus, so können hierdurch die Emissionen dieses Klimagases um **8.800 t/a** reduziert werden.
2. Durch die Einsparung des Rohstoffes Zink werden weiterhin Energie und Emissionen erübrigt. Direkt ist dies die Energie, welche in der Verzinkerei zum Einschmelzen des Zinks benötigt wird. Nach den ersten Versuchen können ca. 4 kg Zink pro Tonne Verzinkungsgut eingespart werden. Weitere Versuche und Modifikationen der Anlagentechnik sollen ein Potential von bis zu 5 kg Zink pro Tonne Verzinkungsgut bringen. In Deutschland werden momentan jährlich 1,5 Millionen Tonnen Stahl verzinkt. Nimmt man 4 kg Zinkersparnis pro Tonne, so liegt das Gesamtpotential in Deutschland bei 6.000 kg Zink pro Jahr. Der Energiebedarf für das Einschmelzen des Zinks kann mit rund 90 kWh/t Zink angegeben werden. Somit können im Jahr 540.000 kWh und mindestens **108** Tonnen CO₂ gespart werden.
3. Weiterhin benötigt man für die Zinkgewinnung und –herstellung sehr viel Energie. Bei effizientem Umgang mit dem Rohstoff Zink kann auch hier der Energieaufwand reduziert werden. Die KEA-Zahl für die Zinkherstellung wird mit 70,6 MJ/kg angegeben. Auf 6.000 kg Zink hochgerechnet entspricht das 423.600 MJ oder 117.667 kWh. Mit der Vorkette über Rohstoffgewinnung und Aufbereitung von Zink werden, neben vielen anderen umweltrelevanten Stoffen, 4,67 kg CO₂ pro kg Zink frei. In Deutschland gesamt sind dies rund **28** Tonnen pro Jahr.
4. Auch die für die bisherige Flussmittelaufbereitung eingesetzten Chemikalien können reduziert werden. Besonderes Augenmerk soll hier auf H₂O₂ und NH₃ gelegt werden, da diese Stoffe komplett wegfallen können. Exklusive Vorkette werden durch die Herstellung von Wasserstoffperoxid 5,46 kg CO₂ pro kg H₂O₂ freigesetzt. Insgesamt sind dies für den Verbrauch an H₂O₂ für Flussmittelaufbereitung in Deutschland rund **386** Tonnen pro Jahr. Für die Herstellung von Ammoniak werden direkt, also ohne Vorkette, 1,24 kg CO₂ pro kg NH₃ emittiert. Dies entspricht, hochgerechnet auf den Verbrauch für die Flussmittelaufbereitung in ganz Deutschland, rund **175 t/a**.
5. Die Menge des entstehenden Schlammes kann um ca. 1/3 reduziert werden. Dies entlastet die Deponien.

Insgesamt ist also ein Einsparpotential von **9.497 Tonnen CO₂** pro Jahr allein in Deutschland vorhanden.

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

Diese Technik kann durchaus auch in das Ausland exportiert werden, da die verfahrensweise des Verzinkens ähnlich ist.

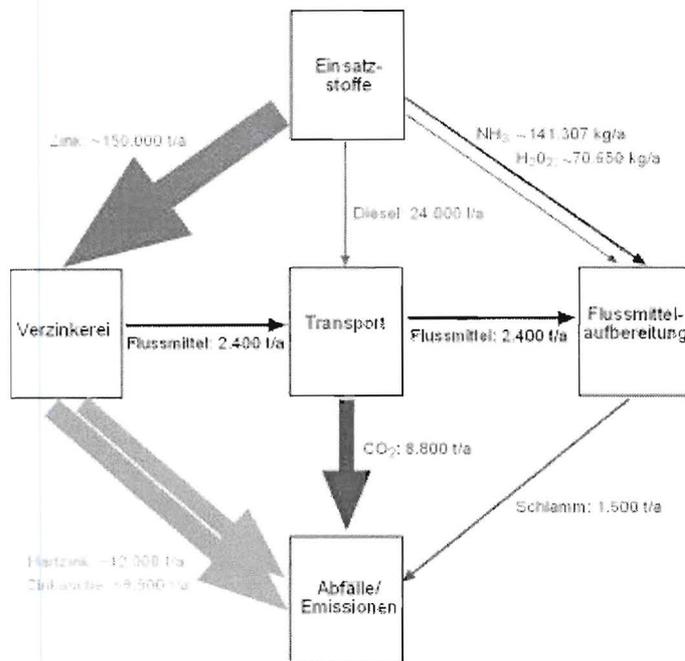


Abbildung 1: IST-Zustand

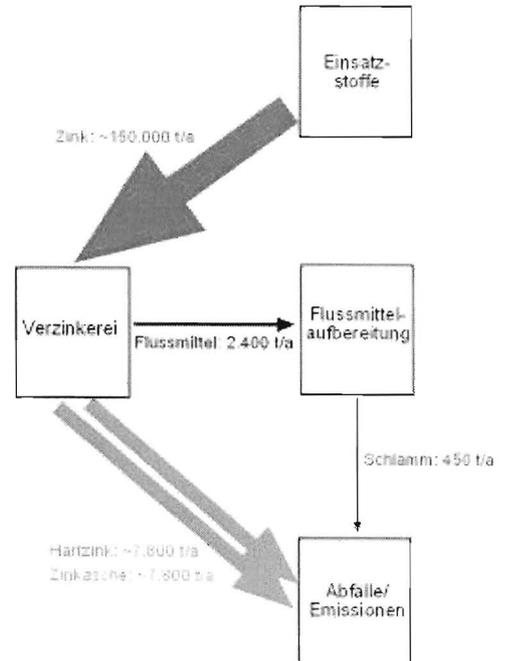


Abbildung 2: Soll-Zustand

4. Projektverlauf

1. Die Planung inklusive der Werkstattzeichnungen Stücklisten.
Dauer ca. 4 Wochen.
2. Die Erstellung der Originalgröße, wie sie später in Verzinkereien im Einsatz sein soll. **(Siehe Fotos und Fließbild)**
Dauer 5 Wochen
3. Die Funktion der, Steuerung, Pumpen, Ventile ect. wurde während eines Probelaufes geprüft.
- 3.1 Hierbei wurde festgestellt, dass eine Durchlaufmessung des zu behandelnden Flussmittels fehlte. Wurde nachträglich installiert.
Dauer 2 Woche
4. Großversuch
Dauer ca.7 Monate

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

5. Großversuch (Hauptteil)

1. Da unter authentischen Bedingungen geprüft werden muss, wurde uns von einem Verzinkungsbetrieb Platz für einen Großversuch zur Verfügung gestellt. Der Betrieb hat keine Kosten übernommen, stellt jedoch seine Kapazitäten (Produktion, Raum, ect.) zur Verfügung (**siehe beiliegende Fotos**). Während dieser Zeit wurden ca. 12.000 to Materialien verzinkt und ca. 12.000 kg Ferrokill über den Fluxomaten zu dosiert.
Die Dauer des Versuches betrug ca. 7 Monate.
2. Während des Versuches traten in erster Linie Probleme bei den Pumpen auf. Die eingesetzten Membranenpumpen waren zu klein und mussten gegen größere Pumpen ausgetauscht werden. Ein weiteres Problem stellte sich bei der Pressluft ein. Die Pressluft war nicht, wie zugesagt, getrocknet. Dies hatte zur Folge, dass die Pumpen vereist sind und hierbei die Membranen zerstört wurden. Nach der Behebung dieses Problems traten keine weiteren Pumpenstörungen mehr auf.
3. Die Zuführung der Ferrokilllösung musste ebenfalls verändert werden. Ursprünglich war eine Mischeinrichtung in der Zuführungsleitung für das Ferrokill vorgesehen. Es stellte sich jedoch heraus, dass das Ferrokill zu spontan reagiert und die Mischeinrichtung mit dem ausgefallenen Eisenhydroxid verstopft hat. Nach der Demontage des Mixers trat diese Problem nicht mehr auf.
4. Eine weitere Erkenntnis war die Umpumpmenge des zu behandelten Flussmittels. Hier war die erste Menge von 1000 l/h zu hoch angesetzt. Im Laufe des Versuches wurde die Menge auf 400 l/h reduziert. Letztendlich ist die Umpumpmenge vom Durchsatz und dem Fe-Gehalt in der Spüle abhängig.
5. Ein weiteres Problem waren die Pneumatik für die Membranenpumpen. Es traten starke Erschütterungen auf, die die Rohrverbindungen beschädigt haben. Nach Einbau von Druckausgleichsbehältern wurde dieses Problem gelöst.
6. Das Gesamtkonzept des in Serie gehenden Fluxomaten hat sich auf Grund der Versuchsdurchführung erheblich verändert, so dass, wie ursprünglich vorgesehen, keine der in der Versuchsanlage eingesetzten Teile wieder verwendet werden.
Der neue Fluxomat stellte eine sehr kompakte Anlage dar. Durch die zwischenzeitliche Änderung der Wassergefährdungsklasse des Flussmittels von 2 auf 3 ist die Anlage so konzipiert, dass im Notfall das gesamte in dem Fluxomaten befindliche Volumen aufgefangen werden kann. Alle Anlagenteile (Pumpen, Ventile ect.), die kontrolliert und gewartet werden, sind übersichtlich und gut erreichbar angeordnet. (**Anlage 5**)
7. Die Menge der Abfallstoffe (Schlamm) und des Ferrokillverbrauches wurde während des Großversuches bestimmt. Der Schlammanfall beträgt 0,363 kg/to Durchsatz und der Ferrokillverbrauch 1 kg/to (**Siehe Anlage 3**).
Aus der Schlammmenge errechnet sich, dass das Ferrokill ca. 80 g Fe pro kg Ferrokill ausfällt.

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

8. Laboruntersuchung der Zusammensetzung des entstandenen Schlammes.
(siehe Anlage 4)

Wie aus der Schlammanalyse zu ersehen ist befindet sich ein erheblicher Anteil Mangan im Schlamm. Dies ist die Bestätigung, dass das Mangan als Manganoxid im Schlamm verbleibt. Voraussetzung hierfür ist die ordnungsgemäße Einstellung der Parameter für den Fluxomaten.

Dauer: ca. 2 Wochen.

9. Überprüfung der Flussmittelchemie.

Es soll auch bei längerem und dauerhaftem Einsatz keine Anreicherung bestimmter Stoffe erfolgen. Dafür wurden im Laufe des Großversuches immer wieder Proben durch ein beauftragtes Labor untersucht. (siehe Anlage 2). Das Ergebnis zeigt, dass nur eine im ppm liegende Anreicherung von Mangan im der Fluxlösung erfolgt ist. Das Mangan findet sich wieder im Schlamm als Manganoxid (Braunstein) (siehe Anlage 4)

Das Kaliumchlorid und Zinkchlorid ist in Lösung im Flux.

Die Analysen zeigen, dass auch nach längerem Gebrauch keine merkbare Erhöhung des KCl-Gehaltes im Flux festgestellt wurde.

Das Zinkchlorid ist ein Bestandteil des Flussmittels. Der sich bei der Reaktion bildende Zinkchloridanteil wurde bei der Flussmittelherstellung berücksichtigt, so dass keine Verschiebung des $ZnCl_2/NH_4Cl$ Verhältnis erfolgt

Der KCl-Gehalt in den normalen Flussmitteln liegt bei ca 1% und um diesen Betrag bewegt sich auch der gemessene Wert.

Die während des Großversuches gemachten Erfahrungen und Messungen haben die theoretischen Annahmen bestätigt.

Dauer: im Laufe des Gesamtprojektes.

10. Die Zinkeinsparung wurde am Ende des Großversuches mit 4,26 kg Zink pro to Durchsatz festgestellt. (siehe Anlage 1)

Aus den Kennzahlen ist zu ersehen, dass die Reduzierung der Zinkasche und des Hartzinks eine Einsparung des Zinkverbrauches von ca. 2 kg pro to Durchsatz ergeben hat.

Die Gesamtersparnis liegt jedoch bei 4,26 kg/to. Die Differenz von ca 2,26 kg/to lässt sich nur mit kürzeren Tauchzeiten im Zinkbad erklären. Kürzere Tauchzeiten bedeuten geringere Zinkschichten. Kürzere Tauchzeiten sind jedoch nur möglich, wenn das Flussmittel schneller abkocht.

Flussmittel kochen erfahrungsgemäß schneller ab, wenn ein geringer Eisengehalt vorhanden ist. Der Grund ist darin zu suchen, dass das Eisenchlorid sehr hygroskopisch ist und somit mehr Wasser in das Zinkbad einschleppt. Dies führt zu einer verstärkten ZnO-Bildung und damit zu einer schlechteren Abkocheigenschaft. Außerdem werden durch niedrigere Eisengehalte die Trocknungseigenschaften des Flussmittels verbessert.

Dauer: im Laufe des Gesamtobjektes.

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

6. Fazit

In den über 7 Monate laufenden Versuch wurden die angestrebten Werte bezüglich Zinkasche und Hartzink erreicht bzw. unterschritten. Der Zinkverbrauch wurde von 56,26 auf 52,0 kg/to reduziert (**siehe Anlage1**).

Die in diesen Betrieb vorhandenen Betriebsdaten sind in der Relation zu der Mehrheit der Verzinker schon vor dem Versuch mit dem Fluxomaten sehr gut gewesen. Deshalb ist die Einsparung um so höher einzuschätzen.. Bei dem Großteil der Verzinkereien liegen der Zinkverbrauch bei 55-75 kg/to und der Hartzinkanfall bei 5-9 kg/to und Zinkasche bei 6-10 kg/to

| | IST | Laboranlage bisher | Großversuch |
|-------------------------------|---|--------------------|-------------|
| Flussmittel | 1 kg/t Durchsatz | 1 kg/t Durchsatz | 1,0 kg/to |
| Schlamm | 1 kg/t Durchsatz | 0,3 kg/t Durchsatz | 0,363 kg/to |
| Zinkasche (82% Zinkanteil) | 5,26 kg/t | 5,2 kg/t | 4,0 kg/t |
| Hartzink (96% Zinkanteil) | 5,44kg/t | 5,2 kg/t | 4,44 kg/t |
| Flussmitteltransport | 200 Transporte/a = 24.000 l Diesel/a | 0 | 0 |
| NH ₃ | 141.307 kg/a | 0 | 0 |
| H ₂ O ₂ | 70.650 kg/a | 0 | 0 |

Ansprechpartner

| Dipl.-Ing. HERWIG GmbH | | | |
|------------------------|---------|-------------|-------------------------------|
| Helmut Herwig | Inhaber | 02331 91555 | helmut.herwig@herwig-gmbh.com |

Hagen, den 5.6.2009

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

Literaturverzeichnis

- (Lit1) W.Katzung,R.Ritter: Abhängigkeit der Zinkaschebildung und der Zinkauflage beim Feuerverzinken von den Prozessparametern der Vorbehandlung.
(Sonderdruck aus der Fachzeitschrift „Metall“,52.Jahrgang Nr.5/1998)
- (Lit2) Wolf-Dieter Schulz, Marc Thiele: Feuerverzinken von Stückgut
(Eugen G. Leuze Verlag 1.Auflage,2008)
- (Lit3) Peter Maaß, Peter Peißker: Handbuch Feuerverzinken
(Wily-VCH Verlag GmbH&Co.KGaA 3. Auflage)

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

ANLAGE 1

(Eisengehalt im Flux betrug 2007 30 g/l und während der Versuchszeit 5 g/l)

| Bezeichnung | 2007 | 2008/9 | Delta kg/to | Delta Zink kg/to |
|------------------------------------|-------|--------|-------------|------------------|
| Zinkasche kg/to | 5,26 | 4 | 1,26 | 0,94 |
| Hartzink kg/to | 5,44 | 4,44 | 1,00 | 0,96 |
| Zinkannahme kg/to | 47,1 | 44,74 | 2,36 | 2,36 |
| Zinkeinsatz kg/to | 56,26 | 52 | | 4,26 |
| Ferrokil to | 0 | 11,2 | | |
| Normalflux to | 45 | 0 | | |
| Flux kg/to | 1,21 | 0,92 | | |
| Schlammanfall | | 4427 | | |
| Schlammanfall/kg Flux | | 0,40 | | |
| Fe-Gehalt im Schlamm | | 19,20% | | |
| H ₂ O-Gehalt im Schlamm | | 46,50% | | |
| Ø Fe-Gehalt Flux g/l | 30 | 5 | | |
| Eisenfällung g Fe/kg Flux | | 76 | | |
| Produktion to | 37306 | 12210 | | |

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter AZ: 26521-21/0

Anlage 2

Fluxbadanalysen

| Datum | Dichte kg/l | Dichte °Be | ZnCl2 g/l | NH4Cl g/l | NaCl g/l | KCl g/l | Fe g/l | pH | Flux ges. g/l | ZnCl2 % | NH4Cl % | NaCl % | KCl % | Mangan ppm |
|------------|-------------|------------|-----------|-----------|----------|---------|--------|-----|---------------|---------|---------|--------|-------|------------|
| 18.08.2008 | 1,285 | 32 | 326,9 | 226,2 | 6,4 | 6,4 | 2,6 | 3,8 | 553,10 | 59,10 | 40,90 | 1,16 | 1,16 | |
| 28.08.2008 | 1,308 | 34 | 349,1 | 240,7 | 7,8 | 5,2 | 2,2 | 4,0 | 589,80 | 59,19 | 40,81 | 1,32 | 0,88 | 150 |
| 09.09.2008 | 1,274 | 31 | 324,0 | 207,6 | 7,6 | 6,4 | 1,3 | 4,2 | 531,60 | 60,95 | 39,05 | 1,43 | 1,20 | 150 |
| 25.09.2008 | 1,285 | 32 | 182,2 | 197,9 | 3,9 | 1,3 | 2,6 | 4,0 | 380,10 | 47,93 | 52,07 | 1,03 | 0,34 | 155 |
| 03.10.2008 | 1,296 | 33 | 335,2 | 233,4 | 5,2 | 3,9 | 6,5 | 4,2 | 568,60 | 58,95 | 41,05 | 0,91 | 0,69 | 160 |
| 17.10.2008 | 1,296 | 33 | 355,2 | 230,8 | 6,5 | 5,2 | 6,5 | 4,2 | 586,00 | 60,61 | 39,39 | 1,11 | 0,89 | 158 |
| 31.10.2008 | 1,262 | 30 | 300,1 | 209,6 | 6,3 | 1,3 | 5,0 | 4,0 | 509,70 | 58,88 | 41,12 | 1,24 | 0,26 | 160 |
| 11.11.2008 | 1,274 | 32 | 316,1 | 226,2 | 7,7 | 6,4 | 6,4 | 4,5 | 542,30 | 58,29 | 41,71 | 1,42 | 1,18 | 170 |
| 25.11.2008 | 1,308 | 34 | 332,8 | 240,7 | 6,5 | 5,2 | 5,2 | 3,8 | 573,50 | 58,03 | 41,97 | 1,13 | 0,91 | 165 |
| 05.12.2008 | 1,285 | 32 | 337,6 | 228,7 | 6,4 | 3,9 | 5,1 | 3,8 | 566,30 | 59,62 | 40,38 | 1,13 | 0,69 | 180 |
| 19.12.2008 | 1,285 | 32 | 305,4 | 219,7 | 6,4 | 3,9 | 5,1 | 4,5 | 525,10 | 58,16 | 41,84 | 1,22 | 0,74 | 175 |
| 05.01.2009 | 1,296 | 33 | 302,8 | 224,3 | 6,5 | 3,9 | 5,2 | 4,3 | 527,10 | 57,45 | 42,55 | 1,23 | 0,74 | 180 |
| 19.01.2009 | 1,274 | 31 | 313,3 | 222,9 | 7,6 | 5,1 | 6,4 | 4,1 | 536,20 | 58,43 | 41,57 | 1,42 | 0,95 | 185 |
| 02.02.2009 | 1,274 | 31 | 286,8 | 203,8 | 6,4 | 5,1 | 5,1 | 4,2 | 490,60 | 58,46 | 41,54 | 1,30 | 1,04 | 190 |
| 16.02.2009 | 1,285 | 32 | 316,1 | 233,9 | 7,7 | 5,1 | 7,7 | 4,2 | 550,00 | 57,47 | 42,53 | 1,40 | 0,93 | 195 |
| 02.03.2009 | 1,296 | 33 | 308,2 | 237,3 | 9,1 | 7,8 | 7,8 | 4,4 | 545,50 | 56,50 | 43,50 | 1,67 | 1,43 | 200 |
| 13.03.2009 | 1,274 | 31 | 281,5 | 222,9 | 7,6 | 7,6 | 7,6 | 4,8 | 504,40 | 55,81 | 44,19 | 1,51 | 1,51 | 205 |
| 23.03.2009 | 1,285 | 32 | 300,1 | 222,3 | 6,4 | 5,1 | 7,7 | 4,4 | 522,40 | 57,45 | 42,55 | 1,23 | 0,98 | 210 |
| 31.03.2009 | 1,262 | 30 | 279,0 | 215,9 | 6,3 | 3,8 | 7,6 | 4,4 | 494,90 | 56,38 | 43,62 | 1,27 | 0,77 | 220 |
| 01.04.2009 | 1,274 | 31 | 292,1 | 222,9 | 6,4 | 3,8 | 8,9 | 4,5 | 515,00 | 56,72 | 43,28 | 1,24 | 0,74 | 218 |
| 14.04.2009 | 1,262 | 30 | 279,0 | 217,1 | 6,3 | 3,8 | 8,8 | 4,8 | 496,10 | 56,24 | 43,76 | 1,27 | 0,77 | 225 |
| 27.04.2009 | 1,274 | 31 | 265,5 | 208,3 | 2,5 | 2,5 | 7,6 | 4,5 | 473,80 | 56,04 | 43,96 | 0,53 | 0,53 | 223 |

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 26521-21/0**

Anlage 3

Ferrokillverbrauch und Schlammfall während Versuchsphase

| Datum | Fluxbad | Tegoflux | Schlamm | Bemerkung | Produktion |
|------------|---------|----------|---------|---------------------------|------------|
| | pH-Wert | kg | kg | | to |
| 19.08.2008 | 4 | 200 | 70 | o.k. | |
| 25.08.2008 | 4 | 200 | 60 | o.k. | |
| 29.08.2008 | 4 | 200 | 65 | o.k. | |
| 03.09.2008 | 4 | 200 | 65 | o.k. | |
| 08.09.2008 | 4 | 200 | 75 | o.k. | |
| 15.09.2008 | 4 | 200 | 73 | o.k. | |
| 16.09.2008 | 4 | 0 | 75 | o.k. | |
| 19.09.2008 | 4 | 200 | 60 | o.k. | |
| 24.09.2008 | 4 | 200 | 60 | o.k. | |
| 30.09.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 01.10.2008 | 4 | 0 | 70 | o.k. | |
| 02.10.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 07.10.2008 | 4 | 200 | 65 | o.k. | |
| 10.10.2008 | 4 | 200 | 70 | o.k. | |
| 16.10.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 20.10.2008 | 4 | 200 | 115 | o.k. | |
| 24.10.2008 | 4 | 0 | 0 | Filterpumpe defekt | |
| 26.10.2008 | 4 | 0 | 0 | Pumpe gewechselt | |
| 27.10.2008 | 4 | 200 | 110 | o.k. | |
| 29.10.2008 | 4 | 0 | 80 | o.k. | |
| 30.10.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 04.11.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 07.11.2008 | 4 | 200 | 130 | o.k. | |
| 12.11.2008 | 4 | 200 | 110 | o.k. | |
| 17.11.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 21.11.2008 | 4 | 400 | 82 | o.k. | |
| 24.11.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 28.11.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 02.12.2008 | 4 | 400 | 93 | o.k. | |
| 8.12.2008 | 4 | 200 | 86 | o.k. | |
| 11.12.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 15.12.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 17.12.2008 | 4 | 200 | 109 | o.k. | |
| 19.12.2008 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 23.12.2008 | 4 | 200 | 98 | o.k. | |
| 05.01.2009 | 4 | 200 | 132 | o.k. | |
| 08.01.2009 | 4 | 200 | 80 | o.k. | |
| 12.01.2009 | 4 | 200 | 81 | o.k. | |
| 15.01.2009 | 4 | 200 | 110 | o.k. | |
| 19.01.2009 | 4 | 200 | 81 | o.k. | |
| 22.01.2009 | 4 | 200 | 190 | o.k. | |
| 26.01.2009 | 4 | 200 | 108 | o.k. | |
| 31.01.2009 | 4 | 200 | 98 | o.k. | |
| 04.02.2009 | 4 | 200 | 86 | o.k. | |
| 09.02.2009 | 4 | 200 | 84 | o.k. | |
| 13.02.2009 | 4 | 200 | 170 | o.k. | |
| 18.02.2009 | 4 | 200 | 80 | o.k. | |
| 23.02.2009 | 4 | 200 | 110 | o.k. | |
| 28.02.2009 | 4 | 200 | 96 | o.k. | |
| 03.03.2009 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 06.03.2009 | 4 | 200 | 82 | o.k. | |
| 10.03.2009 | 4 | 200 | 0 | o.k. | |
| 13.03.2009 | 4 | 200 | 92 | o.k. | |
| 18.03.2009 | 4 | 200 | 86 | o.k. | |
| 23.03.2009 | 4 | 400 | 180 | o.k. | |
| 27.03.2009 | 4 | 200 | 86 | o.k. | |
| 01.04.2009 | 4 | 200 | 82 | o.k. | |
| 06.04.2009 | 4 | 200 | 90 | o.k. | |
| 09.04.2009 | 4 | 200 | 80 | o.k. | |
| 13.04.2009 | 4 | 200 | 78 | o.k. | |
| 16.04.2009 | 4 | 200 | 88 | o.k. | |
| 20.04.2009 | 4 | 200 | 78 | o.k. | |
| 24.04.2009 | 4 | 200 | 78 | o.k. | |
| Summe | | 12200 | 4427 | 0,363 kg Schlamm /kg Flux | 12210 to |

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt gefördert unter dem AZ: 26521-21/0

Anlage 4

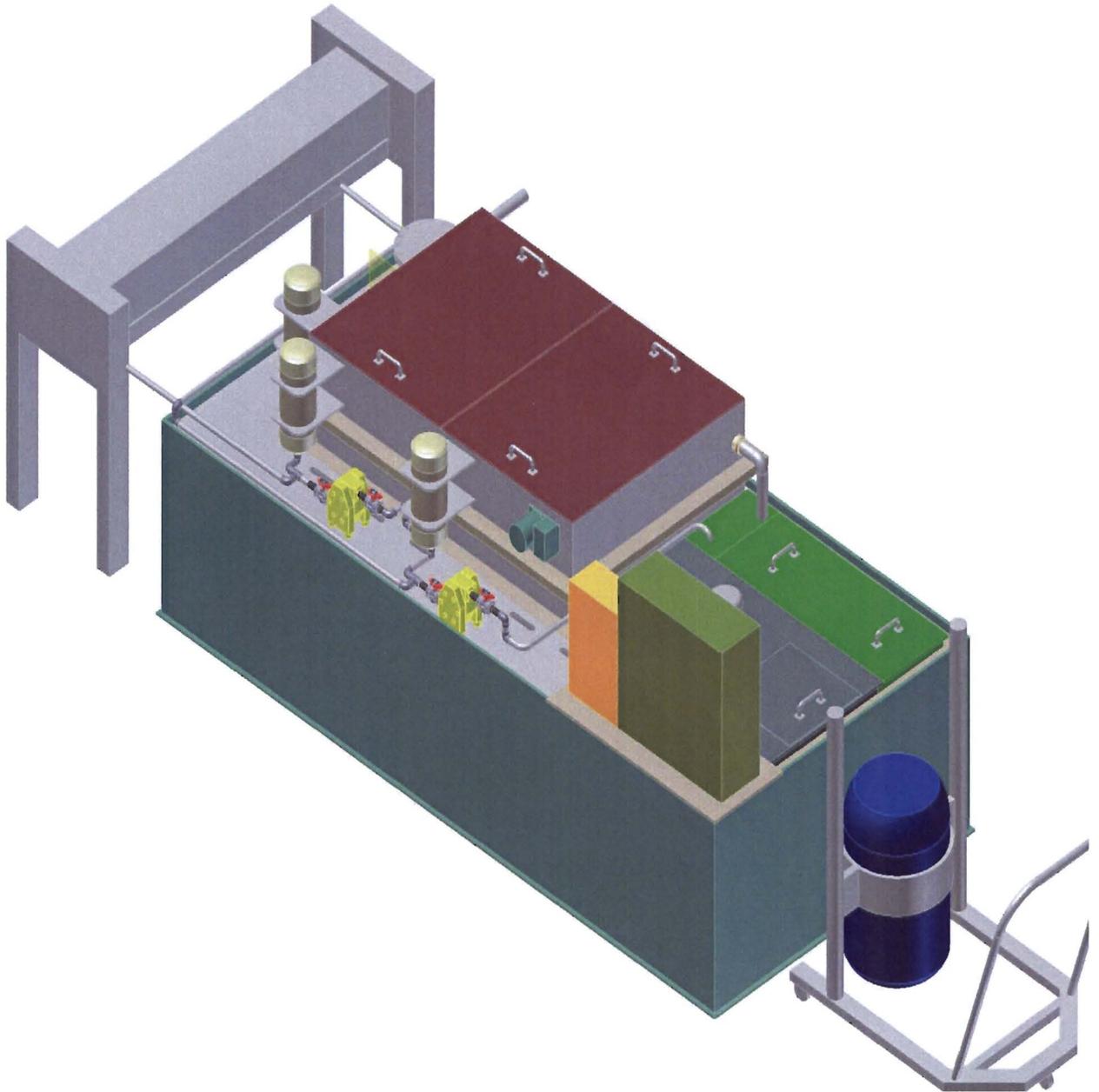
Schlammanalyse Fluxomat

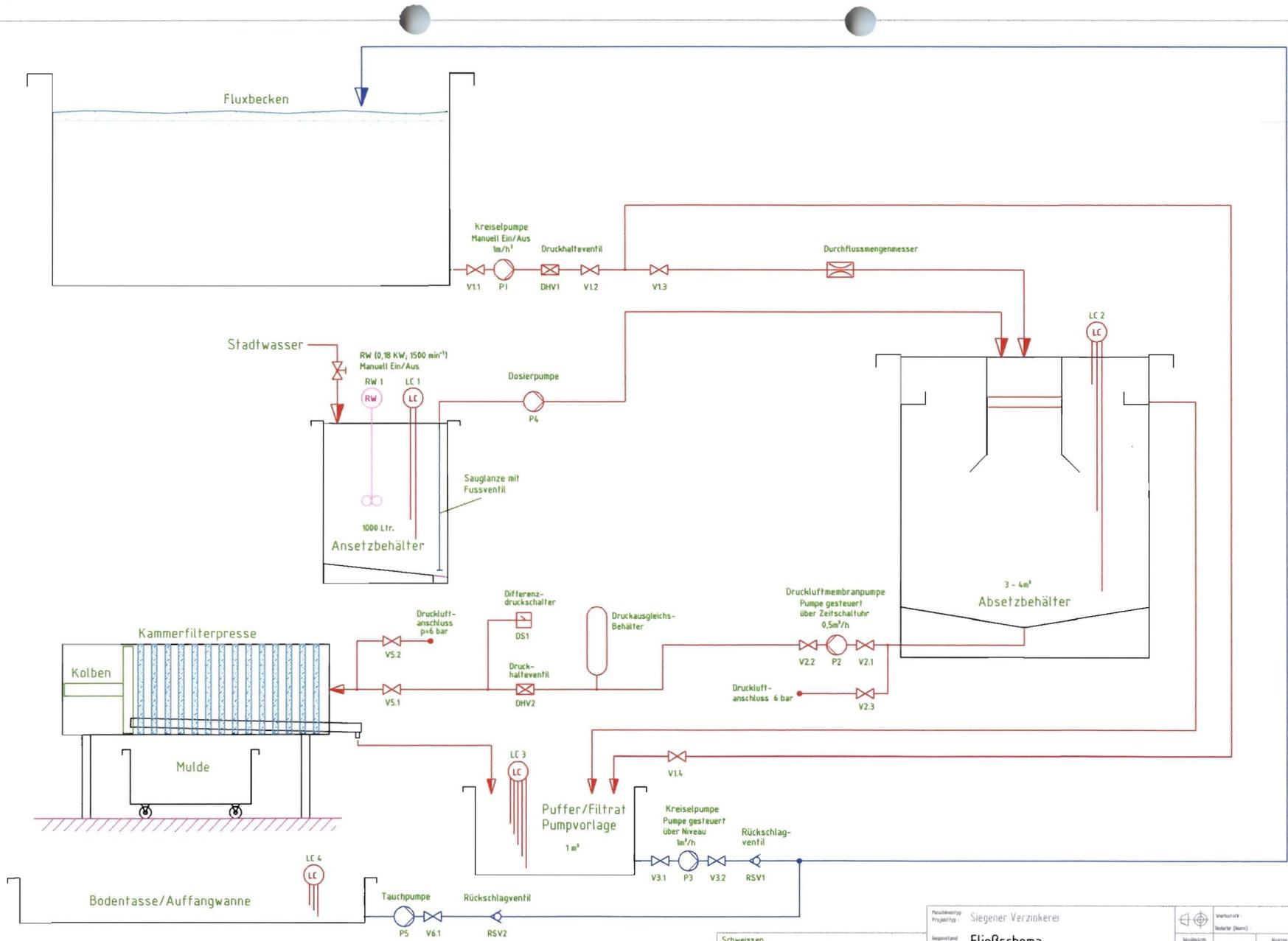
| Datum | Fe % | Zn % | Mn% | Cl % | H2O | Organik ppm |
|------------|------|------|-----|------|------|-------------|
| 07.11.2008 | 19,2 | 8,5 | 9,8 | 9 | 46,5 | 200 |

**Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ: 26521-21/0**

Anlage 5

Neuer Fluxomaten





Für diese Zeichnung behält sich das Institut für alle Rechte vor, auch für die Weiterverbreitung oder Vervielfältigung. Dieses Dokument ist ausschließlich für den internen Gebrauch bestimmt und darf nicht ohne schriftliche Genehmigung des Instituts weitergegeben werden. Die Verantwortung für die Richtigkeit der Angaben liegt bei dem Auftraggeber. Das Institut übernimmt keine Haftung für Schäden, die aus dem Gebrauch dieses Dokuments resultieren.

Schweißen
 Wenn auf der Zeichnung nicht speziell vermerkt:
 - gilt für Schweißverbindungen DIN EN 25817, Bewertungsgruppe C
 - gilt für die Kalknährbezeichnungen DIN EN 22553, Nährstoffe 2

| Loseblech | 12,5 | 12,5 | Spondenfraktion | | | | | | Masse, ohne | | | | | | | | | | |
|-----------|-------|------|-----------------|-------|----|-----|-----|-----|-------------|-----|-------|------|------|-----|----|-----|-----|-----|------|
| | | | H7 | H8 | H9 | H10 | H11 | H12 | über | bis | über | bis | über | bis | | | | | |
| 30 | ± 0,2 | 1000 | 2000 | ± 1,2 | 10 | ± 1 | 120 | 400 | ± 10 | 30 | ± 0,3 | 2000 | 4000 | ± 2 | 10 | ± 1 | 120 | 400 | ± 10 |
| 120 | ± 0,3 | 2000 | 4000 | ± 2 | 10 | ± 1 | 120 | 400 | ± 10 | 30 | ± 0,5 | 400 | 800 | ± 3 | 10 | ± 1 | 120 | 400 | ± 10 |

| | | | |
|--|---|---------------------------------|-------------------------------------|
| Projekttyp Siegeler Verzinkelei | Zeichnungsart Fließschema | Maßstab 1:5 | Blatt FF-002 |
| Projektname Fließschema | Zeichnung Fließschema | Blatt FF-002 | Blatt FF-002 |
| Datum 08.10.2010 | Gezeichnet E. Schüringer | Geprüft E. Schüringer | Freigegeben E. Schüringer |
| O.K.A.-TECH Lutz Hopfing Industriestraße 1 34123 Kassel Tel.: +49 561 8100 Fax: +49 561 8100 Email: info@oka-tech.de | Auftraggeber FF-002a (18.10.06) | Maßstab 1:5 | Blatt FF-002 |





Abschlussbericht FSU Jena

„MICROBO“ – Entwicklung eines Verfahrens und eines Prototyps zur wirtschaftlichen und reproduzierbaren Herstellung von Mikrolöchern in Einspritzdüsen

Laufzeit 01.10.2007-30.09.2008

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Motivation | 3 |
| 2. | Durchgeführte Arbeiten..... | 5 |
| 2.1 | Theoretische Vorbetrachtungen – Das EVA 2-Verfahren | 5 |
| 2.2 | AP 1: Konzeption und Entwicklung eines kompakten Strahlweges | 7 |
| 2.2.1 | Erweiterung der Lasersteuerung..... | 7 |
| 2.2.2 | Konzipierung und Neuaufbau eines kompakten Strahlengangs..... | 8 |
| 2.2.3 | Neukonstruktion der Laserbohrköpfe..... | 9 |
| 2.2.4 | Überarbeitung der ILM | 10 |
| 2.3 | AP 2: Optische Lösung „Rotationseinheit-Taumelspiegel“..... | 11 |
| 2.4 | AP 3: Optische Konzeption „Strahlungsentkopplung-Divergenzanpassung“ | 14 |
| 2.4.1 | Anpassung des Strahldurchmessers und der Strahldivergenz | 14 |
| 2.4.2 | Strahlungsentkopplung..... | 15 |
| 2.5 | AP 4: On-Line-Überwachung der Strahlungsparameter | 17 |
| 2.6 | Vergleich zwischen alter und neuer FSU-Laboranlage..... | 18 |
| 2.7 | AP 5: Aufbau der Laserbohrereinheit | 21 |
| 2.8 | AP 6: Optimierung des Bohrverfahrens und Herstellung von Einspritzdüsen..... | 22 |
| 2.8.1 | Positionierung des Werkstücks zur Bearbeitung..... | 22 |
| 2.8.2 | Strahlungsabsorption mittels hochabsorbierenden Fluids..... | 23 |
| 2.8.3 | Erzielte Bearbeitungsergebnisse | 24 |
| 3. | Zusammenfassung..... | 30 |

1. Motivation

Zur Verwirklichung von Schadstoffreduktionen bzw. Kraftstoffeinsparungen bei gleichzeitiger Leistungssteigerung der Motoren tragen neben dem Einspritzdruck auch Form, Anzahl und Größe der Kraftstoffeinspritzöffnungen maßgeblich bei, da sie die Charakteristik des sich ausbildenden Kraftstoffsprays und dadurch den Verbrennungsablauf im Motor festlegen. Bild 1 illustriert die Haupteinflussgrößen bei der Dieseleinspritzung, insbesondere die Funktion der Einspritzdüse und damit der Spritzlöcher. Um zukünftige Abgasnormen zu erfüllen, gehen die Entwicklungen in der Einspritztechnik hin zu immer höheren Drücken bei gleichzeitig unter $100\ \mu\text{m}$ sinkenden Öffnungsdurchmessern der Düse. Außerdem steigen ständig die Anforderungen an die Präzision der Bohrungen, um die strömungstechnischen Vorgaben einhalten zu können. Die geometrischen Toleranzen der Bohrungen liegen bei wenigen Prozent. Eventuell sind der Lochfertigung aufwendige Prozesse nachgeschaltet, um Restmängel zu beseitigen.

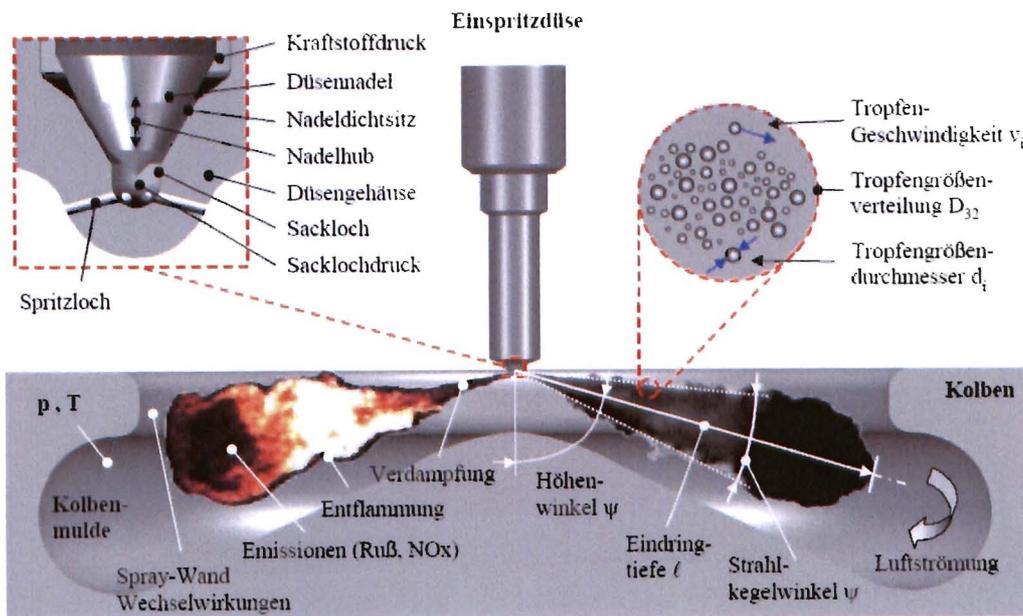


Bild 1: Haupteinflussgrößen auf die Schadstoffentstehung bei der Dieseleinspritzung [Quelle: M. Blessing, *Untersuchung und Charakterisierung von Zerstäubung, Strahlausbreitung und Gemischbildung aktueller Dieseldirekteinspritzsysteme*, Dissertation, Universität Stuttgart, 2004]

Zurzeit am besten werden die gestellten Anforderungen durch funkenerosive Verfahren (M. Feurer: *Elektroerosive Metallbearbeitung*. Vogel-Buchverlag, Würzburg (1983)) (B. Schuma-

cher, D. Weckerle: Funkenerosion – Richtig verstehen und anwenden. Technischer Fachverlag Dipl.-Ing. K.H. Möller, Velbert (1988)) erfüllt, allerdings mit dem Nachteil relativ langer Bearbeitungszeiten pro Loch und objektiven Grenzen bezüglich des Durchmessers und vor allem der Form der Bohrung.

Seit einer Reihe von Jahren versucht man intensiv, relevante Fortschritte durch den Einsatz der Lasertechnik zu erreichen, bisher jedoch mit begrenztem Erfolg. Ursachen dafür sind neben den extrem hohen Forderungen an die Präzision und Zuverlässigkeit (Reproduzierbarkeit aller Parameter) der Bearbeitung vor allem auch technische Details, die eine industrielle Nutzung verhindern, selbst wenn das Bohren eines einzelnen Loches mit den gewünschten Parametern gelungen ist. An dieser Stelle seien zwei Beispiele genannt, die an die geometrischen Randbedingungen bei der Bearbeitung von Einspritzdüsen verknüpft sind.

Ein Hauptproblem ist z.B. die Vernichtung der Reststrahlung, die durch das Bohrloch zum Ende des Bohrprozesses hin durchtritt und die relativ nahe (ca. 1 mm) gegenüberliegende Wand beschädigt, wenn keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden (vgl. Bild 1, vergrößerte Darstellung links oben). Die bisher genutzten Methoden, z.B. Einführung eines Opferkegels in den Raum zwischen den beiden Wänden, sind zeit- und kostenaufwendig und können die Bohrqualität an der Strahlaustrittsseite verschlechtern. Der Einsatz billiger absorbierender Flüssigkeiten, z.B. Wasser, scheitert bei den üblichen eingesetzten Lasern (Nd:YAG-Laser, in jüngster Zeit auch Titan-Saphir- oder Faserlaser) an der Wellenlänge um 1 μm , für die Wasser praktisch transparent ist.

Ein zweites Problem ergibt sich, wenn mittels Trepaniertechnik bei sehr feiner Fokussierung (z.B. bei ca. 20 μm Schnittfugenbreite) ein kegelförmiger Bohrkern entsteht. Dessen prozeßgerechte Entfernung ist schwierig, speziell z.B. bei der Nutzung des vorstehend beschriebenen Opferkegels.

Ein besonders einschränkender Faktor im Hinblick auf die Fertigung von Düsenlöchern mit optimiertem Einspritzverhalten ist jedoch die Beschränkung der Form der Löcher bei den bisher genutzten (Funkenerosion) bzw. aufwendig untersuchten (Lasertechnik) Verfahren auf konische bzw. schwach kegelförmige Formen. An dieser Stelle eröffnet das im Rahmen des Projektes untersuchte CO₂-laserbasierte Bohrverfahren auf Grund seiner hohen Flexibilität bezüglich der Lochform neue Optimierungsmöglichkeiten.

2. Durchgeführte Arbeiten

Der vorliegende Bericht orientiert sich im wesentlichen an der Abfolge der einzelnen Arbeitspakete (AP) wie im Antrag beschrieben, die tatsächliche zeitliche Bearbeitung der einzelnen Punkte hat dabei manchmal in abweichender Reihenfolge bzw. parallel stattgefunden.

2.1 Theoretische Vorbetrachtungen – Das EVA 2-Verfahren

Dass die CO₂-Lasertechnologie für das Bohren höchster Präzision, wie es für Löcher in Einspritzdüsen erforderlich ist, erfolgreich genutzt werden kann, ist an spezielle Randbedingungen gekoppelt, die insbesondere die Impulsdauer und -spitzenleistung betreffen. Diese Randbedingungen ergeben sich aus dem an der FSU entwickelten EVA 2-Verfahren, das auf folgenden Grundüberlegungen beruht.

Materialabtrag bzw. Bohrungen höchster Präzision sind prinzipiell an die Vorgabe eines minimalen Schmelzanteils gebunden. Mit dem genannten Prinzip des Elementarvolumenabtrages (2) kann diese Grundforderung außerordentlich effizient, d.h. sehr gute Präzision bei hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit, erfüllt werden.

Bild 2 illustriert das Grundprinzip des EVA 2, auf dessen Basis nachfolgend der günstigste Bereich von Impulsdauer und nötiger Impulsspitzenleistung abgeleitet werden soll.

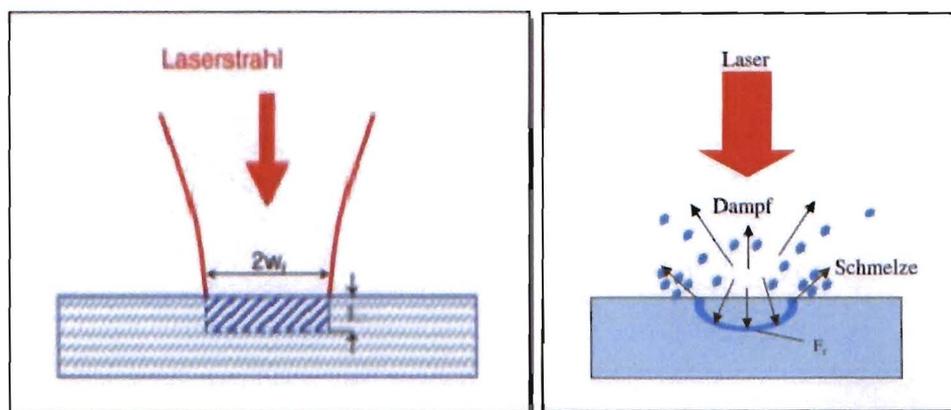


Bild 2: Grundprinzip des Elementarvolumenabtrages (EVA)

Dazu wird die Größe des von der Laserstrahlung beeinflussten Werkstückvolumens bestimmt. An der Oberfläche ist dies eine Kreisfläche vom Durchmesser $2w_f$, also die Fokusfläche der

Strahlung. Die für die Tiefe angenommene Länge l ist die minimale, durch die Wechselwirkung Laserimpuls-Werkstoff vorgegebene effektive Wirkungstiefe der Strahlung.

Im Fall von Metallen hat die Strahlung nur eine sehr geringe optische Eindringtiefe, dafür ist der Einfluss der Wärmeleitung zu beachten. Die Länge l wird deshalb über die Diffusionslänge δ bestimmt. Diese gibt die Wegstrecke einer Isotherme in einer gegebenen Zeitdauer an, und ergibt sich in Abhängigkeit von der Temperaturleitfähigkeit k_w des Materials sowie der Impulsdauer τ_{imp} zu

$$\delta = 2\sqrt{k_w \cdot \tau_{imp}}$$

Für CrNi-Stahl und eine angenommene Impulsdauer von $20 \mu\text{s}$ ergibt sich demnach eine Länge l von

$$l = \delta = 34 \mu\text{m}.$$

Das Elementarvolumen V_{EVA}

$$V_E = \pi w_f^2 \times l$$

ergibt sich damit zu rund $0,26 \times 10^{-6} \text{ cm}^3$ und in der Folge die pro Impuls abzutragende Masse zu etwa $m_{EVA} \approx 2 \mu\text{g}$. Dabei wurde $2w_f = 100 \mu\text{m}$ angenommen.

Um den Anteil an geschmolzenem aber nicht abgetragenen Material zu minimieren, muss die eingebrachte Impulsenergie möglichst mit der für die Verdampfung dieses Elementarvolumens nötigen Energie übereinstimmen. Um m_{EVA} zu verdampfen benötigt man eine Energie von etwa 6 mJ , die von der Strahlung eingebracht werden muss. Damit lässt sich jetzt über

$$E_{imp} = \tau_{imp} \times P_{sp}$$

die im Material absorbierte Impulsspitzenleistung zu $P_{sp} \sim 300 \text{ W}$ bestimmen. Im Verlauf der Bohrung ändern sich diese Parameter, und die Impulsspitzenleistung muss entsprechend angepasst werden.

Aus den vorstehenden Überlegungen geht hervor, dass über die eingestrahlte Impulsdauer eine Variation der Größe l möglich ist. Die oben angenommenen $20 \mu\text{s}$ ergeben sich einerseits aus den experimentellen Gegebenheiten (Schaltgeschwindigkeit des ILM) und andererseits aus dem Ziel möglichst kurzer Bohrzeiten. Unter diesen zwei Aspekten stellt sie eine Art Optimum dar.

2.2 AP 1: Konzeption und Entwicklung eines kompakten Strahlweges

Ziel dieses Arbeitspunktes war eine weitgehende Optimierung des Aufbaus der Laboranlage, wobei parallel dazu die Ergebnisse für den in Karlsruhe aufzubauenden Prototyp bereitgestellt werden sollten.

2.2.1 Erweiterung der Lasersteuerung

Insbesondere die Anforderungen bezüglich der Impulsdauer sind nur durch den Einsatz der ILM zur externen Strahlungsmodulation zu erreichen. Für die dazu notwendige, zeitlich zum Laserimpuls abgestimmte Modulatoransteuerung wurde die Steuerung des Lasers in enger Zusammenarbeit mit FEHA und CAP Dresden entsprechend angepasst und erweitert.

Im November 2007 wurde die Planung für die erweiterte Lasersteuerung abgeschlossen. Bis September 2008 wurde diese neue Steuerung von FEHA und CAP Dresden in die Laboranlage integriert. Sie beinhaltet drei neue programmierbare Steuerausgänge für das zeitlich zum Laser abgestimmte Auslenken der benötigten drei Interferenz-Laserstrahlungs-Modulatoren (ILM), sowie vier weitere zeitlich programmierbare Steuerausgänge für die Prozessgasventile sowie das Absorberfluid-Ventil. Für eine Kommunikation zwischen der FEHA-Steuerung und der übergeordneten SPS ist die bestehende Schnittstelle an der FEHA-Steuerung vorgesehen. Auf der SPS-Steuerung muss dazu ein ebenfalls neu entwickeltes Fernsteuerungsprogramm der FEHA-Lasersteuerung laufen.

Wichtigste Neuerungen der erweiterten FEHA-Lasersteuerung sind:

- pro Laserimpuls 8 Spannungsniveaus (Amplitudenauflösung 12 Bit) variabler Dauer programmierbar
- 3 ILM-Signalausgänge über 16 Amplitudenwerte pro Periode (Amplitudenauflösung 12 Bit) oder direkte Sinusfunktionen programmierbar
- 4 weitere programmierbare Ausgänge für Ventile und Zusatzeinrichtungen
- Samplezeit 17 μ s
- Zusammenfassung unterschiedlicher Impuls-/ILM-/Ventilverläufe in kompletten Bohrprogrammen
- Kompilierung der Programme in Binärform mit Syntax- und Plausibilitätsprüfung
- Fernsteuerungsoberfläche auf übergeordneter SPS

Ebenfalls gleich im November 2007 wurde eine Anpassung der Lasernetzteile für eine Erhöhung der Laserpulsspitzenleistung geplant. Im Mai 2008 war die Entwicklung abgeschlossen und die Netzteile des Lasers der Laboranlage wurden aufgerüstet. Dadurch ist eine Verdoppelung der Pulsspitzenleistung bei Beibehaltung der hohen Strahlqualität ermöglicht worden.

2.2.2 Konzipierung und Neuaufbau eines kompakten Strahlengangs

Der Neuaufbau des Strahlenganges der Laboranlage auf einem kommerziellen Schienensystem wurde verworfen. Aufgrund der möglichst hohen mechanischen Stabilität wurden die Elemente des tatsächlichen Aufbaus ohne Schienensystem direkt auf die Grundplatte aufgeschraubt. Sowohl für die Laboranlage als auch für den Prototyp wurde ein entsprechender Bohrungsplan ausgearbeitet.

Die Strahlhöhe über der Grundplatte wurde auf den minimal möglichen Wert festgelegt, wieder im Hinblick auf eine größtmögliche Stabilität. Ausgehend von diesen Bedingungen wurden die einzelnen Elemente des Strahlenganges in Zusammenarbeit mit FEHA neu konstruiert und wo nötig neu gefertigt. Für die Untersuchung zur Effizienzsteigerung der Anlage mit einer ILM-Kaskade wurde eine entsprechende spätere Nachrüstung der Laboranlage schon im Aufbau und bei den Bohrungsplänen mit vorgesehen (vgl. Bild 3 und Bild 4).

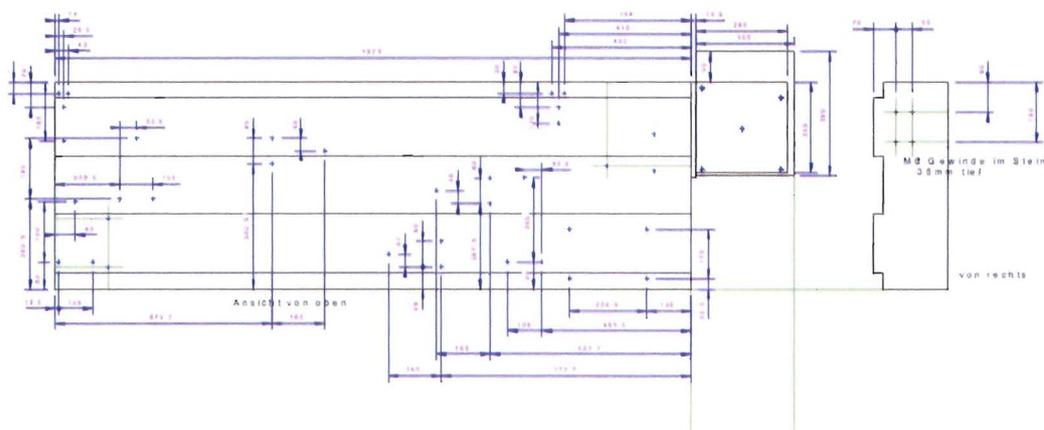


Bild 3: Bohrplan für die Umrüstung der Laboranlage

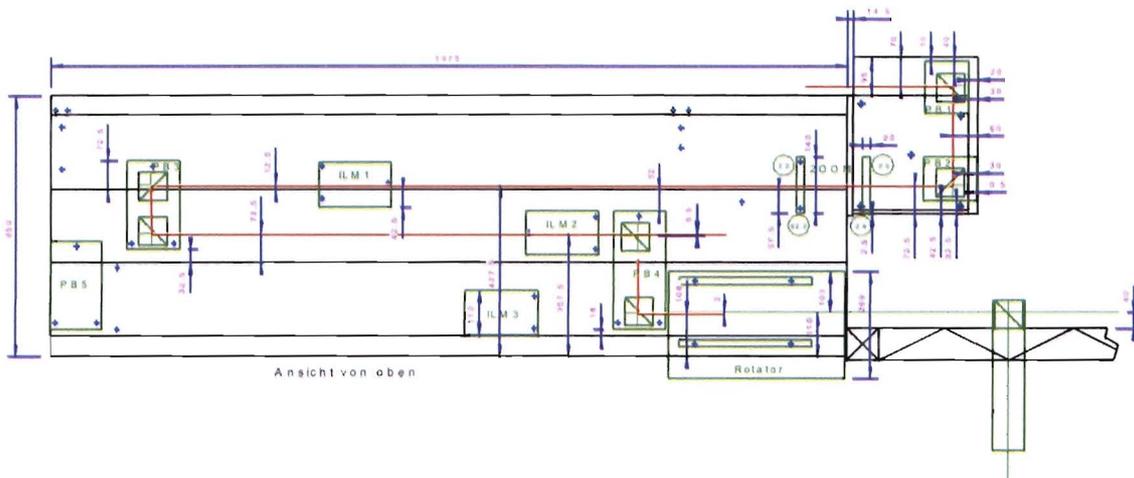


Bild 4: Konstruktion des Strahlengangs der Laboranlage

2.2.3 Neukonstruktion der Laserbohrköpfe

Für die Strahlfokussierung wurden Bohrköpfe für eine Brennweite von 1" sowie eine Brennweite von 1,5" in enger Zusammenarbeit mit FEHA konzipiert und bei FEHA gefertigt (Bild 5). Dabei wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass durch die prozessbedingten Variationen des Arbeitsgasdrucks keine Änderung der Fokusslage (geforderte Stabilität: wenige μm) und auch keine Fokusverzerrung hervorgerufen wird. Zusätzlich wurde besonderer Wert auf die kleinstmögliche Ausgestaltung der Prozessgasdüse gelegt, um die jeweiligen knappen Bohrpositionen an Dieseleinspritzdüsen zu ermöglichen.

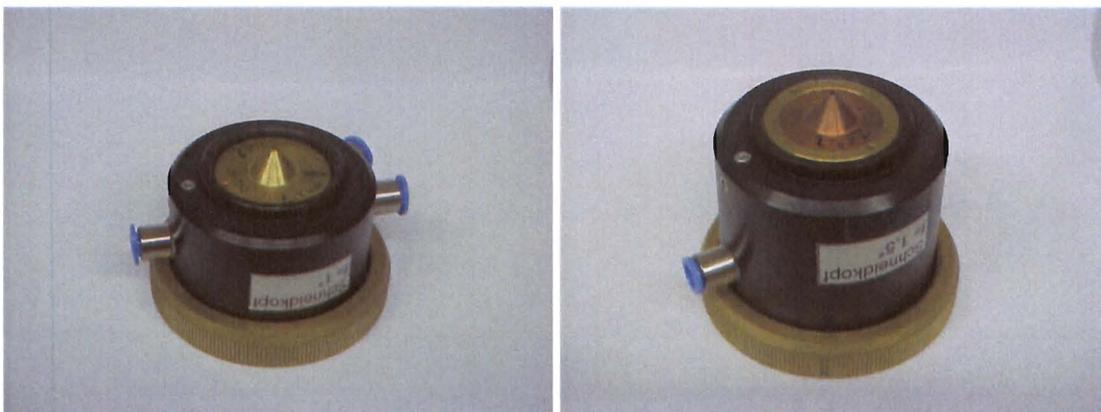


Bild 5: Neu konstruierte Bohrköpfe, Brennweiten 1" (links) bzw. 1,5" (rechts)

2.2.4 Überarbeitung der ILM

Die Konstruktion der verwendeten ILM wurde überarbeitet (Bild 6) und insbesondere im Hinblick auf eine standardisierte Fertigung aktualisiert. Für die im Projektrahmen vorgesehenen Aufgaben wurden 3 neue ILM gefertigt (Bild 7).

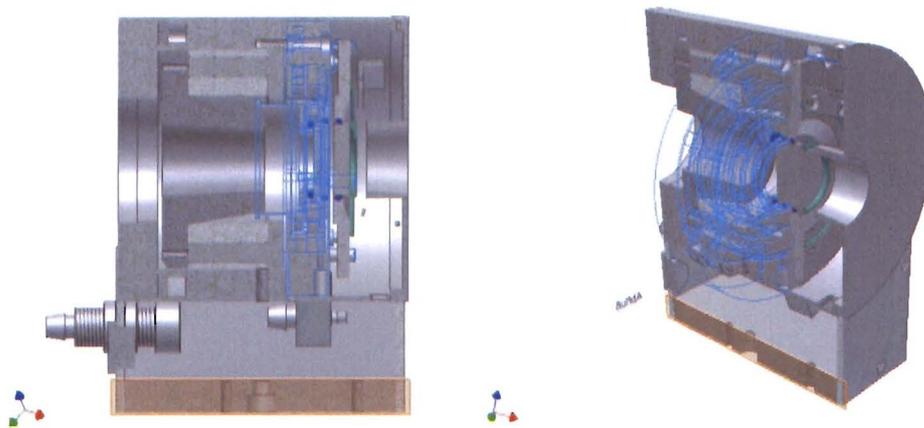


Bild 6: Neue Konstruktion des ILM



Bild 7: ILM (Interferenz-Laserstrahlungs-Modulator)

2.3 AP 2: Optische Lösung „Rotationseinheit-Taumelspiegel“

Die mechanischen Schwachstellen der alten Einheit zur Strahlrotation wurden analysiert. Hauptschwachpunkte sind dabei in der einseitigen Lagerung der Rotationsachse, der nicht konstanten Rotationsgeschwindigkeit verursacht durch Verwendung eines DC-Motors sowie der schwierigen Justierbarkeit ohne die nötige Parameterstabilität gefunden worden. In Zusammenarbeit mit FEHA wurde bei der Neukonstruktion die Rotationsachse beidseitig gelagert, um Fehler durch ein Verkappen zu minimieren. Zum Antrieb wurde ein Schrittmotor verwendet, der reproduzierbare Rotationsfrequenzen garantiert. Die Justierung der 5 Spiegel wurde direkt nach der Fertigung bei FEHA mit einem stabilisierten HeNe-Laser in einem Aufbau mit langen Strahlwegen durch Einschleifen der Auflagepunkte der Spiegel vorgenommen und danach fixiert.

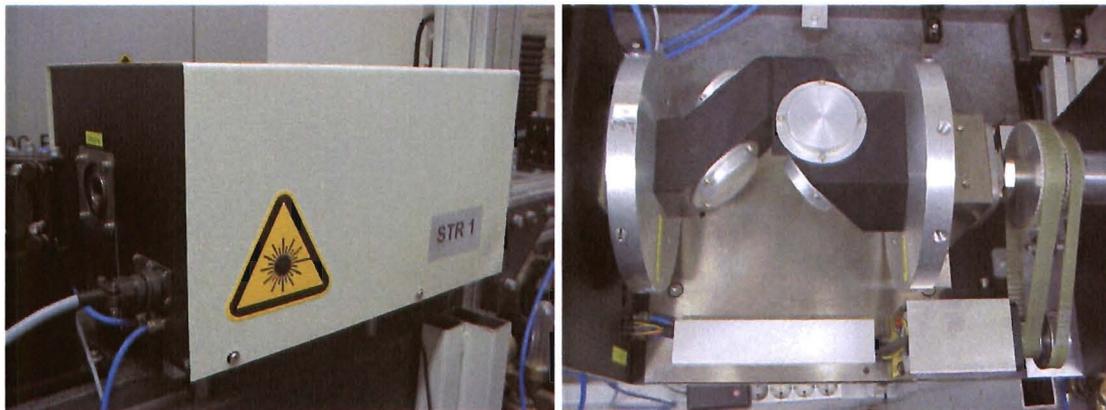


Bild 8: Neu entwickeltes Rotationsmodul mit (links) und ohne Schutzabdeckung (rechts)

Die Strahlauslenkung mit einem Taumelspiegel wurde im Hinblick auf eine mechanisch möglichst stabile und reproduzierbar verstellbare Konstruktion verworfen. Eine zweite prinzipielle Schwachstelle ist in dem zwingenden Auftreten eines Strahlungszwischenfokus auf der Taumelspiegeloberfläche, und den damit einhergehenden hohen Anforderungen an die Zerstörungsschwelle dieses Elements zu sehen.

Für den Neubau der Laboranlage wurde stattdessen die Strahlauslenkung auf der Fokussieroptik durch eine mitrotierende planparallele ZnSe-Scheibe in den Aufbau integriert. Diese benötigt prinzipbedingt keinen Zwischenfokus der Laserstrahlung und ist gegen Justierfehler relativ unempfindlich. Die Variation der Strahlauslenkung auf der Fokussieroptik ist durch Einstellen des Kippwinkels der Platte möglich.

Ein weiterer Vorteil der Taumelscheibe ist ihre lineare Anordnung mit der Rotationseinheit auf einer optischen Achse, sodass die notwendige Kopplung der beiden Drehfrequenzen zuverlässig durch zwei unterschiedliche Zahnriemen mit demselben Motor realisiert werden konnte.

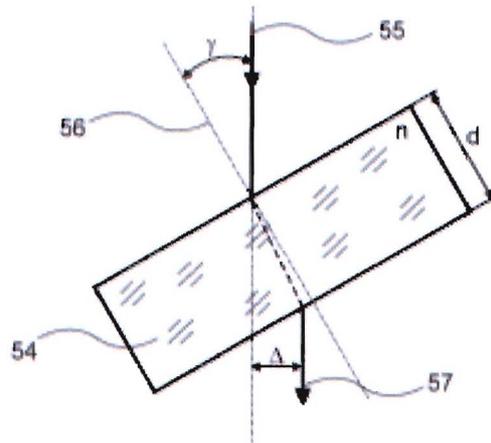


Bild 9: Prinzip der Strahlablenkung durch eine planparallele Platte unter dem Winkel γ

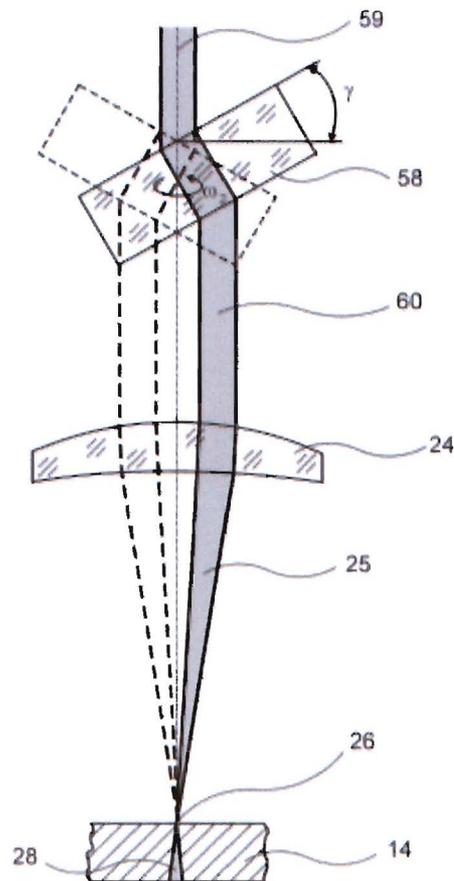


Bild 10: Prinzip der Strahlauslenkung auf der Fokussieroptik (24) mittels rotierender planparalleler Platte (58)

In Bild 9 ist noch einmal das an sich bekannte Prinzip des definierten Strahlversatzes durch eine planparallele Platte dargestellt. Der Strahlversatz Δ berechnet sich dabei aus den Plattenparametern d (Plattendicke) und n (Brechzahl des optischen Mediums) und dem Einstrahlwinkel γ gemäß folgender Beziehung:

$$\Delta \approx \frac{n-1}{n \cdot d \cdot \tan \gamma}$$

Dieser Versatz Δ des Strahlenbündels beträgt je nach Dicke der verwendeten Platten einige mm, so dass sich mit der Anordnung gemäß Bild 10, bei der die geneigte planparallele Platte mit der Kreisfrequenz ω_2 rotiert, deutliche Aufweitungen der konischen Bohrung erreichen lassen. Vorteile dieser Anordnung sind der vergleichsweise einfache Aufbau, die sehr präzise Einstellmöglichkeit des Versatzes Δ und damit letztlich der Form des erzeugten Loches und schließlich auch die Tatsache, dass durch die kleinen Δ im mm-Bereich praktisch immer im Bereich relativ guter Abbildung der Linse geblieben wird, so dass die Linsenfehler nur unwesentlich ins Gewicht fallen.

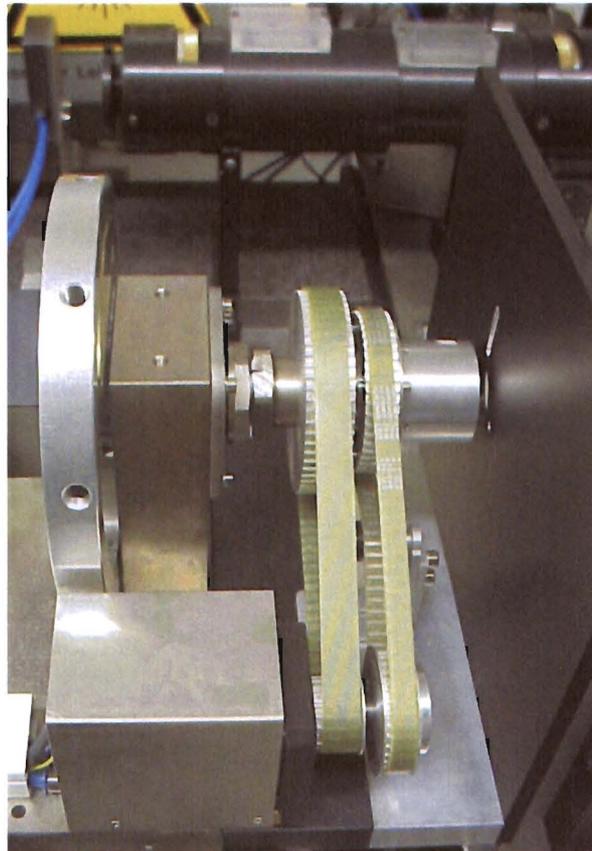


Bild 11: Rechts an den Rotator angeschlossene Taumelscheibe mit zweitem Antriebsriemen

2.4 AP 3: Optische Konzeption „Strahlungsentkopplung-Divergenzanpassung“

2.4.1 Anpassung des Strahldurchmessers und der Strahldivergenz

Um die für die Fokussierung der Strahlung wichtigen Parameter Strahldurchmesser $2w_0$ und Strahldivergenz θ im Rahmen der Bearbeitungsaufgabe optimal anpassen zu können, wurde ein optisches Zoomobjektiv für die CO_2 -Wellenlänge in Zusammenarbeit mit FEHA entwickelt und von FEHA gefertigt. Verwendet wurde dabei eine 3-Linsen Anordnung, um die beiden Parameter im Gegensatz zu üblichen Teleskopen unabhängig voneinander auf der Fokussierlinse einstellen zu können.

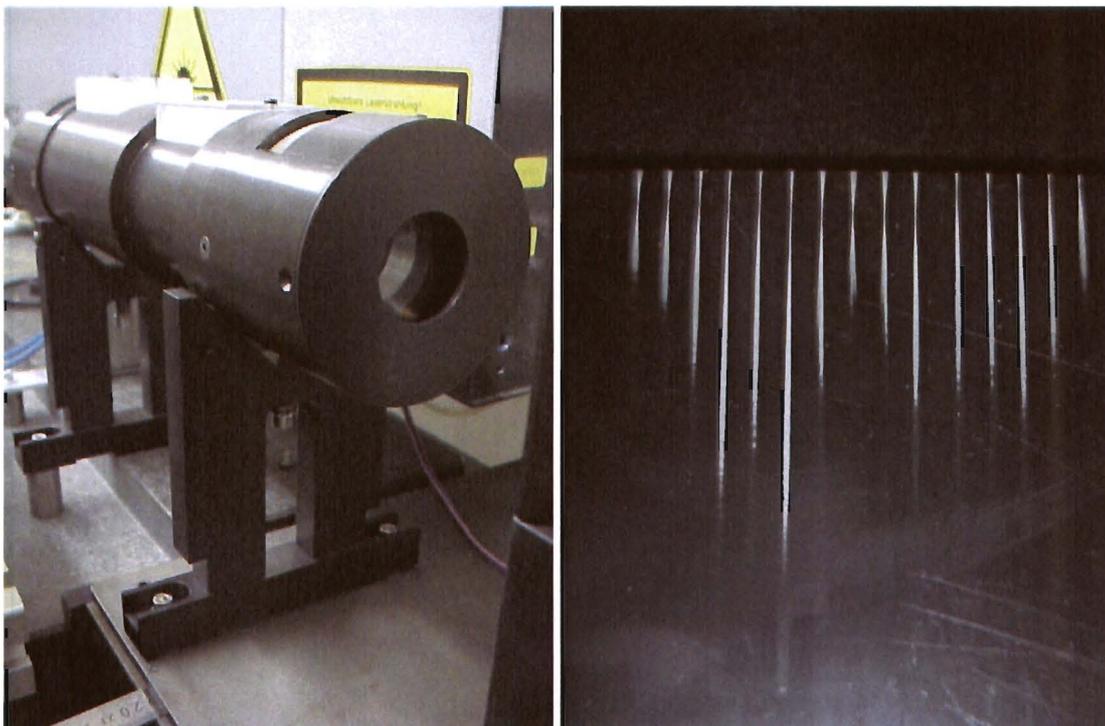


Bild 12 Links: Zoomobjektiv; rechts: mögliche Fokussierungen (Abbildung der Strahlungsverläufe durch Abtragsspuren auf eloxiertem Aluminium)

Im rechten Teil von Bild 12 sind verschiedene Fokusspuren des 1"-Bohrkopfes auf eloxiertem Aluminium zu, das unter einem Anstellwinkel von 12° unter der fokussierten Strahlung hinwegbewegt wurde, zu sehen. Die verschiedenen Spuren entsprechen unterschiedlichen Einstellungsvarianten des Zoom-Objektives. Deutlich sind dabei die Variationen der jeweiligen Fokusposition (durch Änderung der Divergenz der Strahlung) bzw. die Variation der Länge der Spuren, eine Folge der unterschiedlich scharfen Fokussierung durch Änderung der Ausleuchtung der Linse, zu sehen.

2.4.2 Strahlungsentkopplung

Durch die Verwendung von für elektrisch gepulste CO₂-Laser bereits relativ kurzen Strahlungsimpulsen in Wechselwirkung mit der Wellenlänge selektivität der ILM traten bei dem ersten Aufbau der Laboranlage Probleme mit der Wellenlängenstabilisierung des Lasers auf. Bild 13 zeigt beispielhaft mögliche Auswirkungen auf das Bohren von Löchern um 100 µm Durchmesser: Die Strahlanteile „falscher“ Wellenlänge werden in der alten Anordnung, bei der ein Prisma in den Strahlengang integriert war, winkelmäßig abgelenkt und damit anders abgebildet, so dass ein schadhafter Rand um die Eintrittskante der eigentlichen Bohrung entsteht.

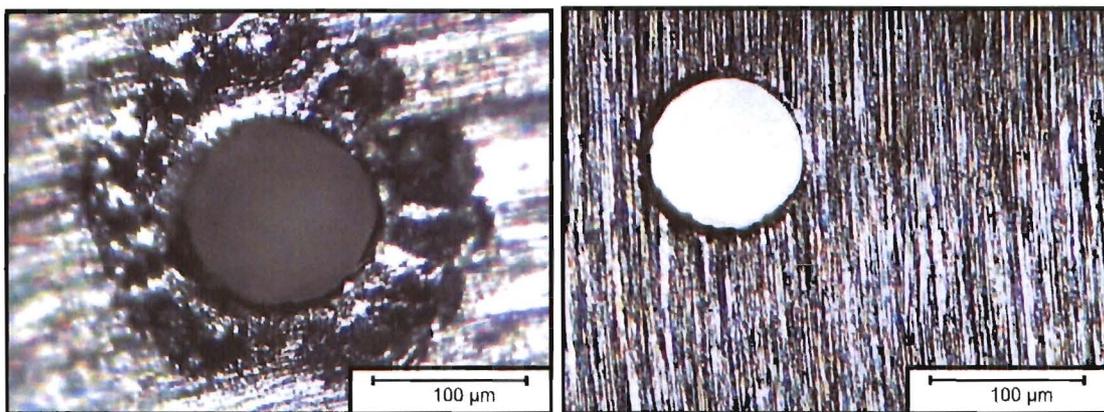


Bild 13: Auswirkung von unerwünschten Laser-Wellenlängeninstabilitäten auf die Eintrittskante der Bohrung (links ohne Entkopplung, rechts mit Entkopplung durch die neue temperaturgeregelte Auskoppeloptik)

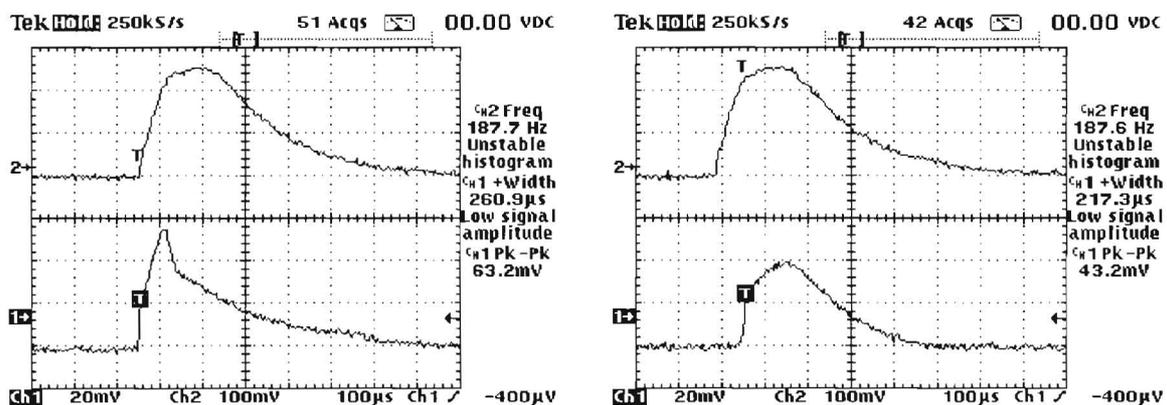


Bild 14: Aufteilung des gleichen Laserimpulses (Kanal 2 jeweils vor ILM) in zwei verschiedene Wellenlängenteile (Kanal 1 jeweils nach ILM), ohne Entkopplung

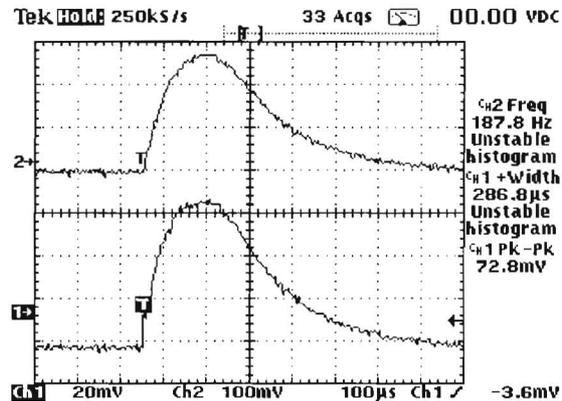


Bild 15: Durch angepasste Etalontemperatur: keine Aufspaltung der Laserstrahlungsimpulse mehr durch ILM (Kanal 2 vor ILM, Kanal 1 nach ILM)

Um das Anschwingverhalten des Lasers zu verbessern und das Auftauchen unerwünschter Nebenlinien der P20-Line zu unterdrücken, wurde die normale Auskoppeloptik des Laserresonators durch eine in enger Zusammenarbeit mit FEHA neuentwickelte und von FEHA gefertigte, temperaturgeregelte Etalon-Anordnung ersetzt.

Durch die so erreichte zusätzliche Stabilisierung der Laserwellenlänge ist das unerwünschte Anschwingen von Nebenlinien beim verwendeten Laser auch durch Rückkopplung der Strahlung über die Werkstückoberfläche vollständig unterbunden worden.

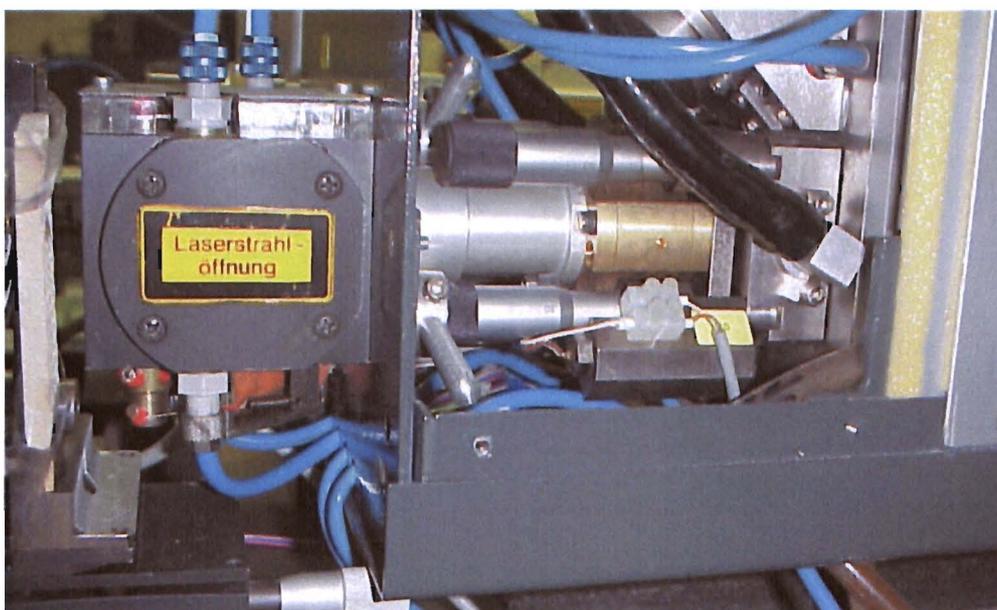


Bild 16: Resonatorausgang mit neuer temperaturgeregelter Auskoppeloptik (in der Messing-Fassung)

2.5 AP 4: On-Line-Überwachung der Strahlungsparameter

Für die online-Überwachung der Strahlungsparameter wurden 2 kompakte Leistungsmesser in den Aufbau integriert, die parallel zum Bohrprozess jederzeit den genauen zeitlichen Laserstrahlungsverlauf sowie die absoluten Leistungswerte anzeigen.

Um den Strahlweg dabei so kurz wie möglich halten zu können, wurden diese Leistungsmesser in Zusammenarbeit mit FEHA in vorhandene, notwendige Umlenkspiegel integriert. Die Fertigung erfolgte bei FEHA.

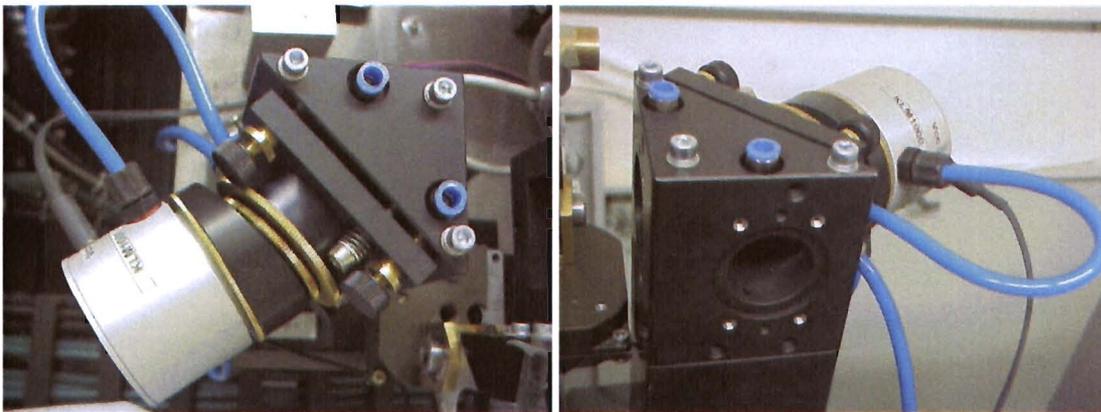


Bild 17: Integration der Leistungsmesser in 90°-Umlenkprismen

Durch Verwendung dieser Leistungsmesser sowie der erweiterten Laser-ILM-Ansteuerung ist es ermöglicht worden, reproduzierbar die im Laufe des Bohrprozesses erforderlichen unterschiedlichen Strahlungsimpulse online zu überwachen. Bild 18 zeigt typische Leistungsverläufe der von den Modulatoren ILM 1 und ILM 2 modifizierten Strahlung.

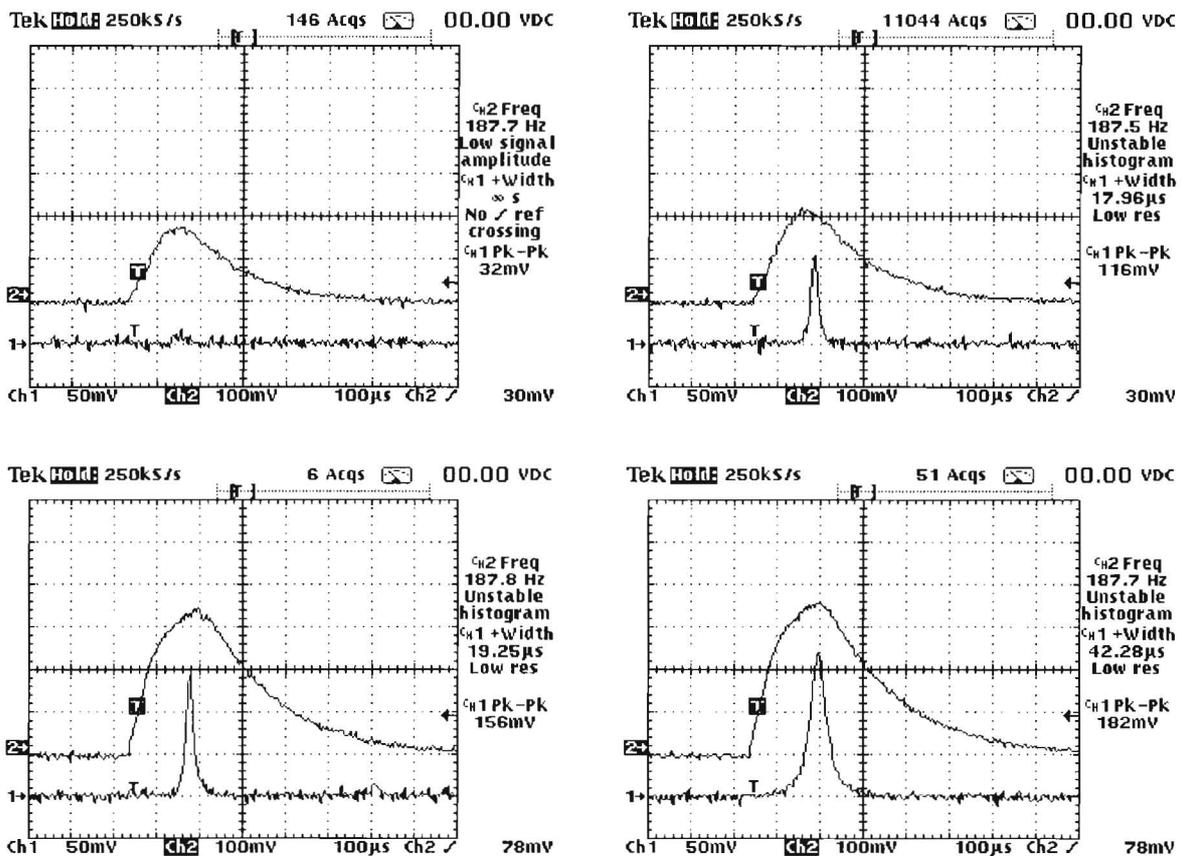


Bild 18: Darstellung verschiedener Leistungsverläufe durch Kombination von CO₂-Laser-Ansteuerung sowie ILM 1 und ILM 2; Kanal 2: Laserleistungsverlauf am Resonatorausgang, Kanal 1: resultierender Bearbeitungsimpuls nach ILM1 und ILM2 (oben: Variation der Impulsspitzenleistung mit ILM 1, unten: Variation der Impulsdauer von 19 μs auf 42 μs mit ILM 2)

2.6 Vergleich zwischen alter und neuer FSU-Laboranlage

Die vorstehend geschilderten Neu- bzw. Weiterentwicklungen der Grundkomponenten der Laserbohranlage ermöglichten nun den Aufbau des konzipierten kompakten Strahlweges an der FSU-Laboranlage. Nachfolgend illustrieren Bild 19 und Bild 20 die erfolgreiche Vereinfachung des unübersichtlichen alten Laboraufbaus in einen übersichtlich strukturierten neuen Aufbau, der vor allem unter dem Aspekt der mechanischen Stabilität und damit letztlich unter dem Aspekt der Stabilität aller optischen Parameter einen entscheidenden Fortschritt darstellt. Die neue Anordnung erfüllt voll die gesteckten Ziele und wurde deshalb im Hinblick auf den Strahlengang quasi 1:1 auf den geplanten Prototypen in Karlsruhe übertragen.

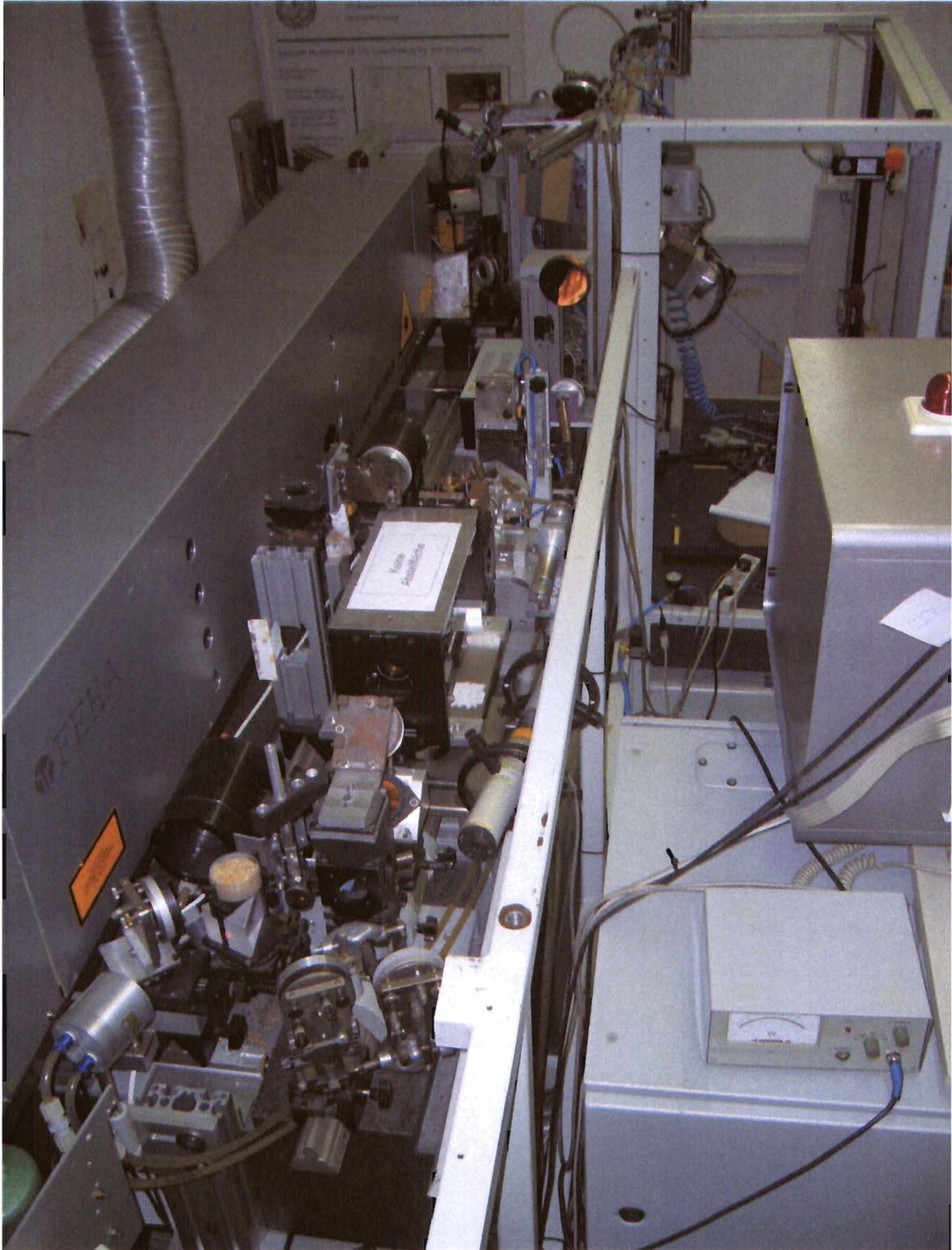


Bild 19: Alter Aufbau der Laboranlage, Stand November 2007

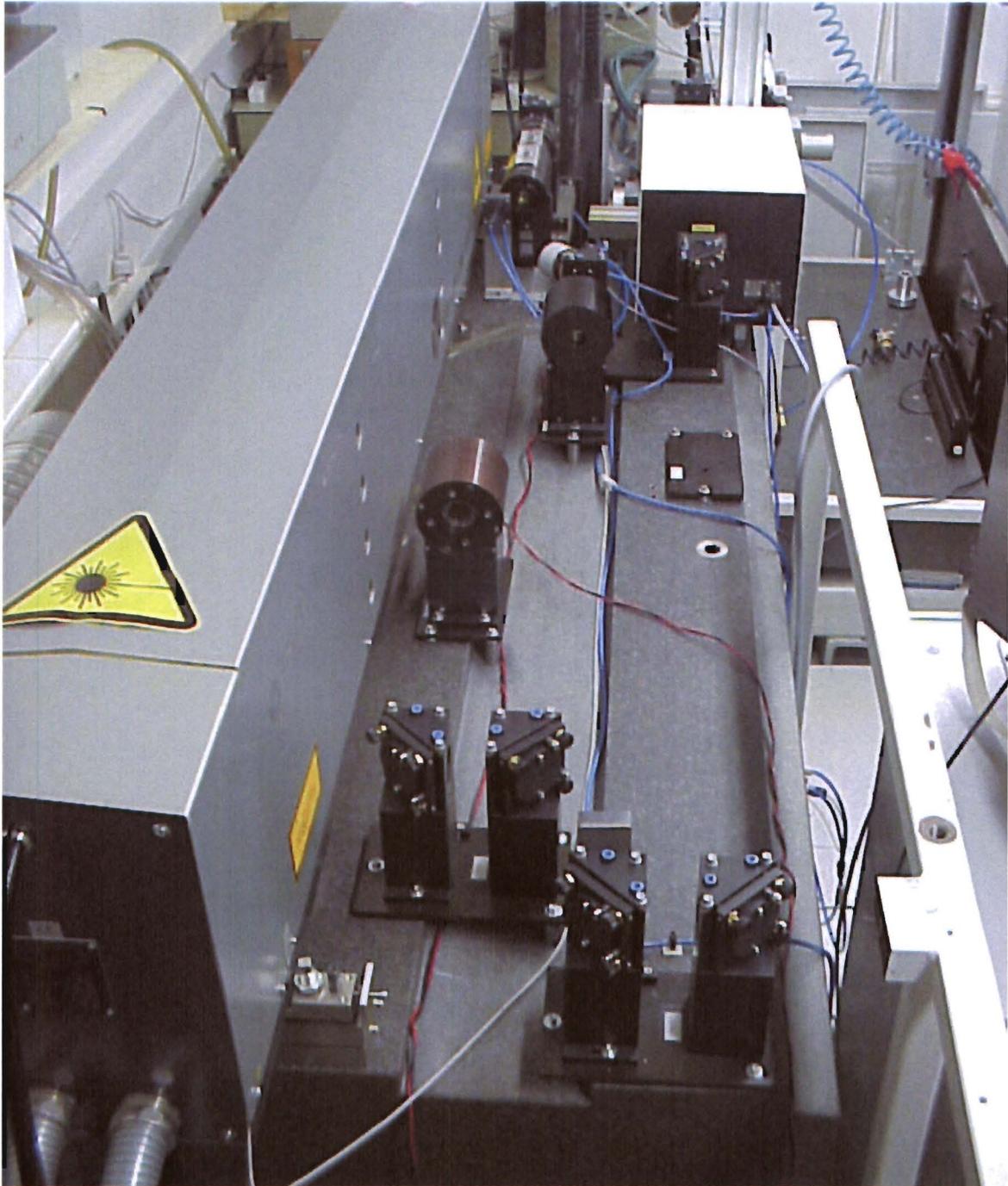


Bild 20: Neuer kompakter Strahlengang der Laboranlage, Stand September 2008

2.7 AP 5: Aufbau der Laserbohrereinheit

Alle in den obigen Punkten aufgezählten Erweiterungen oder Änderungen des Maschinenkonzepts wurden immer auch in Hinblick auf den Aufbau des Prototyps vorgenommen. Alle entstandenen neuen Strahlengang-Komponenten wurden immer in zweifacher Ausfertigung gefertigt und schrittweise parallel der Prototyp errichtet.

So wurde beispielsweise ebenfalls ein Bohrplan für den Prototyp erstellt oder die für den Bohrprozess notwendige Konzeption der Gas- und Wasserversorgung vorgenommen.

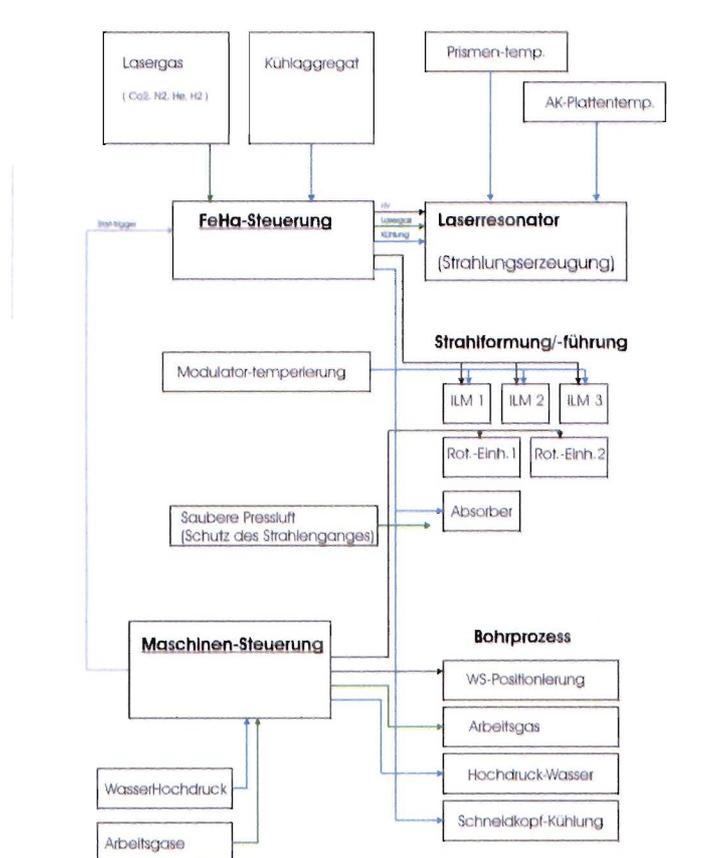


Bild 21: Prinzipskizze der nötigen Anlagenkomponenten

Die Entwicklung wichtiger Teilkomponenten, z.B. auch in Hinblick auf die Werkstückpositionierung für den Prototyp in Karlsruhe, wurde stets in enger Kooperation zwischen dem dortigen Kollegen und den FSU-Mitarbeitern durchgeführt.

2.8 AP 6: Optimierung des Bohrverfahrens und Herstellung von Einspritzdüsen

Die Arbeitsschritte, welche diesem Arbeitspaket zugeordnet werden können, wurden kontinuierlich über praktisch den gesamten Projektzeitraum, d.h. sowohl an der alten als auch an der neuen Bohranlage, durchgeführt.

2.8.1 Positionierung des Werkstücks zur Bearbeitung

Insbesondere die Positionierung in z-Richtung ist durch die scharfe Fokussierung der verwendeten Laseroptiken und die daraus resultierende kurze Rayleigh-Länge des Fokus für die Bearbeitung von immenser Wichtigkeit. Aber auch für die Position des Loches auf dem Düsenrohling (xy-Richtung) sind Genauigkeiten kleiner 1/100 mm gefordert.

Um die notwendige Positioniergenauigkeit des Werkstücks zum Laser-Bearbeitungskopf zu realisieren, wurde ein Messmikroskop mit aufgesetzter CCD-Kamera und online-Überwachung auf einem Monitor in den Laboraufbau übernommen. Mit diesem war es nach einmaligem Einmessen des Relativabstandes zwischen Messmikroskop und Bearbeitungspunkt möglich, das zu bohrende Werkstück in z-Richtung μm -genau und in lateraler xy-Richtung auf 5 μm genau zu positionieren (vgl. Bild 22).

Für den Prototyp wurde eine automatisierte Vermessung der Düsenkörper mittels präziser Lasertaster direkt an der Bearbeitungsposition geplant.

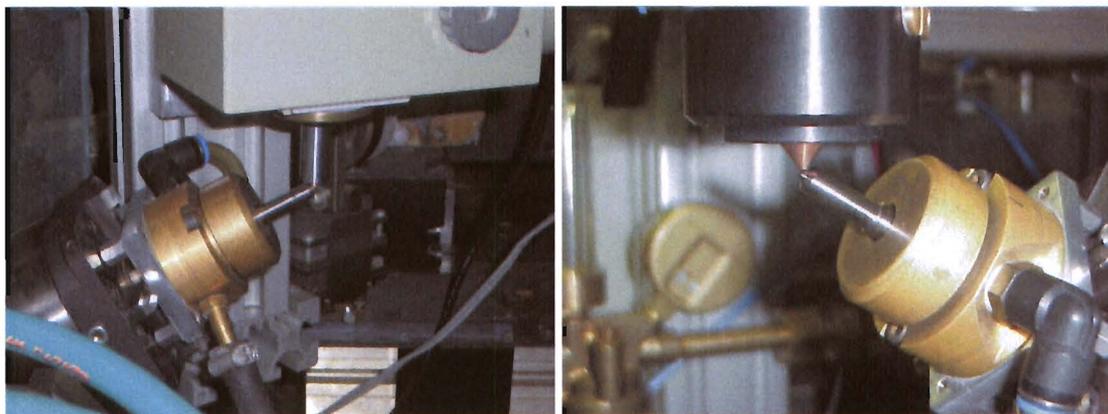


Bild 22: Links: Werkstück an Messmikroskop; rechts: Werkstück an Bearbeitungsposition

2.8.2 Strahlungsabsorption mittels hochabsorbierenden Fluids

Die grundsätzliche Wirkung wurde an einer vereinfachten Anordnung eines rückseitig wasser-gespülten Plättchens nachgewiesen. Die dabei gefundenen Anforderungen an die Wasser-Strömungsgeschwindigkeiten sowie an die erforderliche Glättung des nötigen Drucks bis 100 bar wurden bei dem Aufbau des Hochdruckkreislaufs der Laboranlage berücksichtigt.

Für das Bohren von Dieseleinspritzdüsen wurde ausgehend von diesen Vorversuchen eine Werkstück-Aufnahme mit dem nötigen Hochdruck-Wasserkreislauf konstruiert und gefertigt. Insbesondere wurde dabei sichergestellt, dass die zur Strahlungsabsorption nötigen Fluid-geschwindigkeiten im durchstrahlten Volumen erreicht werden können, bei gleichzeitig notwendigem niedrigem Druck an der Bohrungsinnenseite. Hierzu wurde die düseninterne Strömung analysiert und die Nadelgeometrie entsprechend angepasst. Die technische Umsetzung diesen zentralen Punktes des neuartigen Bohrverfahrens zeigen Bild 23 und Bild 24.

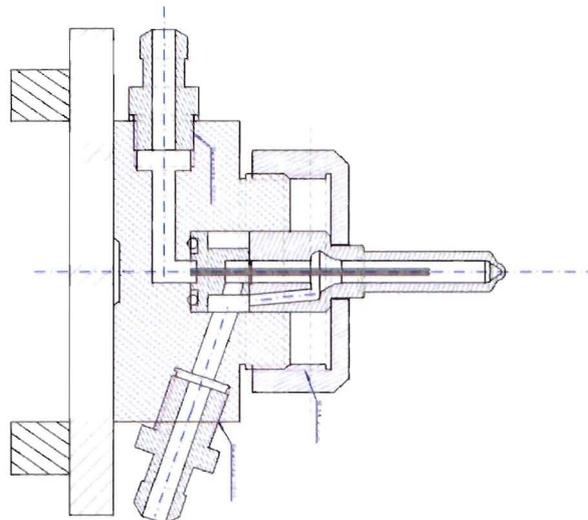


Bild 23: Konstruktionsskizze der hydraulischen Werkstück-Aufnahme

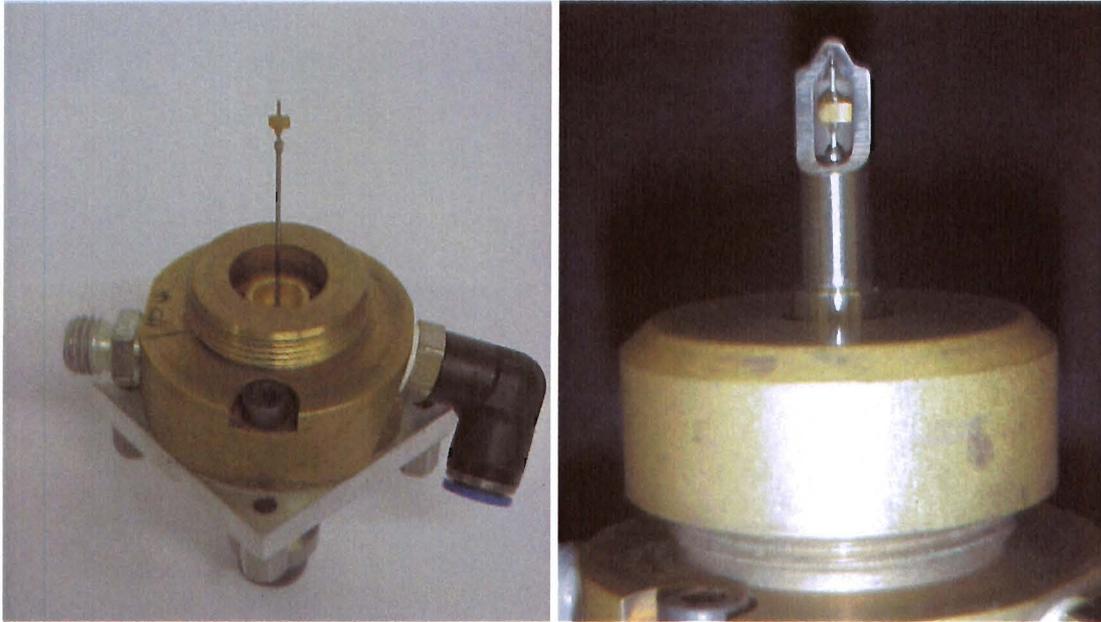


Bild 24: Hochdruck-Werkstück-Aufnahme, rechts mit eingesetzter angeschliffener Dieseleinspritzdüse

2.8.3 Erzielte Bearbeitungsergebnisse

Bis zum Neubau des Strahlenganges der Laboranlage im Juni 2008 wurden parallel weitere Untersuchungen zur Optimierung der Lochform durchgeführt, insbesondere im Hinblick auf eine gezielte Variation des Geometrieverlaufs innerhalb der Bohrung. Bild 25 und Bild 26 illustrieren in gewissem Sinne die Ausgangssituation zu Beginn des Projektes. Es war einerseits mit der alten Laboranlage möglich, Löcher in guter Qualität und den angestrebten Durchmessern in der Größenordnung $100\ \mu\text{m}$ herzustellen, andererseits gab es noch große Schwierigkeiten bei der Erzielung großer Verhältnisse zwischen Bohrungseintritt und -austritt (d_E/d_A), der Qualität der gesamten Lochform und deren Variation in weiten Grenzen sowie letztendlich der Reproduzierbarkeit insgesamt. So illustriert Bild 26, dass bereits damals in einem Düsenkörper bei Wandstärken von $1\ \text{mm}$ sehr gute Bohrungen, allerdings lediglich bei einem Verhältnis $d_E/d_A = 1,3$ eingebracht werden konnten. Damalige Tests zur Variation der Lochform zeigt Bild 25.

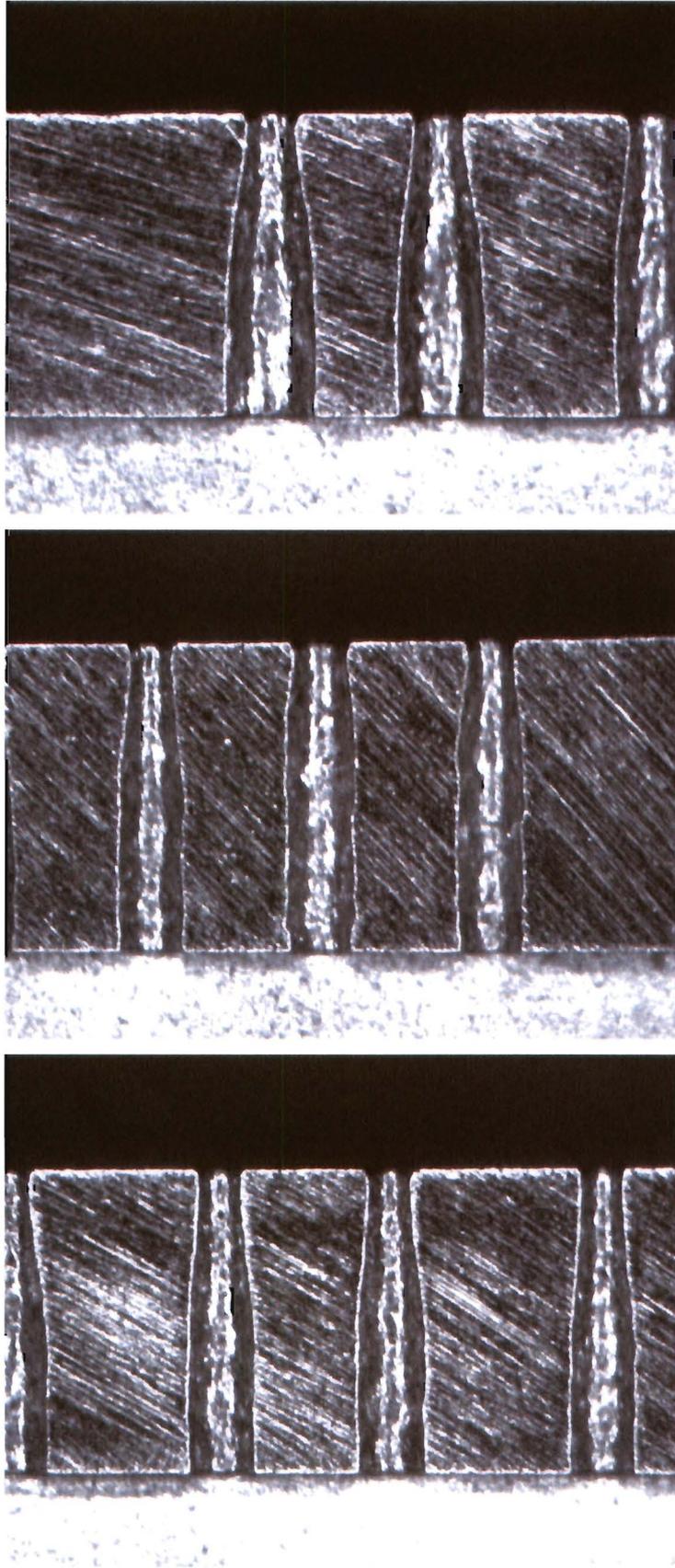
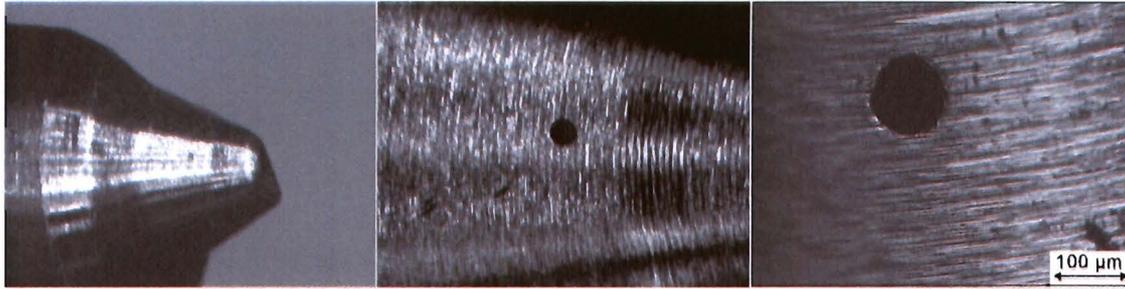
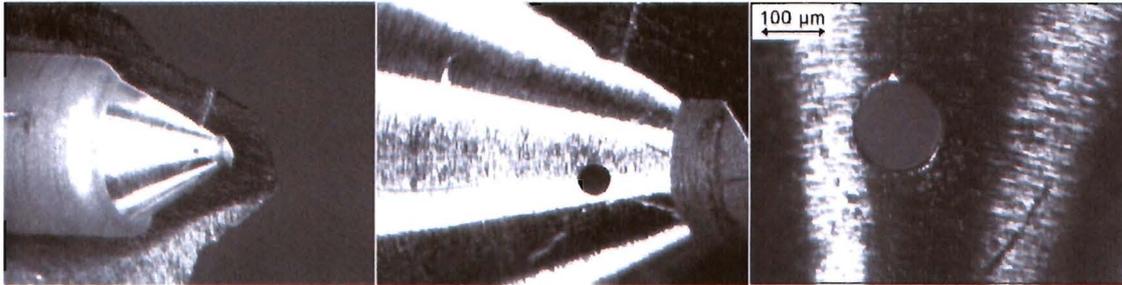


Bild 25: Querschliffe von Bohrungen im 1 mm Wandstärke, Variation der Durchmesser bzw. des Geometrieverhältnisses Eintrittsdurchmesser zu Austrittsdurchmesser



Bohrung in Düse - Außenseite



Bohrung in Düse - Innenseite

Bild 26: Bohrung in einen Düsenkörper, Wandstärke 1 mm

In der Anfangsphase des Projektes erfolgte erstmalig eine Erweiterung der durchbohrten Materialdicken von 1 mm auf 1,3 mm in Zusammenhang mit der beginnenden Kooperation mit der Ingenieurgesellschaft Auto und Verkehr (IAV). Die gebohrte Einspritzdüse besaß 12 Spritzlöcher und diente einer ersten Standortbestimmung im Hinblick auf das Sprayverhalten und die Reproduzierbarkeit der neuartigen flaschenähnlichen Lochformen. Bild 27 zeigt Schliffbilder von Bohrungen, die im Prinzip denen der 12-Loch-Düse äquivalent sind.

Die Resultate der bei IAV durchgeführten optischen Sprayanalyse der 12-Loch-Düse zeigen Bild 28, Bild 29 und Bild 30.

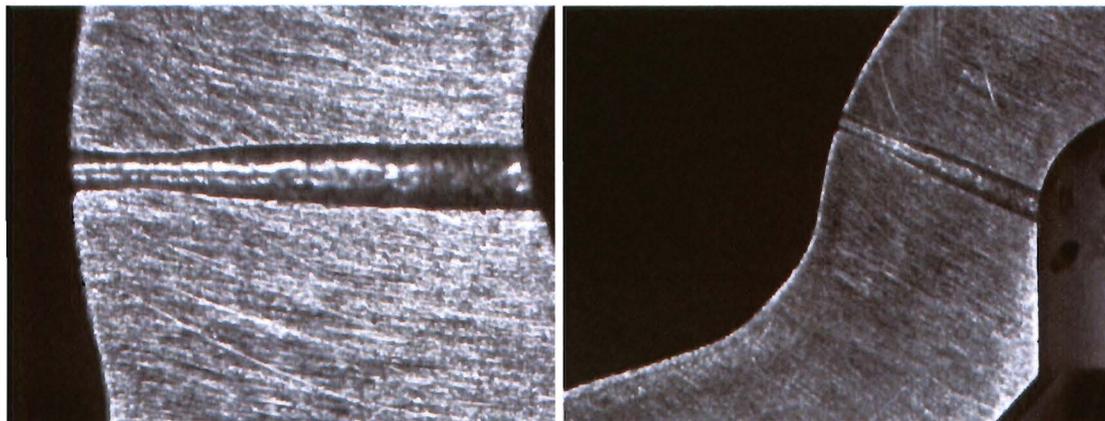


Bild 27: Schliffbilder von Bohrungen in einen Düsenkörper mit 1,3 mm Wandstärke

Optische Sprayanalyse

Einzelbildaufnahmen (Zeit nach start of dig. Injection)



Kammertemperatur: 270°C; Kammerdruck 50 bar; Raildruck: 1800 bar

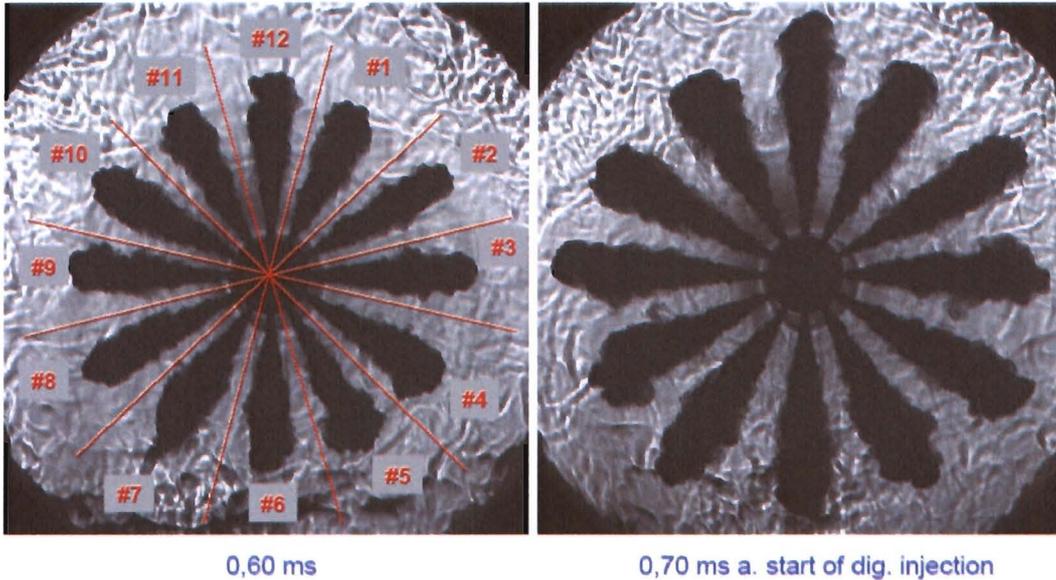


Bild 28: Optische Sprayanalyse lasergebohrter 12-Loch-Düse, [Quelle: IAV]

Optische Sprayanalyse

Auswertung der Spraypenetration

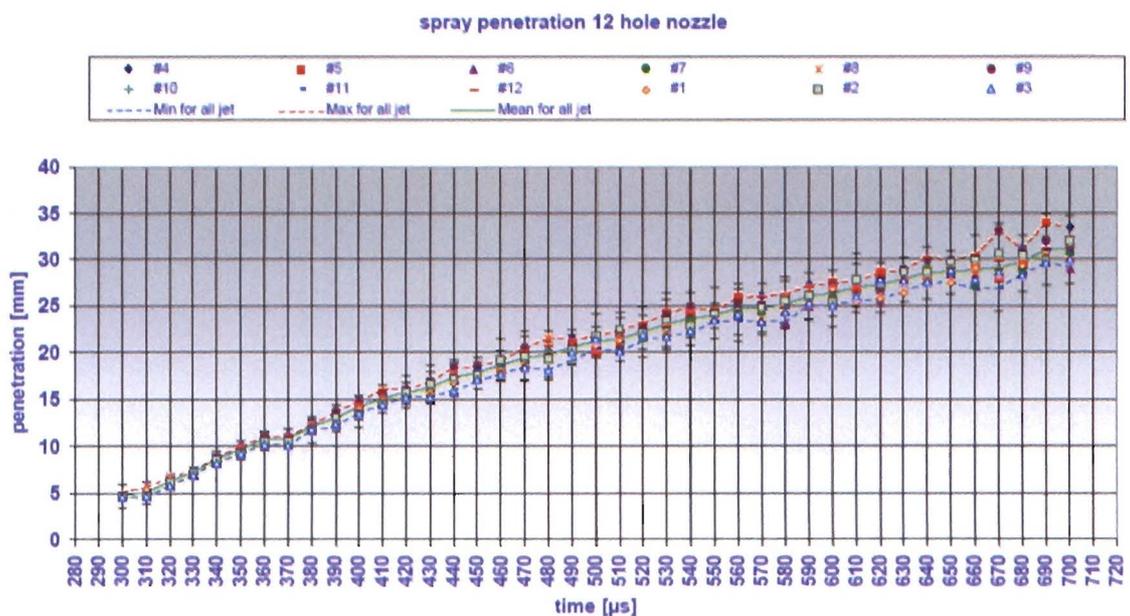


Bild 29: Auswertung der Spraypenetration [Quelle: IAV]

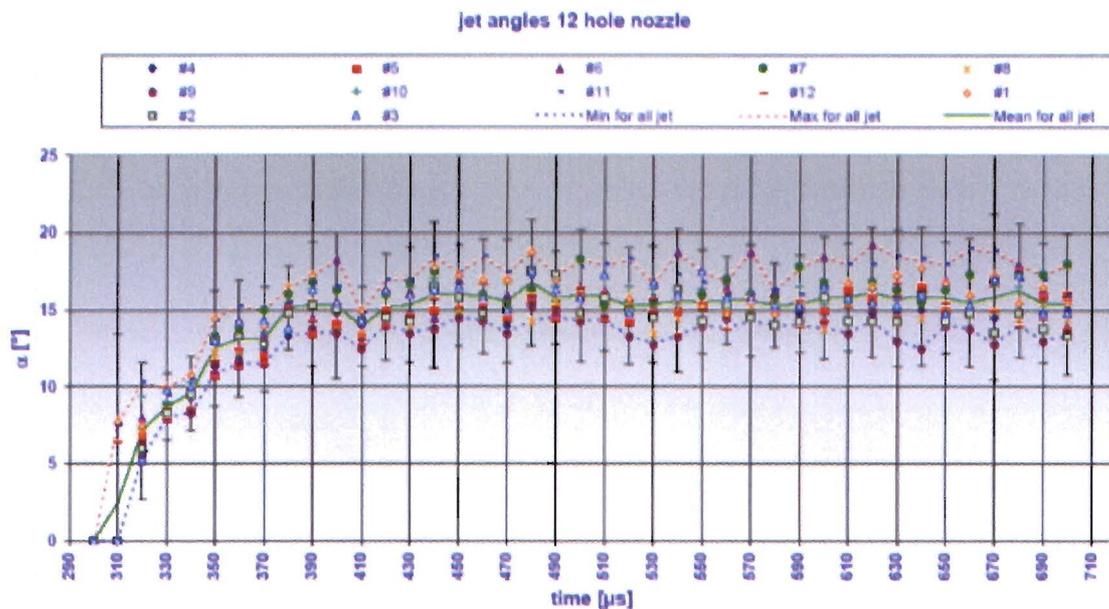


Bild 30: Auswertung der Einzelstrahlwinkel [Quelle: IAV]

Die Diskussion der erzielten Ergebnisse mit Herrn Marohn von der IAV brachte die Aussage, dass die untersuchte 12-Loch-Düse eine ausgezeichnete Basis für die weitere Entwicklung praxistauglicher Düsen darstellt. Dies betrifft sowohl die untersuchten Parameter der entstehenden Dieselsprays als auch die entsprechende Reproduzierbarkeit der untersuchten Bohrungen.

Nachdem der Neuaufbau der Anlage Ende Juni 2008 abgeschlossen war, wurden weitere Untersuchungen zu den nun möglichen Lochdimensionen durchgeführt, und insbesondere eine deutliche Verbesserung der erzielbaren Lochaufweitung bis zu einem Verhältnis von $d_E/d_A = 2,5$ erzielt (Bild 31, Bild 32). Des Weiteren wurde, wie durch die verbesserte mechanische Stabilität erwartet, eine erhebliche Verbesserung der Stabilität des Anlagenjustierzustandes sowie der Reproduzierbarkeit der Bohrgeometrien realisiert (Bild 33).

Das Prinzip zum Schutz der Bohrungsgegenseite durch die Wasserdurchströmung wurde für verschiedene Düsengeometrien erfolgreich angepasst und ein kompletter Schutz der Gegenseite erreicht.

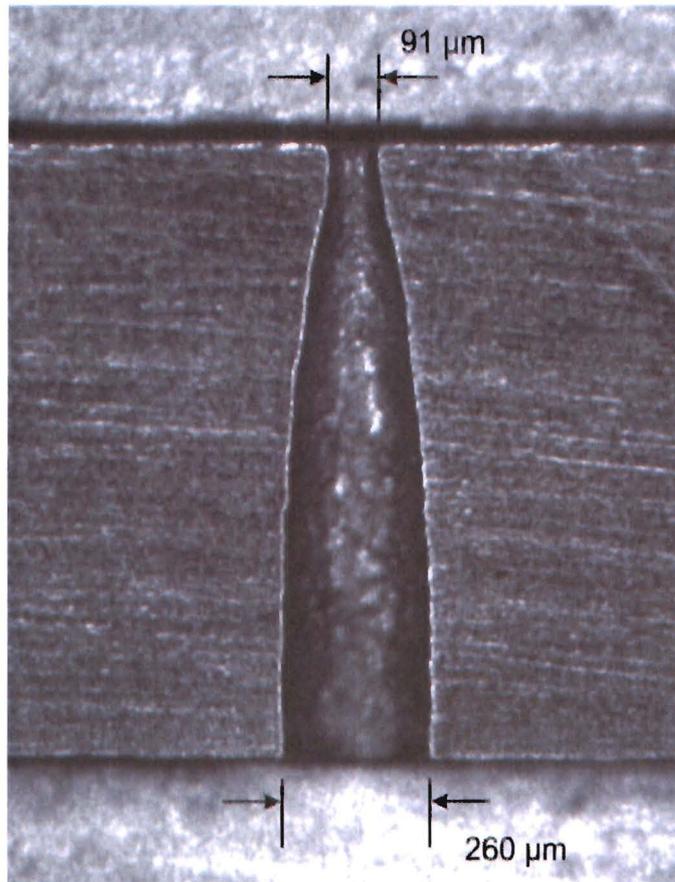


Bild 31: Querschliff einer stark aufgeweiteten Bohrung in 1mm Wandstärke



Bild 32: Querschliff der Bohrung in eine Einspritzdüse

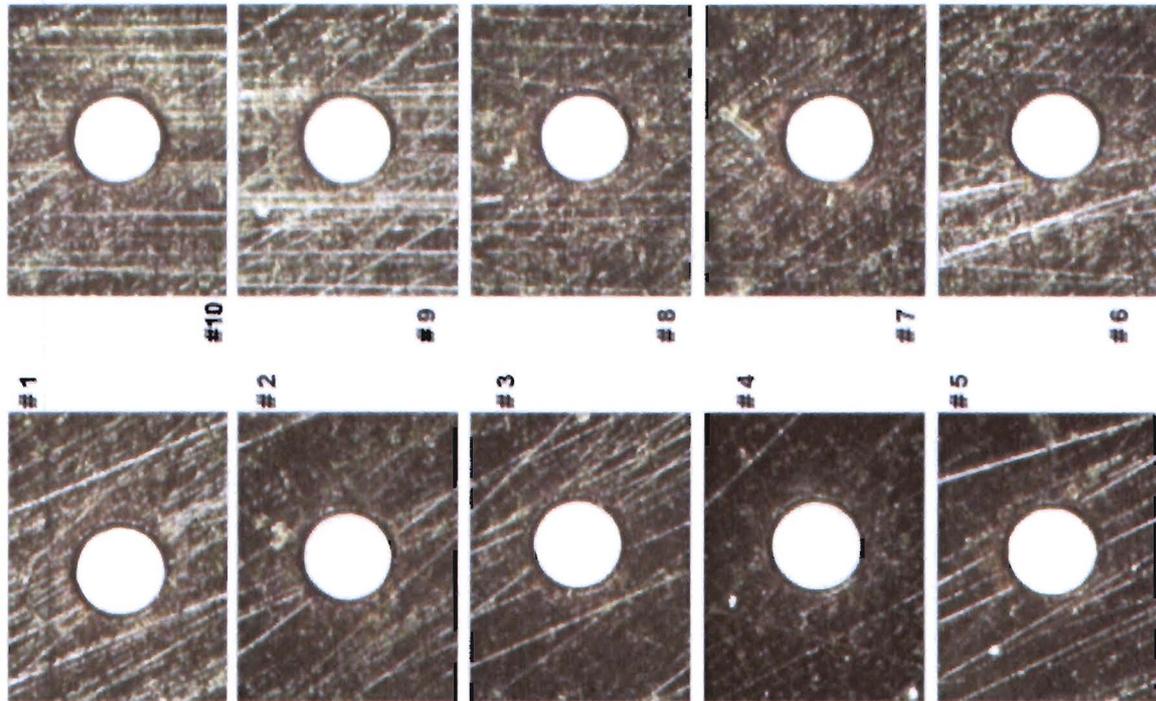


Bild 33: Zur Reproduzierbarkeit des Durchmessers der Laserbohrungen in 1,3 mm 18CrNi8

3. Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die für den Bearbeitungszeitraum 01.10.07-30.09.08 für die FSU Jena definierten Projektziele voll erreicht wurden. Durch die oben dargestellten Verbesserungen des Laboraufbaus in Jena konnte die Reproduzierbarkeit (Langzeitstabilität des Aufbaus) der Bohrerergebnisse deutlich erhöht werden, bei gleichzeitiger Verbesserung der möglichen Bohrgeometrien, insbesondere des Aufweitungsverhältnisses der Bohrungen. Durch die Erhöhung der möglichen Laserspitzenleistung (Umbau der Netzteile) wurde das Bearbeiten von dickeren Bohrungswandstärken bis 1,3 mm ermöglicht. Darüber hinaus wurde umfangreiche Hilfestellung bei der Konzeption und Teilen der Umsetzung des geplanten Prototyps der Laserbohranlage in Karlsruhe geleistet.