

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Abschlussbericht DBU-AZ 34709/01

„Hochdynamische In-Line Detektion zur legierungsselektiven LIBS basierten
Sortierung von Wertstoffen (HILDE)“

Projektpartner:

Clean-Lasersysteme GmbH

cleansort GmbH

Verfasst von:

Philipp Soest, Josef Tholen, Veronika Katzy, Edwin Büchter

Herzogenrath, Januar 2021

Projektlaufzeit: Oktober 2018 – Oktober 2020

Fördermittel: 265.000 €



Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	34709/01	Referat	21	Fördersumme	265.000 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel **Hochdynamische In-Line Detektion zur legierungsselektiven LIBS basierten Sortierung von Wertstoffen (HILDE)**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
24 Monate	14.10.2018	14.12.2020	1

Zwischenberichte Juli 2019, Januar 2020

Bewilligungsempfänger	Clean-Lasersysteme GmbH Dornkaulstraße 6 – 8 52134 Herzogenrath	Tel	02407 9097 0
		Fax	02407 9097 111
		Projektleitung Edwin Büchter	
		Bearbeiter Büchter, Soest, Tholen	

Kooperationspartner cleansort GmbH
Nussbaumweg 27
51503 Rösrath

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Moderne metallische Hochleistungswerkstoffe zeichnen sich durch exakt aufeinander abgestimmte Legierungsanteile aus. Um den Anteil und die Qualität an Recyclingmaterial bei diesen Werkstoffen zu steigern, ist es erforderlich die Legierungszusammensetzung des eingesetzten Schrotts genau zu bestimmen. Konventionelle Analyseverfahren können die Beschichtungen aus Lacken oder Metallen, Kontaminationen und Seigerungsschichten nicht durchdringen. Hier schafft die Kombination zweier Prozesse Abhilfe.

Das Verfahren zur laserbasierten Echtzeitanalyse für das Schrottreycling befreit durch eine Laservorbehandlung die Oberfläche von Schmutz und Deckschichten, so dass durch die anschließende laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) der optische Fingerabdruck des Grundmaterials bestimmt wird und eine sortenreine Sortierung erfolgt.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Basierend auf den Ergebnissen der DBU-geförderten Vorgängerprojekte (AZ 32322/01 und AZ 32322/02), in denen das zugrundeliegende COLA-Verfahren entwickelt wurde, wird zielgerichtet eine Optimierung des LIBS-/Sortierverfahrens entwickelt, um Effizienz, Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit der Technologie zu steigern und die Recyclingraten bei metallischen Hochleistungswerkstoffen zu steigern.

Durch den Einsatz schneller CMOS-Spektrometer wird aufgrund höherer Sensitivität der Sensorik eine Geschwindigkeitssteigerung erzielt. Die mangelnde Qualität der Messung aufgrund von Intensitätsschwankungen des LIBS-Signals konnte durch eine Optimierung der Justage und der Bearbeitungsparameter verbessert werden. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens konnte durch die Vergrößerung des Bearbeitungsbereiches und die Erhöhung der Messgeschwindigkeit gesteigert werden. Durch eine Weiterentwicklung des Optikmoduls wird eine Verdopplung der Bearbeitungsfläche erreicht. Um die Einsatzfelder der Technologie zu erweitern, wird eine Materialdaten-Bibliothek angelegt, in der eine große Zahl an Materialkennndaten hinterlegt wurde. Die Entwicklung eines Algorithmus zur Selbstkalibrierung des Systems ermöglicht die benutzerfreundliche Charakterisierung von Materialien. Eine Temperaturcharakterisierung und –stabilisierung ermöglicht die zuverlässige Erfassung der

Spektrometerdaten unabhängig von Umgebungsbedingungen. Durch die Optimierung des Messvorgangs, der Erzielung eines lückenlosen Bearbeitungsbereiches in Kombination mit einer verbesserten Vereinzelung des Stoffstroms kann ein Durchsatz von bis zu 10 t/h erreicht werden.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Die wesentlichen Ziele des Projektes konnten in der geplanten Laufzeit und im Rahmen des vorgesehenen Budgets erfolgreich umgesetzt werden.

Durch den Einsatz schneller CMOS-Spektrometer und optimierter Prozessstrategie konnte die Geschwindigkeit der Messung um mehr als einen Faktor 3 gesteigert werden. Der Bearbeitungsbereich konnte wie angestrebt verdoppelt und damit die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens deutlich erhöht werden. Zahlreiche Materialdaten wurden anhand von Kalibrierproben (z. B. verschiedene Aluminium-, Stahl-, Titanlegierungen, Edelstähle, etc.) in eine Datenbank aufgenommen. Zur benutzerfreundlichen Charakterisierung eines Materials wurde ein Algorithmus basierend auf einer Analyse zur Vorbestimmung der Materialkategorie und einer quantitativen Spektrenanalyse entwickelt. Eine Temperaturstabilisierung des Spektrometers gewährleistet die zuverlässige Messung bei nicht konstanten Umgebungsbedingungen. Für Aluminiumschredderschrotte wurden bei einem Durchsatz von 6 t/h Sortiergrade von 97 % erzielt. Durchsatzraten von bis zu 10 t/h konnten bereits gezeigt werden.

Das Recycling hochwertiger metallischer Stoffe leistet einen wichtigen Beitrag zur Schonung unserer Umwelt und Einsparung von Ressourcen. Die Strategie der „Zirkulären Metallwirtschaft“ („closed loop recycling“, „cradle-to-cradle“) versucht durch gezielte Wiederverwertung anfallende umweltschädliche Kuppelprodukte zu vermeiden. Insbesondere ist das Ziel der Recyclingprozesse die Wertigkeit und Qualität der Stoffe beizubehalten. Die im Projekt erreichten Ziele tragen entscheidend dazu bei die „serienreine“ Trennung metallischer Wertstoffe nach Legierungsgehalten zu ermöglichen und im industriellen Maßstab wirtschaftlich umzusetzen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Inhalte des Projektes wurden auf verschiedenen Tagungen und Kongressen vorgestellt:

- GDA Tagung November 2018
- Samsung - Life is a Pitch 2019, München; *Laserbasierte Sortieranlagen zum Wertstoffrecycling*, August 2019
- Ressourcenkongress Oktober 2019
- Landshuter Leichtbaukongress 2019
- Parts2clean Kongress 2019
- EALA, Februar 2020

Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Internet:

- Fachzeitschrift Entsorga-Magazin: Redaktioneller Artikel (2019)
- Newsletter „Energie + Umwelt“ von Springer Professional (2020)
- Springer Fachmedien - Nachhaltige Industrie Ausgabe 1/2020 *Wertstoffrückgewinnung durch laserbasierte Metallsortieranlagen*
- <https://www.cleanlaser.de/de/anwendungen/anwendungsfelder/cleansort-metallrecycling/>
- <https://www.cleanlaser.de/de/news/ressourceneffizienz-und-kreislaufwirtschaftskongress/>

Fazit

Durch die erfolgreiche Projektumsetzung konnte das LIBS-Sortierverfahren für die wirtschaftliche Anwendung optimiert werden und zum Fortschritt der Strategie einer Kreislaufwirtschaft metallischer Wertstoffe beitragen. Durch die Ausweitung des Einsatzfeldes auf zahlreiche weitere metallische Schrotte und die deutlich gesteigerte Geschwindigkeit wird der Einsatz des Verfahrens für einen größeren Anwenderkreis interessant. Damit die Technologie im industriellen Umfeld Akzeptanz und breite Anwendung findet, ist insbesondere die Erprobung im Feld relevant. In diese Richtung zielen die nächsten Schritte.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • <http://www.dbu.de>

Inhalt

Projektkennblatt	3
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis.....	7
Zusammenfassung	8
1. Einleitung	9
2. Geschwindigkeitssteigerung durch Einsatz schneller CMOS-Spektrometer.....	10
Auswahl eines geeigneten CMOS-Spektrometers	10
Optimierung Timing	12
Erprobung der optimierten Bearbeitungsparameter	14
3. Automatisches Referenzieren und Selbstkalibrieren des Systems, temperaturunabhängige Qualität der Messergebnisse.....	16
Untersuchung des Temperatureinflusses unter realen Bedingungen.....	18
Konstruktion und Aufbau eines temperierten Optikmoduls zur grundsätzlichen Vermeidung von Temperaturschwankungen	22
Untersuchung der Funktion des realisierten Systems	23
Das clean2sort Modul	24
4. Aufbau des Messstands inklusive Linearführung für Messungen bei einer Fördergeschwindigkeit von 3 m/s.....	25
5. Vergrößerung des Bearbeitungsbereichs	27
Intensitätsvergleich zwischen den Scanfildern	28
6. Schnelle dynamische Belichtungsanpassung	36
7. Umbau des Modulhalters über dem Förderband im Technikum zur Einstellung des Höhenabstandes zwischen Förderband und Messsystem	36
8. Aufbau einer Spektren Bibliothek.....	37
9. Selbstkalibrierung des Systems.....	39
10. Optimierung Materialfluss	40
11. Analyse der Leistungsfähigkeit.....	41
12. Theoretische Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen und technischen Grenzen	41
13. Fazit	42
A Anhang	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: : Messung der Bearbeitungszeit - links: mit den alten Parametern, rechts: mit den neuen Parametern.	12
Abbildung 2: Falschfarbendarstellung einer mikroskopischen Messung der Oberflächentopographie der Vorablationsfläche.	14
Abbildung 3: Spektralvergleich einer verzinkten Probe mit unterschiedlichen Vorablationen.	15
Abbildung 4: Spektralvergleich einer lackierten Aluminium Probe mit unterschiedlichen Vorablationen.	15
Abbildung 5: Vergleich der Ablationstiefe Links: ohne VA / Rechts 1xVA.	16
Abbildung 6: Wellenlängen der Kalibrierlampe.	16
Abbildung 7: Versuchsaufbau Links: geschlossener Ofen, Mitte: Spektrometer mit Steuereinheit, Rechts: Controller mit Temperaturmodul.	19
Abbildung 8: Temperiertes Spektrometer Gehäuse (links: Außenansicht Gehäuse, Mitte: 3D-Ansicht Gehäuse mit farblich gekennzeichneten Kühlleitungen, rechts: Draufsicht Gehäuse).	23
Abbildung 9: Benutzeroberfläche Software „cleananalysis“. Messung der Spektrometer Temperatur „Spectre“.	24
Abbildung 10: links: clean2sort Modul, rechts: Kaskadierung der clean2sort Module im Technikum.	25
Abbildung 11: Aufbau Messstand.	26
Abbildung 12: links: Messstand mit unterschiedlichen Bearbeitungsabständen, rechts: Messstand mit Linearführung für dynamische Messungen.	27
Abbildung 13: Bearbeitungsbereiche - links aktueller Bereich, rechts vergrößerter Bereich [alle Angaben in mm].	28
Abbildung 14: Arbeitsabstände für den vergrößerten Arbeitsbereich.	29
Abbildung 15: Diagramm Intensitätsvergleich aktueller Messbereich (200 x 200 mm ²).	30
Abbildung 16: Diagramm Intensitätsvergleich vergrößerter Messbereich (280 x 280 mm ²).	30
Abbildung 17: Diagramm Intensitätsvergleich aktueller zu vergrößertem Messbereich.	31
Abbildung 18: Diagramm zur Gegenüberstellung der mittleren Intensitätsverteilung bei verschiedenen Parametern und Bearbeitungsabständen.	31
Abbildung 19: Vergleich der Ablationstiefe bei verschiedenen Bearbeitungsabständen.	35
Abbildung 20: CAD-Modell des geplanten Modulhalters.	36
Abbildung 21: Reale Umsetzung des Modulhalters.	37
Abbildung 22: Elementverteilung Aluminium Kalibrierproben.	38
Abbildung 23: Al 1000 schwarz, Al 5000 cyan.	38
Abbildung 24: Datenverarbeitungsstruktur.	39
Abbildung 25: Lichtschranken Schwingkomponenten.	40
Abbildung 26: Beispiel Bunkeraustrag verschiedener Schrottfractionen.	40
Abbildung 27: Erzielte Sortiererergebnisse für unterschiedliche Materialfraktionen.	41
Abbildung 28: Elementverteilung Stahl Kalibrierproben.	44
Abbildung 29: Stahl schwarz, Edelstahl cyan.	44
Abbildung 30: Elementverteilung Titan Kalibrierproben.	45
Abbildung 31: Reintitan schwarz, Titan VaAl cyan.	45
Abbildung 32: Elementverteilung Kupfer Kalibrierproben.	46
Abbildung 33: Kupfer schwarz, Messing cyan.	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenndaten Spektrometer inkl. Versuchsauswertung.....	10
Tabelle 2: Zielwerte für die Geschwindigkeitssteigerung der Messung, bestehend aus Vorablation, Erzeugung und Erfassung sowie Auswertung des LIBS-Signals.....	12
Tabelle 3: Einzelschritte zur Selbstkalibrierung des Spektrometers.....	17
Tabelle 4: Messergebnisse mit der Herstellersoftware des Spektrometers.....	19
Tabelle 5: Messung 1 – Temperaturabhängigkeit der Spektren.....	20
Tabelle 6: Messung 2 – Aufnahme von Spektren bei konstanter Temperatur.....	20
Tabelle 7: Messung 3 – konstante Temperierung des Spektrometers bei variiertem Umgebungstemperatur.	22
Tabelle 8: Vergleich Scanfildgrößen der alten und der neuen optimierten Optik.	27
Tabelle 9: Messung der Bearbeitungszeit nach Optimierung der Parameter.	32
Tabelle 10: Standard Bearbeitungsabstand.	33
Tabelle 11: Vergrößerter Bearbeitungsabstand.	34

Zusammenfassung

In den DBU-geförderten Projekten COLA I und COLA II (AZ 32322/01 und AZ 32322/02) wurden das Verfahren zur laserbasierten Echtzeitanalyse für das Schrottreycling und der Prototyp einer Sortieranlage entwickelt. Das zweischrittige COLA-Verfahren befreit durch eine Laservorbehandlung die Oberfläche von Schmutz und Deckschichten, sodass durch die anschließende laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) der optische Fingerabdruck des Grundmaterials bestimmt wird und eine sortenreine Sortierung erfolgt.

Nachdem in den Vorgängerprojekten das zugrundeliegende Verfahren erfolgreich erprobt und demonstriert werden konnte, wurde im Projekt HILDE durch die Projektpartner Clean-Lasersysteme GmbH und cleansort GmbH das LIBS/Sortierverfahren optimiert und weiterentwickelt, um die Technologie zur Marktreife zu bringen.

Durch den Einsatz verbesserter Spektrometer-Hardware und einer optimierten Bearbeitungsstrategie wurde die Geschwindigkeit der Materialanalyse um einen Faktor 3,4 gesteigert und an verschiedenen Grundmaterialien mit unterschiedlichen Deckschichten nachgewiesen. Die hardware- und softwaretechnische Umsetzung einer Selbstkalibrierung des Spektrometers sichert die zuverlässige LIBS-Analyse und konforme Messung der einzelnen clean2sort Module. Die Schrottsortierung im Feld erfordert eine gleichbleibende Qualität der Mess- und Analyseergebnisse unter variierenden Umgebungsbedingungen; eine Temperaturstabilisierung des Sensormoduls gewährleistet die korrekte Analyse unabhängig von der Umgebungstemperatur. Für die Untersuchung und die Optimierung der Bearbeitungsparameter sowie des Bearbeitungsbereichs wurde ein flexibler Messstand entwickelt, welcher statische als auch dynamische Messungen einfach umzusetzen erlaubt. Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens konnte durch die Vergrößerung des Bearbeitungsbereiches und die Erhöhung der Messgeschwindigkeit gesteigert werden. Durch eine Weiterentwicklung des Optikmoduls wird eine Verdopplung der Bearbeitungsfläche erreicht. Für den Aufbau einer umfassenden Materialbibliothek wurden zahlreiche Kalibrierproben vermessen und ein Grundstock an Materialien hinterlegt. Die Entwicklung eines Algorithmus zur Selbstkalibrierung des Systems ermöglicht die benutzerfreundliche Charakterisierung von Materialien. Die Optimierung des Materialflusses und verbesserte Vereinzelung der Schrottteile ermöglicht Sortierdurchsatzraten von bis zu 10 t/h.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten im Projekt hat die Technologie in den entwickelten Modulen einen Reifegrad erlangt, der die Anwendung im industriellen Umfeld äußerst attraktiv macht und hohes Potenzial für zahlreiche Anwendungsfelder bietet. Die Sammlung technischer und wirtschaftlicher Erfahrungen aus der Erprobung im Feld stellt den nächsten notwendigen Schritt auf dem Weg zur Entwicklung der Serienreife dar.

Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, die das Projekt HILDE unter dem Aktenzeichen 34709/01 mit förderfähigen Gesamtkosten i. H. v. 594.360 € im Rahmen der Richtlinien gefördert hat.

1. Einleitung

Moderne metallische Hochleistungswerkstoffe zeichnen sich durch exakt aufeinander abgestimmte Legierungsanteile aus. Um den Anteil und die Qualität an Recyclingmaterial bei diesen Werkstoffen zu steigern, ist es erforderlich die Legierungszusammensetzung des eingesetzten Schrotts genau zu bestimmen. Konventionelle Analyseverfahren können die Beschichtungen aus Lacken oder Metallen, Kontaminationen und Seigerungsschichten nicht durchdringen. Hier schafft die Kombination zweier Prozesse Abhilfe.

Das Verfahren zur laserbasierten Echtzeitanalyse für das Schrottrecycling befreit durch eine Laservorbehandlung die Oberfläche von Schmutz und Deckschichten, sodass durch die anschließende laserinduzierte Plasmaspektroskopie (LIBS) der optische Fingerabdruck des Grundmaterials bestimmt wird und eine sortenreine Sortierung erfolgt.

In vorangegangenen DBU-Projekten wurden die Grundpfeiler für eine scanfähige Sensorik zur Zusammenarbeit von Laserablation und LIBS gesetzt und unter betriebsnahen Bedingungen erprobt. In der derzeitigen Konfiguration können Teile in einem Scanfeld von 200 x 200 mm² bei einer Bandgeschwindigkeit von 3 m/s gereinigt und analysiert werden. Aktuell sind Raten von ca. 35 Messungen/s möglich und dargestellt. Dieser Technische Stand, der durch das abgeschlossene DBU Projekt erreicht wurde, stellt derzeit den aktuellen Benchmark dar.

Ziele des Projektes sind:

- Eine weitere Erhöhung der Sortiergeschwindigkeit und Durchsatzraten
- Eine vereinfachte Kalibrierung der Anlage zur Erweiterung des Einsatzfeldes auf andere metallische Legierungsfraktionen
- Eine Verbesserung der Bearbeitungsintensität und Lichtausbeute des LIBS Prozesses bei gleichzeitiger Vergrößerung des Arbeitsbereiches des Lasersystems zur Steigerung der Effizienz und nachhaltigen Wirkung der Maschine

Durch den Einsatz der hochdynamischen Sortiertechnik und der Generierung sortenreiner Schmelzschrotte wäre eine signifikante Reduktion des Rohaluminiumeinsatzes möglich, was einer Energieeinsparung um bis zu 95 % entspricht. Das Wissen der Legierungszusammensetzung vorausgesetzt, kann recyceltes Aluminium nahezu verlustfrei, mit lediglich 5 % des Energieaufwands (800 kWh/t) im Vergleich zur Herstellung von Primär-Aluminium (15.700 kWh/t), im Kreislauf geführt werden.

Basierend auf den Ergebnissen der DBU-geförderten Vorgängerprojekte (AZ 32322/01 und AZ 32322/02), in denen das zugrundeliegende COLA-Verfahren entwickelt wurde, wird zielgerichtet eine Optimierung des LIBS-/Sortierverfahrens entwickelt, um Effizienz, Einsatzmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit der Technologie zu steigern und die Recyclingraten bei metallischen Hochleistungswerkstoffen zu steigern.

Wesentliche Arbeitsschritte im Projekt werden im Folgenden benannt.

Durch den Einsatz schneller CMOS-Spektrometer wird eine Geschwindigkeitssteigerung erzielt. Für die Messung des LIBS-Signals wird eine geringere Lichtausbeute benötigt, sodass diese wesentlich beschleunigt werden kann. Weitere Zeiteinsparungen sind durch eine Optimierung des Ablationsprozesses und der Erzeugung des LIBS-Signals möglich, sodass insgesamt eine Geschwindigkeitssteigerung um etwa einen Faktor 5 angestrebt wird.

Aufgrund der dreidimensionalen Ausmaße der Bauteile, kommt es zu unterschiedlichen optischen Weglängen des Plasmasignals von der Oberfläche zum Spektrometer. Daraus resultieren Intensitätsunterschiede des detektierten Signals, welche die Qualität der Messung reduzieren und die Messgeschwindigkeit herabsetzen. Ziel ist die Entwicklung eines Algorithmus, welcher in Abhängigkeit der Bearbeitungsposition die Integrationszeit bestimmt und somit ein intensitätsoptimiertes Signal erzeugt wird.

Stand der Technik ist ein Bearbeitungsbereich von 200 x 200 mm². Bedingt durch die Bauweise der Optikmodule entstehen bei einer kaskadierten Bauweise (die für einen ausreichenden Durchsatz notwendig ist) zwischen den einzelnen Systemen tote Winkel, in denen Teile nicht bearbeitet werden können und somit der Sortiergrad negativ

beeinflusst wird. Durch eine Verdopplung der Bearbeitungsfläche wird eine lückenlose Bearbeitungsfläche realisiert, der Sortiergrad erhöht und die Anzahl der benötigten Messsysteme reduziert und somit ein erheblicher, positiver Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems erzielt.

Ziel ist es eine Vielzahl von Materialien identifizieren zu können und insbesondere die Bibliothek der angelegten Spektren einfach um neue Datensätze erweitern zu können.

Zur Sicherstellung der korrekten Spektrenauswertung wird eine automatische Referenzierung der Spektrometer entwickelt. Um temperaturabhängige Schwankungen der Messergebnisse auszuschließen, erfolgt eine Temperaturcharakterisierung des Systems, welche zur Kalibrierung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur eingesetzt wird.

Durch die Optimierung des Messvorgangs, der Erzielung eines lückenlosen Bearbeitungsbereiches in Kombination mit einer verbesserten Vereinzelung des Stoffstroms soll der Sortiergrad von mindestens 95 % bei einem Durchsatz von > 5 t/h erreicht werden.

2. Geschwindigkeitssteigerung durch Einsatz schneller CMOS-Spektrometer

Auswahl eines geeigneten CMOS-Spektrometers

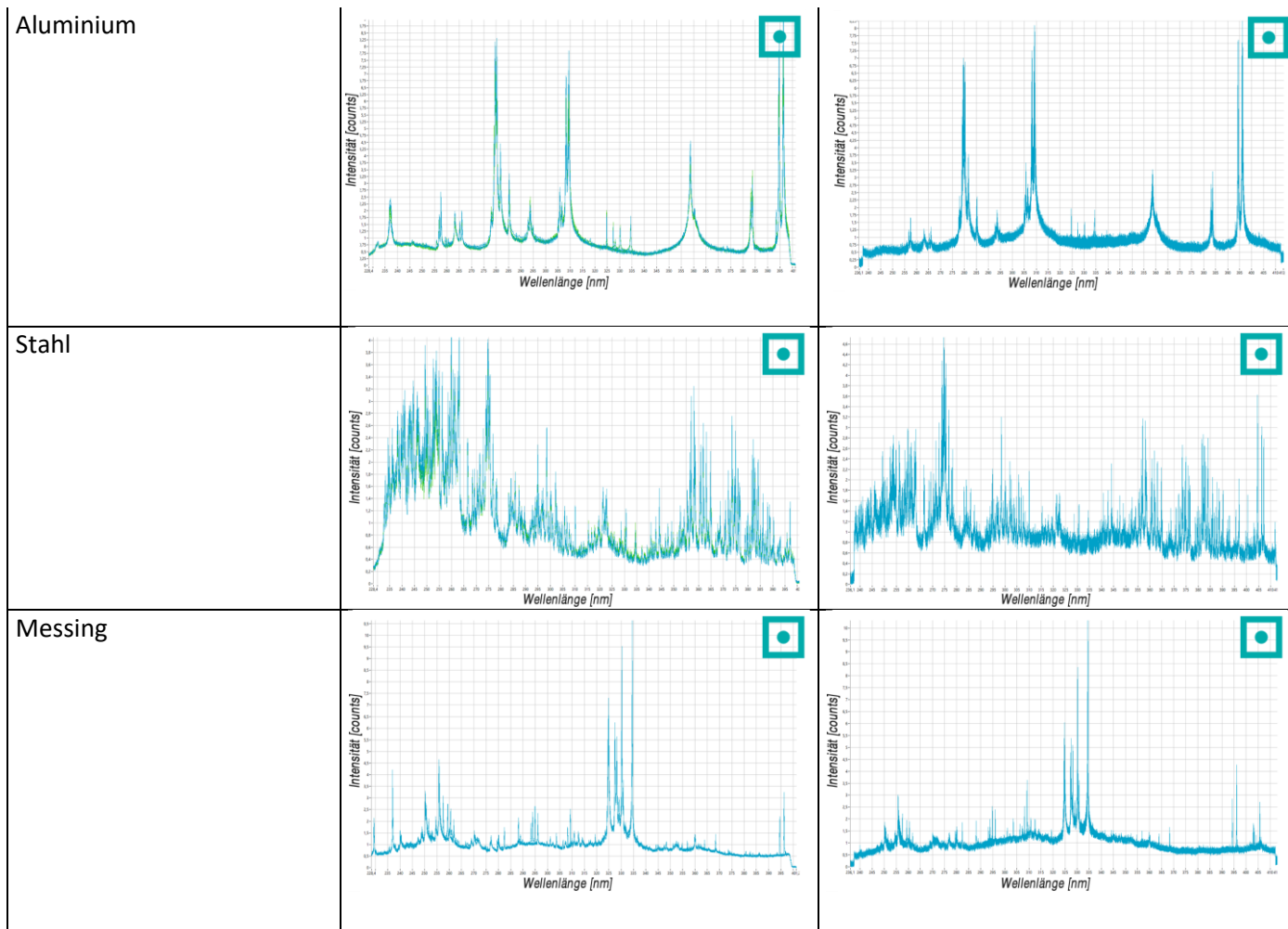
Die neue CMOS-basierte Spektroskopie-Technologie kommt im Vergleich zur herkömmlichen CCD-Technologie mit einer deutlich niedrigeren Lichtausbeute aus, wodurch die Integrationszeiten verringert werden können.

Zur Auswahl des für den vorliegenden Anwendungsfall am besten geeigneten Spektrometers werden zwei Spektrometer im Labor und im Feld getestet. Da eines der Spektrometer unsere Anforderungen an die Taktzeiten, die Signalqualität und die Lichtausbeute erfüllt, wird von Versuchen an weiteren Produkten abgesehen.

Für einen Vergleich der Spektrometer werden Aluminium-, Stahl- und Messingproben im Technikum bei einer Fördergeschwindigkeit von $v = 3 \text{ m/s}$ vermessen und die Spektren gegenübergestellt. Für die Messungen wird die Hardware des Testmoduls „clean2sort“ (Modul 01) nicht verändert, lediglich die Spektrometer werden ausgetauscht.

Tabelle 1: Kenndaten Spektrometer inkl. Versuchsauswertung.

	Spektrometer 01	Spektrometer 02
Detektor	CMOS	CMOS
Wellenlängenbereich [nm]	200-1100	200 - 1100
Detektor [Pixel]	2048	4096
Integrationszeit	9 μs - 59s	30 μs - 50 s
Sample Speed mit On-Board-Mittelung [ms /scan]	0,38	6,5
Daten-Transfargeschwindigkeit [ms /scan]	0,38	8,9
Streulicht [%]	0,19-1,0	0,2 - 1



Im Vergleich zu Spektrometer 01 weist Spektrometer 02 ein größeres Signal-Rausch-Verhältnis bei geringerer Intensität auf. Die höhere Auflösung führt zu verbesserten Auswertemöglichkeiten und damit zu genaueren Analyseergebnissen. Für die präziseren Messergebnisse sind deutlich höhere Verarbeitungszeiten notwendig. Für die aktuellen Sortieraufgaben ist davon auszugehen, dass die Auflösung von Spektrometer 01 ausreicht. Um eine schnelle Auswertung erzielen zu können wird dieses Spektrometer eingesetzt.

Optimierung Timing

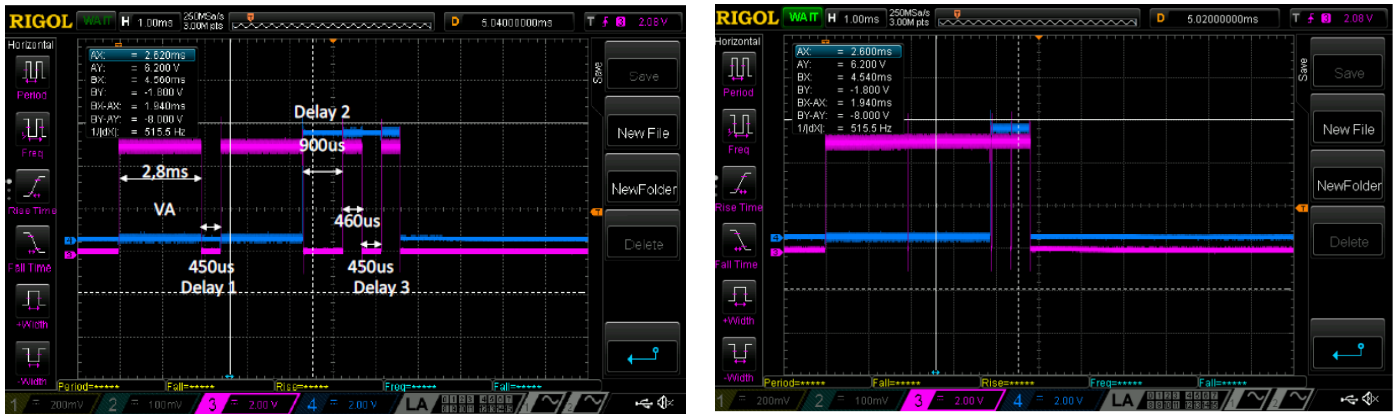


Abbildung 1: : Messung der Bearbeitungszeit - links: mit den alten Parametern, rechts: mit den neuen Parametern.

Durch eine neue Bearbeitungsstrategie konnte die Bearbeitungszeit optimiert werden. Zwischen einzelnen Ablationsüberfahrten – wie sie bei den alten Parametereinstellungen notwendig waren, um eine ausreichende Reinigung der Oberfläche zu erzielen – entstehen Lücken (Delays), in denen die Scannerspiegel, welche den Laserstrahl über die Oberfläche bewegen, in ihre Ausgangsposition zurückbewegt werden. Bei der neuen Bearbeitungsstrategie, erfolgt die Reinigung der Oberfläche in einem einzigen Schritt, sodass die Delays zwischen den einzelnen Ablationsschritten, zwischen Ablationsfläche und LIBS-Messung sowie die zwischen den einzelnen LIBS-Messungen eingespart werden. Insgesamt resultiert eine Zeiteinsparung von 1,8 ms pro Messung (vgl. Abbildung 1).

In Tabelle 2 sind die einzelnen Parameter dargestellt, die sich auf die Bearbeitungszeit auswirken. Der Vergleich zeigt die Ausgangswerte zu Projektbeginn, die Zielparameter sowie die im Projekt erreichten Verbesserungen.

Tabelle 2: Zielwerte für die Geschwindigkeitssteigerung der Messung, bestehend aus Vorablation, Erzeugung und Erfassung sowie Auswertung des LIBS-Signals.

	Stand vor Projektbeginn	Geplante Verbesserung	Tatsächliche Verbesserung	Maßnahmen
VORABLATION				
Anzahl der Überfahrten	4,00	1,00	1,00	Optimierung der Ablationsflächenparameter und Optimierung der Justage des Laserstrahlengangs
Zeit pro Überfahrt [ms]	4,40	3,30	4,78	Optimierung der Ablationsfläche
Bearbeitungszeit Vorablation [ms]	17,60	3,30	4,78	
LIBS				
Anzahl der Überfahrten	3,00	1,00	1,00	Auswahl der ebensten Fläche und Optimierung der LIBS-Flächenparameter
Zeit pro Überfahrt [ms]	1,10	1,00	1,41	Optimierung der LIBS-Fläche

Bearbeitungszeit LIBS [ms]	3,30	1,00	1,41	
SPEKTROMETER (Zeitparallel zu LIBS)				
Integrationszeit [ms]	5,00	1,10	1,4	Schnelleres Spektrometer mit besser Lichtausbeute und Optimierung der Justage der optischen Komponenten im LIBS-Strahlengang
Auslesezeit Spektrometer [ms]	5,00	0,60	0,60	Schnelleres Spektrometer
Bearbeitungszeit Spektrometer [ms]	10,00	1,70	2,00	
SCANNER				
Zeit für Rücksprung [ms]	6,48	2,07	2,42	
Gesamt Zeit für eine Messung inkl. Rücksprung [ms]	29,08	6,47	8,60	
Zurückgelegter Weg [mm]	87,23	19,42	25,80	
Verbesserung [Faktor]		4,49	3,38	

Im Folgenden werden die erreichten Verbesserungen diskutiert.

Die ursprünglichen Parameter für die Vorablation (VA) waren darauf ausgelegt, in möglichst kurzer Zeit möglichst tief in das Material einzudringen. Der erzielte Flächenabtrag war nicht homogen, sodass mehrere Wiederholungen nötig waren, bis sichergestellt werden konnte, dass bei der LIBS-Messung keine Verunreinigungen mehr auf dem Material vorhanden sind. Mit den optimierten Parametern ist die Flächenabtrag wesentlich homogener, sodass mit einer Überfahrt eine saubere Oberfläche gewährleistet werden kann. Die Überlappung der Laserpulse in der Fläche wurde für die Erreichung eines gleichmäßigen Bearbeitungsergebnisses erhöht, wodurch die Bearbeitungszeit von 4,4 ms auf 4,78 ms gestiegen ist (vgl. Abbildung 2). Da statt der vierfachen Reinigung nur noch einmalig vorgereinigt werden muss, beträgt die Zeitersparnis 12,82 ms.

Eine weitere Reduzierung der Bearbeitungszeit ist voraussichtlich möglich. Da die Fortbewegung des zu vermessenden Bauteils in der Anlage aufgrund der verkürzten Zeit für die Vorablation bis zur LIBS-Messung reduziert wird, kann die Vorablationsfläche verkleinert werden. Im Rahmen des Projektes wurde die weitere Optimierung aus Zeitgründen nicht vorgenommen.

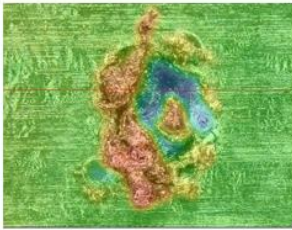
Messungen im Applikationscenter ($v = 3\text{m/sec}$):


Bild 1: VA-Fläche alte Parameter

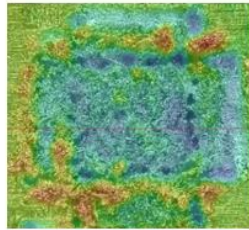


Bild 2: VA-Fläche neue Parameter

Abbildung 2: Falschfarbendarstellung einer mikroskopischen Messung der Oberflächentopographie der Vorablationsfläche.

Die Parameter zur Erzeugung des LIBS-Signals wurden dahingehend optimiert, dass ausreichend viel Licht mit einer einzelnen Überfahrt erzeugt wird. So kann das beste Licht pro Zeit Verhältnis erreicht werden. Bei mehrfachen Überfahrten nimmt die Lichtintensität von Mal zu Mal ab, da sich der Laser immer tiefer in das Material gräbt und immer weniger Licht aus dem entstehenden Loch austritt. Die Bearbeitungszeit für eine einzelne LIBS-Fläche ist von 1,1 ms auf 1,41 ms gestiegen. Da nicht mehr drei sondern nur noch eine Überfahrt benötigt wird, beträgt die Zeitersparnis 1,89 ms.

Durch die Parameteroptimierung der Bearbeitungsflächen, ein verbessertes Justageverfahren des Systems und ein neues Spektrometer mit besserer Lichtausbeute und kürzeren Auslesezeiten konnte die Gesamtzeit für eine Messung von 29,08 ms auf 8,6 ms um den Faktor 3,38 reduziert werden.

Erprobung der optimierten Bearbeitungsparameter

Eine von der Industrie angefragte Sortieraufgabe ist die quantitative Analyse von verzinkten Stählen. Für eine reproduzierbare, quantitative Analyse ist zunächst die rückstandslose Entfernung von Deckschichten wie der Zinkauflage im Bereich des Messflecks unabdingbar.

In Abbildung 3 wird der Effekt der Vorablation an einem feuerverzinkten Feinblech mit einer Zinkauflage von 142 g/m^2 und einer leicht beölten Oberfläche ($0,5 - 1\text{ g/m}^2$) anhand der aufgenommenen Spektren verdeutlicht. Ohne Vorablation sind die Zn-Peaks im Spektrum der LIBS-Analyse deutlich ausgeprägt, sodass eine quantitative Analyse des Grundmaterials nicht möglich ist. Bei den Ausgangseinstellungen und einer VA sind die Peaks noch ersichtlicher. Mit den neuen Einstellungen und einer VA sind die Peaks so stark reduziert - und damit die Zn-Schicht ausreichend abgetragen - dass eine Identifizierung des Grundmaterials anhand der Auswertung des LIBS-Signals erfolgen kann.

Selbst Schrotte wie lackiertes, feuerverzinktes Feinblech mit hoher Zinkauflage können bei Fördergeschwindigkeiten von 3 m/s aufgabengerecht vorablatiert, analysiert und damit sortiert werden.

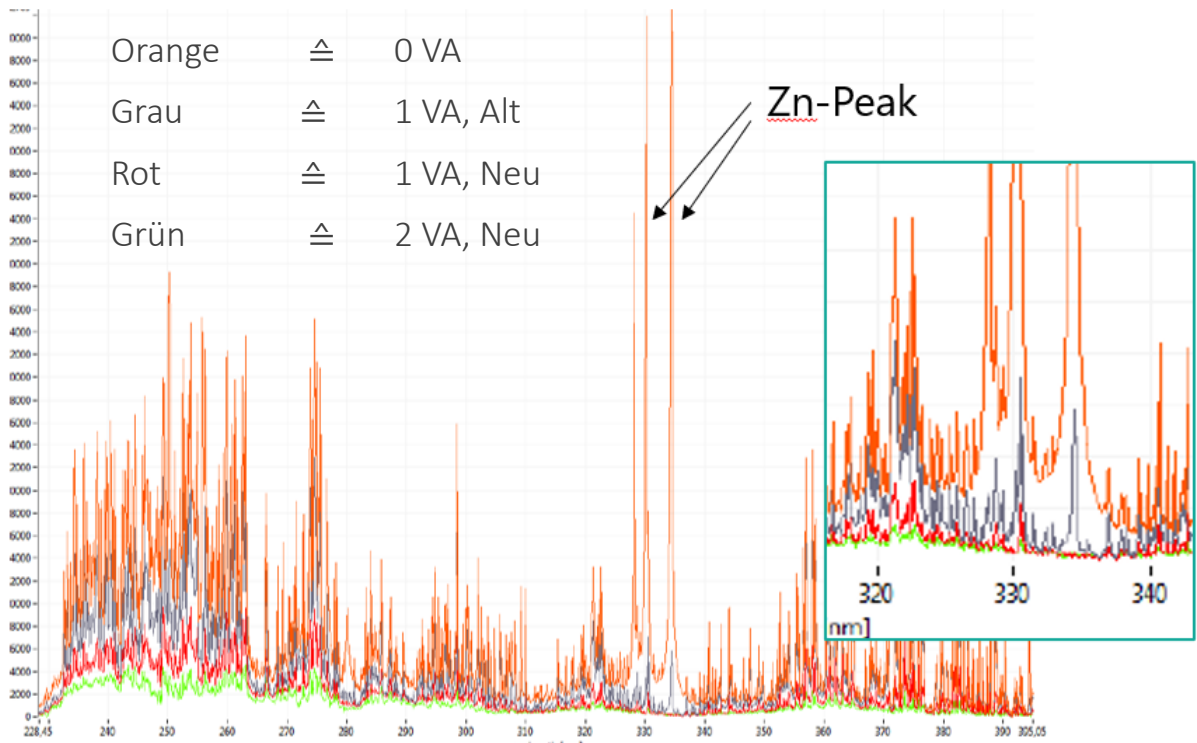


Abbildung 3: Spektralvergleich einer verzinkten Probe mit unterschiedlichen Vorablationen.

In einem weiteren Test wird eine lackierte Aluminium-Alt-Schrott-Schredder-Probe analysiert und die Vorablationsperformance getestet. Bei der ersten Messung, ohne Vorablation (0 x VA, Spektrum rechts oben), erreichen einige Einzelpulse bereits das Grundmaterial und lassen charakteristische Peaks des Aluminiums erkennen. Die Intensität und das Signal-Rausch-Verhältnis des Spektrums lassen allerdings keine weitere Auswertung zu. Ab der ersten Vorablation (1 x VA) werden die Oberflächenbeschichtung sowie mögliche Legierungselement-Seigerungsschichten in Gänze abgetragen. Weitere Ablationsfahrten (2 x VA und 3 x VA) haben keinen Einfluss auf das Messergebnis (vgl. Abbildung 4).

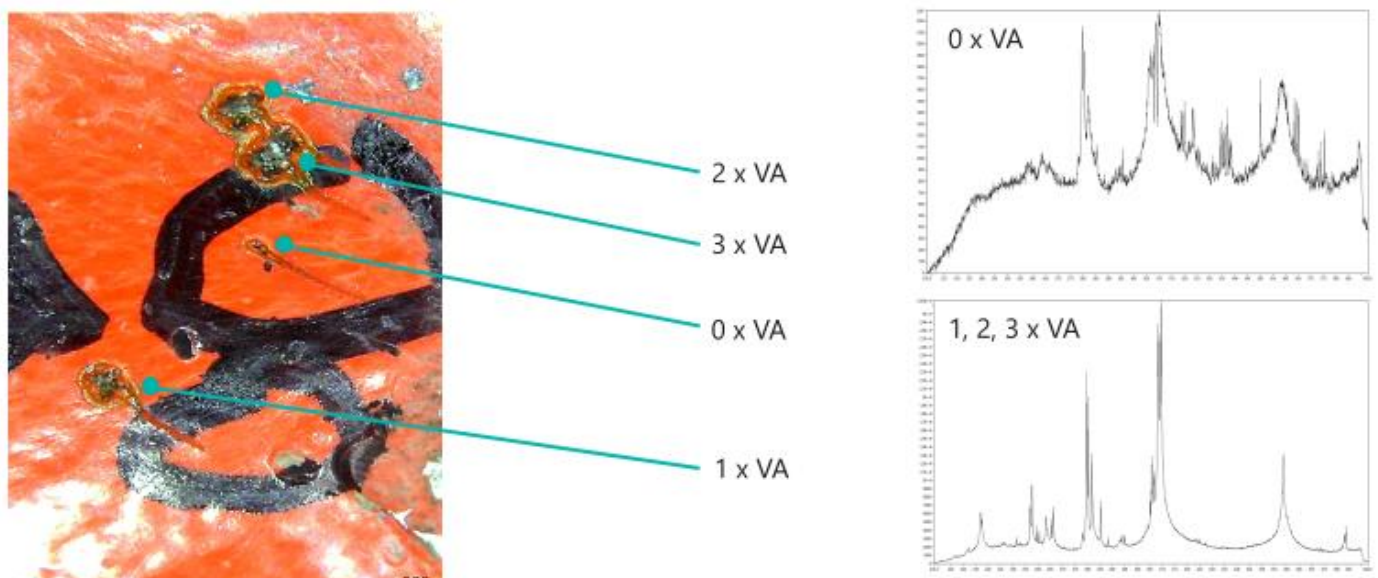


Abbildung 4: Spektralvergleich einer lackierten Aluminium Probe mit unterschiedlichen Vorablationen.

Die Mikroskopaufnahmen der laserbearbeiteten Oberfläche bestätigen nochmals die aus den Spektren geschlossene Annahme. Bei der Messung ohne Vorablation (Abbildung 5 links) wird die 101 µm dicke Lackschicht im Mess-Spot zwar abgetragen, die Randeffecte und der nicht saubere Messbereich verhindern jedoch eine aussagekräftige Analyse. Bei einer VA (Abbildung 5 rechts) wird die Oberflächenbeschichtung und die Materialoberfläche zuverlässig abgetragen, eine ausreichend große Fläche für die LIBS-Analyse wird freigelegt.

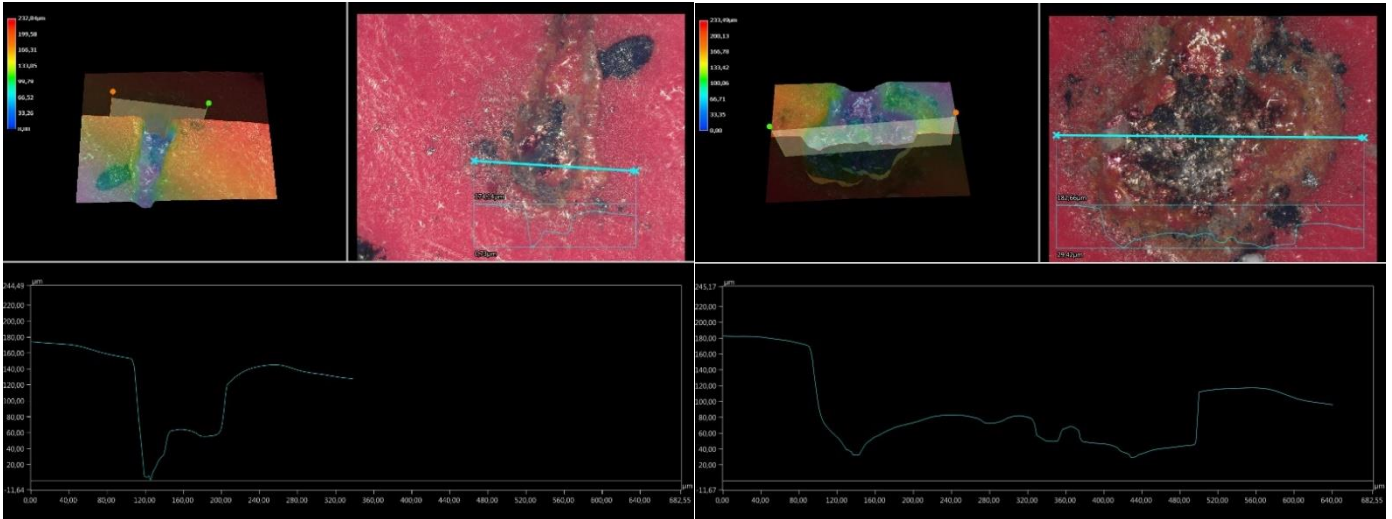


Abbildung 5: Vergleich der Ablationstiefe Links: ohne VA / Rechts 1xVA.

3. Automatisches Referenzieren und Selbstkalibrieren des Systems, temperaturunabhängige Qualität der Messergebnisse

Vor der Inbetriebnahme wird jedes Spektrometer auf die definierten Referenzlinien einer Quecksilberdampfampe kalibriert. Hierbei wird die Kalibrierlampe in den Strahlengang implementiert und ein Spektrum aufgenommen.

Das Spektrometer hat einem Messbereich von 200 nm bis 400 nm. Die Kalibrierlampe deckt diesen Wellenlängenbereich mit sechs Quecksilber-Spektrallinien ab, welche zur Selbstkalibrierung verwendet werden können.

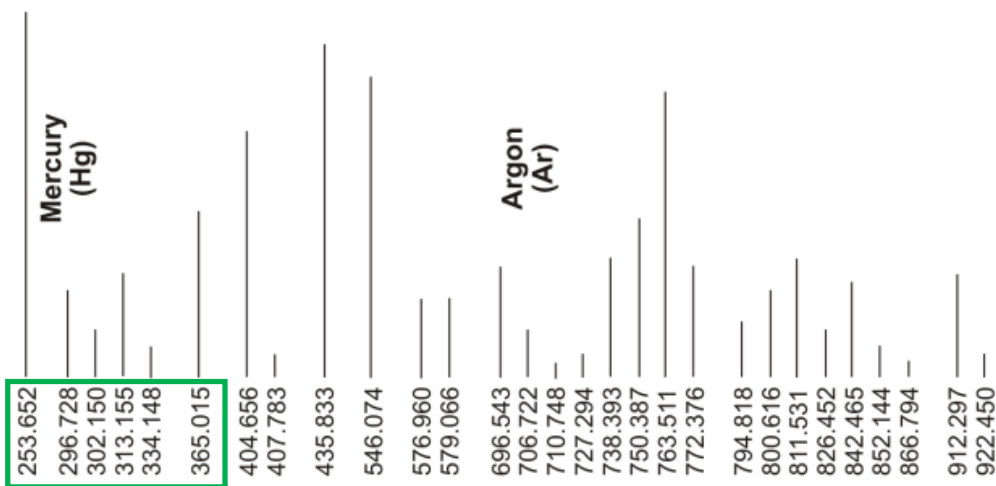
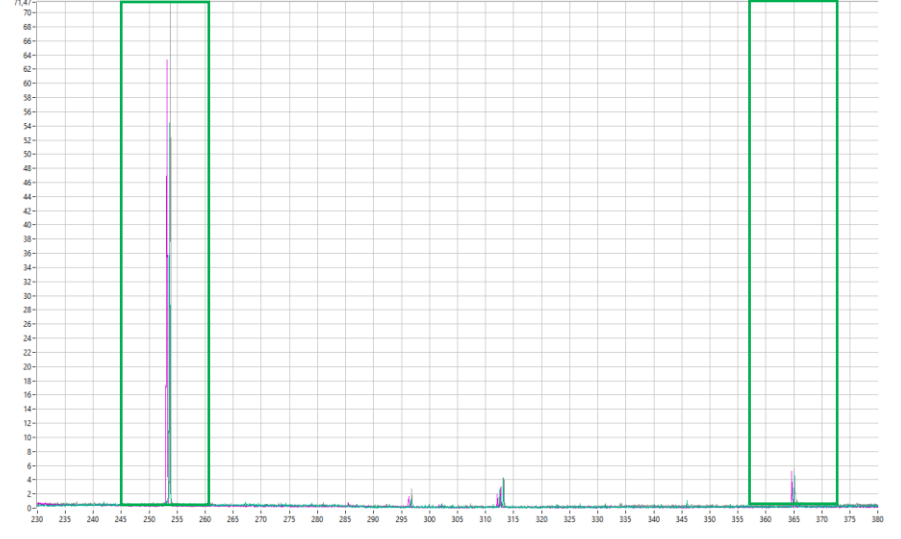
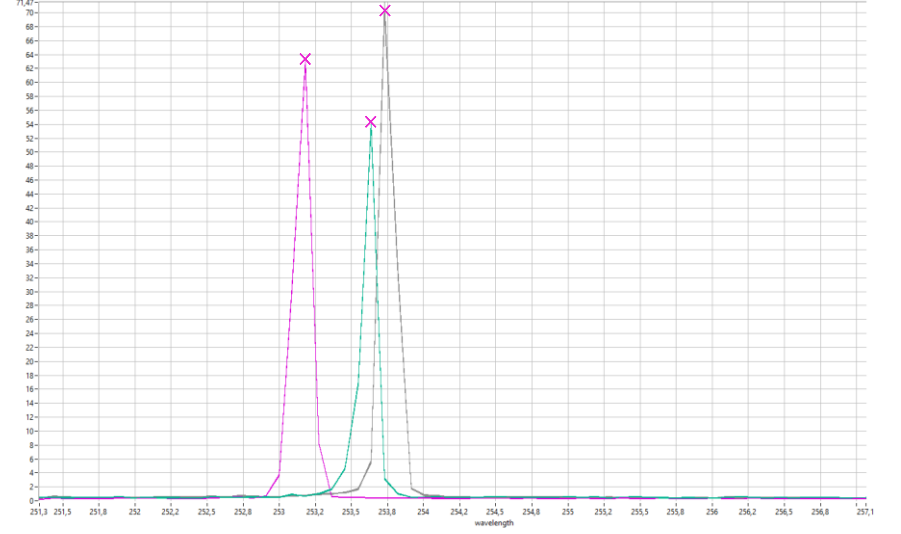


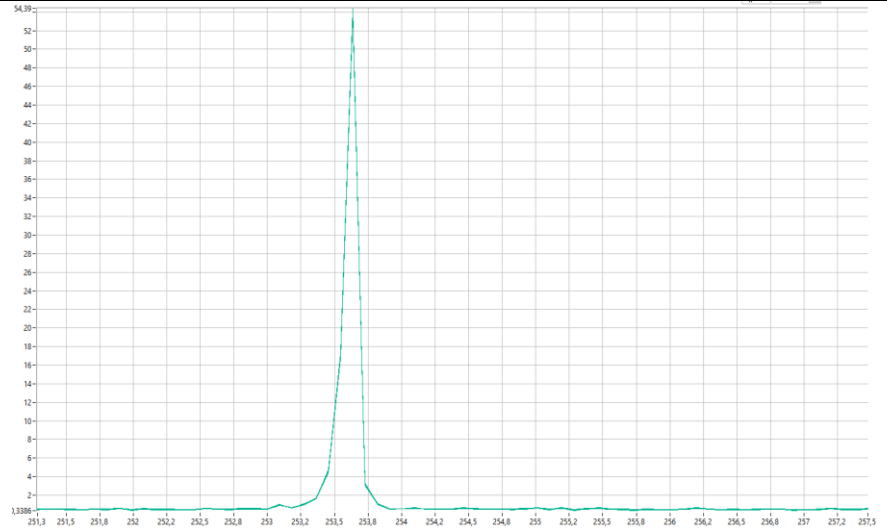
Abbildung 6: Wellenlängen der Kalibrierlampe.

Mittels der neuen Software wird das Maximum der Kalibrier-Peaks in einer zuvor definierten „Region of Interest“ ermittelt und die Peaks an die definierten Referenzlinien automatisch adaptiert. Im Folgenden sind die einzelnen Arbeitsschritte anhand der derzeit vorhandenen Spektrometer dargestellt.

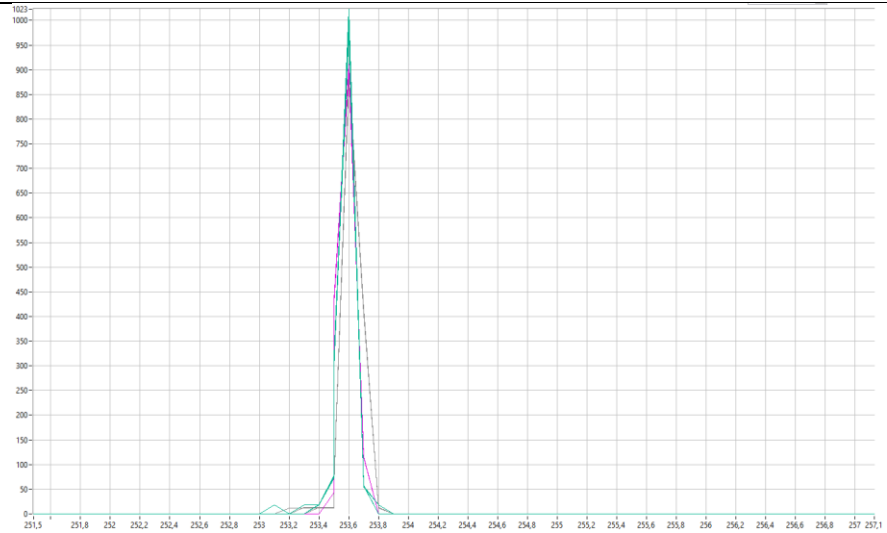
Tabelle 3: Einzelschritte zur Selbstkalibrierung des Spektrometers.

<p>Darstellung des gesamten Wellenlängenbereiches von drei clean2Sort Modulen.</p> <p>Modul O1 ist in magenta, Modul O2 in grün und Modul O3 in grau dargestellt.</p> <p>Die grünfarbenen Rechtecke zeigen die „Regions of Interests“ in denen die Peaks zur Selbstkalibrierung des Systems liegen.</p>	 <p>The plot shows intensity versus wavelength from 230 to 380 nm. Three distinct peaks are visible: a magenta peak at approximately 253.2 nm, a green peak at approximately 258.8 nm, and a grey peak at approximately 259.8 nm. Two green rectangular boxes are drawn around the green and grey peaks, indicating the Regions of Interest (ROIs) for self-calibration.</p>
<p>Im zweiten Schritt ermittelt die „cleananalysis“-Software das Intensitätsmaximum des jeweiligen Peaks in Abhängigkeit der Wellenlänge und berechnet die Differenz zu den vorgegebenen Referenzpeaks.</p>	 <p>This is a zoomed-in view of the peaks from the previous plot, focusing on the wavelength range from 251.3 to 257.1 nm. The magenta peak is at 253.2 nm, the green peak is at 258.8 nm, and the grey peak is at 259.8 nm. Each peak's maximum intensity is marked with a small 'x' symbol, showing how the software identifies the peak positions for calibration.</p>

Mit der Information der Soll-Lage des Peaks wird jedem System ein Offset vorgegeben und die Peaks somit auf die Soll-Lage gefittet.



Als Resultat liegen alle Maxima der jeweiligen Peaks der einzelnen Messsysteme auf einer Wellenlänge. Die Kalibrierung ist abgeschlossen.



Untersuchung des Temperatureinflusses unter realen Bedingungen

Nach Herstellerangaben weist das Spektrometer in Abhängigkeit von der Temperatur einen Wellenlängenshift bzw. Peakshift auf, der bis zu 0,1 Pixel pro Grad Celsius betragen kann. Dieser wird im Folgenden zunächst im Labor und anschließend unter realen Umgebungsbedingungen überprüft.

Der Wellenlängenshift in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, wird zunächst in einem einfachen Messaufbau überprüft. Hierfür wird das Licht der Kalibrierlampe über eine 5 m Faser direkt in das Spektrometer geleitet und die Verschiebung der Peaks in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur aufgenommen.

Im Laboraufbau wird das Spektrometer in einem temperaturgesteuerten Ofen verbaut (vgl. Abbildung 7). Die Kalibrierlampe wird außerhalb des Ofens montiert und ihre Temperatur konstant gehalten. Für die Versuche wird ein Controller programmiert, der in der Lage ist, das Spektrometer in Abhängigkeit von der Temperatur zu triggern. So kann bei einer Temperatursteigerung von einem Grad ein Spektrum aufgenommen werden. In der folgenden Versuchsreihe werden in 10 Grad-Schritten Spektren aufgenommen und diese gegenübergestellt. Das Licht für die Spektren wird von der Kalibrierlampe erzeugt. Es werden Spektren bei 17, 27 und 37 Grad aufgenommen.

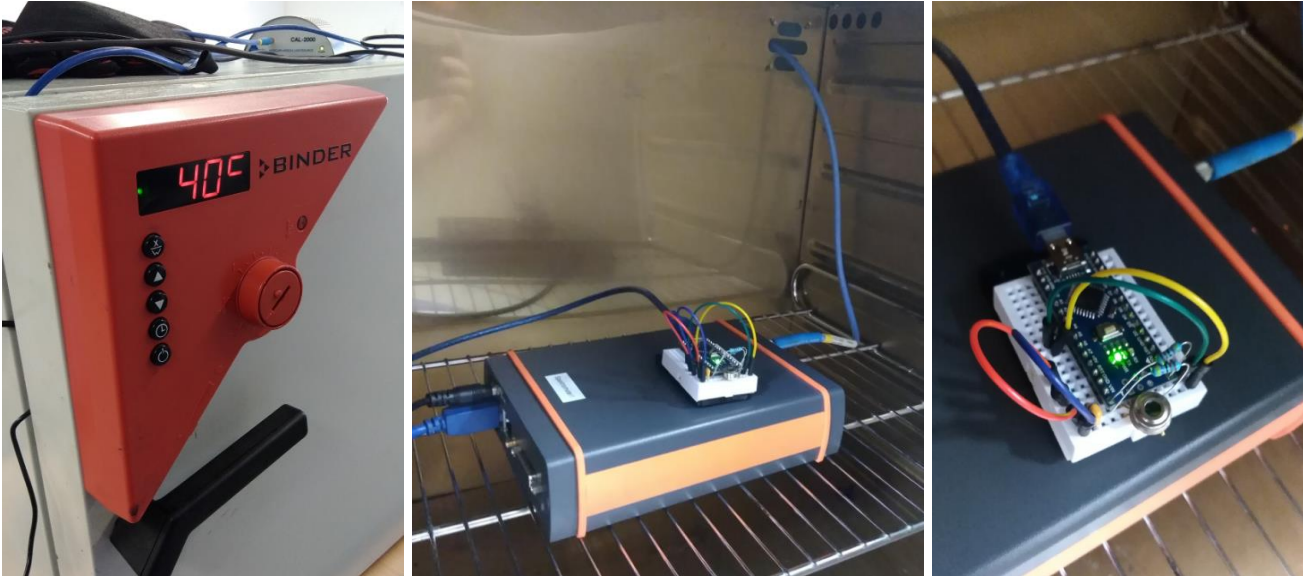


Abbildung 7: Versuchsaufbau Links: geschlossener Ofen, Mitte: Spektrometer mit Steuereinheit, Rechts: Controller mit Temperaturmodul.

In Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Messung mittels Software des Spektrometerherstellers dargestellt. Ein reproduzierbarer Temperaturdrift von 0,09 nm/°C wird ermittelt. Eine Temperaturregelung ist für eine zuverlässige Materialanalyse bei schwankenden Umgebungsbedingungen notwendig und wird im Folgenden weiter untersucht und entwickelt.

Tabelle 4: Messergebnisse mit der Herstellersoftware des Spektrometers.

Messung	1	
Temperatur	17 bis 37 grad	
Filter	-	
Wellenlängen POI [nm]	17 grad: 312,36 27 grad: 312,45 37 grad: 312,53	
Beschreibung	Die Messungen zeigen einen klaren Drift i. A. der Temperatur	

Der im Technikum festgestellte Wellenlängenshift des Spektrometers wird im Labor mit einem neuen temperierten Gehäuse überprüft, um eine geeignete Temperierung zu entwickeln. Die Spektrometer Temperatur wird über einen integrierten Temperatursensor gemessen. Darüber hinaus wird untersucht, wie konstant die Temperatur im Spektrometer gehalten werden kann und wie lange die Klimatisierung benötigt, um das Gehäuse auf eine konstante Temperatur zu bringen.

Spektrometer und Gehäuse werden durch ein Klimagerät über Einstellung von Vorlauf Temperatur und Durchfluss temperiert. Die Temperaturen im Klimagerät und im Spektrometer werden aufgezeichnet und in Intervallschritten

von 2,5 °C Spektren aufgenommen und diese gegenübergestellt. Das Licht für die Spektren wird von der Kalibrierlampe erzeugt. Dieses wird über eine Faser direkt in das Spektrometer geleitet.

Im ersten Versuch wird das Spektrometer von einer Temperatur von 40,25°C auf 22,5°C heruntergekühlt und alle 2,5°C Spektren aufgenommen und gegenübergestellt. Pro Messung werden 5 Spektren aufgenommen. Die Integrationszeit wird auf 0,3 ms festgelegt, um das Intensitätsmaximum nicht zu überschreiten.

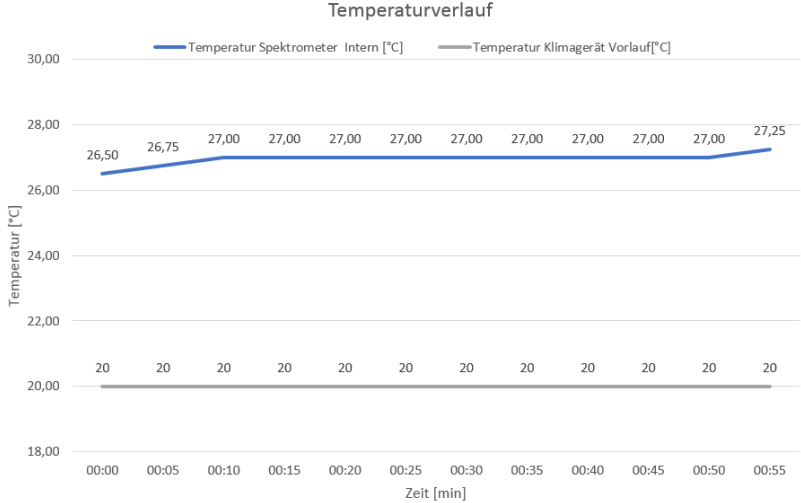
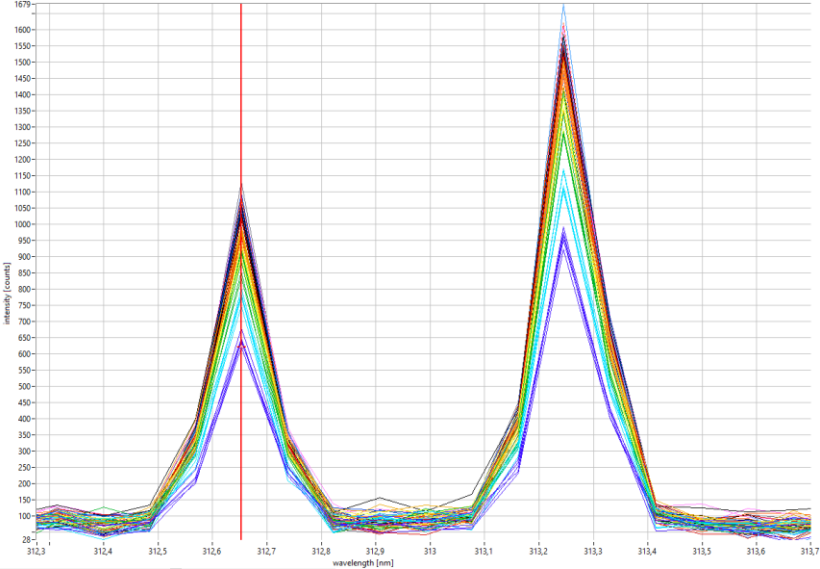
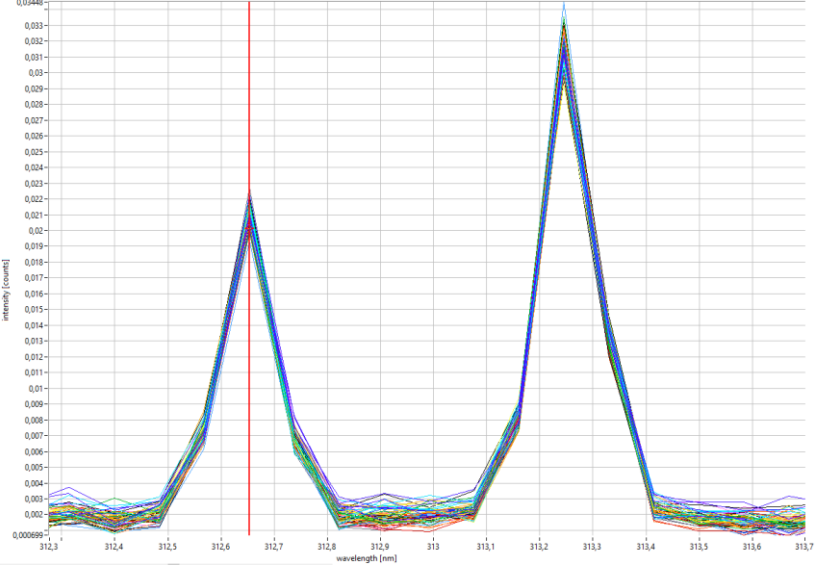
Tabelle 5: Messung 1 – Temperaturabhängigkeit der Spektren.

Messung	1	
Beschreibung	Pro Messung wurden 5 Spektren aufgenommen. Die Integrationszeit wurde auf 0,3 ms eingestellt, um das Intensitätsmaximum nicht zu überschreiten.	
Temperatur	22,5 – 40,25	
Filter	-	
Beschreibung	Temperaturverlauf der Messungen	
Wellenlängen POI [nm]	22,5°: 312,65 24,75°: 312,65 27,5°: 312,65 30,0°: 312,65 32,5°: 312,65 35,0°: 312,65 40,25 grad: 312,57	
Beschreibung	Die Messungen zeigen eine klare Drift i. A. von der Temperatur.	

In Messung 2 wird die Temperatur des Spektrometers konstant bei ca. 27°C gehalten und alle 5 min Spektren aufgenommen und gegenübergestellt.

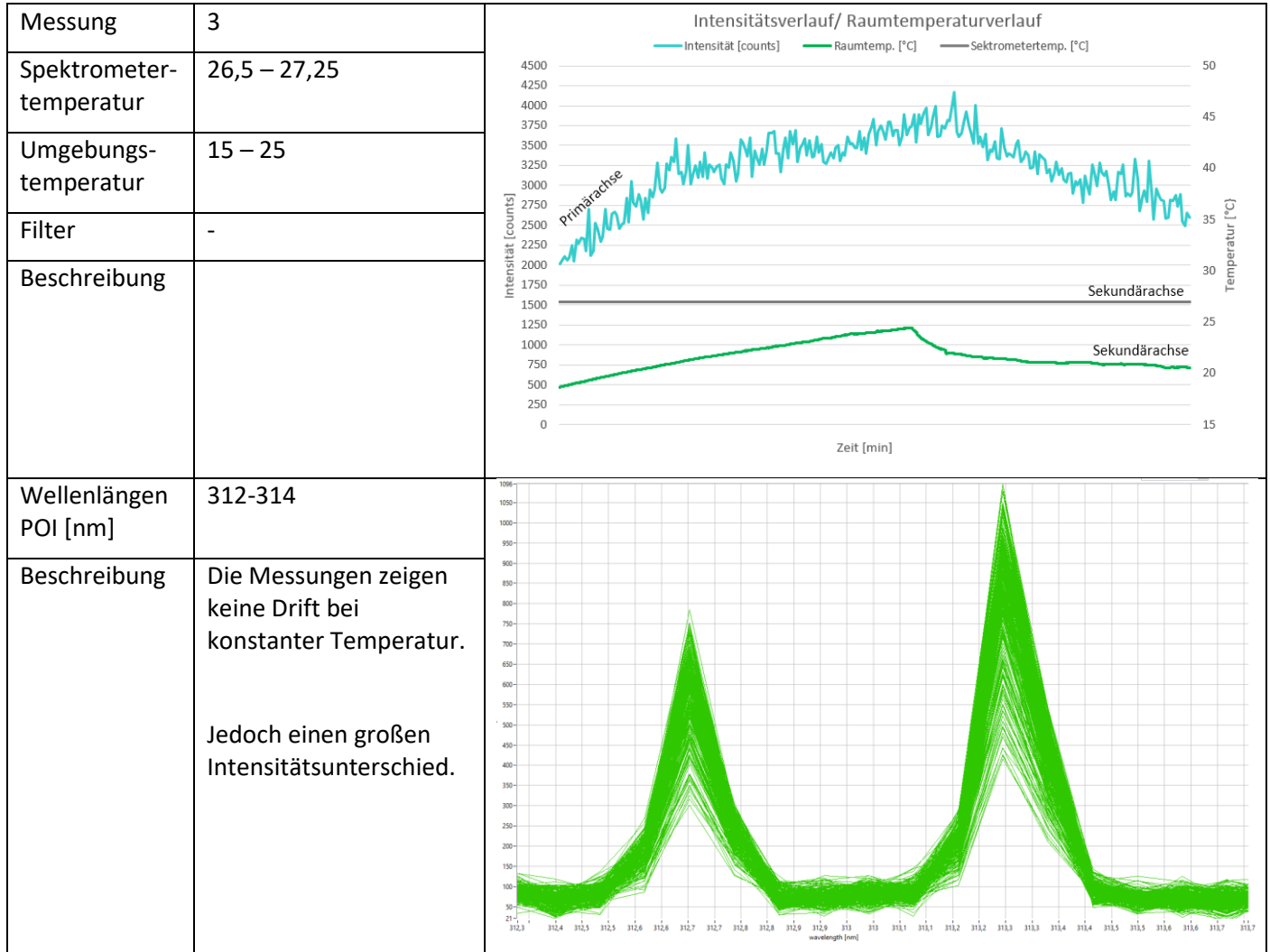
Tabelle 6: Messung 2 – Aufnahme von Spektren bei konstanter Temperatur.

Messung	2	
Temperatur	26,5 – 27,25	
Filter	-	

<p>Beschreibung</p>	<p>Temperaturverlauf der Messungen.</p> <p>Temperatur im Spektrometer und Temperatur Vorlauf Klimagerät</p>	
<p>Wellenlängen POI [nm]</p>	<p>312 - 314</p>	
<p>Beschreibung</p>	<p>Die Messungen zeigen keine Drift bei konstanter Temperatur.</p> <p>Intensitätsschwankungen innerhalb der Messungen sind erkennbar.</p> <p>Messungen bei Minute 0 und 5 haben die geringsten Intensitäten</p>	
<p>Messung</p>	<p>2b</p>	
<p>Filter</p>	<p>Normiert nach Mittelwert</p>	
<p>Beschreibung</p>	<p>Die Messungen zeigen keine Drift bei konstanter Temperatur.</p> <p>Durch eine Normierung auf den Mittelwert können die Intensitätsschwankungen verringert werden.</p>	

In den vorangegangenen Messungen war die Umgebungstemperatur konstant. Im nächsten Schritt wird die Umgebungstemperatur variiert um zu prüfen, ob die Temperierung des Spektrometers mittels Klimagerät ausreicht, um eine Drift der Messwerte zu vermeiden.

Tabelle 7: Messung 3 – konstante Temperierung des Spektrometers bei variiert Umgebungstemperatur.



Die Messungen zeigen, dass der Wellenlängenshift den Angaben des Herstellers entspricht und reproduzierbar ist. Ohne eine Stabilisierung der Temperatur beeinträchtigt die Drift die Analyse der Messergebnisse, so dass eine Temperierung des Spektrometers erforderlich ist. Die Temperaturstabilisierung über ein Klimagerät garantiert auch bei wechselnden Umgebungsbedingungen die zuverlässige Detektion der Spektren. Basierend auf den Ergebnissen wird im Folgenden ein temperiertes Gehäuse für das Spektrometer entwickelt, um auch in der Sortieranlage zuverlässige Messergebnisse zu erzielen.

Konstruktion und Aufbau eines temperierten Optikmoduls zur grundsätzlichen Vermeidung von Temperaturschwankungen

Zur Vermeidung von Temperaturschwankungen im Spektrometer wird dieses neben dem generell temperierten clen2sort Gehäuse in ein separat temperiertes Gehäuse eingebaut. Das Temperierungsmodul heizt das Spektrometer zunächst auf eine Betriebstemperatur auf und hält diese während des Betriebs konstant. Das Aluminiumgehäuse wird aus dem Vollen gefräst und bietet damit zum einen die perfekten Voraussetzungen für den angedachten

Anwendungsfall, zum anderen erfüllt es die benötigten Anforderungen an Maßgenauigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Über Temperatursensoren in der Nähe der optischen Bank des Spektrometers, innerhalb des Gehäuses sowie außerhalb des Gehäuses und Durchflusssensoren werden Temperaturschwankungen erfasst und mit Hilfe eines Algorithmus eine konstante Temperierung gesteuert, sodass die zuverlässige Messung auch bei wechselnden Umgebungseinflüssen sichergestellt ist.

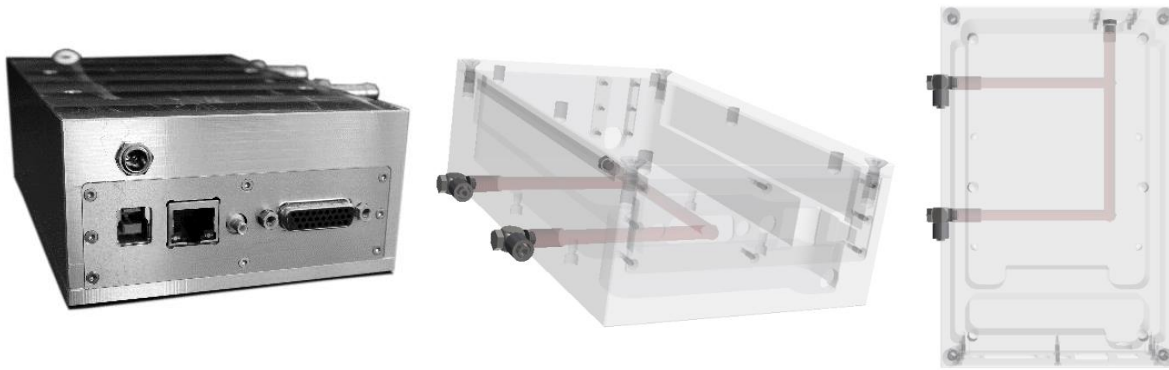


Abbildung 8: Temperiertes Spektrometer Gehäuse (links: Außenansicht Gehäuse, Mitte: 3D-Ansicht Gehäuse mit farblich gekennzeichneten Kühlleitungen, rechts: Draufsicht Gehäuse).

Untersuchung der Funktion des realisierten Systems

Für die Untersuchung der Temperaturstabilität in der Sortieranlage werden die Messmodule inklusive der Spektrometer-Temperierung aufgebaut und Langzeittests im Technikum mit unterschiedlichen Umgebungstemperaturen durchgeführt. Für die Messungen wurde unsere Software „cleananalysis“ sowie die clean2sort Module um Sensoren zur Überwachung des Systems erweitert:

Sensor 1: Durchflussmengenmesser Spektrometer Gehäuse

Sensor 2: Durchflussmengenmesser clean2sort Modul gesamt

Sensor 3: Temperatursensor Spektrometer Platine

Sensor 4: Temperatursensor Spektrometer Gehäuse

Sensor 5: Temperatursensor clean2sort Modul

Sensor 6: Luftdrucksensor clean2sort Modul

Sensor 7: Luftfeuchte clean2sort Modul

Sensor 8: Luftqualität clean2sort Modul

In Abbildung 9 zeigt die schwarze Kurve im Screenshot der „cleananalysis“-Software mit der Bezeichnung *Spectre* den gemessenen Temperaturverlauf am Spektrometer, die Temperaturabweichung liegt im Langzeitbetrieb unter 3 %.

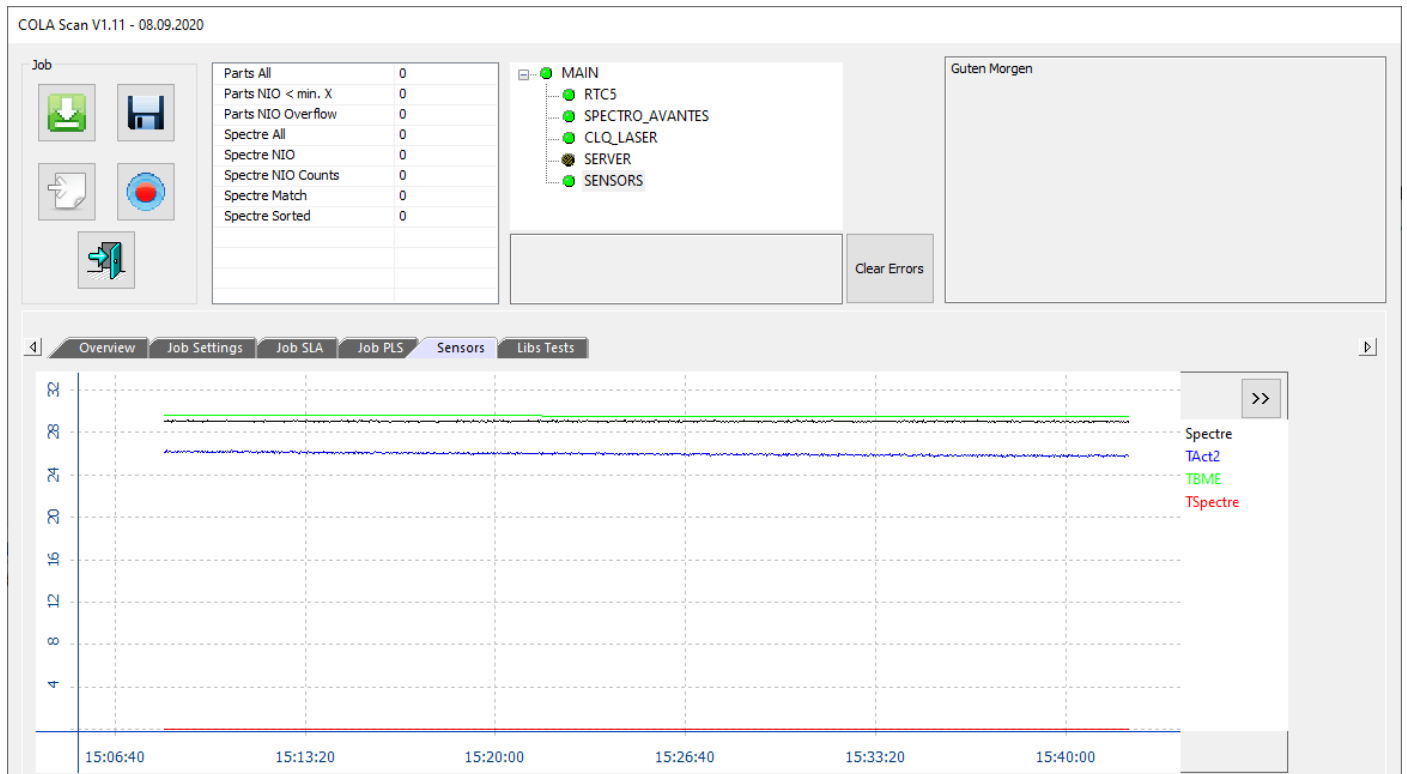


Abbildung 9: Benutzeroberfläche Software „cleananalysis“. Messung der Spektrometertemperatur „Spectre“.

Das clean2sort Modul

Um den wechselnden Umgebungsbedingungen der Recycling-Industrie gerecht zu werden, sorgt ein aus dem Vollen gefrästes Gehäuse mit eigenem Kühlkreislauf für konstante Analysequalitäten. Die gefräste Innenkontur bietet neben der Steifigkeit sehr enge Toleranzen für die Montage der optischen Komponenten. Diese sind durch das dichte Gehäuse, das mit einem Überdruck beaufschlagt wird, perfekt von den äußeren Umgebungsbedingungen wie Staub und Dreck geschützt. Durch das komplette Gehäuse laufen Kühlleitungen, die an ein Klimagerät angeschlossen werden, um die engen Justagetoleranzen auch in einem Umgebungstemperaturbereich von -15 bis 45 °C konstant zu halten. Zur internen Systemüberwachung werden zahlreiche Temperatur-, Druck-, Feuchte- und Durchflusssensoren verbaut. Zudem kann das clean2sort Modul im Sinne einer Systemüberwachung durch eine interne Laser-Leistungsüberwachung ergänzt werden (s. Untersuchung der Funktion des realisierten Systems).



Abbildung 10: links: clean2sort Modul, rechts: Kaskadierung der clean2sort Module im Technikum.

Der modulare Aufbau der Anlagentechnik erlaubt die Anreihung zahlreicher clean2sort Module (s. Abbildung 10). Die Kaskadierung ermöglicht somit eine Vollabdeckung des Analysebereichs auch bei Förderbreiten von bis zu 2 Metern. Im Fall einer Wartung können die Module entsprechend „Plug & Play“ untereinander ausgetauscht werden, was Stillstandzeiten der Anlage erheblich minimiert.

Drei clean2sort Module wurden aufgebaut und in Betrieb genommen. Nach umfangreichem Systemtest und der Entwicklung einer Justagestrategie auf dem Messstand wurden die Module über dem Messband im Technikum eingebaut und weiteren Systemtests unterzogen. Die Ergebnisse werden im Folgenden diskutiert.

4. Aufbau des Messstands inklusive Linearführung für Messungen bei einer Fördergeschwindigkeit von 3 m/s

Für die Spektrenaufnahme sowie die Versuche bezüglich des vergrößerten Messbereiches wird ein Teststand konstruiert und aufgebaut. Der mobile Messstand ist mit zwei unterschiedlich zu bestückenden Bearbeitungsseiten versehen (vgl. Abbildung 11). Wahlweise kann ein Breadboard oder eine Lineareinheit appliziert werden, die getrennt voneinander an einer Linearführung montiert sind und über Rastbolzen in 25 mm Abständen arretiert werden können. Dies ermöglicht die einfache Höhenverstellung und damit eine erhebliche Vereinfachung für dynamische sowie statische Versuche mit unterschiedlichen Arbeitsabständen. Das clean2sort Modul wird ebenfalls auf einer Linearführung montiert, um einfach und bei konstantem Arbeitsabstand zwischen dynamischer und statischer Messvariante wechseln zu können. Aufgrund der Stabilität und der einmaligen Justage und Einrichtung des Messstands ist eine erneute Justierung bei einem Wechsel von Modul zu Modul nicht notwendig.

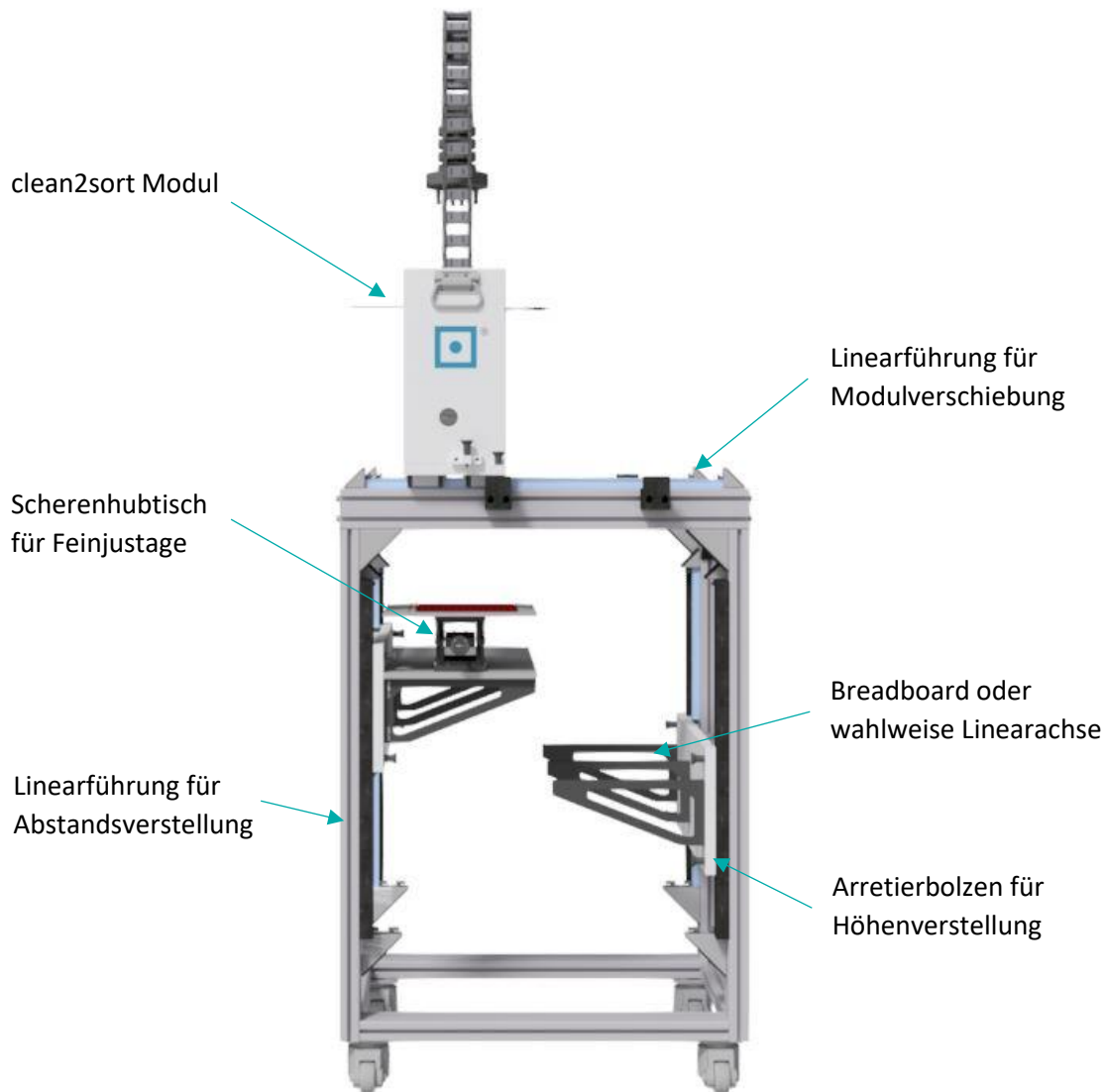


Abbildung 11: Aufbau Messstand.

In Abbildung 12 links ist der reale Aufbau für die Messungen der aktuellen Scanfeldgröße dargestellt. Auf der rechten Seite ist der Messstand inklusive der Lineareinheit zu sehen. Die Lineareinheit ist in der Lage, die Testteile, die auf einem Schraubstock montiert werden, auf der Förderlänge von 3 Metern auf 3 m/s zu beschleunigen und wieder abzubremesen. Die eigens entwickelte Software zur Integration der Lineareinheit in die Messsoftware erlaubt die einfache Änderung der Anzahl der Durchfahrten sowie die Synchronisierung der Datenaufnahme.



Abbildung 12: links: Messstand mit unterschiedlichen Bearbeitungsabständen, rechts: Messstand mit Linearführung für dynamische Messungen.

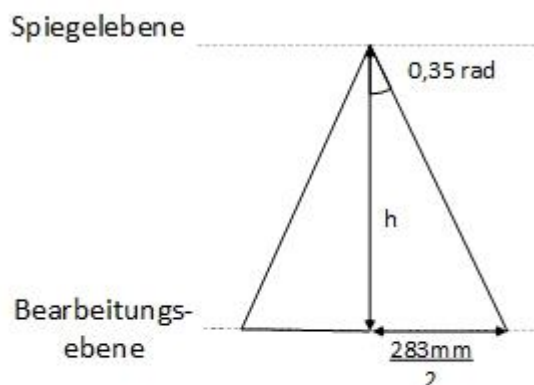
5. Vergrößerung des Bearbeitungsbereichs

Um die maximale Fläche von 200 x 200 mm² zu bearbeiten, müssen die Spiegel des 2D Scanners bereits maximal ausgelenkt werden. Um den Bearbeitungsbereich um 100 % zu vergrößern, muss daher der Abstand des 2D Scanners zur Bearbeitungsebene vergrößert werden.

Tabelle 8: Vergleich Scanfeldgrößen der alten und der neuen optimierten Optik.

	Aktuelles Scanfeld	Vergrößertes Scanfeld
Scanfeldgröße / Flächeninhalt [mm ²]	200 x 200 = 40.000	2 x 40.000 = 80.000 = 283 x 283
Maximale Auslenkung der Scannerspiegel [rad]	± 0,35	± 0,35
Minimaler Arbeitsabstand [mm]	280	390

Der minimale Arbeitsabstand wird wie folgt berechnet:



$$\tan(0,35) = \frac{283 \text{ mm}}{2 \times h}$$

$$\rightarrow h = \frac{283 \text{ mm}}{2 \times \tan(0,35)}$$

$$\rightarrow h = 387,64 \text{ mm} \approx \mathbf{390 \text{ mm}}$$

Der minimale Arbeitsabstand für das um 100 % vergrößerte Scanfeld beträgt 390 mm. Die minimale Entfernung zur Bauteiloberfläche vergrößert sich somit um **110 mm**. Der dreidimensionale Arbeitsbereich soll nach wie vor eine Höhe von 100 mm abdecken, sodass eine Bearbeitung im Abstand zwischen 390 mm und 490 mm möglich ist.

Intensitätsvergleich zwischen den Scanfeldern

Die Vergrößerung des Arbeitsabstands bedeutet eine Abnahme der Bearbeitungsintensität, da sich effektiv die Brennweite des Optiksystems verändert. Für den Vergleich zwischen aktuellem und vergrößertem Arbeitsbereich vergleichen wir zahlreiche Messpunkte für drei definierte Arbeitsabstände. Der jeweilige Messbereich wird dazu in drei Ebenen +50 mm, 0 mm und -50 mm unterteilt. Auf jeder Ebene werden 225 Messpunkte durch den Scanner angefahren und Spektren aufgenommen. In dem aktuellen Messbereich von 200 x 200 mm² liegen die Messpunkte in einem Abstand 13,3 mm über die Fläche verteilt, bei dem vergrößerten Messbereich resultiert ein Abstand der Messpunkte von 20 mm.

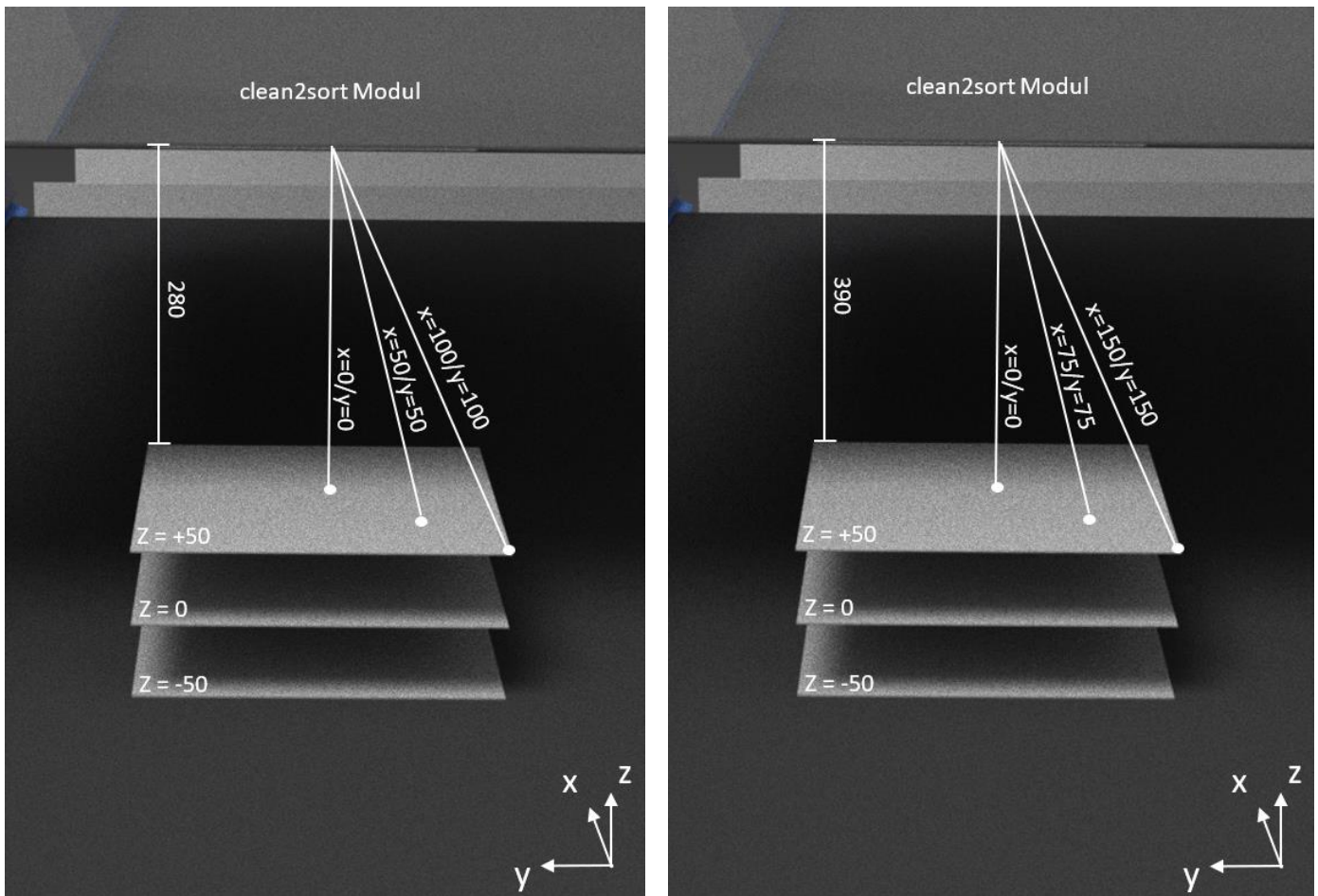


Abbildung 13: Bearbeitungsbereiche - links aktueller Bereich, rechts vergrößerter Bereich [alle Angaben in mm].

Auf dem Messstand können die beschriebenen Testebenen einfach durch das Verschieben des Breadboards in Z-Richtung auf der Linearführung eingestellt werden. Als Testmaterial für die Intensitätsvergleiche wird ein Aluminiumblech (EN AW-ALSi Mg(A)) mit 0,9 Gew.-% Si und 0,78 Gew.-% Mg verwendet. In Abbildung 14 sind zur

Veranschaulichung die Bearbeitungsabstände und die Anordnung der einzelnen Messpunkte auf dem Testblech gekennzeichnet.

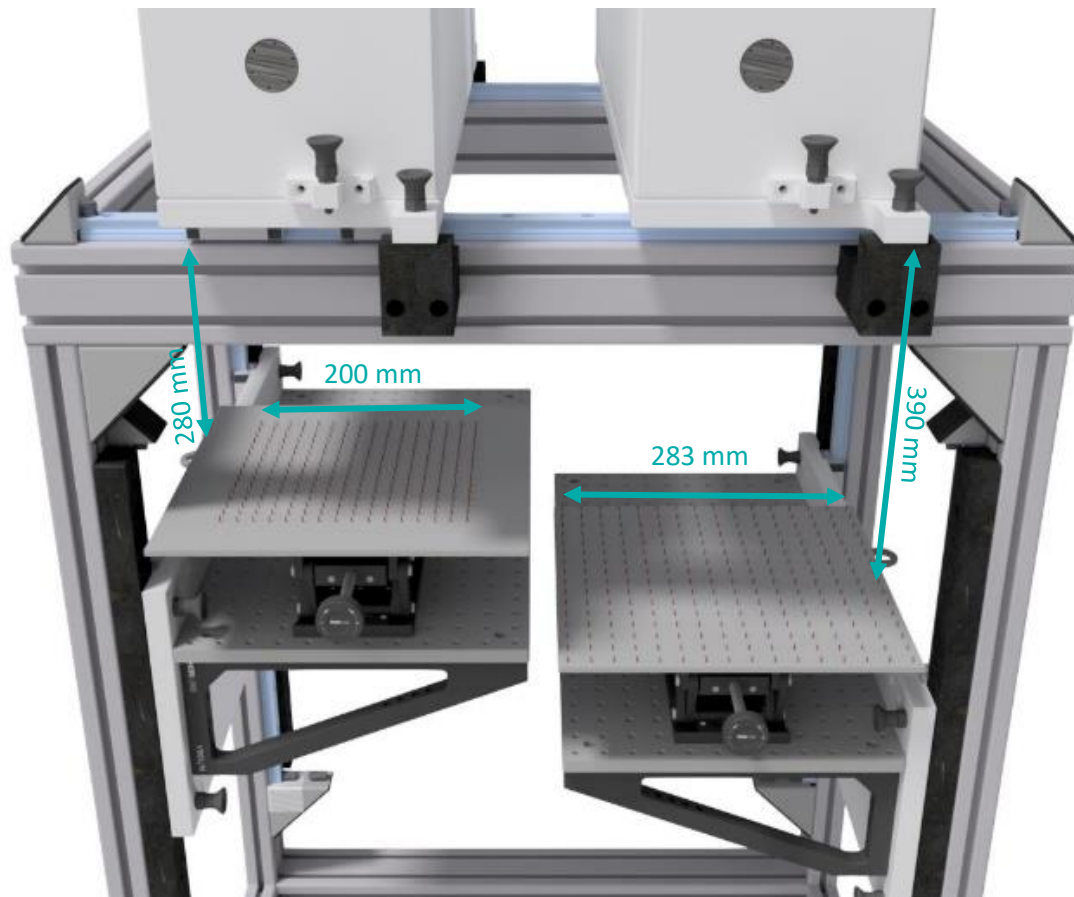


Abbildung 14: Arbeitsabstände für den vergrößerten Arbeitsbereich.

Zunächst erfolgt die Vermessung des aktuellen Messbereichs. Die Ergebnisse der Intensitätsverteilung des LIBS-Signals über den Messbereich sind in Abbildung 15 dargestellt. Als Parameter für Vorablation und LIBS-Messung wird für die folgenden Messungen unser Standard Parametersatz für die qualitative Unterscheidung von verschiedenen Metallen verwendet. Die optischen Komponenten im Modul sind so justiert, dass in der Null-Ebene die höchsten Intensitäten erzielt werden, was sich in den Messungen widerspiegelt.

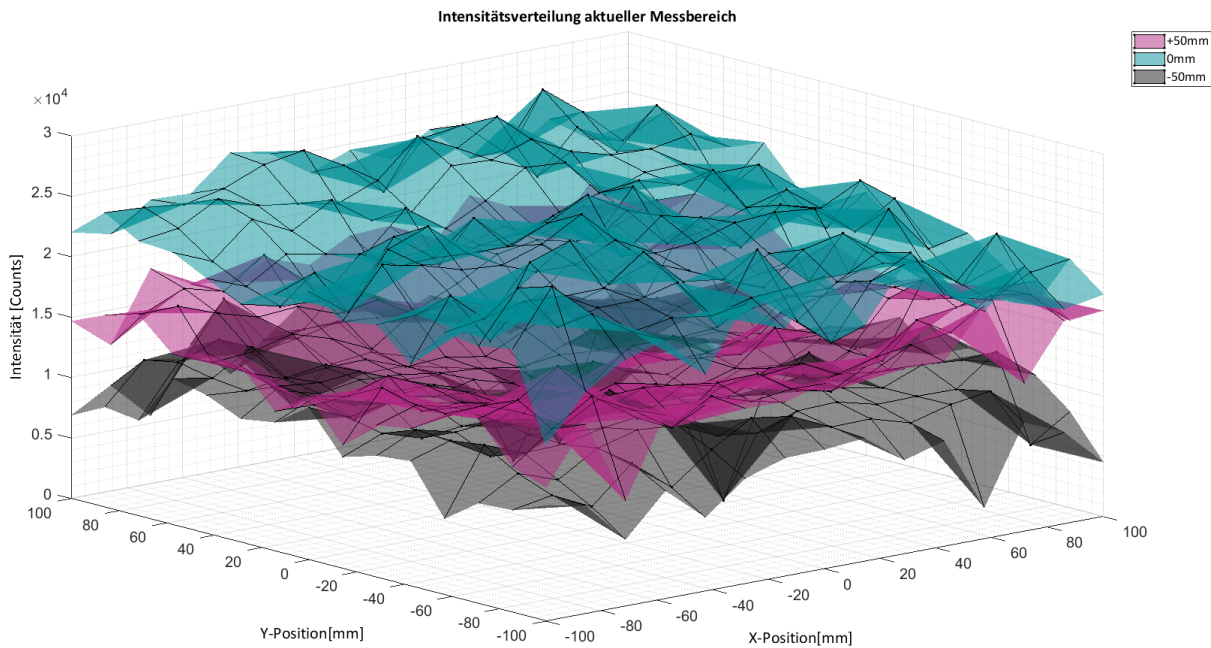


Abbildung 15: Diagramm Intensitätsvergleich aktueller Messbereich (200 x 200 mm²).

Werden dieselben Parameter bei dem vergrößerten Arbeitsbereich und damit dem vergrößerten Arbeitsabstand verwendet, ist davon auszugehen, dass die erzielte Intensität verringert wird. Dies zeigt Abbildung 16, in der die Gesamtintensität aller Messpunkte über alle drei Ebenen um 53 % geringer ausfällt als bei der Bearbeitung im aktuellen Messfeld. Gerade bei dem größten Bearbeitungsabstand (Ebene -50 mm) liegt die mittlere Intensität bei 3310 Counts, die gegebenenfalls für eine qualitative Auswertung ausreicht, aufgrund der damit einhergehenden Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses ist eine quantitative Analyse allerdings nicht möglich.

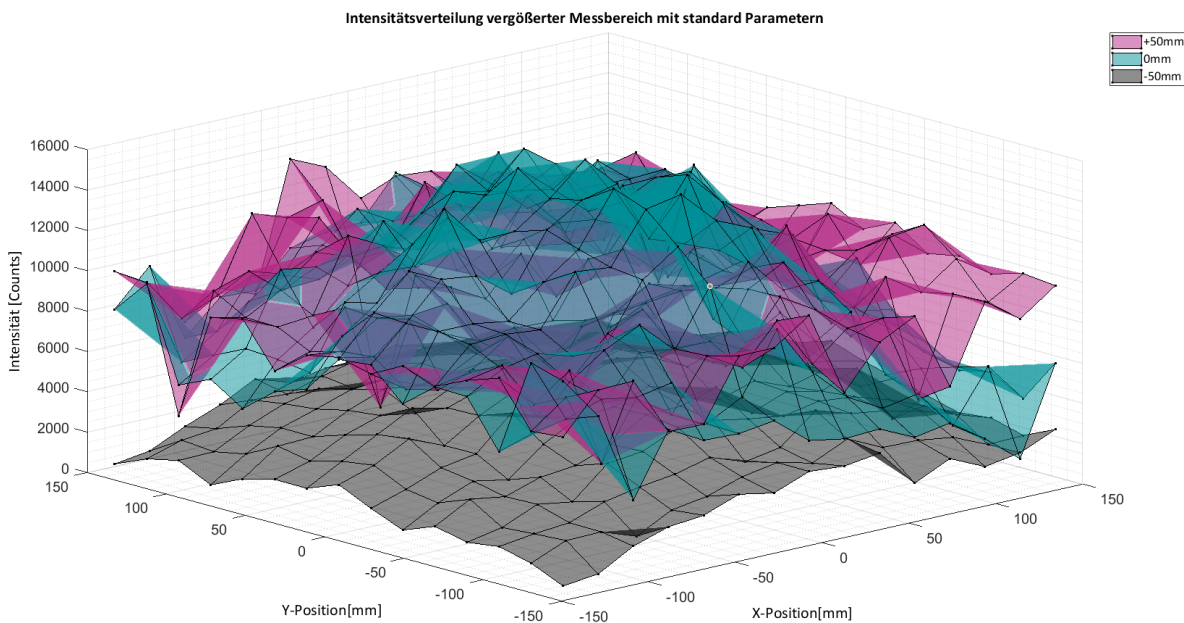


Abbildung 16: Diagramm Intensitätsvergleich vergrößerter Messbereich (280 x 280 mm²).

Durch die Ermittlung optimierter Parameter für die Scanner- und Lasersteuerung, kann eine vergleichbare Intensität wie zuvor im kleineren Messbereich erzielt werden (vgl. Abbildung 17).

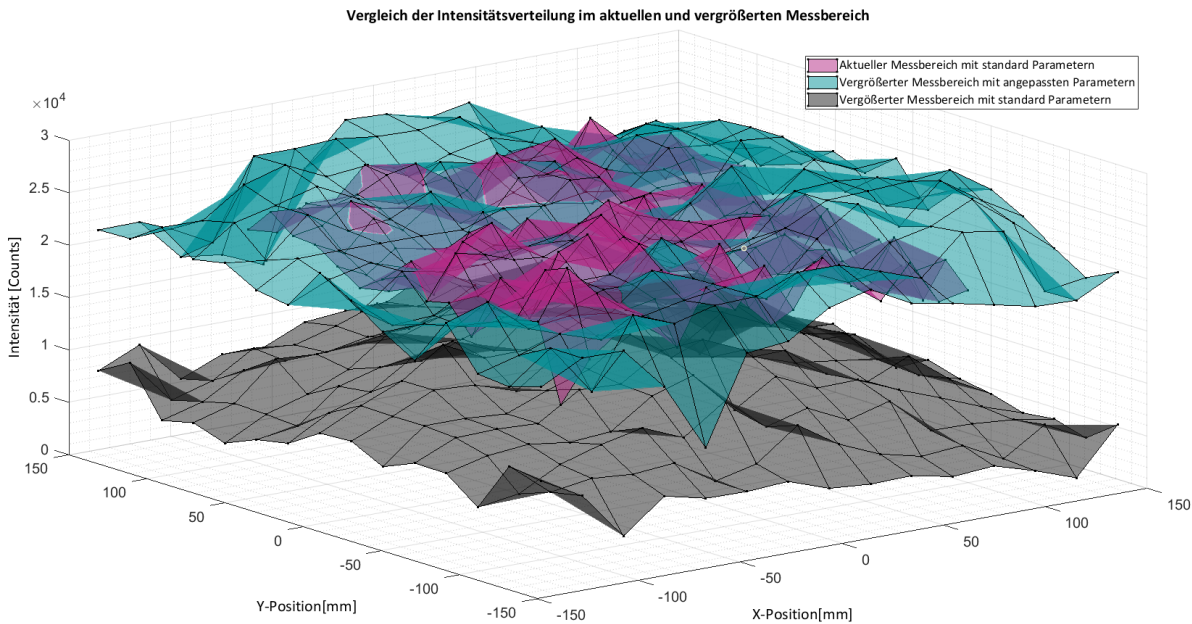


Abbildung 17: Diagramm Intensitätsvergleich aktueller zu vergrößertem Messbereich.

In dem folgenden Diagramm (Abbildung 18) sind nochmal alle mittleren Intensitäten bei variierten Parametern in den einzelnen Bearbeitungsebenen gegenübergestellt.

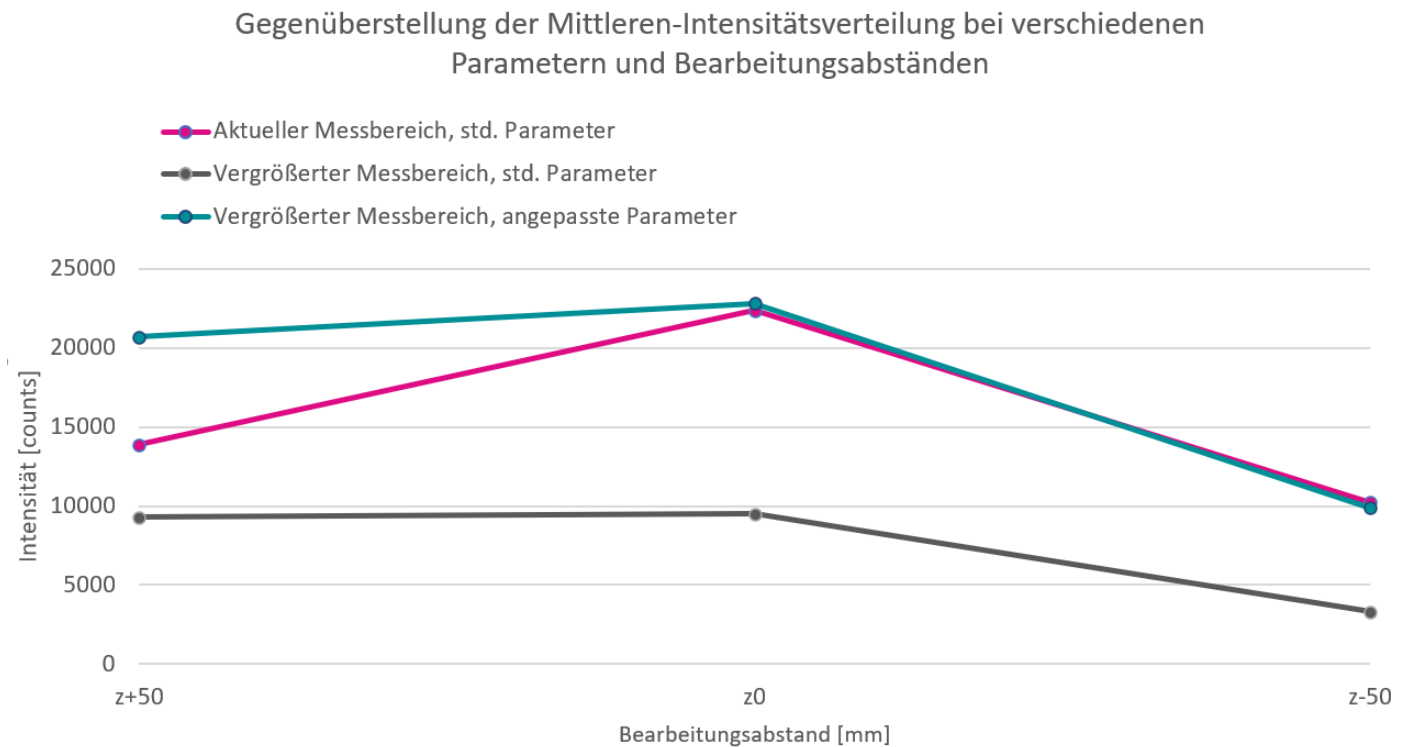
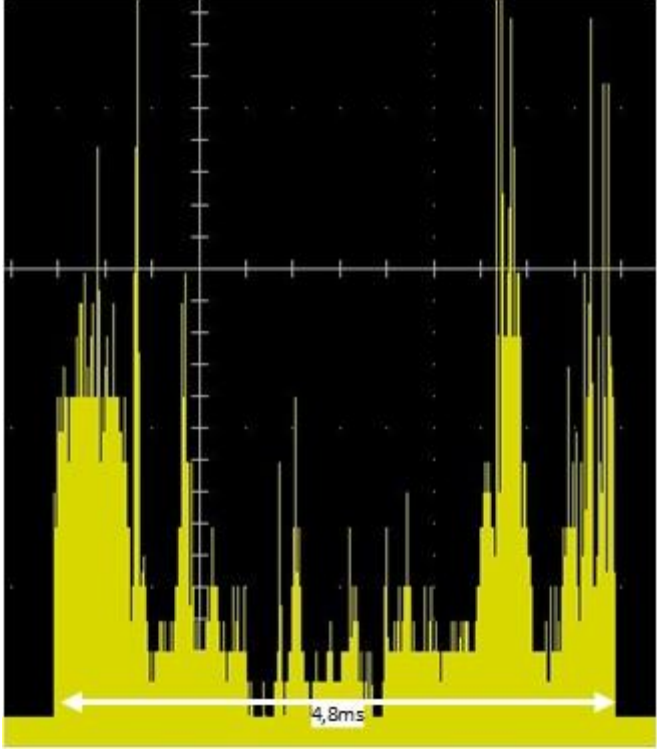
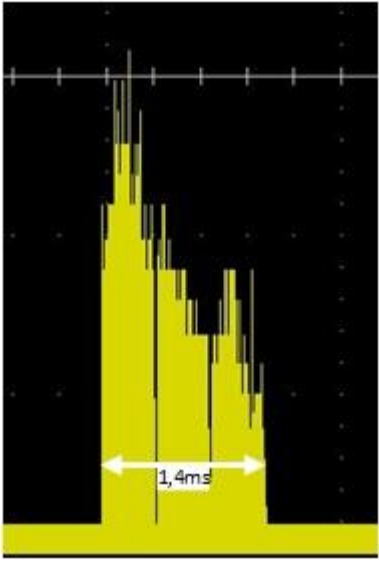


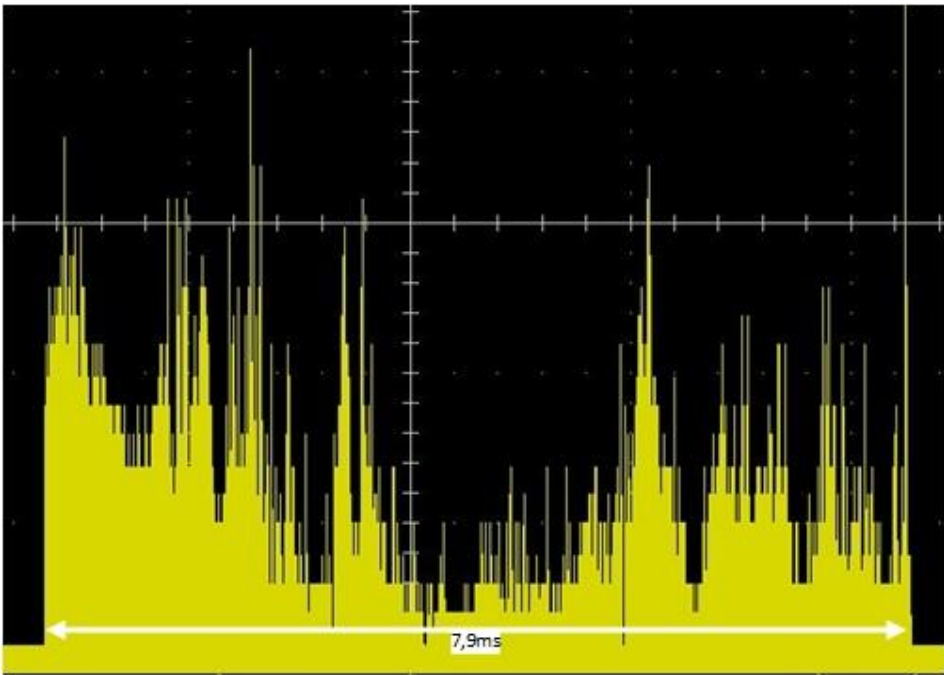
Abbildung 18: Diagramm zur Gegenüberstellung der mittleren Intensitätsverteilung bei verschiedenen Parametern und Bearbeitungsabständen.

Die Anpassung der Parameter zur Erreichung eines gleichwertigen Intensitätsniveaus des Signals führt zu einer Erhöhung der Messdauer, die im Folgenden untersucht wird (vgl. Tabelle 9).

Um ein vergleichbares Intensitätsniveau zu erreichen, muss die Messzeit bei dem vergrößerten Messabstand um 6,5 ms auf 7,9 ms verlängert werden. Bei einer Fördergeschwindigkeit von 3 m/s bewegt sich das zu analysierende Teil in 6,5 ms um 23,7 mm in der Förderrichtung. Für eine Messaufgabe von sehr kleinen Teilen kann dies dazu führen, dass nicht alle Teile gemessen werden können. Dem steht der über 100 % vergrößerte Arbeitsbereich des Scanners entgegen.

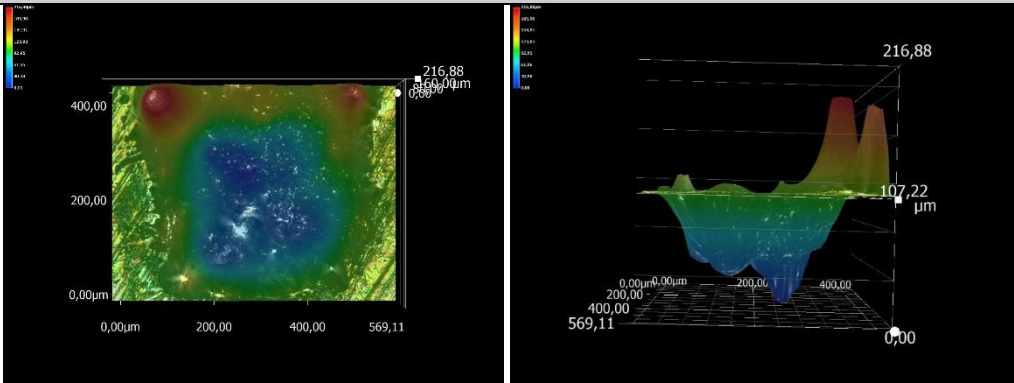
Tabelle 9: Messung der Bearbeitungszeit nach Optimierung der Parameter.

Beschreibung	Zeit[ms]	Aktion / Bild
1x Vorablation	4,8	
1x LIBS standard	1,4	

Beschreibung	Zeit[ms]	Aktion / Bild
1x LIBS angepasst	7,9	

Im nächsten Schritt wird überprüft, ob sich durch die Erhöhung des Arbeitsabstands auf die Vorablation auswirkt. Dazu wird die Ablationstiefe vermessen. Die Messung erfolgt statisch in zentraler Position an einer Stahlprobe. Die Parametereinstellungen entsprechen denen für die Vorablation. In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der mikroskopischen Vermessung der Ablationsfläche aufgeführt.

Tabelle 10: Standard Bearbeitungsabstand.

Arbeitsabstand [mm]	Max. Ablationstiefe [µm]	Aktion / Bild
280 (höchste Ebene)	107,22	

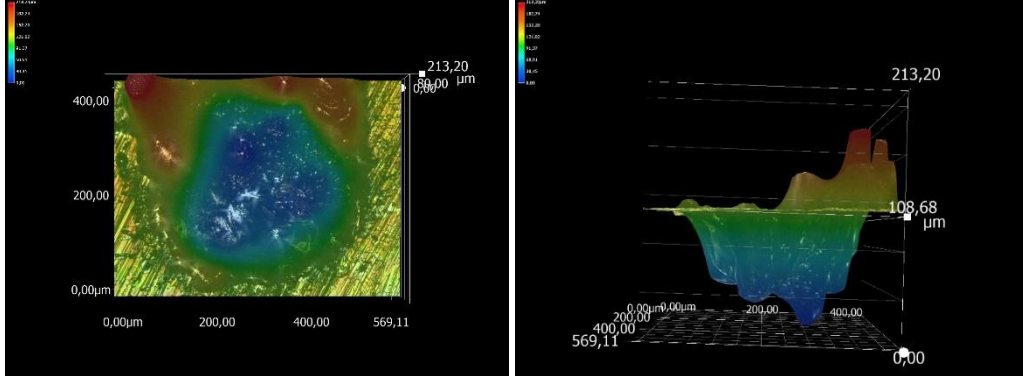
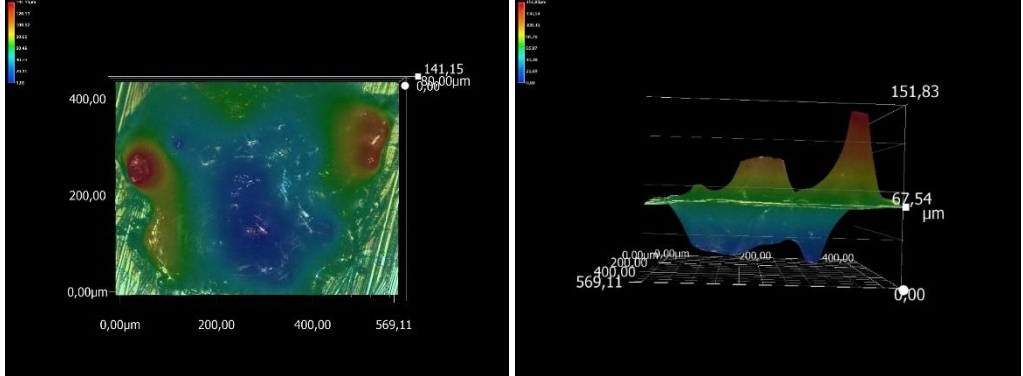
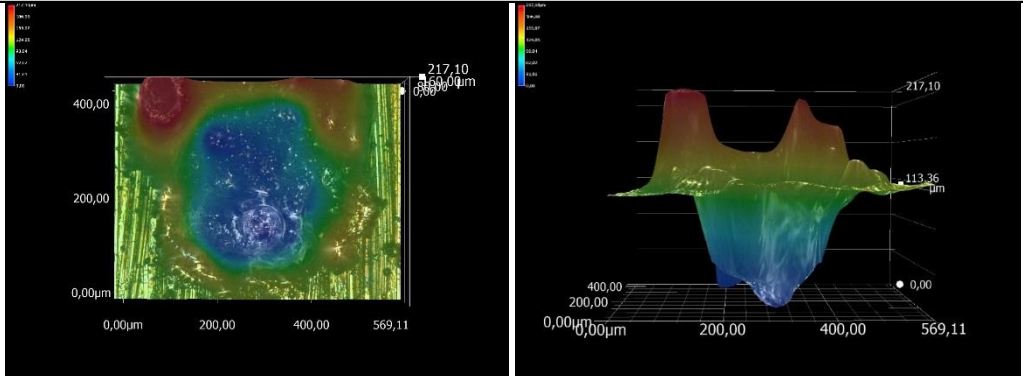
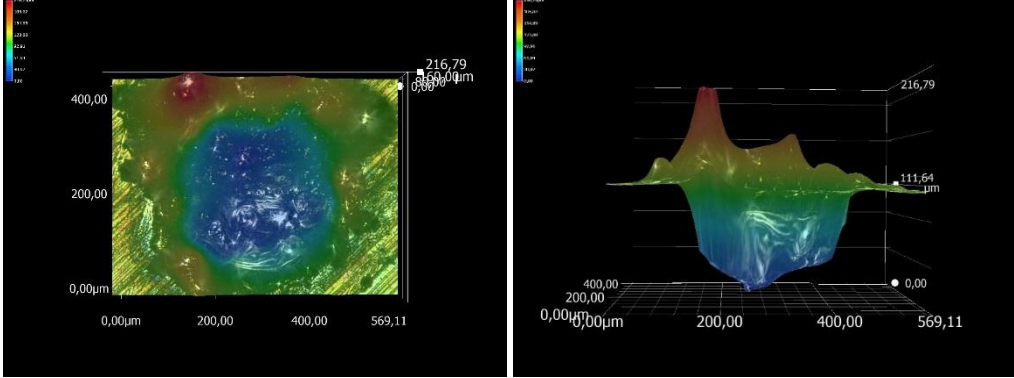
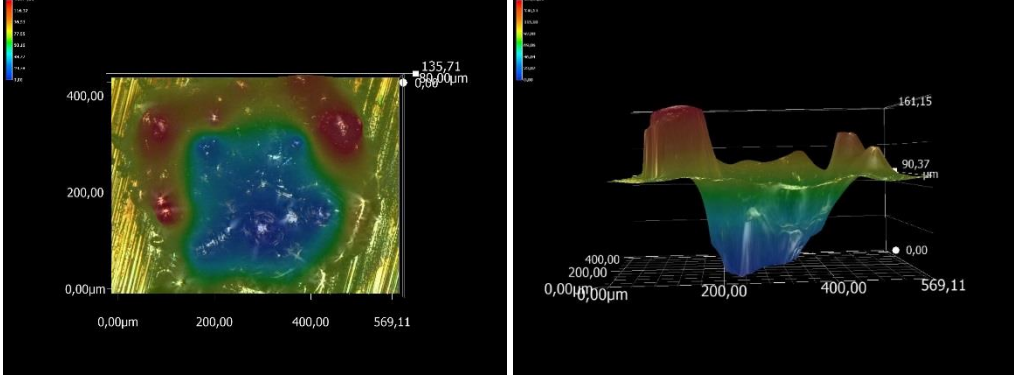
Arbeits- abstand [mm]	Max. Ablations- tiefe [µm]	Aktion / Bild
330 (Mittel- ebene)	108,68	
380 (tiefste Ebene)	67,54	

Tabelle 11: Vergrößerter Bearbeitungsabstand.

Arbeits- abstand [mm]	Max. Ablations- tiefe [µm]	Aktion / Bild
390 (höchste Ebene)	113,36	

Arbeitsabstand [mm]	Max. Ablationstiefe [µm]	Aktion / Bild
440 (Mittel-ebene)	111,64	
490 (tiefste Ebene)	90,37	

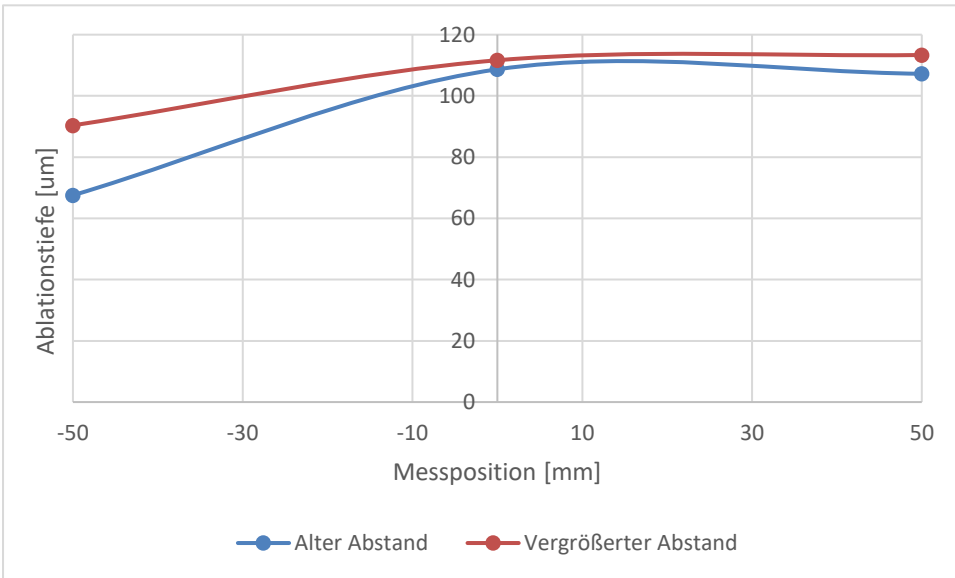


Abbildung 19: Vergleich der Ablationstiefe bei verschiedenen Bearbeitungsabständen.

Bei gleichen Parametern wird eine leicht erhöhte Ablationstiefe bei vergrößertem Arbeitsabstand gemessen (vgl. Abbildung 19). Für die Vorablation können dementsprechend weiterhin dieselben Parameter eingesetzt werden. Die Zunahme kann auf eine verbesserte Justierung des Z-Lagen Moduls zurückgeführt werden.

Das Verfahren funktioniert auch mit größerem Bearbeitungsfeld, was jedoch mit einer geringeren Messgeschwindigkeit einhergeht. Statt 8,6 ms werden 11,72 ms pro Messung benötigt. Damit wird immer noch eine Steigerung um einen Faktor 2,48 erzielt im Vergleich zum kleineren Bearbeitungsfeld mit den vor Projektbeginn eingesetzten Parametereinstellungen. Je nach Einsatzbedingungen und Anforderung des Kunden kann entweder die Messung mit kleinerem Feld mit hoher Geschwindigkeit erfolgen oder mit doppelter Messfläche und dafür reduzierter Messgeschwindigkeit.

6. Schnelle dynamische Belichtungsanpassung

Für eine Verbesserung der Analysequalität wurde in enger Zusammenarbeit mit dem Spektrometerhersteller nach einem Lösungsweg für die dynamische Belichtungsanpassung gesucht. Mit der derzeit für unseren Anwendungsfall wirtschaftlich einsetzbaren Hardware, liegt die minimale Auslesezeit des Spektrometers bei der geforderten Auflösung bei 0,35 ms. Zudem hat das Spektrometer ein fixes Delay nach dem Eingang des Trigger-Signals von 0,9 µs. Nach dem aktuellen Stand der Technik ist es nicht möglich, das am Detektor gesammelte Licht in Situ auszulesen und die Belichtungszeit dynamisch an den Prozess anzupassen.

Mit der Optimierung der Optikparameter, wie dem Korrekturfile für die Positionierung und Fokussierung des Lasers im Messbereich sowie einer verbesserten Justage, ist es gelungen die Fokusslage des Lasers so an den Arbeitsbereich (Breite x Länge x Höhe) von 283 x 283 x 100 mm³ anzupassen, dass eine für die quantitative Analyse ausreichend starke Intensitätsverteilung erzielt wird und die dynamische Anpassung nicht mehr unbedingt erforderlich ist.

7. Umbau des Modulhalters über dem Förderband im Technikum zur Einstellung des Höhenabstandes zwischen Förderband und Messsystem

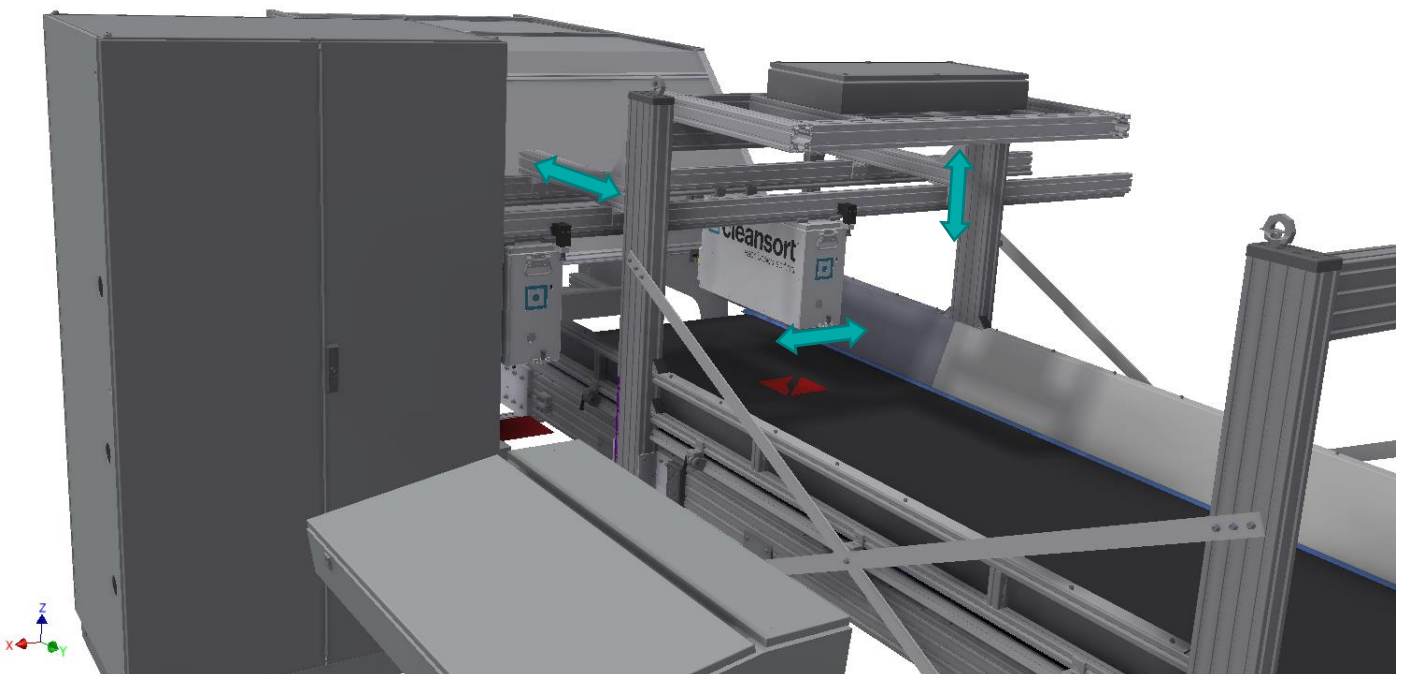


Abbildung 20: CAD-Modell des geplanten Modulhalters.

Für eine flexible Verstellung des Höhenabstandes zwischen Förderband und Messsystem wird der Modulhalter aus Item-Profilen konstruiert und umgesetzt (vgl. Abbildung 20). Die Verstellung in Z- und Y-Richtung kann durch Lösen der Winkelbefestigung und Verschieben der Item-Profile realisiert werden. Für die Verschiebung in X-Richtung

werden die Module an einer Einzelschiene der Firma Iigus und vier Gehäuselager je Modul montiert. Diese Konstruktion ermöglicht die schnelle und einfache Verschiebung der Module und damit eine Verstellung der Messbereiche, um variabel auf die jeweilige Messaufgabe zu reagieren.

Abbildung 21 zeigt die Umsetzung der Konstruktion im Technikum.



Abbildung 21: Reale Umsetzung des Modulhalters.

8. Aufbau einer Spektren Bibliothek

Im Laufe der Projektzeit wurden über 1200 Kalibrier- und Validierproben durch ein alternatives Messverfahren analysiert und die Spektren der Proben in die Datenbank aufgenommen. Diese erlauben die Erstellung von quantitativen Kalibrierungen und sind der Grundstock für eine allumfassende Materialbibliothek. Die folgenden Diagramme zeigen die Elementverteilung der einzelnen Legierungselemente in deren Matrix. Bei der Auswahl der Proben wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Legierungselemente in der Matrix möglichst gleichmäßig verteilt sind. Vorversuche haben gezeigt, dass die Kalibrierergebnisse durch eine gleichmäßige Verteilung der Stützstellen verbessert werden können. Im folgenden Diagramm (Abbildung 22) ist beispielhaft für eine Aluminiumkalibrierprobe die Elementverteilung dargestellt. Zur Veranschaulichung ist auf der X-Achse nur die Messung aufgetragen. Die einzelnen Konzentrationen pro Messung stehen demnach nicht in Bezug zueinander.

Abbildung 23 zeigt exemplarisch die Spektren einer Aluminiumprobe der 1000-Serie (Aluminium $\geq 99,0\%$) und der 5000-Serie mit dem Hauptlegierungselement Magnesium. Zudem sind die, für eine Charakterisierung der Aluminiumlegierungen, wichtigen Elemente (respektive deren Wellenlängen) im Diagramm gekennzeichnet.

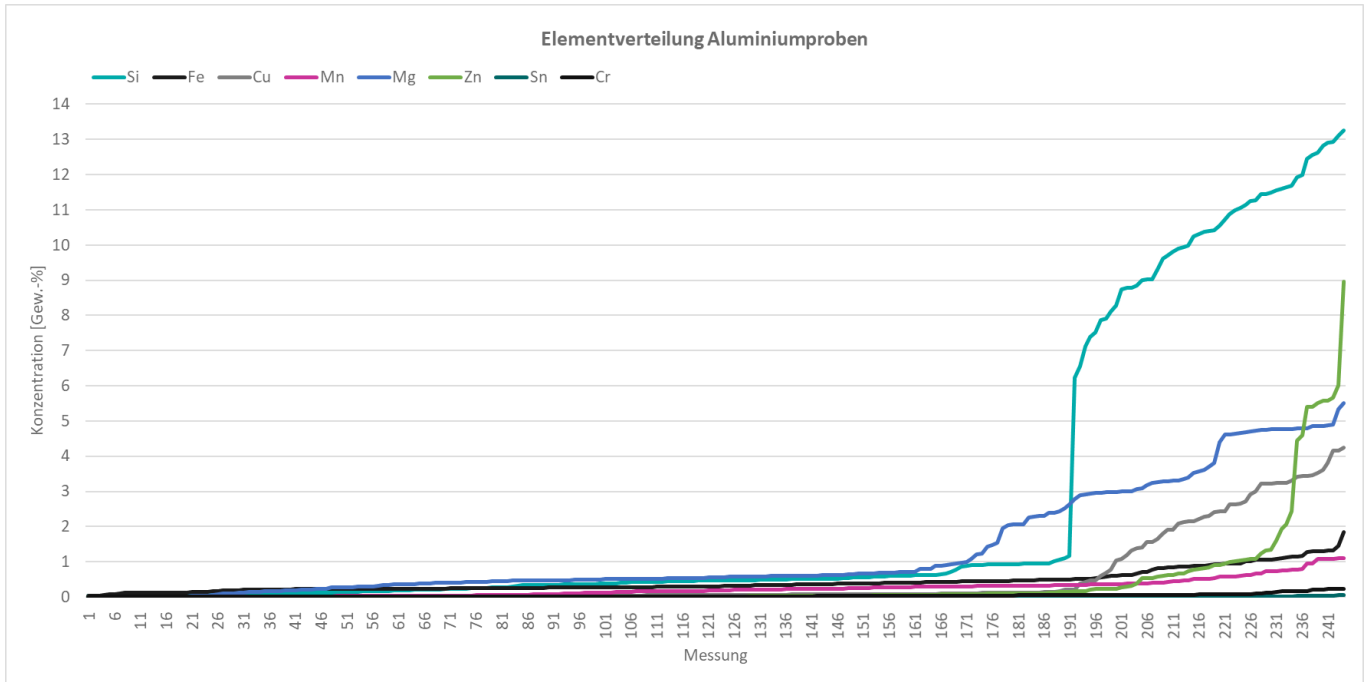


Abbildung 22: Elementverteilung Aluminium Kalibrierproben.

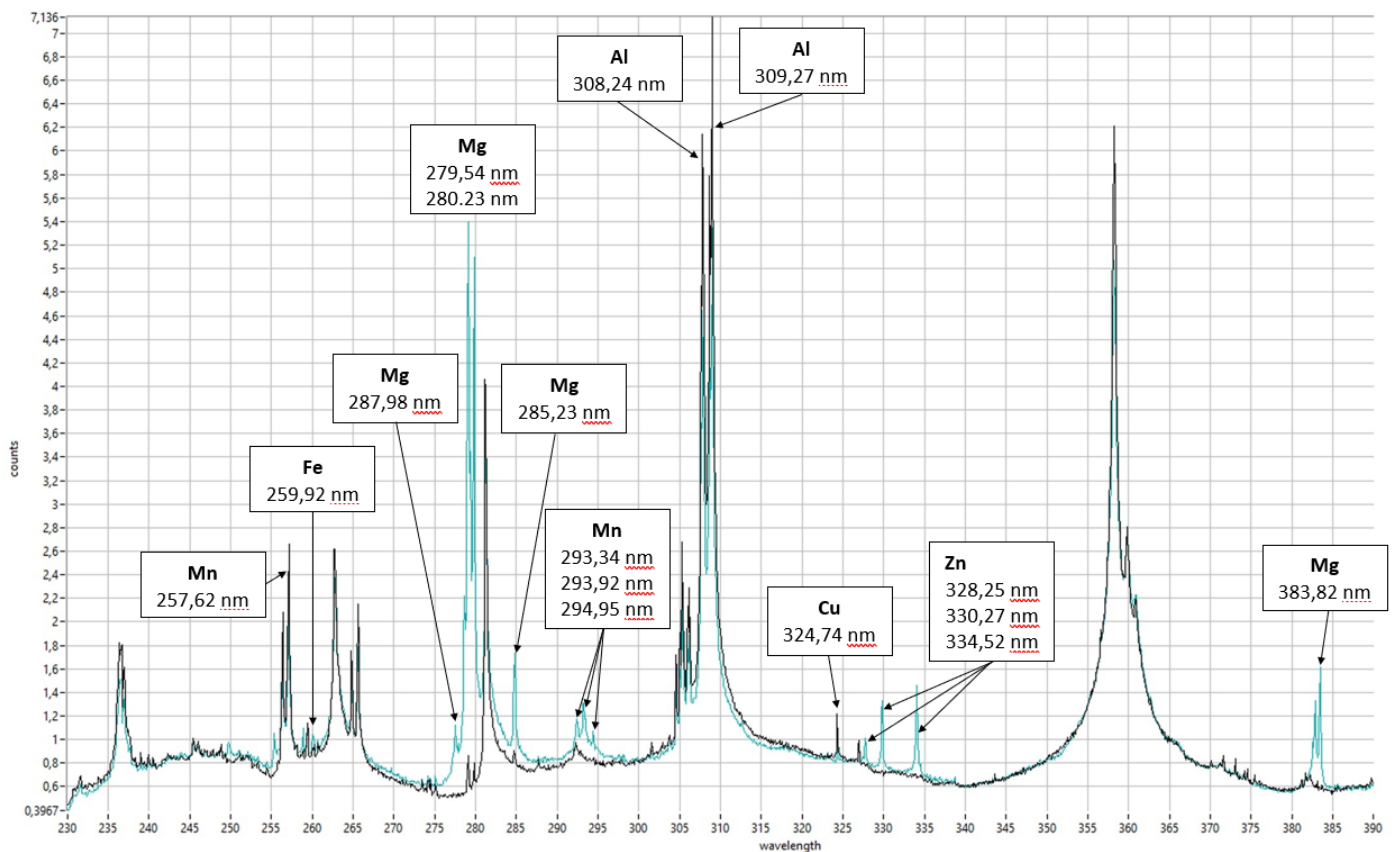


Abbildung 23: Al 1000 schwarz, Al 5000 cyan.

9. Selbstkalibrierung des Systems

Zur Selbstkalibrierung des Systems wird ein Algorithmus zur benutzerfreundlichen Charakterisierung eines Materials entwickelt. Für die Spektralanalyse wurde eine Ist-Zeit-fähige Datenstruktur erarbeitet und umgesetzt (vgl. Abbildung 24). Zunächst wird das aufgenommene Rohspektrum geladen und ggf. um das Dunkelspektrum bereinigt. Zudem wird das Spektrum pro Element auf den relevanten Wellenlängenbereich zugeschnitten und normiert. Anschließend wird eine SLA (single line analysis), also eine quantitative Analyse zur Voranalyse, in der geprüft wird, ob das gemessene Material zur Kalibrierung passt, durchgeführt. Im Anschluss kann das Spektrum nach einer Kalibrierung durch eine PLS-Regression (Partial least squares Regression) quantitativ analysiert werden. Vor der PLS wird für jedes Element das Spektrum in einem bestimmten Bereich zugeschnitten und dieser Bereich normiert sowie eine Untergrundkorrektur durchgeführt.

Die Kundenklassen und damit die Entscheidung, welche Legierungen aussortiert werden, kann vom Kunden frei getroffen werden.

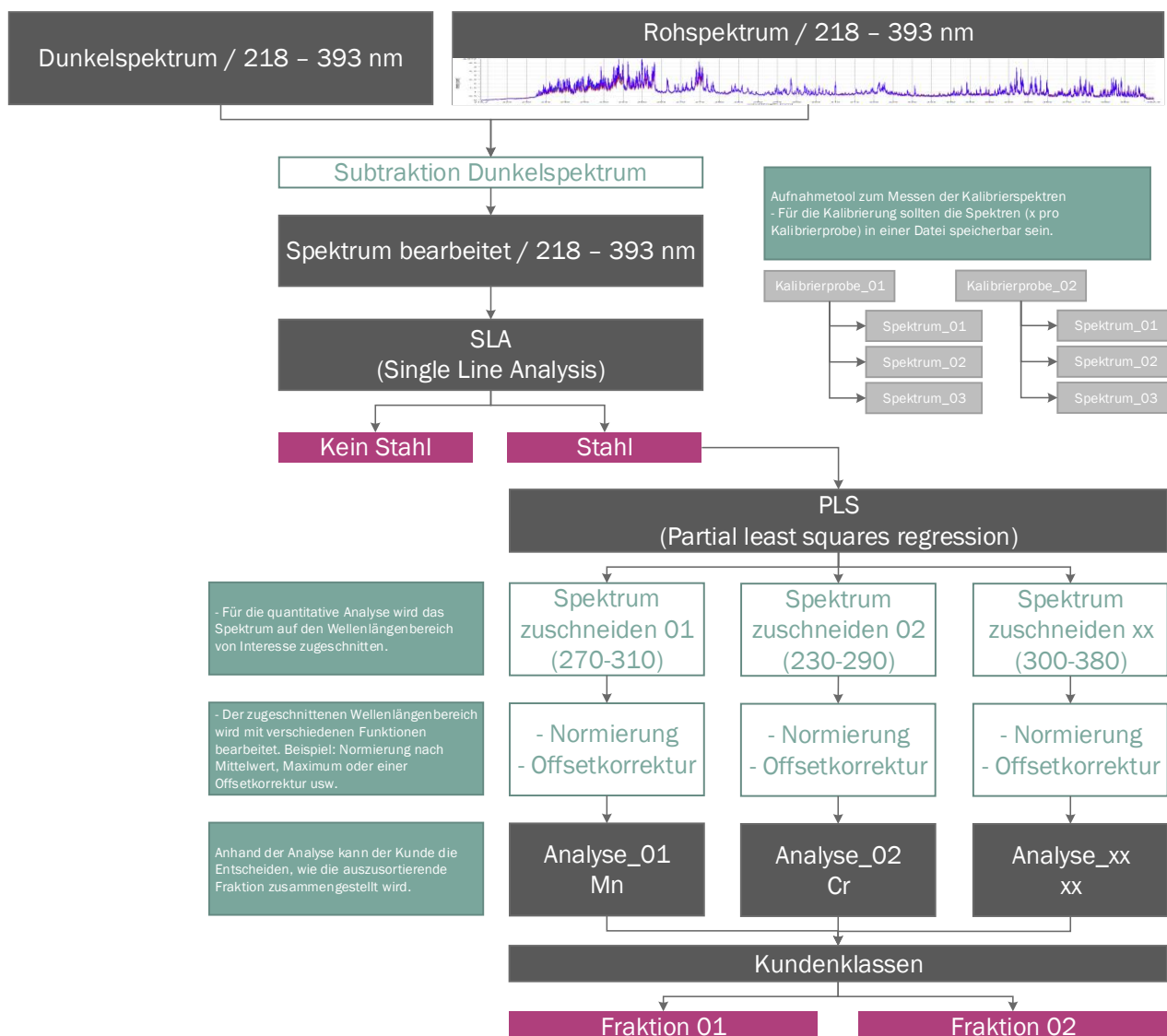


Abbildung 24: Datenverarbeitungsstruktur

10. Optimierung Materialfluss

In zahlreichen Parameterstudien wurde der Materialfluss durch die Anlage weiterentwickelt und damit der Durchsatz bei verbesserter Vereinzelung der Schrottteile gesteigert. Die aktuelle Konfiguration besteht aus einem Aufgabebunker und einer Abzugsrinne, die das Material durch Sensoren gesteuert, dezidiert in die Anlage aufgibt. Die folgende Schwingrinne ist mit einer schrägen Ebene ausgestattet. Die variabel einstellbaren und auf jede Schrotart anpassbaren Schwingparameter wie Unwucht, Drehzahl und Neigungswinkel sorgen in der richtigen Kombination für eine ideale Beschleunigung und Vereinzelung der Schrottfraktion. Eine Rutsche am Ende der Schwingrinne sorgt für eine seichte Übergabe der Schrotte von den Schwingkomponenten auf das mit 3 m/s fahrende Messband.

Zur Realisierung einer kontinuierlichen Materialaufgabe wurde eine optisch unterstützte Regelung realisiert. Durch Lichtschranken wird an mehreren Stellen, wie am Bunkeraustrag und auf der Schwingrinne, die Austragsmenge in Ist-Zeit analysiert und der Austrag durch eine PID-Regelung gesteuert. Die Positionen der Lichtschranken sind in Abbildung 25 dargestellt.

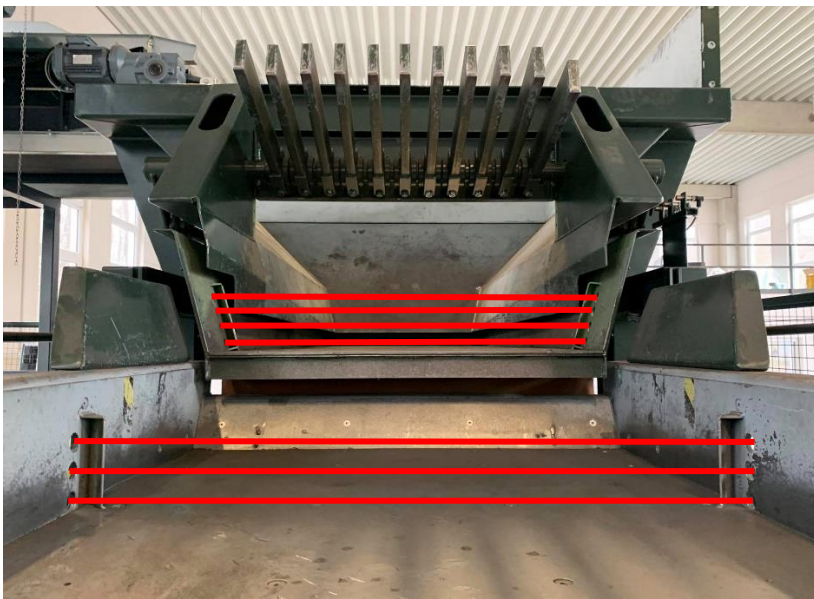


Abbildung 25: Lichtschranken Schwingkomponenten

In Abbildung 26 links ist der Bunkeraustrag von Aluminium-Schredder-Schrotten mit einem Durchsatz von 8 t/h zu sehen. Das mittlere Bild zeigt kleine Al-Stanzschrotte (Kantenlänge von 100 - 300 mm) mit einem Durchsatz von 10 t/h und das rechte Bild zeigt großformatige Al-Stanzschrotten (Kantenlänge von 300 - 900 mm) mit einem Durchsatz von 6 t/h auf einer Gesamtförderbreite von 1200 mm bei kontinuierlichem Austrag.

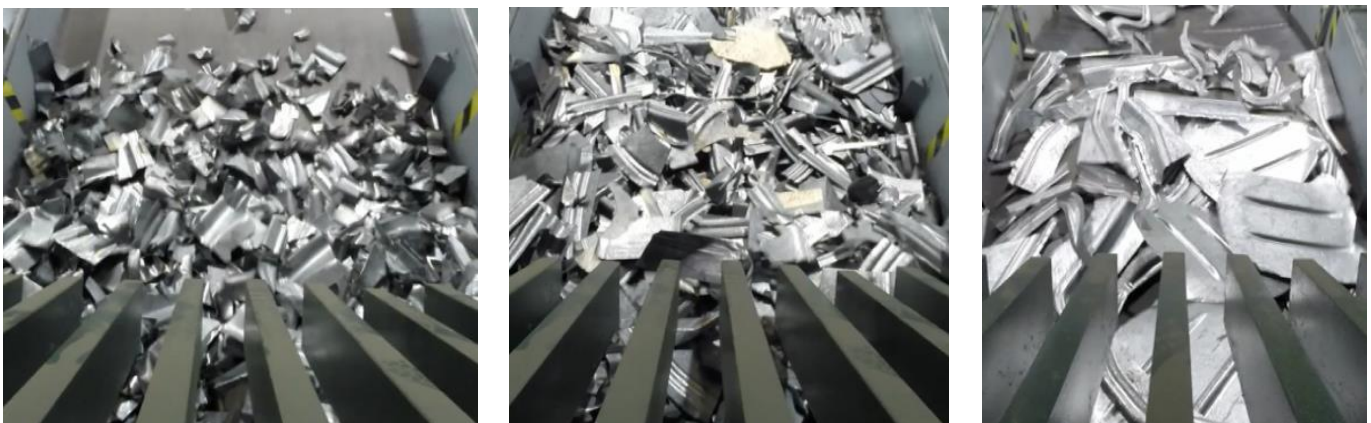


Abbildung 26: Beispiel Bunkeraustrag verschiedener Schrottfractionen

Neben der kontinuierlichen Materialaufgabe ist die Monolage auf dem Messband für die clean2sort Messtechnik unabdingbar. Das punktuelle Messsystem ist derzeit nicht in der Lage, sich überdeckende Teile zu erkennen. Überdeckte Teile werden demnach als eines erkannt und behandelt. Zur Vermeidung der Überdeckung wird für jede zu messende Fraktion das optimale Zusammenspiel zwischen Bunkeraustrag, Parameter der Schwingrinne, Fördergeschwindigkeiten in den einzelnen Förderkomponenten und Einstellungen der Rutsche und damit die Übergabe auf das Messband gewählt.

11. Analyse der Leistungsfähigkeit

In enger Zusammenarbeit mit den verschiedenen Industriezweigen konnten die unterschiedlichsten Materialfraktionen verfügbar gemacht werden, um die Anlagentechnik somit auf die in der Realität anzutreffenden Herausforderungen zu testen.

Anfangen von kleinsten Stahl-Kühl-Schrotten, Presswerkschrotten aus Aluminium und Stahl, den verschiedensten Schredder-Schrotten und vielem mehr wurden in Parameterstudien für jede Fraktion die Betriebsparameter herausgefunden und die zu erwartende Trennschärfe und Reinheit der aussortierten Fraktion in Abhängigkeit vom Durchsatz ermittelt. Abbildung 27 zeigt als Übersicht einige Materialfraktionen mit den erzielten Sortierparametern. Für geringe Korngrößen besteht noch Verbesserungspotenzial für die Effizienz des Materialflusses, da die Demonstrator-Anlagentechnik auf Größen im Bereich 100 – 800 mm optimiert ist.



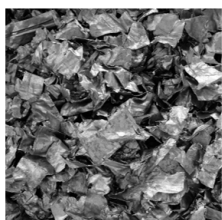

	<p>AL-STANZ-NEUSCHROTTE</p> <p>KORNGRÖÖE ~ 30-800 mm</p> <p>DURCHSATZ ~ 4-6 t/h</p> <p>REINHEIT ~ 96 %</p> <p>AUSBEUTE ~ 85 %</p>		<p>EOL-SCHREDDER-SCHROTTE</p> <p>KORNGRÖÖE ~ 50-250 mm</p> <p>DURCHSATZ ~ 5-7 t/h</p> <p>REINHEIT ~ 92 %</p> <p>AUSBEUTE ~ 85 %</p>
	<p>AL-SCHREDDER-SCHROTTE</p> <p>KORNGRÖÖE ~ 40-120 mm</p> <p>DURCHSATZ ~ 6 t/h</p> <p>REINHEIT ~ 97 %</p> <p>AUSBEUTE ~ 90 %</p>		<p>KÜHL-SCHROTTE</p> <p>KORNGRÖÖE ~ 30-400 mm</p> <p>DURCHSATZ ~ 9-10 t/h</p>

Abbildung 27: Erzielte Sortierergebnisse für unterschiedliche Materialfraktionen.

12. Theoretische Betrachtung der Einsatzmöglichkeiten unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen und technischen Grenzen

Das Anwendungspotenzial des Verfahrens ist groß und reicht von der Erzgewinnung bis zum Recycler, vom Neuschrott bis hin zum Altschrott. Das Problem der Legierungsvermischung betrifft die Automobil-, die Luftfahrbranche sowie die Altschrottverwerter gleichermaßen. Von Titan, Kupfer, Seltenen Erden und Stahl bis hin zu Aluminium können mit LIBS grundsätzlich alle Metalle (prinzipiell auch andere Materialien bspw. Nichtmetalle wie Phosphor) sortiert werden. Aktuell wird ein hoher Bedarf an der legierungsbasierten Sortierung von Stanzabfall gesehen.

Besonderer Bedarf wird dabei aktuell in der Verwertung von Aluminium- und Stahl-Neuschrotten gesehen. Anwendungsfelder wären:

- Sortierung von Stählen und höherfesten Stählen nach schmelzbaren und nicht schmelzbaren Kriterien

- Sortierung von Aluminiumlegierungen (z. B. Unterscheidung von Al 6016 von 6060)
- Sortierung von Buntmetallen

Beschränkt man das derzeitige Potenzial nur auf die größten europäischen Stahl- und Aluminium-Verarbeiter so bietet dieser Markt aktuell ein Absatzpotenzial von ca. 20 vollautomatischen cleansort basierten Maschinen. Bei einem geschätzten Invest von rund 2 – 2,5 Mio Euro pro Maschine wäre bei einer Sortierfähigkeit auf Legierungsebene ein ROI von 14 – 22 Monaten erreichbar, der sich aus den Differenzpreisen zwischen Mischschrotten und sortenreinen Neuschrotten ergibt.

Kontakte zu mehreren großen Presswerken und Metallverarbeitern sowie der Automobilindustrie sind bereits geknüpft und ein großes Interesse ist signalisiert worden.

Um den Weg in das industrielle Umfeld umzusetzen, müssen jedoch Bedienkonzepte vereinfacht und weiterentwickelt sowie ein wirtschaftlicher und gut vereinzelter Massenstrom bzw. die Skalierung des Sortiergutes erzielt werden. Weitere Schritte in Richtung Digitalisierung und Vernetzung müssen für eine zukunftsfähige Technologie berücksichtigt und einbezogen werden. Die einzelnen Module müssen in der Verbindung miteinander weiter entwickelt werden, z. B. an den elektronischen und mechanischen Schnittstellen, unterzogen werden.

13. Fazit

Der Schwerpunkt des Forschungsprojektes lag auf der Optimierung und technologischen Weiterentwicklung der Analyse- und Auswertemethoden sowie darauf eine Basis an Materialkenndaten zu sammeln und zu analysieren. Weitere Forschungsinhalte waren die Steigerung der Sortiergenauigkeit auf modularer Ebene und die Erhöhung des Durchsatzes. Hierdurch hat die Technologie in den entwickelten Modulen einen Reifegrad erlangt, der die Anwendung im industriellen Umfeld äußerst attraktiv macht. Das „clean2sort“ Messsystem, das die Vorreinigung, geometrische Erfassung und die LIBS Analyse in integrierter Form ermöglicht stellt das zentrale Modul für einen nachhaltigen Betrieb einer Sortieranlage dar.

Eine große Zahl an metallischen Legierungen ist bereits in der Materialbibliothek hinterlegt. Auch Deckschichten von mehreren 10 µm stellen kein Problem für die Analyse des Grundmaterials dar. Hohe Durchsatzraten von bis zu 10 t/h bei gleichzeitig sehr hohen Sortiergraden machen das Verfahren für das industrielle Umfeld attraktiv. Durch die Verdopplung des Bearbeitungsbereiches eines „clean2sort“ Moduls und die Steigerung der Messgeschwindigkeit um mindestens einen Faktor $\sim 2,5$ konnte die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens optimiert werden. Um die Einsatzfähigkeit der Technologie auch unter wechselnden Umgebungsbedingungen zu gewährleisten, wurde eine Temperaturstabilisierung des Messsystems entwickelt.

Hinsichtlich der Einsatzbedingungen im industriellen Umfeld in einer geschlossenen Prozesskette sind Aspekte wie Sicherheit, Serviceverfügbarkeit, Robustheit der Anlage sowie die einfache Bedienbarkeit der Software zu berücksichtigen. Auch die technologische Weiterentwicklung hinsichtlich einer verbesserten analytischen Messtiefe von Begleitelementen wie Phosphor in Konzentrationen von 0,01 Gew.-% müssen nach Projektende weiter vorangetrieben werden, um die Anforderungen potenzieller Kunden zu erfüllen. Dazu können beispielsweise höherauflösende Spektrometer oder Kombinationen aus verschiedenen Spektrometern, die bestimmte Messbereiche abdecken eingesetzt werden. Ein zentrales Thema ist die ergänzende Gewichtsbestimmung des Materials (z. B. in Form der kontinuierlichen Messung der Austrittsmenge des Schüttbunkers), die über eine Massenstromanalyse in Kombination mit statistischen Methoden erstmals quantitative Materialkenndaten aller Legierungsbestandteile der sortierten Fraktionen bereitstellen könnte.

Die Sammlung technischer und wirtschaftlicher Erfahrungen aus der Erprobung im Feld stellt den nächsten notwendigen Schritt auf dem Weg zur Entwicklung der Serienreife dar.

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

„Entwicklung einer Hochdynamischen In-Line Detektion zur legierungsselektiven LIBS basierten Sortierung von Wertstoffen (HILDE)“

A Anhang

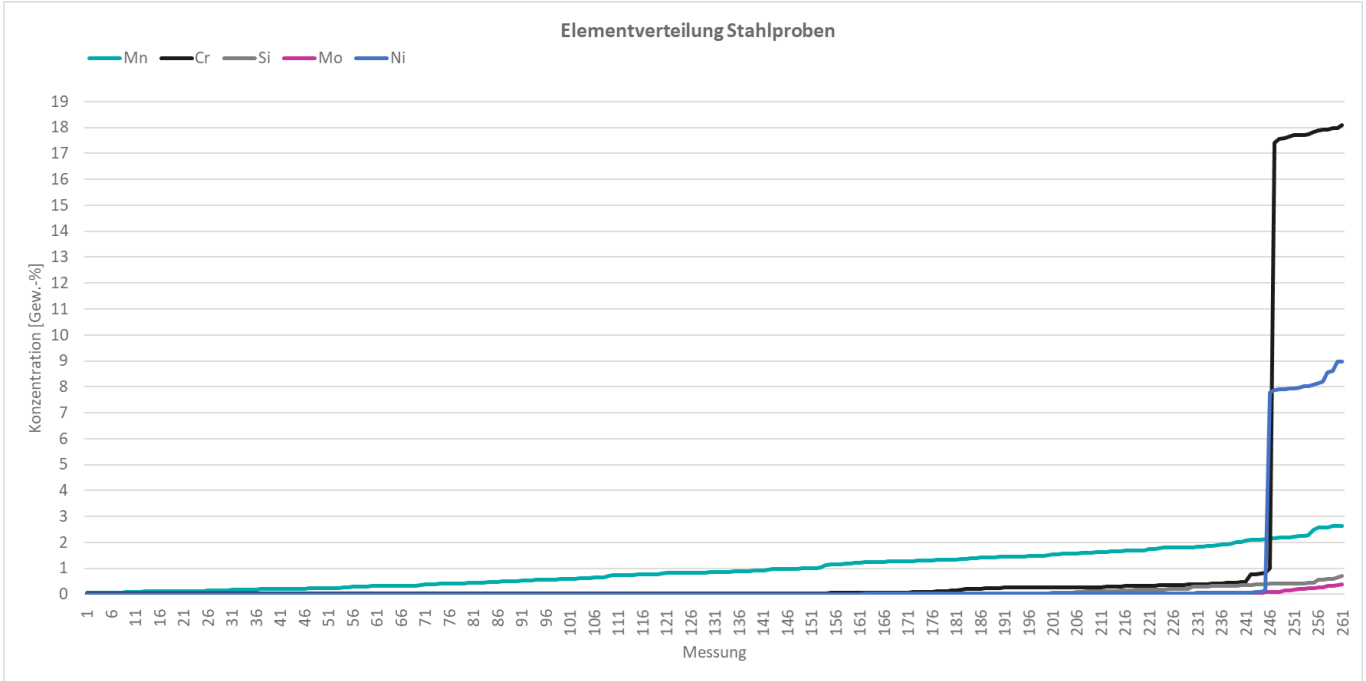


Abbildung 28: Elementverteilung Stahl Kalibrierproben

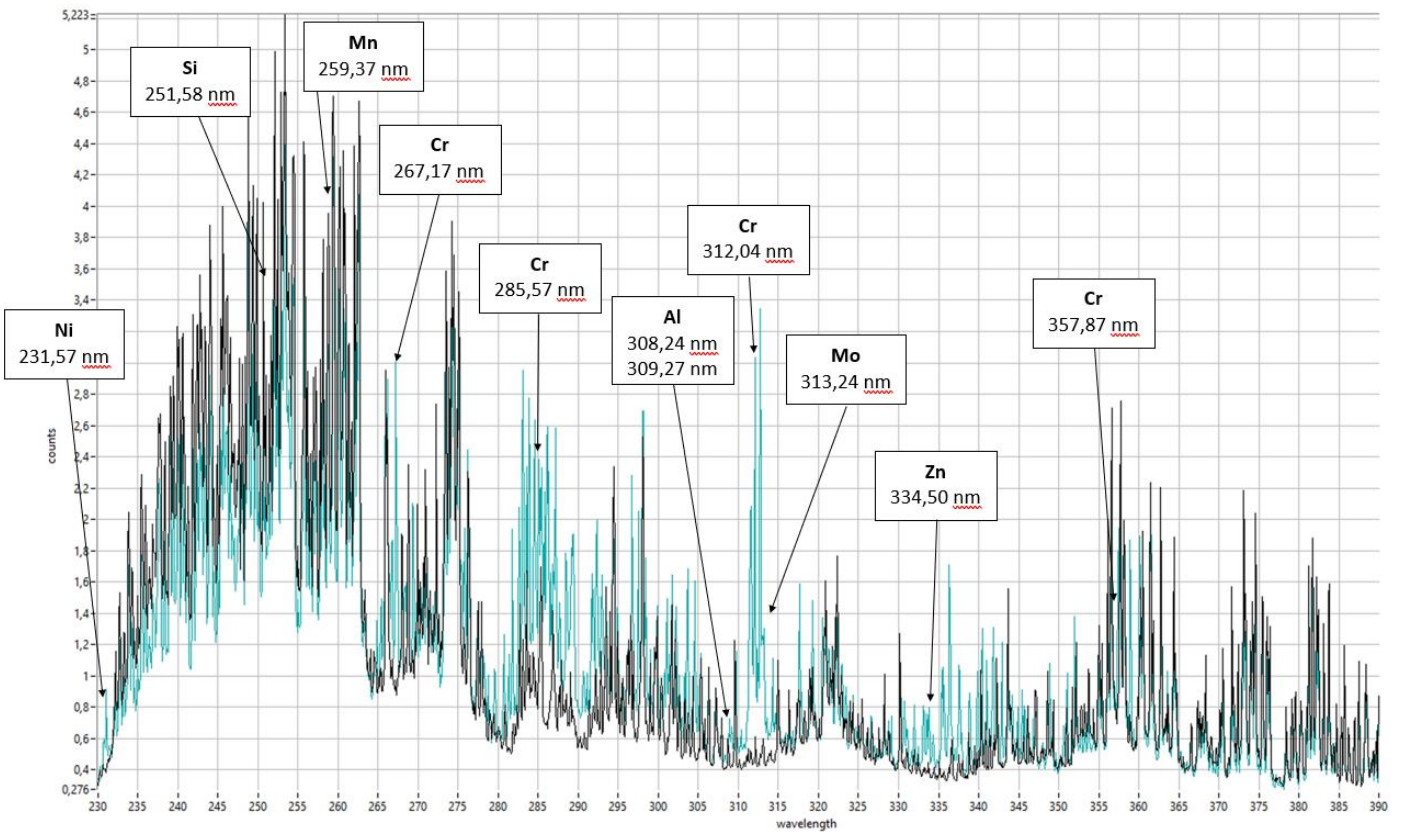


Abbildung 29: Stahl schwarz, Edelstahl cyan

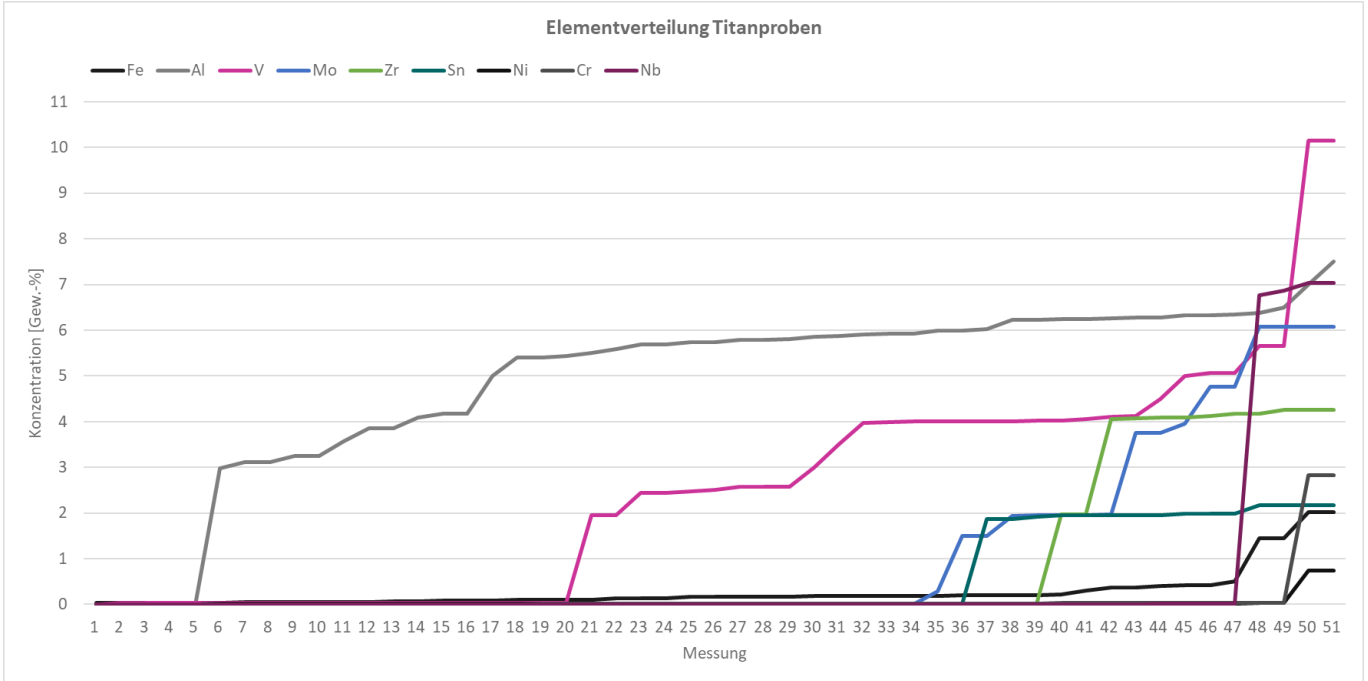


Abbildung 30: Elementverteilung Titan Kalibrierproben

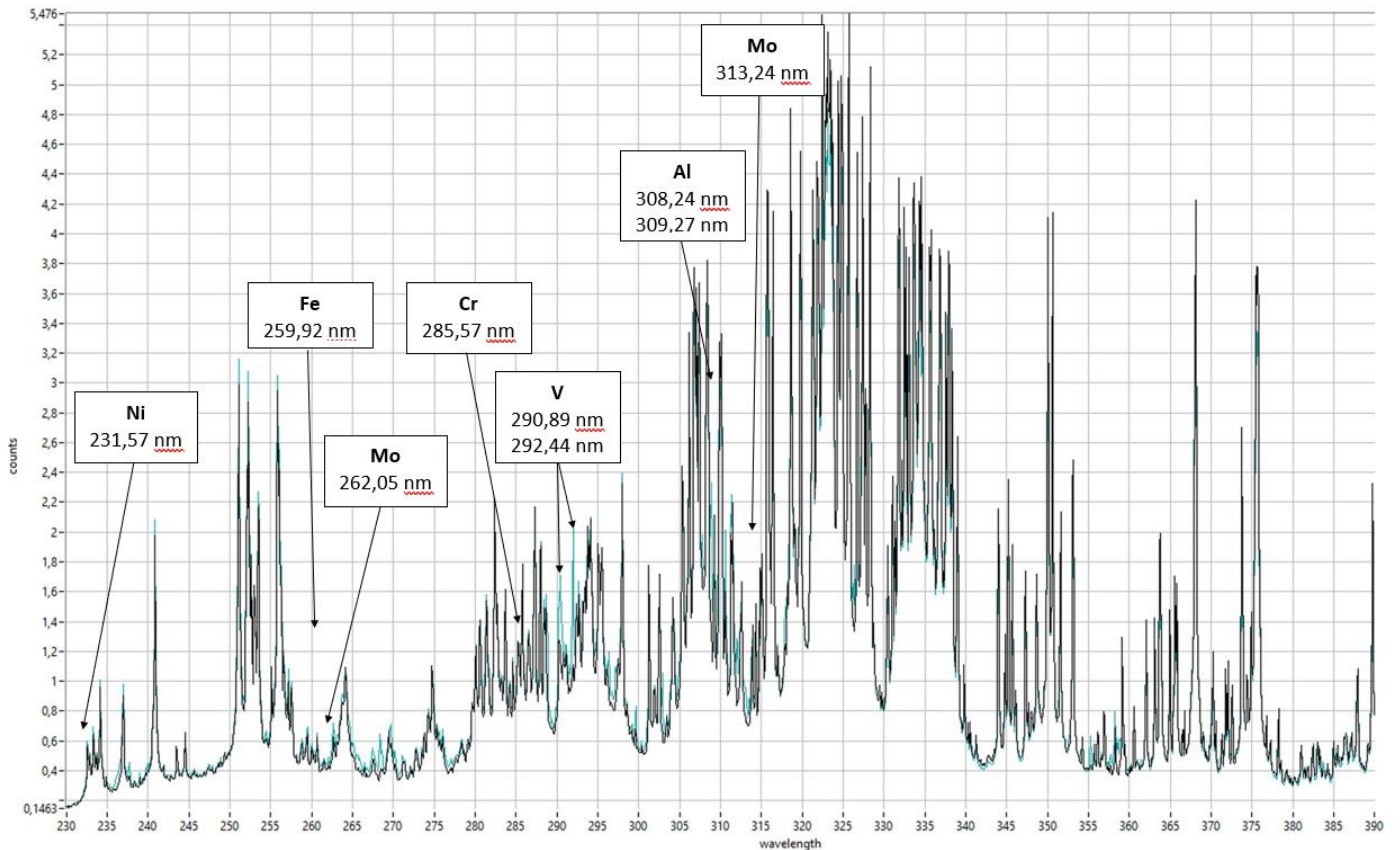


Abbildung 31: Reintitan schwarz, Titan VaAl cyan

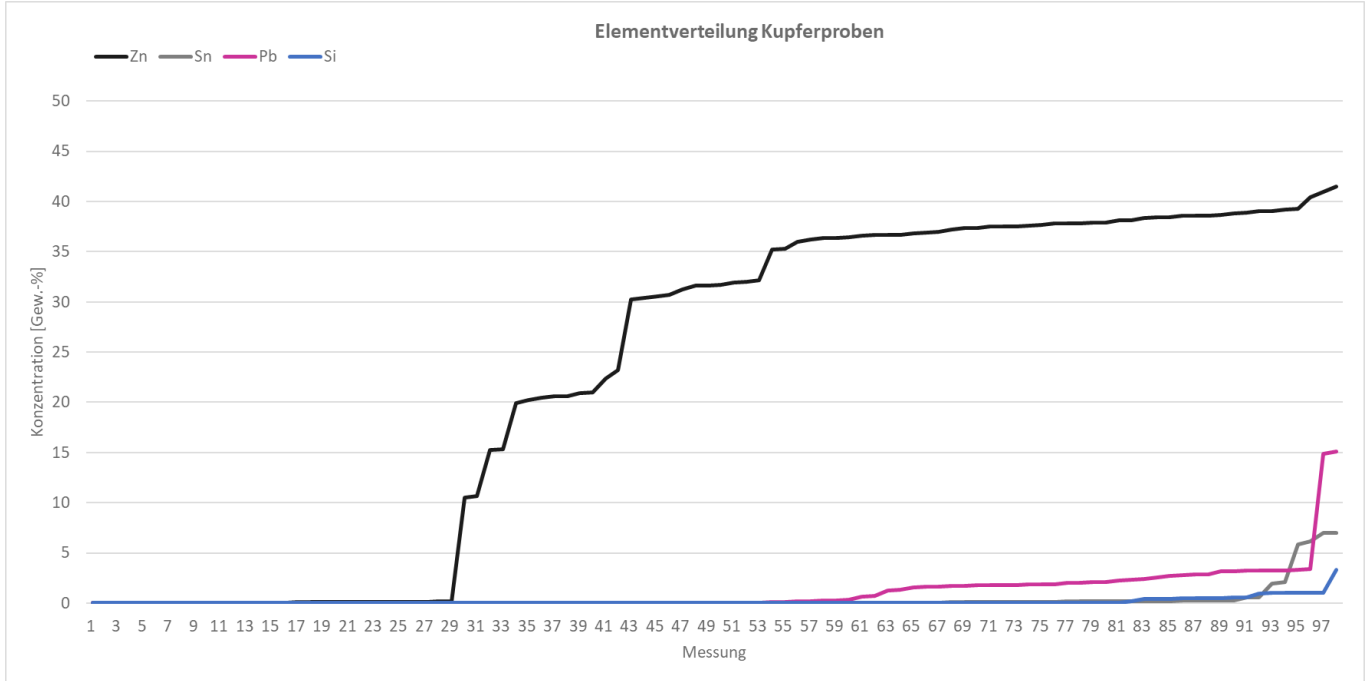


Abbildung 32: Elementverteilung Kupfer Kalibrierproben

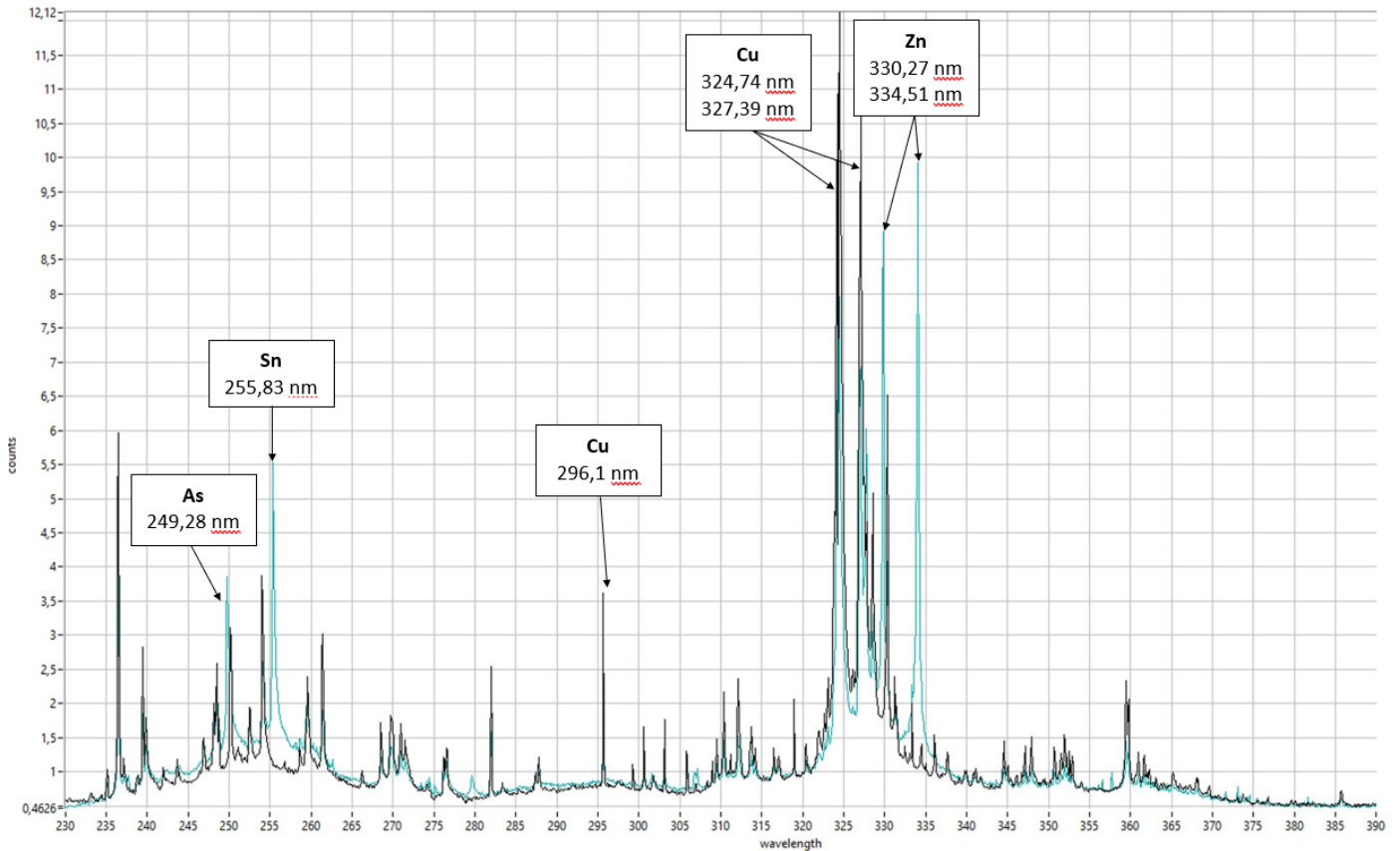


Abbildung 33: Kupfer schwarz, Messing cyan