

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

[www.dbu.de](http://www.dbu.de)

### **Abschlussbericht AZ 32322/02**

„Erprobung eines scanfähigen Prototyps zur Zusammenarbeit von Laserablation und laserinduzierter Plasmaspektroskopie an metallischen Sekundärrohstoffen unter betriebsnahen Bedingungen“  
(COLA II)

Projektpartner:

PROASSORT GmbH

Clean-Lasersysteme GmbH

SECOPTA analytics GmbH

Verfasst von:

Angelika Feierabend, Philipp Soest, Josef Tholen, Edwin Büchter, Hans-Bernd Pillkahn

November 2017

Beantragt: 23.04.2015

Bewilligt: 03.07.2015

Erster Zwischenbericht: 06.12.2015

Zweiter Zwischenbericht: 15.07.2016

Dritter Zwischenbericht: 27.01.2017

Projektende: 03.07.2017

Nachbewilligte Abgabefrist des Abschlussberichts: 04.12.2017

Förderfähige Gesamtkosten: EUR 701.574

Fördersumme: EUR 270.000

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>32322/02</b>	Referat	<b>21</b>	Fördersumme	<b>270.000 €</b>
----	-----------------	---------	-----------	-------------	------------------

**Antragstitel** **Erprobung eines scanfähigen Prototyps zur Zusammenarbeit von Laserablation und laserinduzierter Plasmaspektroskopie an metallischen Sekundärrohstoffen unter betriebsnahen Bedingungen (COLA II)**

**Stichworte**

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>24 Monate</b>	<b>03.07.2015</b>	<b>03.07.2017</b>	<b>2</b>

Zwischenberichte 06.12.2015, 15.07.2016,  
27.01.2017

**Bewilligungsempfänger** PROASSORT GmbH  
Bärenstein 5  
58791 Werdohl

Tel 02392-806655-0  
Fax 02392-806655-9

**Projektleitung**  
Dr.-Ing. Hans-Bernd Pillkahn

**Bearbeiter**  
Feierabend, Büchter, Pillkahn,  
Soest, Tholen

**Kooperationspartner** Clean-Lasersysteme GmbH  
Dornkaulstraße 6  
52134 Herzogenrath

SECOPTA analytics GmbH  
Rheinstr. 15b  
14513 Teltow

***Zielsetzung und Anlass des Vorhabens***

Erhöhte Ansprüche in der Metallurgie von Eisen- und Nichteisenwerkstoffen sowie die Forderungen nach verbesserter Rohstoffnutzung und nach energieoptimierten Schmelzverfahren machen eine dezidierte Trennung der Gattierung von Sekundärrohstoffen nach Legierungsgehalten in Zukunft unerlässlich. Das einzige weit entwickelte und dazu geeignete physikalische Verfahren ist die laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS). Nachteil des Verfahrens ist die Sensitivität der Messung auf Oberflächenbeläge, die gerade bei der Anwendung auf Schrotte der entscheidende Nachteil ist. Ziel des Vorhabens ist, eine aufgabengerechte Oberflächenvorreinigung „durch Licht“ (Laserablation) mit dem LIBS Verfahren zu kombinieren und so schnell zu machen, dass große Metallströme wirtschaftlich zu assortieren sind.

***Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden***

In einem Vorprojekt COLA I (Collaboration of LIBS and Laser Ablation) -beginnend am 26.08.2014- wird im Labor die grundsätzliche Eignung einer solchen Kombination von Verfahrensschritten unter Einsatz einer einzigen Laserquelle nachgewiesen.

In COLA II wird das Verfahren in Schritten auf die betriebsnahe Anwendung auf großformatige Stanzschrotte ausgerichtet. Dieser Anwendungsbereich ist für LIBS bis dato unerschlossen.

Der Laboraufbau aus COLA I wird dazu in einen Prototypen für die Sensoreinheit transformiert, dieser in eine eigens aufgebaute, vollintegrierte Assortieranlage für großformatige Stanzschrotte integriert und der Prototyp auf der Grundlage umfangreicher betriebsnaher Versuchsreihen schrittweise verbessert.

### ***Ergebnisse und Diskussion***

Die angestrebte Verfahrensabfolge von Laserablation und LIBS kann für reproduzierbare, betrieblich verwertbare Ergebnisse präzise und für wirtschaftlichen Durchsatz schnell genug geleistet werden. Der Prototyp hat somit seine grundsätzliche Eignung als Sensor für eine sensorbasierte Assortiertechnologie an großformatigen Schrotten unter Beweis gestellt. Allerdings wird gefunden, dass die Scanbreite eines einzigen solchen Systems aus lichteoptischen Gründen bei hohem Anspruch an die Qualität der Messwerte derzeit 200mm nicht überschreiten soll.

Ausstehende Aufgabe ist nun, mehrere solcher Sensoreinheiten über der Breite eines Sortierbandes zu kombinieren, datentechnisch zu verschalten und Durchsatz und Sortiergrad zu ermitteln.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Das Verfahren und der Stand der Technik wird am 16.03.2016 auf der Internationalen Automobil Recycling Conference (IARC) in Berlin, am 04.11.2016 im Stahlzentrum in Düsseldorf, am 16.03.2017 auf der International Wrought Copper Conference (IWCC) in München und am 27.06.2017 auf der European Metallurgical Conference (EMC) in Leipzig vorgestellt. Zudem ist PROASSORT mit diversen potentiellen Anwendern aus Automobil-, Recycling- und Metallindustrie in ständigem Kontakt.

### ***Fazit***

Mit der DBU Förderung sind höchst notwendige und entscheidende Schritte zur Anwendung des LIBS Verfahrens für die zirkuläre Wertschöpfung von Metallen unternommen worden. Die Akzeptanz der Industrie wird offenbar erst mit dem Betrieb einer Demonstrationsanlage geschaffen. Dies muss nächstes Ziel sein.

## Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen .....	6
1. Zusammenfassung .....	7
2. Einleitung .....	8
3. Hauptteil .....	12
3.1. Laboraufbau mit Lineareinheit .....	12
3.1.1 Systemaufbau .....	12
3.1.2 Funktionstest .....	12
3.1.3 Validierung Ablationsfläche .....	14
3.1.4 Prozesszeiten für Vorablations- und LIBS-Flächen .....	15
3.2 Prototyp über Transportband .....	16
3.2.1 Prototyp 1.0 .....	16
3.2.2 Objekterkennung .....	17
3.2.3 Ablationsleistung über dem Förderband .....	19
3.2.4 Chromatische Aberration .....	21
3.2.5 Ermittlung der LIBS-Parameter .....	24
3.3 Aufbau der Gesamtanlage .....	26
3.3.1 Förder- und Vereinzelungsanlage .....	27
3.3.2 Umbau Förder- und Vereinzelungsanlage .....	28
3.3.3 Benutzerschnittstelle und Bedienkonzept .....	29
3.3.4 Luftimpuls-Sortiertechnik .....	30
3.3.5 Fraktionierung .....	31
3.3.6 Durchsatzermittlung .....	32
3.4 Prototyp 2.0 .....	35
3.5 LIBS-Analytik .....	36
4 Fazit .....	41
5 Literaturverzeichnis .....	41
Rückendeckel .....	42

## Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildung 1: Breadboard-Aufbau inklusive Lineareinheit.....	12
Abbildung 2: Probenaufnahme der Lineareinheit inkl. der Proben .....	13
Abbildung 3: Falschfarbendarstellung der Objekterkennung; Schwerpunkt: rotes Kreuz, Ort für LIBS-Messung: weißes Rechteck.....	13
Abbildung 4: Vorablation und LIBS-Messung .....	14
Abbildung 5: LIBS Spektralanalyse.....	14
Abbildung 6: Ablationsfläche erzeugt bei $v=3\text{m/s}$ .....	15
Abbildung 7: Prototyp über Band, Draufsicht .....	17
Abbildung 8: Objekterkennung über dem Band .....	18
Abbildung 9: Probeteile für Objekterkennung .....	19
Abbildung 10: Objekterkennung Ausgabe Software.....	19
Abbildung 11: Messpunkt bestehend aus Vorablations- und LIBS-Fläche 1 .....	20
Abbildung 12: Abtragtiefe bei Aluminium .....	20
Abbildung 13: Vermessung von Ablationsflächen auf Messmikroskop.....	21
Abbildung 14: Intensitätsshift bei verschiedenen Distanzen .....	22
Abbildung 15: Chromatische Aberration .....	22
Abbildung 16: Strahlverlauf minimaler Abstand .....	23
Abbildung 17: Strahlverlauf maximaler Abstand .....	23
Abbildung 18: Fokusshift bei minimalem und maximalem Abstand.....	23
Abbildung 19: Aufbau mit Hohlleiter.....	24
Abbildung 20: Auswertung Parameterstudie LIBS-Parameter.....	26
Abbildung 21: Integrierte Versuchsanlage in produktionsnaher Abmessung.....	27
Abbildung 22: Förder- und Vereinzelungsanlage .....	28
Abbildung 23: Draufsicht - Förder- und Vereinzelungsstrecke .....	28
Abbildung 24: Skizze Förder- und Vereinzelungsstrecke - Seitenansicht.....	29
Abbildung 25: Skizze Förder- und Vereinzelungsstrecke - Draufsicht.....	29
Abbildung 26: Datentechnische Grundplanung.....	30
Abbildung 27: Schematischer Aufbau der Luftimpuls-Sortiertechnik .....	31
Abbildung 28: Fraktionen 1 bis 3 .....	32
Abbildung 29: Durchsatz und Sortierergebnis Fraktion 1 .....	33
Abbildung 30: Durchsatz und Sortierergebnis Fraktion 2.....	33
Abbildung 31: Durchsatz und Sortierergebnis Fraktion 3.....	34
Abbildung 32: Durchsatz und Sortierergebnis gemischte Fraktion .....	34
Abbildung 33: Abschätzung Durchsatz .....	35
Abbildung 34: Drei Prototypen der 2. Generation, Entwurf Rückansicht .....	36
Abbildung 35: Drei Prototypen der 2. Generation, Entwurf Frontansicht .....	36
Abbildung 36: Kalibrierproben - Legierungselement Mn .....	37
Abbildung 37: Kalibrierproben - Legierungselement Cr.....	37
Abbildung 38: Gegenüberstellung der gemessenen Konzentrationswerte und der Referenzwerten von Mangan .....	38
Abbildung 39: Gegenüberstellung der gemessenen Konzentrationswerte und der Referenzwerten von Chrom .....	38
Abbildung 40: Eloxiertes Aluminiumschrottstück.....	39
Abbildung 41: Abmaße der Analysefläche - Messung bei einer Förderbandgeschwindigkeit von $3\text{ m/s}$ .....	40
Abbildung 42: Ablationstiefe - Messung bei einer Förderbandgeschwindigkeit von $3\text{ m/s}$ .....	40

## 1. Zusammenfassung

In Vorversuchen unter dem Projektteil COLA I (COLA = Collaboration of LIBS and Laser Ablation) wird nachgewiesen, dass die Laserablation eine ausreichend große Fläche auf der Oberfläche von Sekundärrohstoffstücken reinigen kann und somit der eigentliche LIBS-Messvorgang im Grundmaterial stattfindet. Die für eine LIBS-Messung störende Oberflächenverunreinigungen sowie Oberflächenbeschichtungen wie Lacke oder verzinkte Oberflächen lassen in der Messfläche rückstandslos entfernen.

Ein Prototyp des Sensorsystems wird unter dem Teilprojekt COLA II entwickelt. Danach wird das Sensorsystem in eine Assortieranlage für Stanzschrotte eingebaut und inklusive der Luftimpulssortierung datentechnisch integriert. Die Anlagentechnik für die Aufgabe, auch großformatige Stanzschrotte zu assortieren, dürfte weltweites Alleinstellungsmerkmal haben. Es können die Zusammenhänge und insbesondere die datentechnische Verknüpfung zwischen Einzelfunktionen wie den Lichtschnittkameras zur Objekterkennung, dem scanfähigen Lasersensor zur kombinierten Ablation und LIBS-Messung „on the fly“ und der Signalgebung an das Luftimpulssortiersystem unter betriebsnahen Bedingungen erfolgreich erprobt werden.

Die Versuche führen zur schrittweisen Verbesserung der lichtoptischen Leistung in einem zweiten, weiterentwickelten Prototyp und dem Einbau geschwindigkeitssteigernder Komponenten.

Mit dieser Anlagentechnik wird wegen der aktuellen Marktrelevanz das Assortieren von Aluminiumschrotten ausgiebig und erfolgreich erprobt.

Projektpartner sind unter Projektleitung der PROASSORT GmbH, Bärenstein 5, 58791 Werdohl, die Clean-Lasersysteme GmbH, Dornkaulstraße 6, 52134 Herzogenrath, und die SE-COPTA analytics GmbH Rheinstr. 15b, 14513 Teltow bei Berlin.

Im Rahmen des DBU Projekts haben die Projektpartner eine COLA-basierte Assortieranlage bis zum technologischen Reifegrad 7/8 (TRL = technology readiness level) entwickelt. Wir empfehlen nun den Bau einer ggf. öffentlich geförderten Demonstrationsanlage, um weitere Erkenntnis über betriebliche Abläufe, technische Anwendungen und wirtschaftliche Ergebnisse zu sammeln und erkannte Verbesserungspotentiale zu realisieren. So kann der letztgültige Beweis für die Industrietauglichkeit des Verfahrens geführt werden.

Wir danken der Deutsche Bundesstiftung Umwelt, die das Projekt COLA II unter dem Aktenzeichen 32322/02 mit förderfähigen Gesamtkosten i.H.v. EUR 701.574 im Rahmen der Richtlinien gefördert hat.

## 2. Einleitung

Die Strategie der „Zirkulären Metallwirtschaft“ („closed loop recycling, cradle-to-cradle“) gewinnt auch in Deutschland langsam Gestalt. Erste interessante Projekte wie der direkte Übersatz von Aluminium-Stanzschrotten als Rohstoff für die Aluminium-Feinblecherzeugung mit hohem recycelten Inhalt („recycled content“) sind in der Diskussion bzw. in Umsetzung.

Entscheidend ist die „serienreine“ Trennung der Schrotte nach Legierungsgehalten, da die Möglichkeiten der Abreicherung der Schmelze von störenden Legierungselementen metallurgisch oder wirtschaftlich eingeschränkt sind und in jedem Fall mit erheblichen Umweltlasten einhergehen.

Derzeit sich in der Schrottwirtschaft im Einsatz befindliche Sensorsysteme können die zum Assortieren, also dem Sortieren nach Legierungsgehalt, notwendige Information über die präzise Legierungszusammensetzung eines Schrottstücks nicht oder nicht in der erforderlichen Zeit, d.h. nicht wirtschaftlich, geben. Die laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS=laser induced breakdown spectroscopy) ist das einzige physikalische Analyseverfahren, das die Aufgabe, nämlich die Analyse von Legierungselementen von ähnlicher Atommasse wie der Trägerwerkstoff selbst (Beispiel Si und Mg in Al oder Mn und Cr in Eisen), in wenigen zehn Millisekunden vom Grundsatz her lösen kann. Das Verfahren ist wegen der hochentwickelten Laser- und Datenverarbeitungstechnik präzise und schnell in der Auswertung und ermöglicht pro Zeiteinheit große und damit wirtschaftliche Sekundärrohstoff-Prüfmengen.

Gleichwohl ist die LIBS nach heutigem Stand der Technik mit werkstoffabhängigen Eindringtiefen des Laserpulses von wenigen Mikrometern ein oberflächensensitives Messverfahren. Alle Fremdatome auf und in der Oberfläche und alle Legierungsanreicherungen („Seigerungen“) unter der Oberfläche des Sekundärrohstoffstücks beeinflussen das Messergebnis und beweisen die äußerst bedingte Einsatzfähigkeit des Systems für Sekundärrohstoffe, wenn deren Oberfläche oxidiert, verschmutzt oder mit metallischen und organischen Schichten belegt ist.

Die ressourcenintelligente Wiederverwertung von Metallschrotten ist aber für die deutsche Industrie von vitaler wirtschaftlicher Bedeutung. Dabei muss zukünftig die Erschmelzung von Hochleistungswerkstoffen aus Schrotten bei geringstmöglichem Energieeinsatz, nahezu vollständigem Metall- und insbesondere Legierungsmetallausbringen und geringst möglichem Anfall an umweltbelastenden Kuppelprodukten wie Schlacken, Stäuben und Gasen erreicht werden.



In Deutschland werden jährlich rd. 50 Millionen Tonnen Metall erzeugt. Hierzu werden rd. 25 Mio. Tonnen Metallgehalt als Primärrohstoffe, 22 Mio. Tonnen über Metallschrotte als Sekundärrohstoffe und rd. drei Millionen Tonnen Legierungsmetalle eingesetzt. Es entstehen dabei im Status quo mehr als 50 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> und mehr als 15 Mio. Tonnen Schlacken und Stäube.

Rd. 10 Mio. Tonnen in Deutschland gesammelte Schrotte werden jährlich exportiert. Wesentlicher Grund hierfür ist, dass die Schrotte wegen undefinierter chemischer Zusammensetzung nicht an die Hochleistungsschmelzprozesse der deutschen Metallwirtschaft angeschlossen werden können. Stattdessen wird Primärrohstoff importiert.

Beim Einsatz von Sekundärrohstoffen anstelle von Primärrohstoffen können hochgerechnet auf den Gesamterzeugungsweg pro Einheit bei Aluminium 92% und bei Kupfer 31% an Energie eingespart und 93% respektive 51% an CO<sub>2</sub>-Ausstoß vermieden werden.

Gelingt es, mit einer einzelnen Assortieranlage mit integriertem COLA-Sensor 10.000 Tonnen Stahlschrott pro Jahr zu einer Hochleistungsgattierung zu assortieren, diese für die Erzeugung von Hochleistungswerkstoffen einzusetzen und dadurch Primärrohstoffe in diesem Umfang zu ersetzen, werden rd. 27.000 MWh Primärenergie und rd. 11.000 Tonnen CO<sub>2</sub> und der Import von rd. 200 Tonnen Legierungsmetallen im Wert von rd. EUR 0,8 Mio. vermieden. Gelänge es theoretisch, die 10 Mio. Tonnen heute exportierter Schrotte im Inland zu gebrauchen und damit entsprechende Mengen an Primärrohstoffen abzulösen, wären etwa 1000 Assortieranlagen erforderlich, die 27 TWh Energie einsparten, 11 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> reduzieren und 200.000 Tonnen Legierungsmetalle einsparten.

In heutigen Schmelzverfahren entstehen erhebliche Mengen an metalloxydreichen Schlacken und Stäube. Rd. 15 Mio. Tonnen erzeugter Elektro Stahl vernichten beim Einschmelzen von Stahlschrott rd. 2 Mio. Tonnen Eisen und Legierungsmetalle und erzeugen dabei allein in Deutschland jährlich mehr als 3 Mio. Tonnen Schlacken und etwa 250.000 Tonnen Stäube zur Deponierung. Schlacken fallen i.w. durch die benötigten Gleichgewichtsreaktionen zur Entfernung von nicht brauchbaren Legierungsmetallanteilen in der Gattierung an. Stäube entstehen durch den Ofenauswurf im Abgasstrom. Ein neues Stahlschmelzverfahren als Kombination aus verbesserter Gattierung und Induktionsschmelzen kann den Metallverbrauch, den Energiebedarf und den Schlacke- und Staubanfall drastisch reduzieren.

Die Wiederverwertung von Schrotten in geschlossenen Kreisläufen ist aus ökologischer und volkswirtschaftlicher Sicht zwingend. Letztlich ist dies nur mit der LIBS möglich.

In **COLA I** ist die Laborvorrichtung entwickelt worden, die mit einem Hochleistungslaser Oberflächenverunreinigungen von Metallschrotten verdampft und anschließend deren Legierungszusammensetzung analysiert. Dazu wird mit einer „Mikro“-Scaneinrichtung zuerst eine Fläche von mindestens etwa  $0,2\text{mm}^2$  auf der zu reinigenden Oberfläche ablatiert.

Mit demselben Laser wird unmittelbar anschließend eine LIBS-Analyse des Rohstoffstücks vorgenommen. Dazu wird ein sogenannter Burst generiert, der für das Spektrometer genügend auswertbares „Licht“ erzeugt. Während eines Bursts bewegt sich das Schrottstück mit hoher Fördergeschwindigkeit in Transportrichtung. Die Messung erfolgt bei hoher Fördergeschwindigkeit von min.  $3\text{m/s}$  mitlaufend („on the fly“).

In **COLA II** wird diese Laborvorrichtung in der Entwicklungs- und Fertigungsphase in einen Prototyp des COLA-Sensors entwickelt und verbaut und in drei weiteren Testphasen unter wachsenden Schwierigkeitsgraden erprobt.

Die Entwicklungs- und Fertigungsphase beinhaltet den kompletten Weg von der Anpassung der Laborvorrichtung auf den Modulstandard bis zur Endfertigung und dem Systemtest des Prototypen. Dazu gehört die Erfüllung der Anforderungen des Systems für die Implementierung aller Komponenten in einem Gehäuse unter Berücksichtigung der Möglichkeit, mehrere Geräte nebeneinander über einem Förderband positionieren zu können. Die Schnittstellen zur Übertragung auswertungsspezifischer Daten (z.B. Objekterkennung, Positionsübertragung, Pulsanzahl) müssen definiert und elektrisch geplant werden. Unter Berücksichtigung von begrenzten Abmaßen wird ein Optikmodul konstruiert und gefertigt, um es als Baustein in das Gesamtgerät implementieren zu können. In diesem Zusammenhang wird ein Konzept für Steuersignale und Kühlvorgänge erstellt und umgesetzt. Am Ende der Entwicklungs- und Fertigungsphase werden alle Komponenten nach den erstellten Plänen zusammengesetzt und das Gerät einem umfangreichen Systemtest unterzogen.

In Testphase 1 werden die Funktionen geprüft. So muss die ablatierte Fläche in Länge und Breite so gewählt werden, dass die Reinigungspulse synchron mit der hohen Fördergeschwindigkeit eine Fläche „finden“ und mehrlagig freilegen. Letztendlich müssen dann die LIBS-Messpulse trotz Systemschwingungen mit ausreichender Sicherheit in diese ablatierte Fläche „passen“. Die Parametrierung wird zuerst auf einer Präzisions-Linearführung, anschließend auf einem  $1200\text{mm}$  breiten und bis zu  $6\text{m/s}$  schnell laufenden Transportband vorgenommen. Im Zuge der Parametrierung werden Untersuchungen zur Verbesserung der chemometrischen Auswertung durchgeführt. Zusätzlich wird die deutliche Erhöhung der Messfrequenz getestet, um durch eine erhöhte Anzahl von Messwerten den statistischen Fehler zu minimieren.

Eine vorgeschaltete Objekterkennung der Schrottteile auf dem Transportband ermöglicht eine Erfassung der Schrottteile über die Breite der zuführenden Fördertechnik. Dabei werden solche „Felder“ ohne sprungfixe Profiländerung identifiziert, die zur Ablation und zur Analyse geeignet sind. Anschließend bewegt sich der COLA-Sensor mit seiner „Makro“-Scaneinheit zum Schrottstück.

In Testphase 2 ist auf dem Transportband mit vorgeschalteter Objekterkennung der Nachweis zu führen, dass Schrotte aufgabengerecht mit unterschiedlichen Geometrien erfasst, ablatiert und analysiert werden können und welche wirtschaftliche Durchsätze durch die Zeitbilanz des COLA-Sensors erreichen lassen.

Nach Nachbesserungen am System wird der COLA-Sensor zu einer Testphase 3 in die PROASSORT Förder- und Vereinzelungsvorrichtung integriert.

Diese Vorrichtung besteht aus einem Schwingbunker zur Aufnahme der Schrotte, einer besonders konstruierten Schwingförderrinne zur Einflussnahme auf die Schrottkinetik und damit auf die Verteilung in Transportrichtung und zu ihr lateral, einem besonders schwingungsarm konstruierten, schnell laufenden Transportband und einer Luftimpuls-Sortiereinheit. Der stochastische Massenstrom aus dem Schwingbunker soll i.w. durch die Geschwindigkeitsdifferenz der Fördereinheiten in Förderrichtung so auseinandergezogen werden, dass in Förderrichtung weitgehend hintereinander angeordnete Schrottstücke in einer Zufühbreite von max. 400mm unter dem COLA-Sensor hindurchgeführt werden.

In Testphase 3 wird mit der Förder- und Vereinzelungsvorrichtung in Kombination mit dem Cola-Sensor der Nachweis geführt, dass diese unter den von kleinsten und größten Schrottstückabmessungen abhängigen Verhältnissen eine genügende Anzahl an Schrottstücken erfasst, die Schrottstücke in spezifikationsgerechter Genauigkeit und Wiederholbarkeit analysiert, einen Durchsatz in Tonnen pro Betriebszeitstunde ermöglicht, der die Schrottanalyse wirtschaftlich sein lässt.

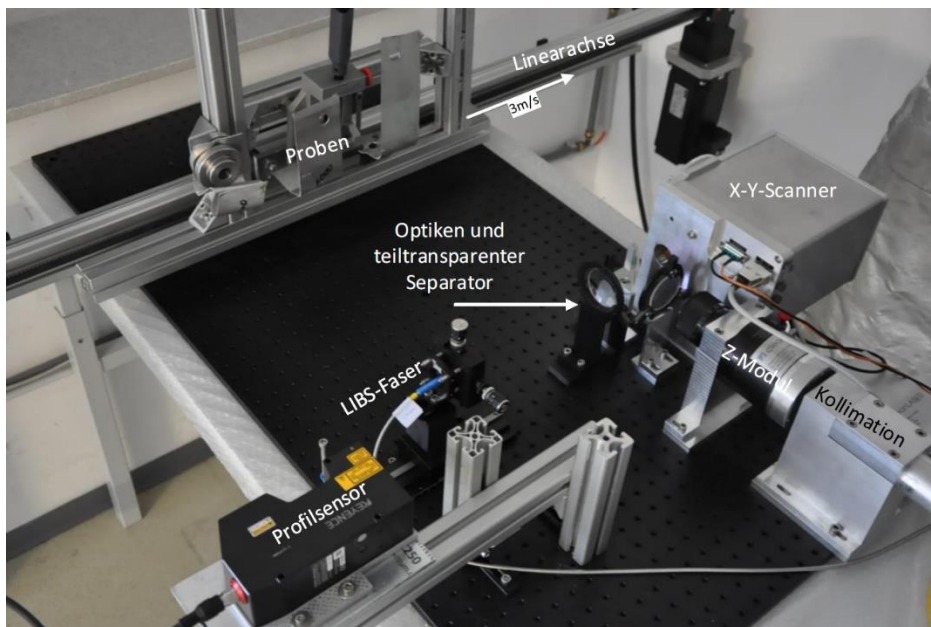
Nach erfolgreicher Durchführung und entsprechenden Nachweisen ist der Einsatz für den Cola-Sensor insbesondere für volkswirtschaftlich bedeutende Felder der Sekundärrohstoffwirtschaft vom Grundsatz her nachgewiesen.

### 3. Hauptteil

#### 3.1. Laboraufbau mit Lineareinheit

##### 3.1.1 Systemaufbau

Nachdem alle Funktionen der lichtoptischen Einzelkomponenten im statischen Breadboard-Aufbau unter COLA I validiert werden können, wird das System durch eine Lineareinheit inklusive Probenaufnahme ergänzt. Die Lineareinheit ist in der Lage, die Proben auf eine Geschwindigkeit von bis zu 5 m/s zu beschleunigen, was eine Untersuchung einzelner und mehrerer Proben unter dynamisch, realistischen Bedingungen ermöglicht.



**Abbildung 1:** Breadboard-Aufbau inklusive Lineareinheit

##### 3.1.2 Funktionstest

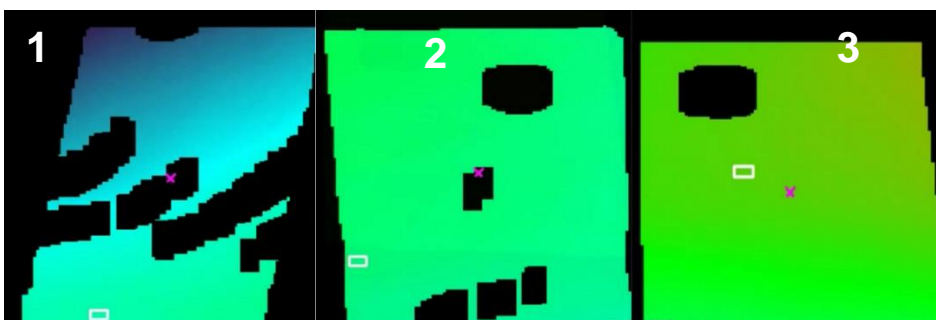
Zur Erprobung der Objekterkennung werden drei Aluminiumproben auf der Probenaufnahme der Lineareinheit in einem Abstand von ca. 60mm voneinander montiert. Die erste und die letzte Probe sind Aluminiumproben der Legierungsklasse Al 5000 - die mittlere Probe ist aus der Legierungsklasse Al 6000.



**Abbildung 2:** Probenaufnahme der Lineareinheit inkl. der Proben

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse einer Durchfahrt gezeigt. Als erstes erfolgt die Objekterkennung. Die Topographie der Probe wird vermessen und hieraus der geeignete Ort für die LIBS Messung ermittelt. Diese Fläche soll -wenn immer möglich- normal zum auftretenden Laserstrahl stehen. Zum anderen wird der Schwerpunkt der Probe ermittelt. Als zweites übernimmt der scannende Laserstrahl die Vorablation in dem dafür in optimaler Lage bestimmten Feld auf der Probe. Nach der Vorablation erfolgt durch dieselbe Laserlichtquelle die LIBS-Messung. Zuletzt werden die laserinduzierten Plasmaemissionen auf ein Spektrometer geleitet, hier in ein Spektrum zerlegt und anschließend mit entsprechender Software der chemometrischen Auswertung unterzogen.

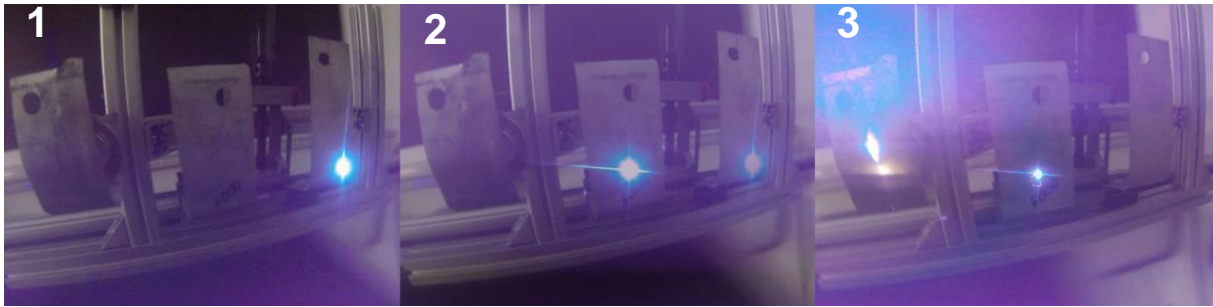
Abbildung 3 zeigt die vereinfachte Darstellung der Formerkennung, auf die später näher eingegangen wird.



**Abbildung 3:** Falschfarbendarstellung der Objekterkennung; Schwerpunkt: rotes Kreuz, Ort für LIBS-Messung: weißes Rechteck

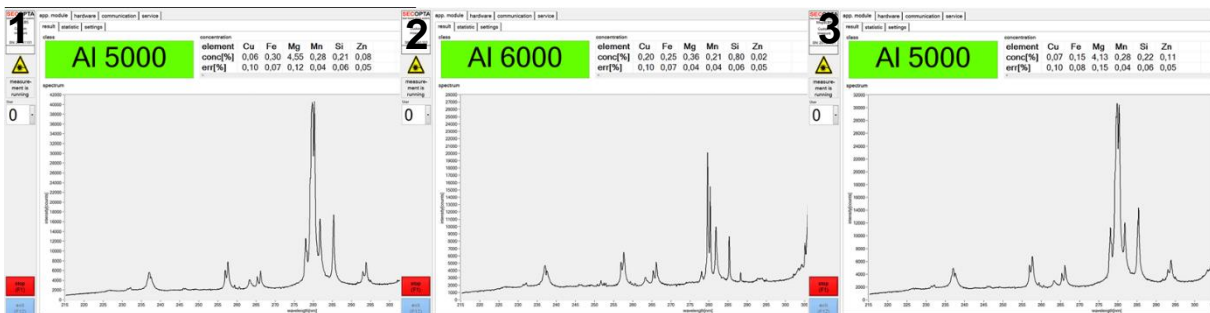
In Abbildung 4 wird die Vorablation und die Erzeugung des Plasmas gezeigt. Auf Grund der zu langen Belichtungszeit der Hochgeschwindigkeitskamera bekommt man in Bild 2 und Bild 3 den Eindruck, dass jeweils zwei Teile gleichzeitig bearbeitet werden.

In der Realität findet die Bearbeitung nacheinander statt.



**Abbildung 4:** Vorablation und LIBS-Messung

Abbildung 5 zeigt die aufgenommenen Spektren der einzelnen Proben, aus denen die Analysezusammensetzung herleitbar ist..



**Abbildung 5:** LIBS Spektralanalyse

### 3.1.3 Validierung Ablationsfläche

Die benötigte Größe der Vorablationsfläche ist eine Funktion der in der Gesamtzeitbilanz zur Verfügung stehenden Ablationszeit, der Art und Dicke der Oberflächenbelegung und den Schwingparametern des Schrottransportsystems. Sie wird für die Versuche wie folgt abgeschätzt:

#### Lateraler Präzisionseinfluss

Wiederholgenauigkeit des Scanners  
Fokusedurchmesser  
Geradlauf /Ablauf Seitlich im Arbeitsbereich

#### Präzision bei f = 420 mm

±84µm  
±64µm  
±42,6µm

Summe Lateraltoleranz aufgerundet

ca. ±280µm

#### Vorablationsbreite

ca. 560µm

**Präzisionseinfluss in Bandrichtung**

Wiederholgenauigkeit des Scanners

Fokusedurchmesser

Encoder Auflösung im Arbeitsbereich

Schwingungsamplitude des Systems (Bandgleichlauf)

Summe aufgerundet

**Vorablationslänge**

**Präzision bei f = 420mm**

±84µm

±64µm

±4µm

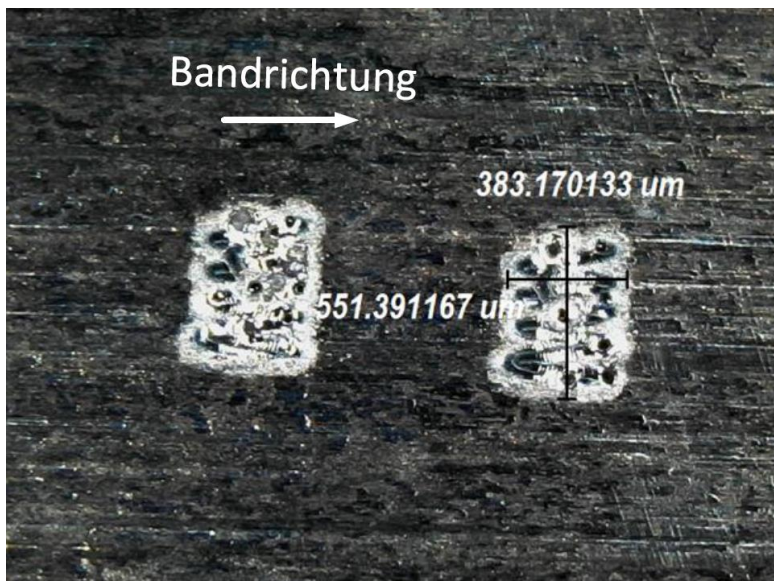
±40µm

ca. ±192µm

**ca. 380µm**

Für die Validierung der Flächenabschätzung wird eine Probe auf dem Probenhalter der Lineareinheit montiert und auf eine Fördergeschwindigkeit von 3 m/s beschleunigt.

Die in **Abbildung 6** gezeigte Ablationsfläche entspricht den Vorgaben und wird somit für alle weiteren Messungen als Standard verwendet.



**Abbildung 6:** Ablationsfläche erzeugt bei v=3m/s

**3.1.4 Prozesszeiten für Vorablations- und LIBS-Flächen**

Für eine Überfahrt über die Vorablationsfläche benötigt der eingesetzte 100W-Laser, der mit 100kHz gepulst wird, 4,4ms. Anschließend wird in die Vorablationsfläche die LIBS-Fläche gelegt. Dies geschieht in 1,1ms. Das vom Spektrometer aufgenommene Licht wird in drei LIBS-Überfahrten erzeugt:

1 x Vorablationsfläche + 3 x LIBS-Fläche → 4,4ms + 3,3ms = 7,7ms pro Messpunkt

Nach der Bearbeitung eines Messpunktes muss der Scanner wieder zurück zur Ausgangsposition zurück springen.

**Tabelle 1:** Basisdaten Scanner

Lateraler Abstand der Bauteile	+/- 150 mm
Positioniergeschwindigkeit des Scanners	55 rad/s
Schleppverzug des Scanner	0,55 ms
Minimaler Abstand zwischen Scanner und Bauteil	280 mm
Positioniergeschwindigkeit Scanner bei minimalem Abstand	55 x 280 mm/s = 15400 mm/s

In den 7,7ms, welche für einen Messpunkt benötigt werden, bewegt sich das Bauteil um  $7,7\text{ms} \times 3\text{m/s} = 23,1\text{mm}$  weiter.

Für den Rücksprung werden somit  $2 \times 0,55 \text{ ms} + 23,1 \text{ mm} \div 15,400 \text{ mm/ms} = 2,6 \text{ ms}$  benötigt.

Pro Messpunkt werden somit insgesamt  $7,7\text{ms} + 2,6\text{ms} = 10,3\text{ms}$  benötigt. Der Abstand zwischen zwei Messpunkten muss somit mindestens  $10,3\text{ms} \times 3\text{m/s} = 30,9\text{mm}$  betragen.

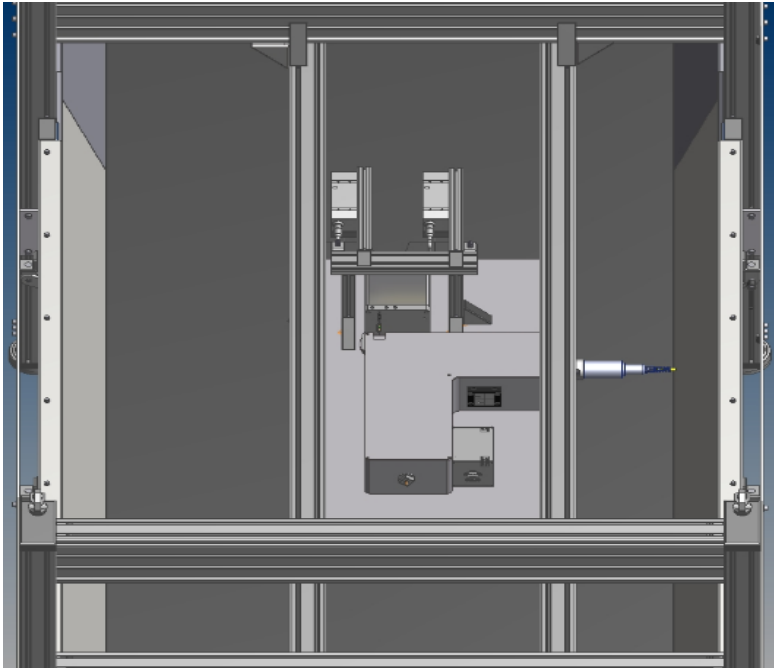
### 3.2 Prototyp über Transportband

#### 3.2.1 Prototyp 1.0

Für die Gesamtanlage wird eine Auslegungsplanung erstellt. Auf Grundlage dieser Planung wird ein in den Abmessungen passender Sensor-Prototyp entworfen und aufgebaut. Dieser besteht i.w. aus zwei vorgeschalteten Laser-Profil Sensoren zur Objekterkennung, dem Laserscanner und der Optikbox, in der der Strahlengang von Ablation und LIBS Messung organisiert wird.

Durch die beiden Profilsensoren kann eine Breite von insgesamt 400mm abgescannt werden. Der Arbeitsbereich eines Scanners wird wegen der geforderten Intensität auf  $200 \times 200 \times 100 \text{mm}^3$  (x x y x z) eingeschränkt.



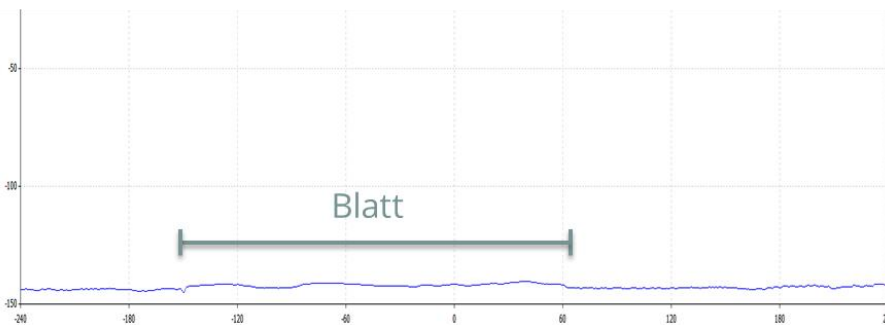
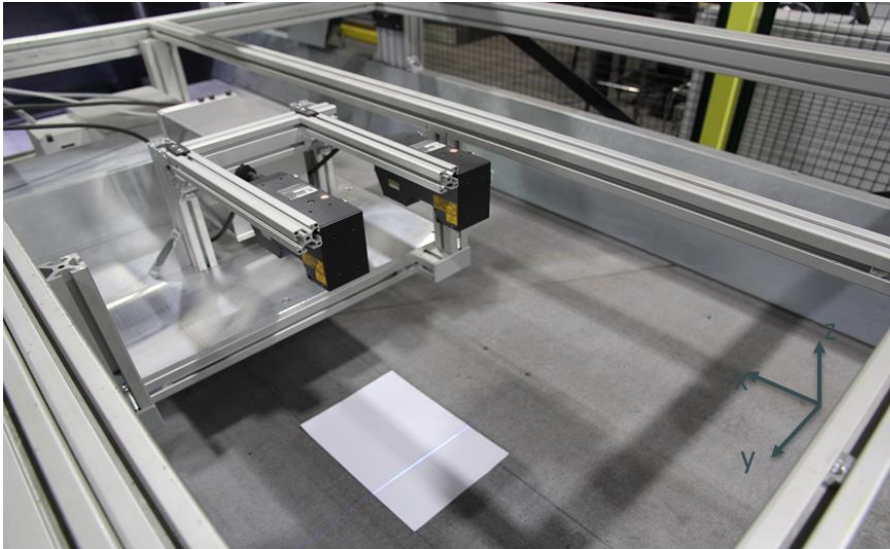


**Abbildung 7:** Prototyp über Band, Draufsicht

### 3.2.2 Objekterkennung

Ein zu einer Linie aufgeweiteter, mit 8kHz gesendeter Laserstrahl wird von der Messobjekt-oberfläche diffus reflektiert. Das reflektierte Licht trifft auf den Empfänger (CMOS-Chip). Durch die Erkennung der Positions- und Formänderung werden die Wegverschiebung und die Form gemessen.

Es werden zwei Lichtschnittkamas zur Erfassung der Bandbreite von 400mm verbaut. Die Daten der Sensorsysteme laufen über das Steuergerät auf einem RTC (Real-Time Controller) zusammen. Die Echtzeit basierte Software ist (einschl. Profilauswertung) signifikant schneller als die Abtastrate des Kamerasystems.



**Abbildung 8:** Objekterkennung über dem Band

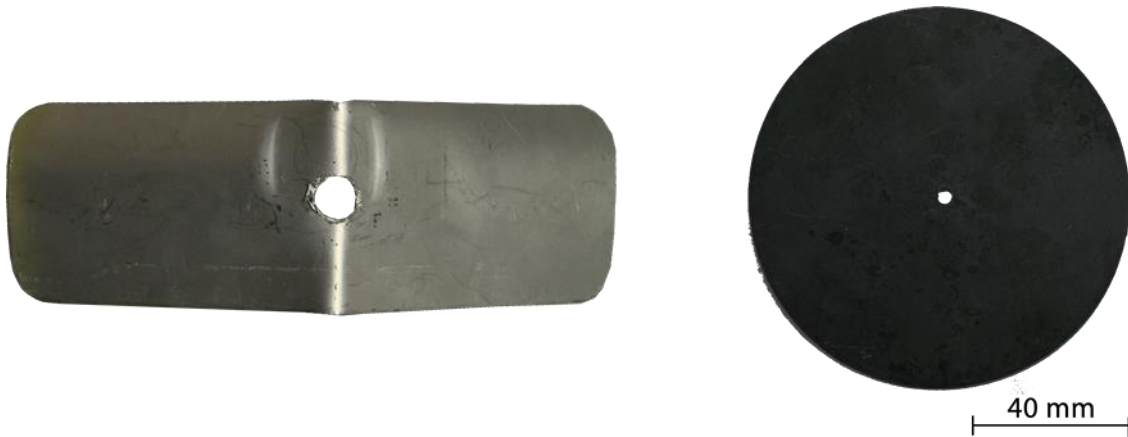
In Bandrichtung (x-Richtung) beträgt die Abtastfrequenz 8 kHz. Profilaufnahmen erfolgen so bei 3 m/s Förderbandgeschwindigkeit mit 0,375 mm Abstand voneinander. Das verbaute Gerät hat die beste Auflösung von allen vorab getesteten Anbietern. Es kann ein auf dem Transportband liegendes DIN A4-Papierblatt detektiert werden

Lateral zur Bandrichtung (y-Richtung) werden 666 Bildpunkte auf 400 mm aufgenommen. Der Abstand der Messpunkte voneinander beträgt also 0,6 mm.

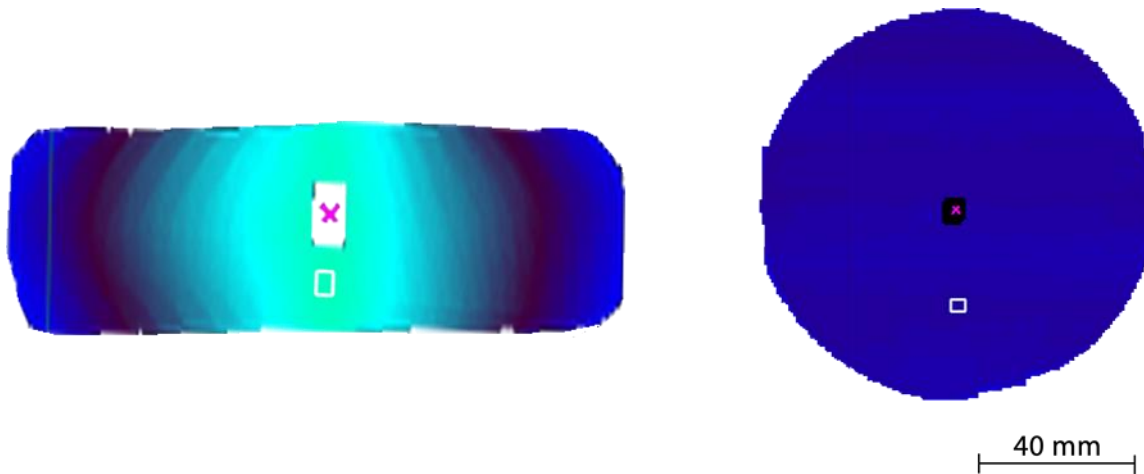
In der Höhe (z-Richtung) ist die Messgenauigkeit  $\pm 400 \mu\text{m}$ .

Die Software bietet die Möglichkeit, mithilfe der aufgenommenen Profile die Bauteile als Falschfarbenbilder darzustellen.

Der Schwerpunkt wird durch ein rotes X, der Laser-„Landeplatz“ für die Ablationsfläche durch ein weißes Rechteck gekennzeichnet. Zur Gradientenbestimmung, also zur Suche nach einem möglichst ebenen, d.h. normal zum Laserstrahl liegenden, Landeplatz werden 7 x 7 Pixel zusammengefasst.



**Abbildung 9:** Probeteile für Objekterkennung



**Abbildung 10:** Objekterkennung Ausgabe Software

### 3.2.3 Ablationsleistung über dem Förderband

Auch im Einsatz des Sensor-Systems über dem Förderband erweist sich die Abschätzung der Größe der Ablationsfläche als zutreffend. Sie ist zwar variabel einstellbar, wird aber für die Versuchsreihen nach den Berechnungen in Kapitel 3.1.3 konstant gehalten.

Es ist nun nachzuweisen, welche materialabhängigen Eindringtiefen die Ablation erzeugt und nach wie vielen Ablationsfahrten eine für die LIBS Messung gesäuberte Teilfläche auf der Oberfläche eines Sekundärrohstoffstücks zur Verfügung steht

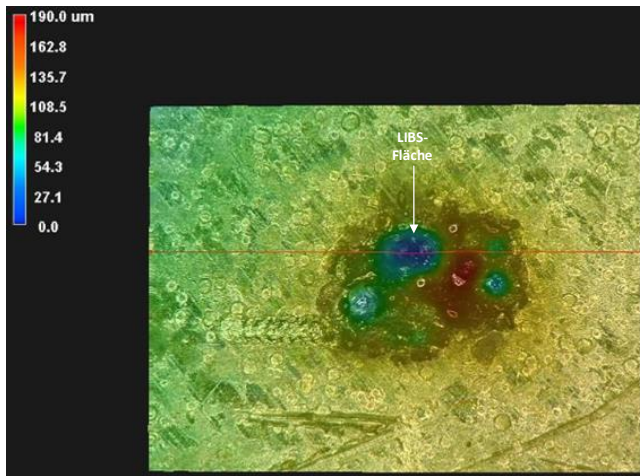


Abbildung 11: Messpunkt bestehend aus Vorablations- und LIBS-Fläche 1

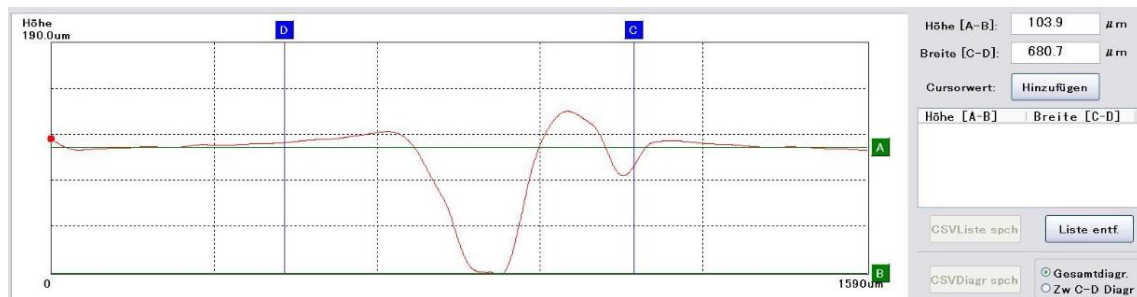
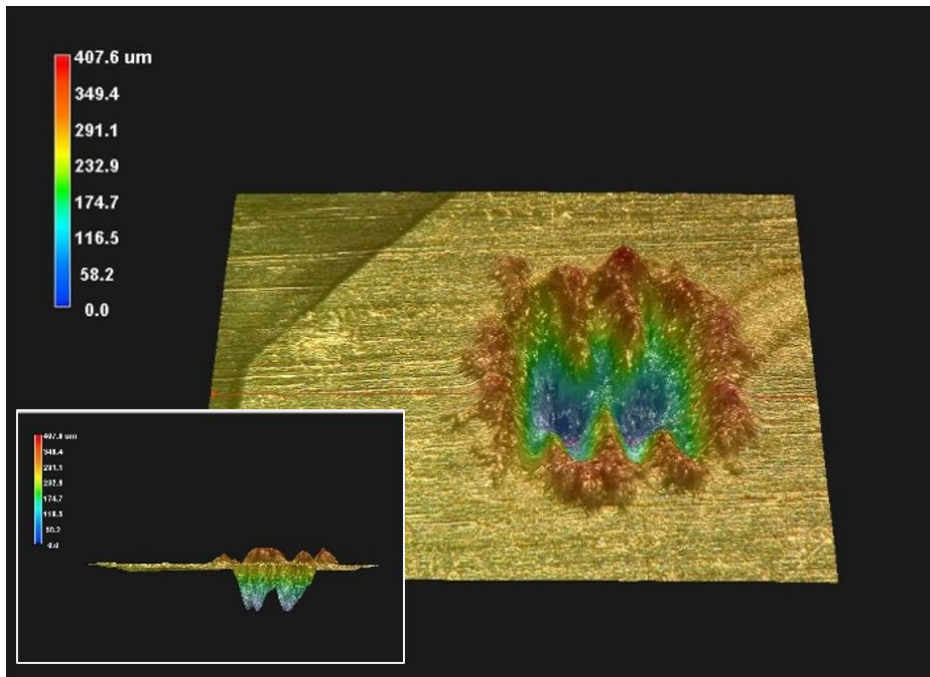


Abbildung 12: Abtragtiefe bei Aluminium

Als durchschnittliche Ablationstiefe wird bei Aluminium pro Überfahrt ca. 70 µm gefunden.

Tabelle 2: Bearbeitungszeiten bei verschiedenen Schrottzuständen

Material	Beschichtung	Zykluszeit	Mindestabstand zweier Messpunkte
Aluminium	Oxide, Materialeisgerung	~14ms	44mm
Verzinkter Stahl	Zink 7-15µm	~23ms	72mm
Stahl (lackiert)	Zink & Lack 60-200µm	~32ms	100mm

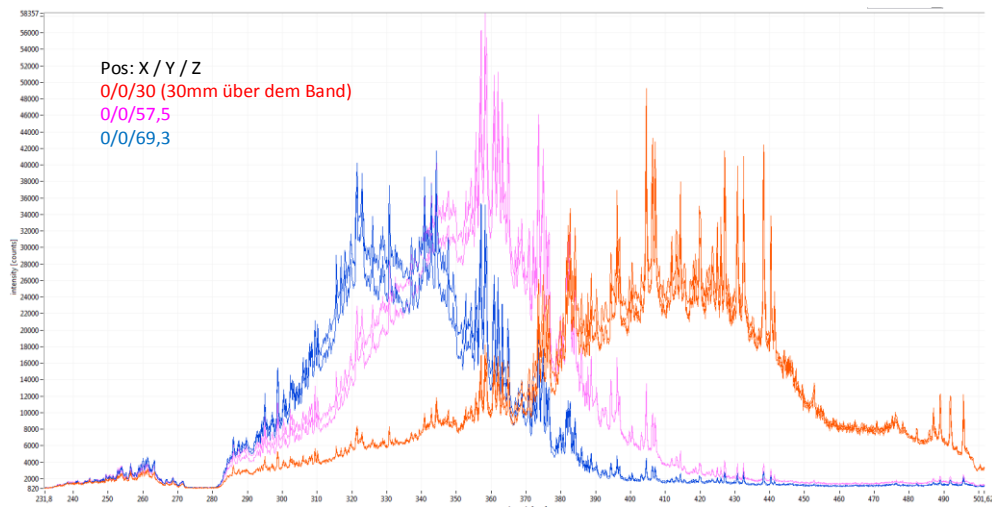


**Abbildung 13:** Vermessung von Ablationsflächen auf Messmikroskop

### 3.2.4 Chromatische Aberration

Auf Grund der chromatische Aberration wird je nach Abstand eines Messpunktes zur Abbildungsoptik ein anderer Wellenlängenbereich des Plasmalichts besser in die LIBS-Faser fokussiert. Dies führt zu einer Verschiebung („shift“) der Spektren in Abhängigkeit der Schrotteilgeometrie und Position.

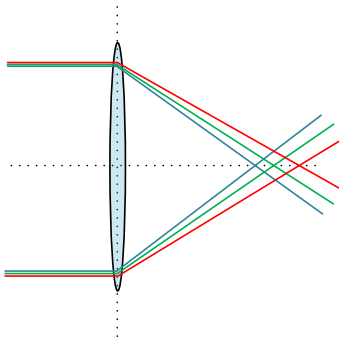
Es konnte beobachtet werden, dass sich die Intensitätsbereiche der Spektren, welche auf demselben Schrotteil erzeugt wurden, je nach der Höhe der Bauteile, also dem Bearbeitungsabstand vom Laser, verschieben.



**Abbildung 14:** Intensitätshift bei verschiedenen Distanzen

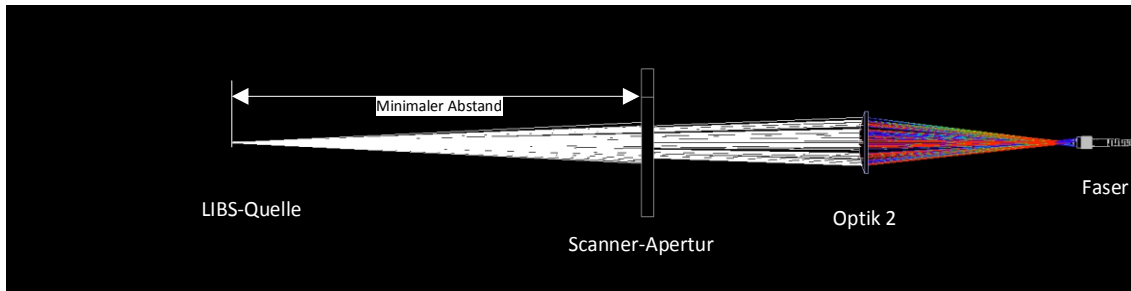
Dieser Shift hat folgende Ursache:

Aufgrund der chromatischen Aberration wird LIBS-Strahlung unterschiedlicher Wellenlängen von Optik 2 (s. Abbildung 16) an unterschiedliche Positionen fokussiert.

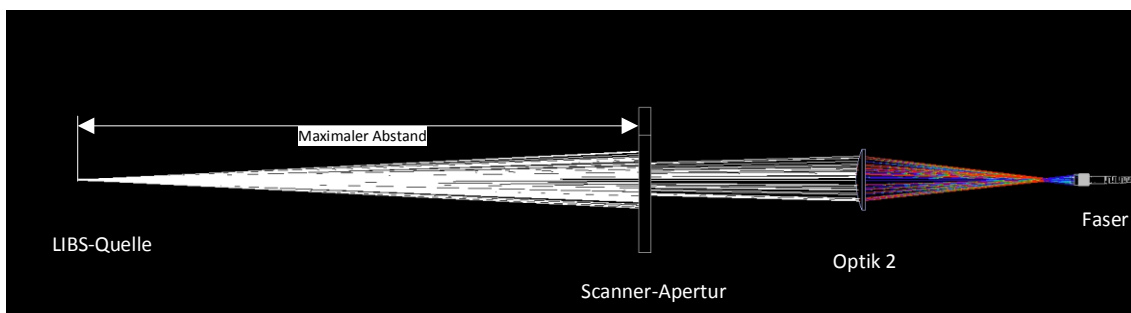


**Abbildung 15:** Chromatische Aberration

Hinzu kommt, dass die gesamte LIBS-Strahlung bei unterschiedlichen Abständen auf unterschiedliche Positionen fokussiert wird.

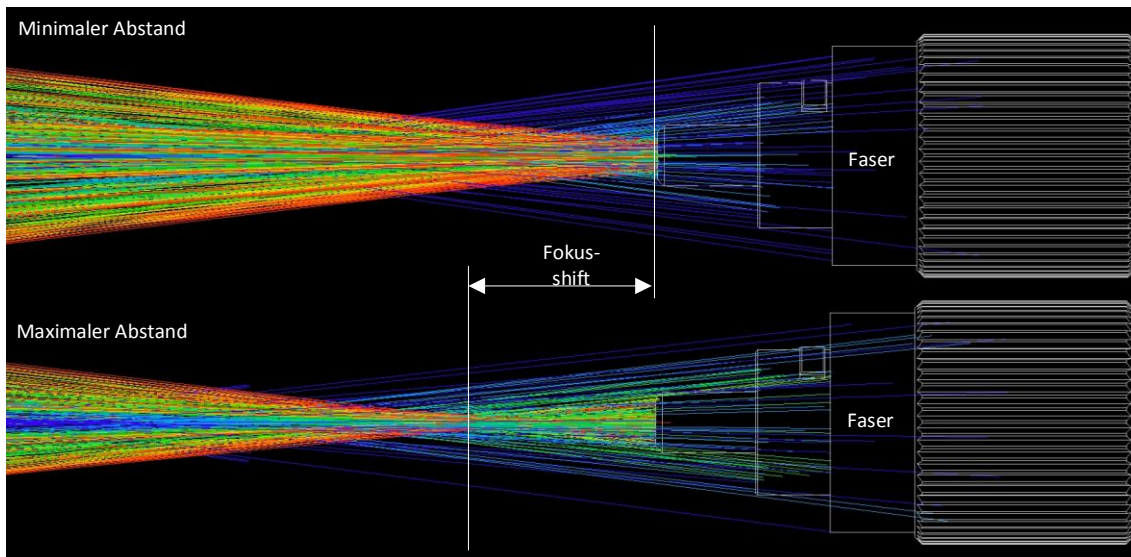


**Abbildung 16:** Strahlverlauf minimaler Abstand



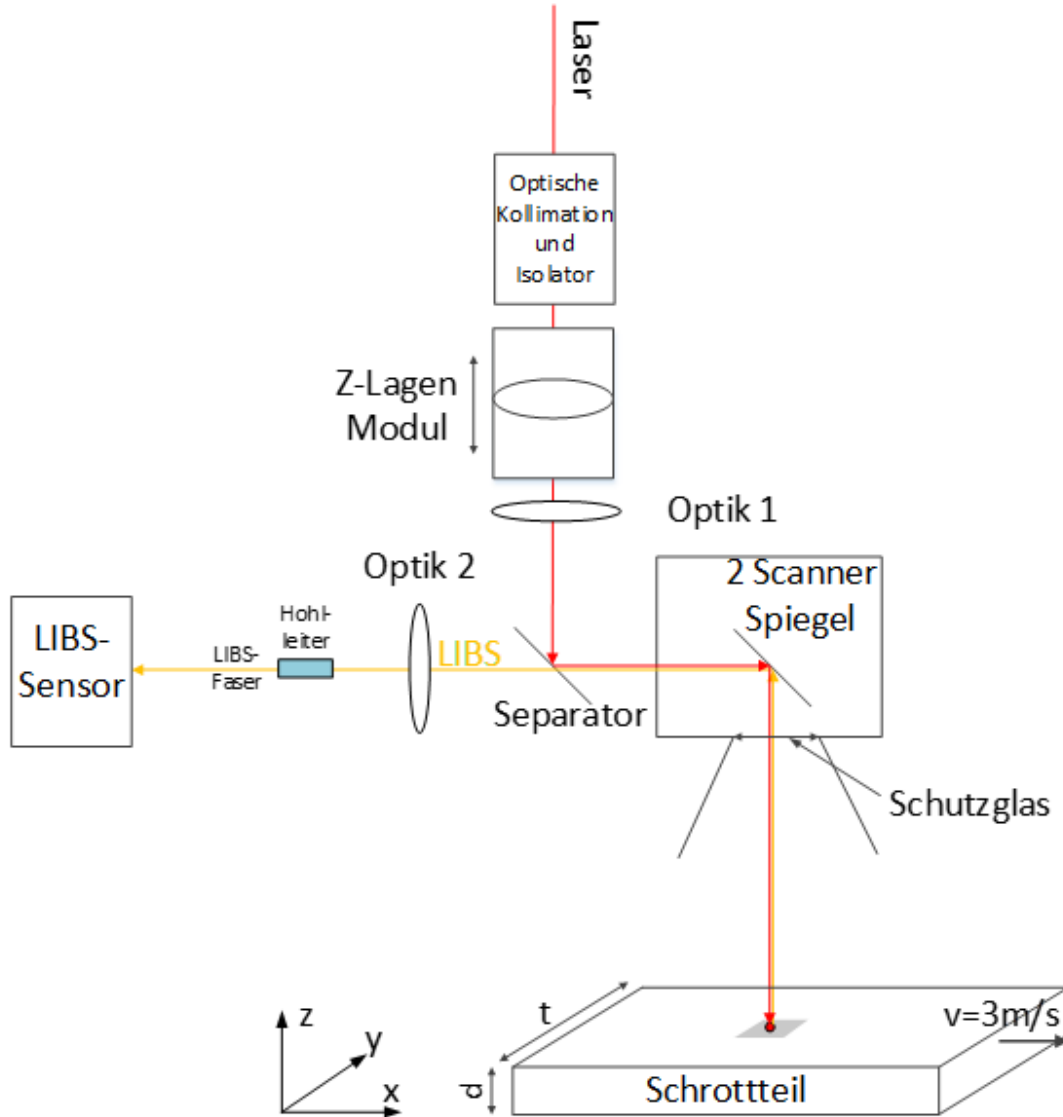
**Abbildung 17:** Strahlverlauf maximaler Abstand

Die Folge dieser beiden Fokus-Shifts ist, dass bei unterschiedlich hohen Bauteilen verschiedene Anteile der LIBS-Strahlung besser oder schlechter in die Faser fokussiert werden.



**Abbildung 18:** Fokusshift bei minimalem und maximalem Abstand

Ein Lösungsansatz der im Rahmen des Projekts verfolgt wurde, war die Verwendung eines metallischen Hohlleiters, welcher vor der Faserverbindung zum Spektrometer montiert wurde.



**Abbildung 19:** Aufbau mit Hohlleiter

Es konnte schließlich ein für die chromatische Aberration unempfindlicher Aufbau gefunden werden, mit welchem positions- und höhenunabhängige Spektren generiert werden können.

### 3.2.5 Ermittlung der LIBS-Parameter

Für eine bestmögliche Materialanalyse soll die aufgenommene Intensität, die in Counts gemessen wird, möglichst konstant sein. Die Sättigungsgrenze des in diesen Versuchsreihen eingesetzten Spektrometers liegt bei 65.000 Counts, die nicht überschritten werden sollte. Da-



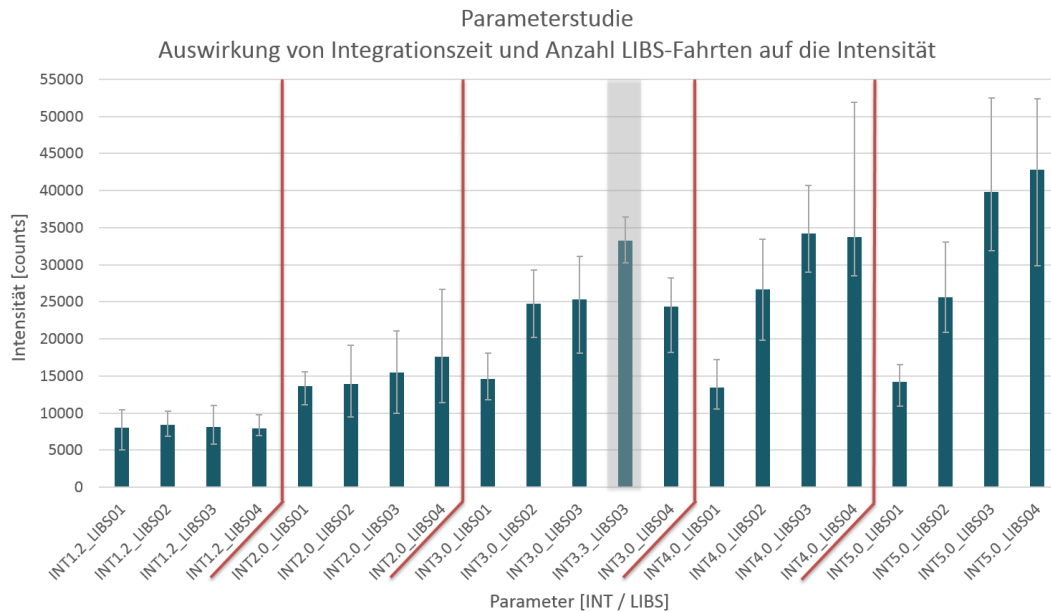
her wird in einer Parameterstudie das ideale Zusammenspiel der Anzahl der LIBS-Fahrten zu der Integrationszeit des Spektrometers ermittelt. Die Vorablation wird mit einer Überfahrt konstant gehalten.

Für die Versuche werden sortenreine, von einem Coil stammende Stahlproben verwendet. Pro Messreihe werden 15 Messungen aufgenommen und ausgewertet. Die Teile werden von Hand auf das mit drei Metern pro Sekunde laufenden Band aufgegeben.

**Tabelle 3:** Versuchsplan Ermittlung LIBS-Parameter

		Integrationszeit Spektrometer [ms]				
		1,2	2	3	4	5
LIBS-Fahrten [Anz]	1					
	2					
	3					
	4					

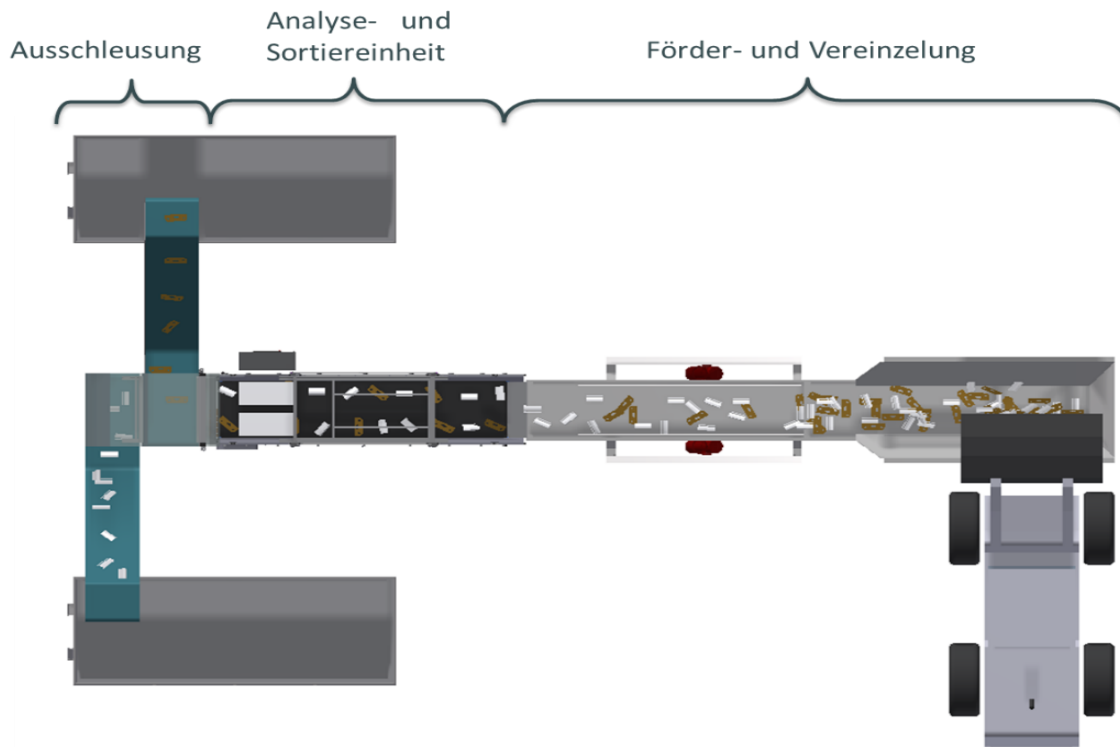
Die in der folgenden Abbildung gezeigten Versuchsergebnisse zeigen, dass die geringsten Intensitätsschwankungen sowie das beste Intensitätslevel bei einer Integrationszeit von 3ms und drei LIBS-Fahrten erzielt werden.



**Abbildung 20:** Auswertung Parameterstudie LIBS-Parameter

### 3.3 Aufbau der Gesamtanlage

Nach Konstruktion, Bau und Test des Sensor-Systems wird dieses in die Gesamtanlage integriert. Diese besteht aus einer Förder- und Vereinzelungsvorrichtung (FuV), aus der Schrotte unterschiedlicher Abmessung in betriebsnahem Massenstrom ausgetragen und vereinzelt werden. Die Vereinzelung ist insofern von ausschlaggebender Wichtigkeit, als jedes Stück getrennt vermessen und anschließend nach festgelegten Kriterien per Luftimpuls sortiert wird. An die FuV schließt die Ausschleusung an, in der per Luftimpuls die großformatigen Schrotstücke sortiert werden.



**Abbildung 21:** Integrierte Versuchsanlage in produktionsnaher Abmessung

### 3.3.1 Förder- und Vereinzlungsanlage

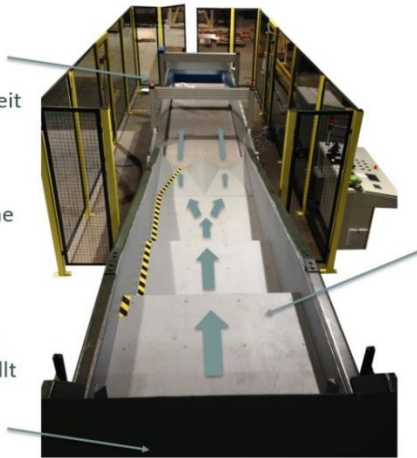
Die FuV setzt sich aus drei Anlagenteilen zusammen. Der Bunker mit einem Fassungsvermögen von ca. 6 m<sup>3</sup>, dessen Förderleistung stufenlos von 30 – 100 % geregelt werden kann, ist für einen kontinuierlichen Materialauslass mit einer Lichtschranke gesteuerten, hydraulischen Pendelklappe am Bunkerabzug versehen. Die Schwingrinne, deren Schwingwinkel und Schwingfrequenz stufenlos verstellt werden können, war ursprünglich mit einem kaskadenförmigen Rinnentrog konzipiert. Im Laufe des Projektes wurde im Sinne einer höheren Fördergeschwindigkeit ein geneigter Innentrog in der Rinne verbaut. Dieser dient dazu, den Förderstrom auf die Endgeschwindigkeit von 3 m/s zu beschleunigen und damit den bei der Übergabe von Schwingrinne auf das Förderband einwirkende Übergabeimpuls so gering wie möglich zu gestalten. Das Förderband ist auf einer für die LIBS-Messung unabdinglichen schwingungsarmen Unterkonstruktion verbaut und kann auf bis zu 6 m/sec beschleunigt werden.

### 3. Förderband

- Stufenlos Höhen verstellbar
- Maximale Fördergeschwindigkeit 7 m/sec.
- Max. ruhiger Bandlauf
- Min. lateraler Versatz
- Schmutzabweisende Oberfläche

### 1. Bunker mit hydraulischer Pendelklappe

- Förderleistung kann stufenlos zwischen 30 – 100 % eingestellt werden.
- Fassungsvermögen ca. 6 m<sup>3</sup>
- Innenmaße: 1100 x 3000



### 2. Schwingförderrinne

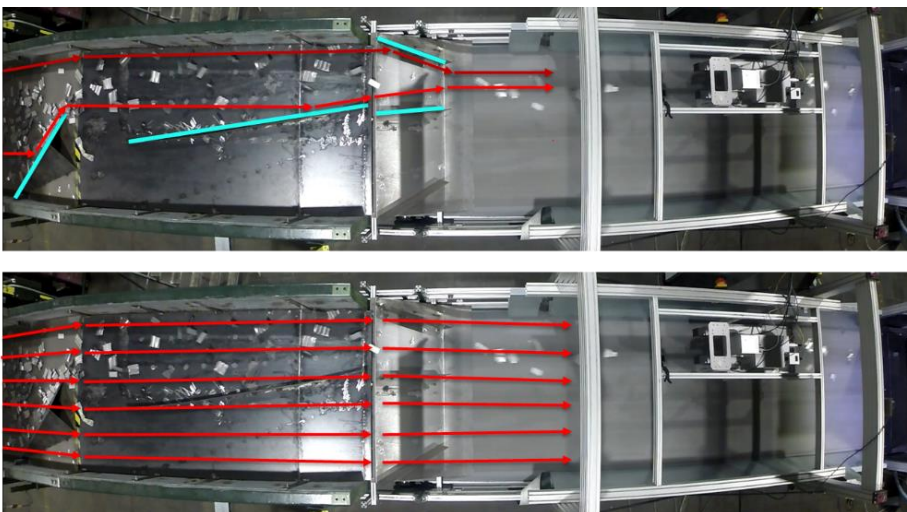
- Stufenlose Verstellung von Schwingwinkel und Schwingfrequenz
- Innenmaße: 1200 x 5000

**Abbildung 22:** Förder- und Vereinzelungsanlage

### 3.2.2 Umbau Förder- und Vereinzelungsanlage

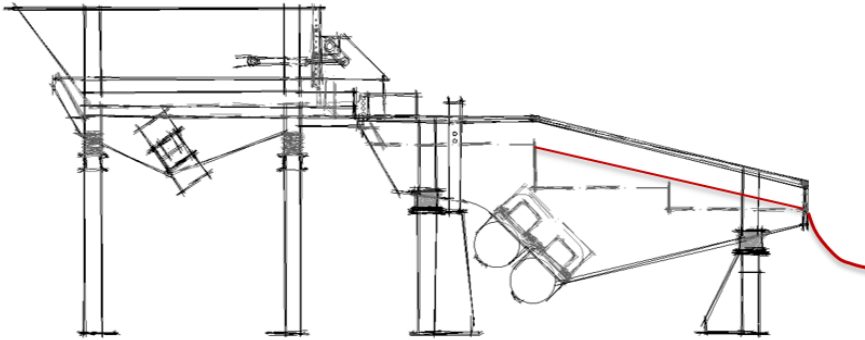
Dieses System muss im Zuge der Entwicklungsarbeiten zu COLA II grundlegend umgestaltet werden. Es wird gefunden, dass eine schräge Ebene in Verbindung mit entsprechenden Schwingparametern die besten Voraussetzungen zur vereinzelt Zuführung von großformatigen Schrotten zum LIBS Sensorsystem garantiert.

Das verbaute Objekterkennungssystem des COLA Sensors ist in der Lage, eine Bandbreite von 400mm auf dem Transportband zu erfassen. Das FuV-Technikum hat eine Förderbreite von 1200mm. Es ist daher ein Umbau der Schwingkomponenten so notwendig, dass die Schrotte auf 400mm Förderbreite dem Sensorsystem zugeführt werden.

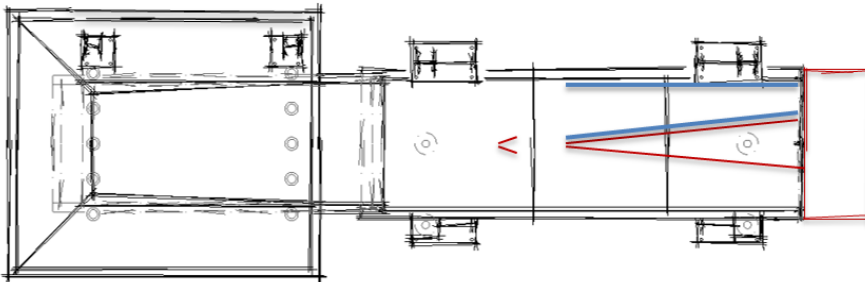


**Abbildung 23:** Draufsicht - Förder- und Vereinzelungsstrecke

Hierzu werden im Vorfeld umfangreiche Stromstromuntersuchungen mit Schrotten unterschiedlicher Abmessung angestellt, per Video aufgezeichnet und ausgewertet.



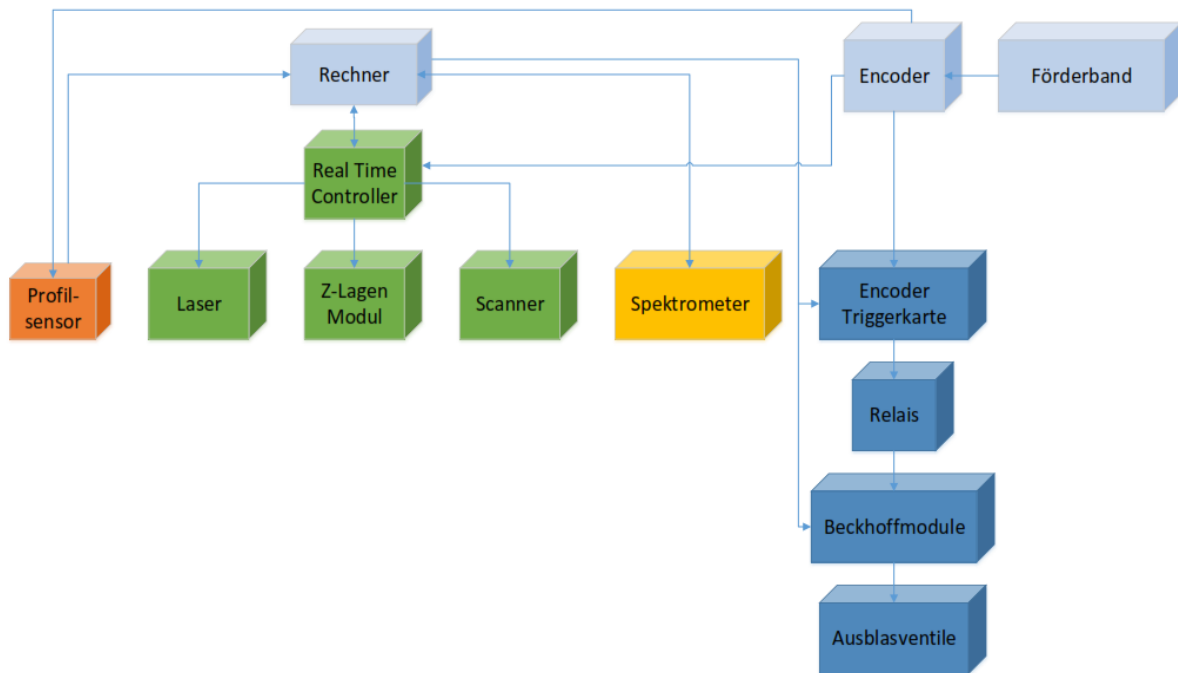
**Abbildung 24:** Skizze Förder- und Vereinzelungsstrecke - Seitenansicht



**Abbildung 25:** Skizze Förder- und Vereinzelungsstrecke - Draufsicht

### 3.3.2 Benutzerschnittstelle und Bedienkonzept

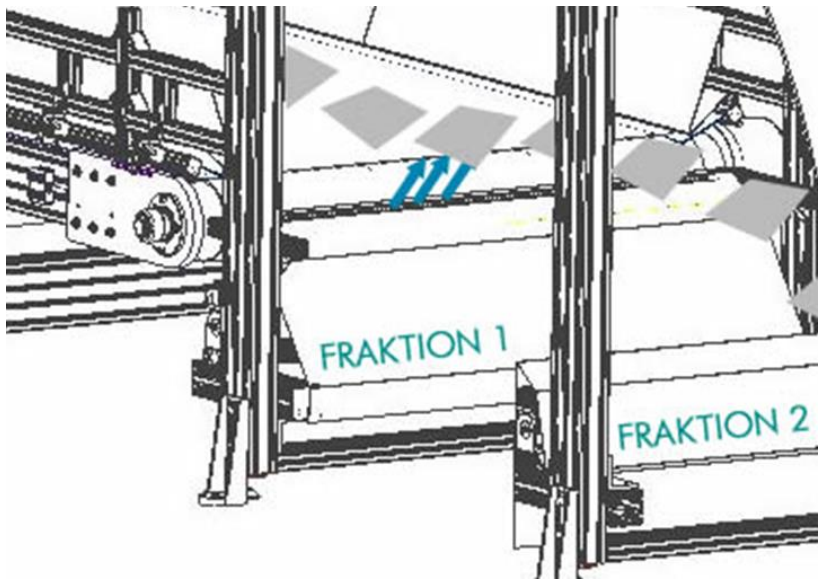
Die Datenintegration ist komplex, aber sicher beherrschbar. Das gewählte Softwarekonzept ist extrem schnell und findet die Grenzen in der Datenaustauschgeschwindigkeit nur durch Hardwarekonfigurationen (z.B. Scannergeschwindigkeit) oder die Datenverarbeitungsgeschwindigkeit in geschlossenen Teilsystemen (z.B. Spektrometer). Weitere technische Grenzen sind im Rahmen der COLA II-Untersuchungen nicht erkennbar.



**Abbildung 26:** Datentechnische Grundplanung

### 3.3.3 Luftimpuls-Sortiertechnik

Die Luftimpuls-Sortiertechnik wird nach dem Kriterium aufgebaut, Stanzschrottstücke von etwa 30mm Kantenlänge bis zu etwa 800mm Kantenlänge assortieren zu können. Eine solche Anlage existiert nach unserem Kenntnisstand bisher nicht. Die Versuche mit der offenbar richtig ausgelegten Anlagenkonfiguration bringen wichtige Erkenntnisse über Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung.



**Abbildung 27:** Schematischer Aufbau der Luftimpuls-Sortiertechnik

### 3.3.4 Fraktionierung

Im Rahmen der Ermittlungen der Korngrößenverteilung werden drei Fraktionen festgelegt. In Vorversuchen zeigt sich, dass es bei zu großen Unterschieden in den Korngrößen, und damit auch im Gewicht, bei der maschinellen Vereinzelung zu deutlich häufiger zu übereinanderliegenden Teilen, sog. Überlagerungen, kommt. Diese können nicht einzeln vom LIBS Sensor erfasst werden und sind auch nicht in der erforderlichen Genauigkeit sortierbar. Die in der folgenden Tabelle gezeigte Korngrößenverteilung ermöglicht eine bestmögliche Vereinzelung von Schrotten unter den gegebenen maschinellen Voraussetzungen.

**Tabelle 4:** Versuchsfraktionen

	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3
Kantenlänge [mm]	30 - 100	100 - 300	300 - 800
Mittleres Stückgewicht [g]	37	105	257
Schüttdichte [t/m <sup>3</sup> ]	0,63	0,38	0,24



**Abbildung 28:** Fraktionen 1 bis 3

### 3.3.5 Durchsatzermittlung

Mit den Versuchsfraktionen mit je 500 Teilen aus Al-Stanzschrotten werden Durchsatz und Sortiergrad ermittelt. Dabei werden folgende Parameter bei der Förderung und Vereinzelung eingestellt:

Unwucht Bunker: 30%

Drehzahl Rinne: 600 - 900 1/min

Winkel Rinne: 35°

Bandgeschwindigkeit: 3 m/s

Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Durchsatz der Sortiergrad sinkt. Wesentlicher Grund dafür sind die Überlagerungen der Teile beim Zutransport zum Sensorsystem. Wird bei einem Durchsatz von rd. 1,5 t/h ein Sortiergrad von etwa 95% erreicht, sinkt dieser auf etwa 80% bei einem Durchsatz von 4 bis 5 t/h.

Aus den Versuchen ergeben sich diverse Lösungen, um den Stoffstrom besser zu vereinzeln und somit ein verbessertes Sortierergebnis zu erreichen. Diese Maßnahmen sind aber mit erheblichen Umbaukosten verbunden und können im Rahmen des COLA II Projekts nicht geleistet werden.



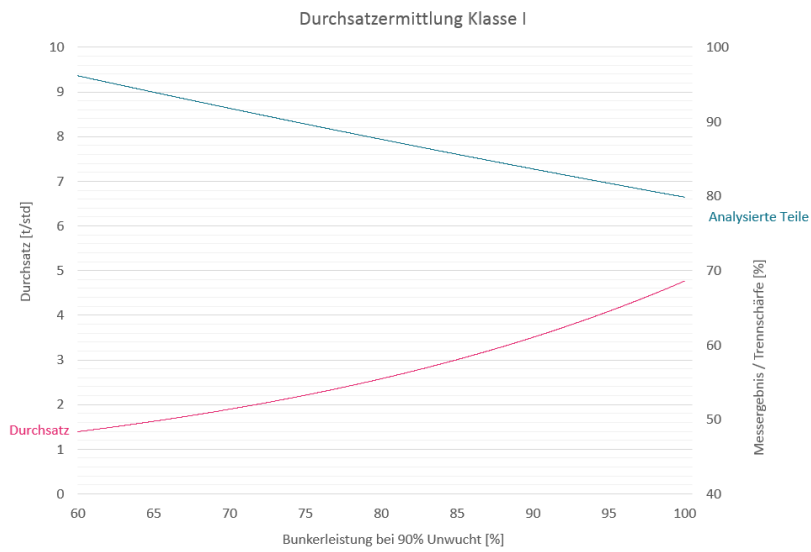


Abbildung 29: Durchsatz und Sortierergebnis Fraktion 1

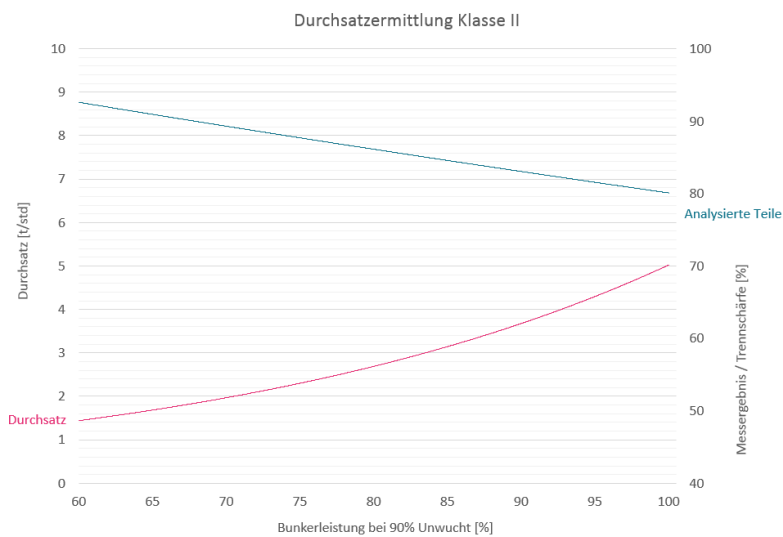
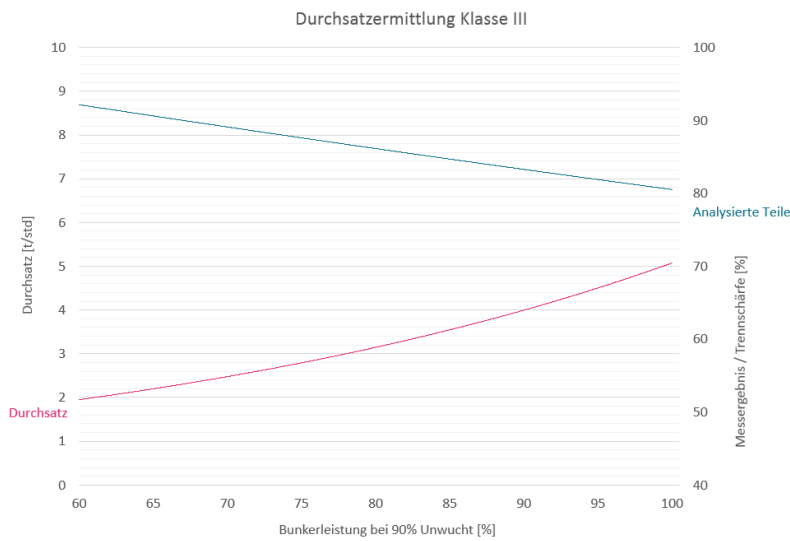
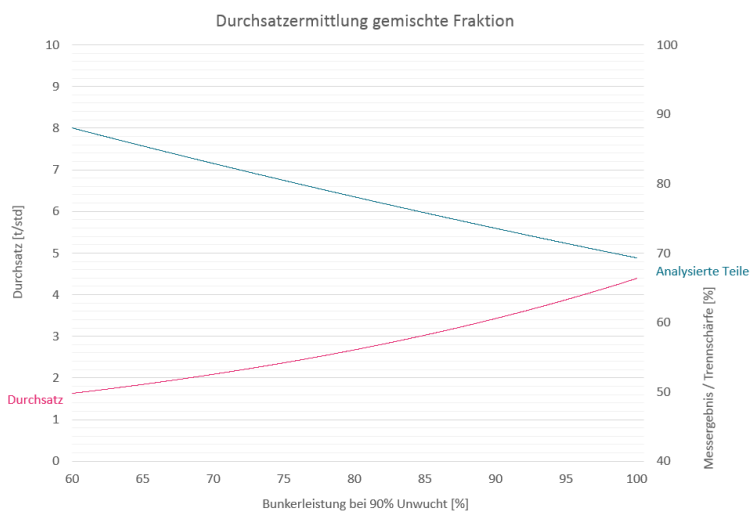


Abbildung 30: Durchsatz und Sortierergebnis Fraktion 2



**Abbildung 31:** Durchsatz und Sortierergebnis Fraktion 3



**Abbildung 32:** Durchsatz und Sortierergebnis gemischte Fraktion

Mit entsprechender Anlagenauslegung ist auf einem 1200mm breiten Sortierband mit je nach Schrotstückgröße drei oder mehr Lasersystemen ein Durchsatz von etwa 30.000t Aluminium-Stanzschrott im Dreischichtbetrieb möglich. Damit ist der wirtschaftliche Einsatz einer solchen Assortieranlage gesichert.

## DURCHSATZ

### ANLAGENKONFIGURATION

Fördergeschwindigkeit [m/s]	3
Anzahl Linien [Stk]	3
Betriebszeitstunden / Schicht	1527
Anzahl Schichten	3

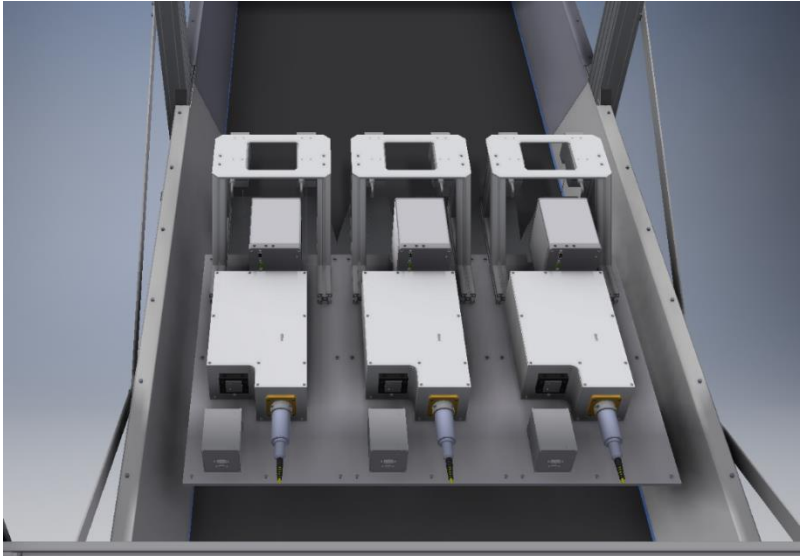
DURCHSATZ	t/Bzh pro Linie	t/Bzh pro Band	t/Schicht und a
Möglicher Durchsatz Klasse I	2,5	7,5	34.357,50
Möglicher Durchsatz Klasse II	2,7	8,1	37.106,10
Möglicher Durchsatz Klasse III	2,9	8,7	39.854,70
Mittel	2,7	8,1	37.106,10
Möglicher Durchsatz Klasse I - III	1,9	5,7	26.111,70

**Abbildung 33:** Abschätzung Durchsatz

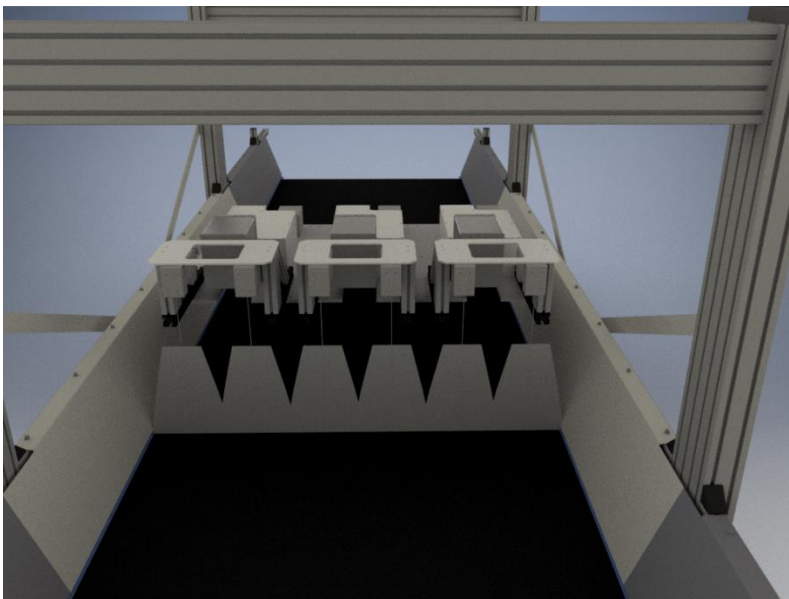
### 3.4 Prototyp 2.0

Im Zuge der Entwicklungsarbeit wird erkannt, dass der Prototyp 1.0 des Sensorsystems wegen seines Strahlengangs für das Analysieren spezieller Werkstoffe wesentliche Informationen aus dem Spektrum nicht darlegt. Der Prototyp 2.0 wird nun mit einem verbesserten Strahlengang aufgebaut. Dies wird durch die Faltung der LIBS-Strahlung durch einen zusätzlichen Spiegel realisiert. Das Gerät ist so schmal konstruiert, dass die Gesamtbreite der Einheit die Scanbreite der Profilsensoren nicht überschreitet.

Durch das Nebeneinandersetzen mehrere Sensoreinheiten kann so die gesamte Breite des Förderbandes abgescannt werden. Dies führt zur Erreichung des oben genannten Durchsatzes.



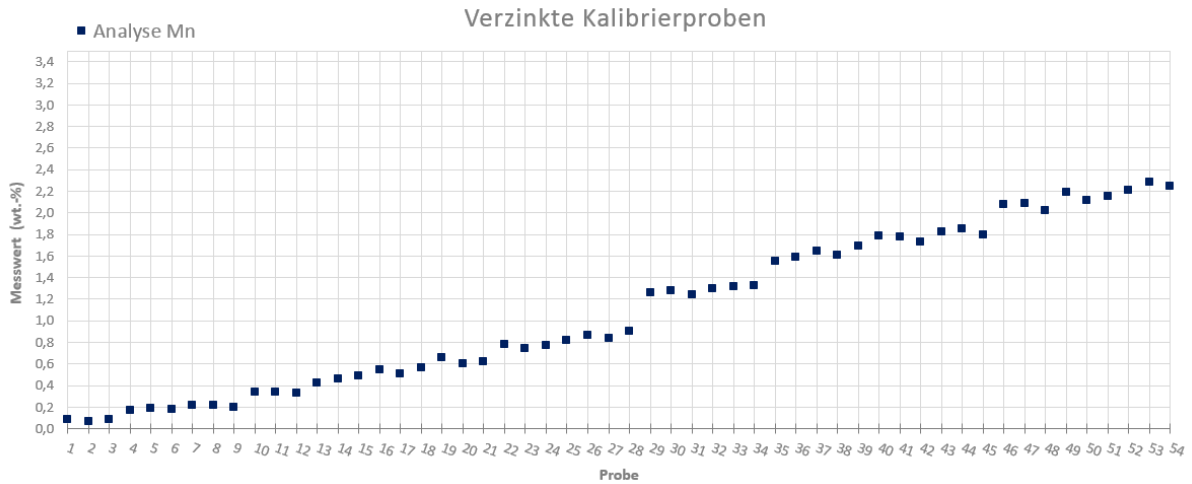
**Abbildung 34:** Drei Prototypen der 2. Generation, Entwurf Rückansicht



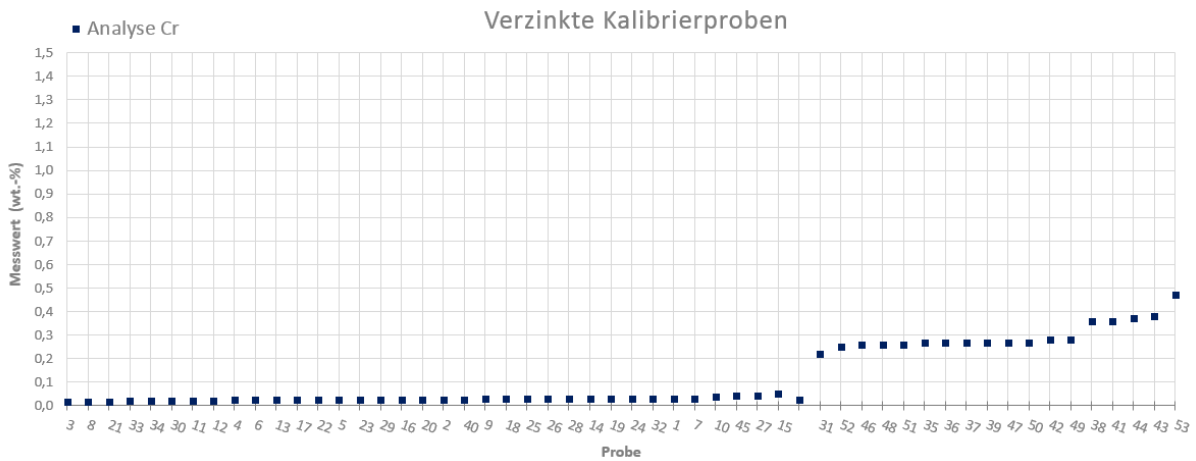
**Abbildung 35:** Drei Prototypen der 2. Generation, Entwurf Frontansicht

### 3.5 LIBS-Analytik

Analog zu der im Projektbericht COLA I ausführlich dokumentierten Methodenerstellung und Validierung der Versuchsergebnisse wird derselbe Probensatz, bestehend aus 54 Einzelproben mit bekannten Stück- und Schmelzanalysen, verwendet. Der Mn-Gehalt der Kalibrierproben variiert von 0,05 Gew.% bis 2,3 Gew.%, der Cr-Gehalt von 0,01 Gew.% bis 0,48 Gew.%.

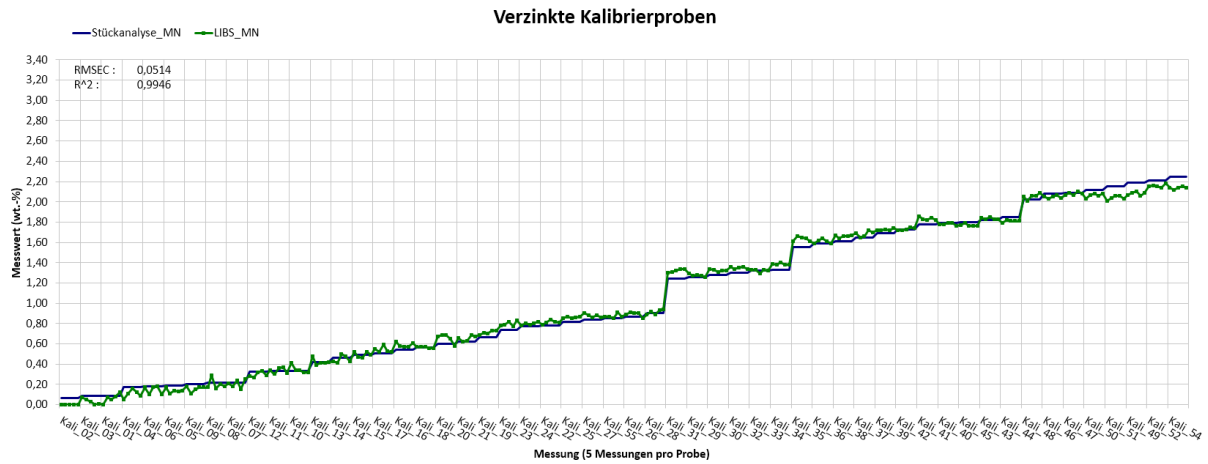


**Abbildung 36:** Kalibrierproben - Legierungselement Mn

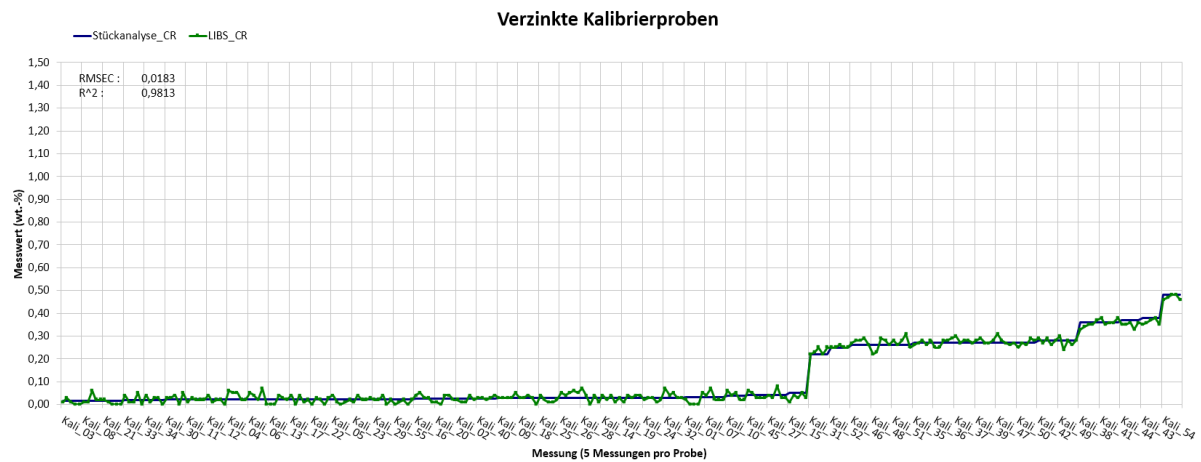


**Abbildung 37:** Kalibrierproben - Legierungselement Cr

Die Kalibrierung ist Basis umfanglicher Versuche, feuerverzinkte Stahlschrotte nach Spezifikationen der Gießereiindustrie zu assortieren. Die Versuche zeigen erfolgversprechende Ergebnisse. Die Funktionalität des Systems ist durch die Vorablation in Verbindung der bereits auf der Lineareinheit erstellten Kalibriermethode erfolgreich bestätigt. Durch die in COLA I sorgfältig ermittelten Parameter werden auf der Versuchsanlage nahezu dieselben, für eine Sortierung notwendigen, Genauigkeiten erzielt.



**Abbildung 38:** Gegenüberstellung der gemessenen Konzentrationswerte und der Referenzwerten von Mangan



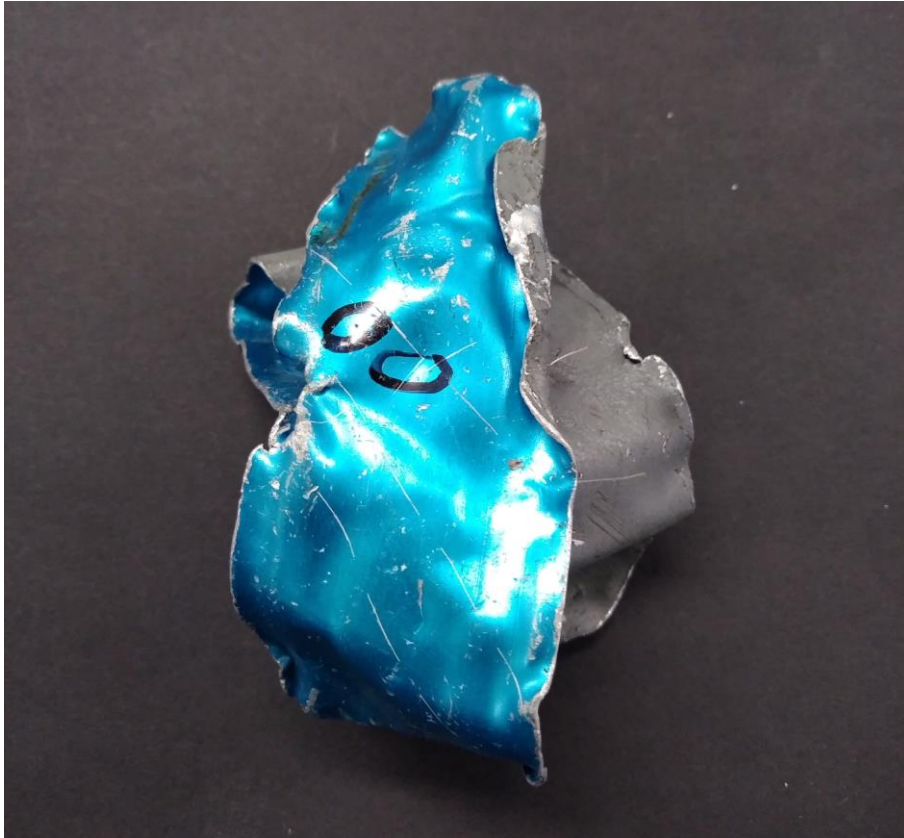
**Abbildung 39:** Gegenüberstellung der gemessenen Konzentrationswerte und der Referenzwerten von Chrom

Für weiterführende Untersuchungen zur Vorablation werden folgenden Proben mit diversen Oberflächenbeschichtungen verwendet.

**Tabelle 5:** Beschichtungsarten

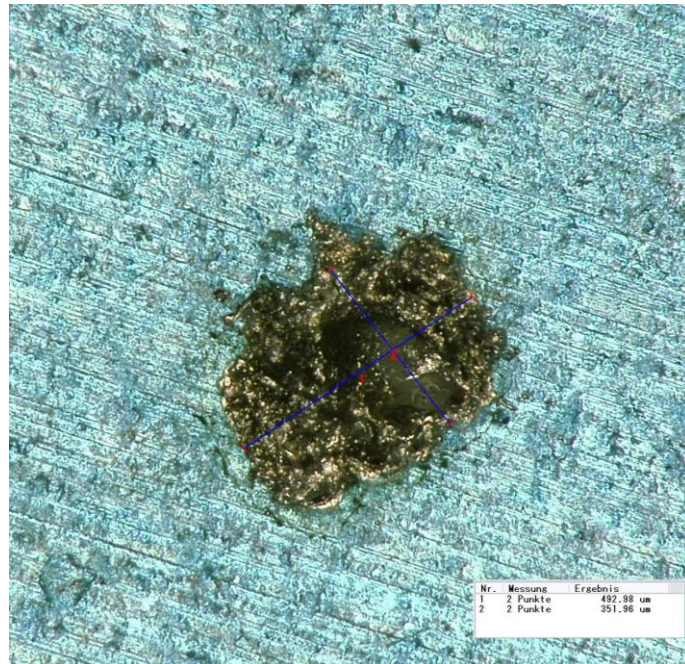
Beschichtungsart	Auflage [g/m <sup>2</sup> ]	geölt
Feueraluminiertes Feinblech	66	leicht geölt
Elo. -verzinktes Feinblech	35	nein
Elo. -verzinktes Feinblech	35	leicht geölt (0,5-1 g/m <sup>2</sup> )
Feuerverzinktes Feinblech	43	nein
Feuerverzinktes Feinblech	142	leicht geölt (0,5-1 g/m <sup>2</sup> )

Abbildung 40 zeigt ein eloxiertes Aluminiumschrottstück, nach der Zerkleinerung durch einen Schredder. Trotz der stark deformierten Oberfläche findet das System bei einer Förderbandgeschwindigkeit von 3 m/s zuverlässig eine geeignete Messfläche.

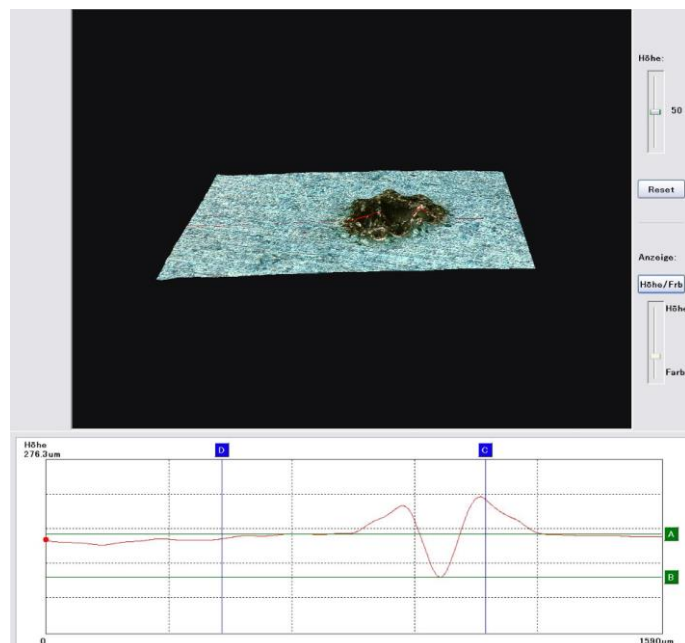


**Abbildung 40:** Eloxiertes Aluminiumschrottstück

Die Ablationsfläche (Abbildung 41) sowie die Ablationstiefe (Abbildung 42) entsprechen den Erwartungen. Die Oberflächenverunreinigungen sowie -beschichtungen werden rückstandslos entfernt.



**Abbildung 41:** Abmaße der Analysefläche - Messung bei einer Förderbandgeschwindigkeit von 3 m/s



**Abbildung 42:** Ablationstiefe - Messung bei einer Förderbandgeschwindigkeit von 3 m/s



Selbst Proben aus feuerverzinktem Feinblech mit hoher Zinkauflage lassen sich mit der Zahl an verfügbaren Ablationsüberfahrten bei 3m/s Fördergeschwindigkeit aufgabengerecht ablatieren.

#### **4 Fazit**

Die Projektpartner haben den Einsatz der LIBS Technologie zur Assortierung großformatiger Stanzschrotte einen entscheidenden Schritt voran gebracht. Davor ist keine Anlagentechnik bekannt, die diese Aufgabenstellung annähernd erfüllt. Die Forderung nach extrem schnellem und höchst präzisiertem Zusammenspiel von lichteoptischen Hochleistungskomponenten bei gleichzeitiger datentechnischer Abbildung des komplexen Stoffstroms in Echtzeit hat das Projekt immer wieder an Grenzen gebracht. Diese können zur Erlangung der Betriebsreife des Gesamtsystems nur mit erheblichem höherem Mitteleinsatz insbesondere für die Softwareerstellung aufgelöst werden. Die Projektpartner haben aber nun einen klaren Blick für noch notwendige Arbeiten und sehen keinen technischen Grund, der von der Realisierbarkeit abhielte. Mit der DBU Förderung sind notwendige und entscheidende Schritte zur Anwendung des LIBS Verfahrens für die zirkuläre Wertschöpfung von Metallen unternommen worden. Die Akzeptanz der Industrie wird erst mit dem Betrieb einer Demonstrationsanlage geschaffen. Dies muss nächstes Ziel sein.

#### **5 Literaturverzeichnis**

Die Bearbeitung des Projekts erforderte kein Literaturstudium.



## Rückendeckel