

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20063 N

Thema

Einbringung von Messskalen in Hubprofile mittels Laserstrahlung

Berichtszeitraum

01.04.2018 bis 28.02.2021

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e.V.

Forschungseinrichtung(en)

Laser Zentrum Hannover e.V.

Hannover 26.03.2021
Ort, Datum

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)



Gefördert durch:

Zusammenfassung

Dieses Forschungsvorhaben befasst sich mit einem innovativen Konzept zur Hubhöhenbestimmung von Flurförderfahrzeugen. Ziel des Vorhabens ist die Bereitstellung eines Messsystems, das unanfällig gegen Umwelteinflüsse und verschleißfrei ist. Wartungsarbeiten sollten minimiert und die erreichbare Messauflösung optimiert werden. Um dieses Ziel zu erreichen wurden Hubprofile durch Laserstrahldispersieren mit Messmarkierungen versehen. Die Messmarkierungen wurden durch einen Wirbelstromsensor am Lasttragemittel erkannt und für die Bestimmung der Hubhöhe herangezogen. Als zweiter Nutzen können die Lasermarkierungen zur Kennzeichnung der Hubprofile und anderen kostenintensiven Bauteilen genutzt werden. Hierzu wird eine festgelegte Abfolge von Markierungen in das Bauteil eingebracht und das zugehörige Wirbelstrommesssignal als Referenz gespeichert. Das Bauteil kann so mit dem Wirbelstrommessgerät untersucht und identifiziert werden.

Für das Laserstrahldispersieren wurden zwei Zusatzmaterialien, Zirkoniumoxid und Wolframschmelzcarbid, untersucht. Zirkoniumoxid ließ sich im Wirbelstrommesssignal als zeitlich schmalere Signaländerung feststellen, während bei Wolframschmelzcarbid unregelmäßige Signaländerungen eine Detektion erschwerten. Das Wirbelstrommesssignal konnte nicht nur über das verwendete Zusatzmaterial, sondern auch über die Laserprozessparameter gesteuert werden. Auf diese Weise konnten unterschiedlich hohe Signalausschläge generiert werden, wenn eine Lasermarkierung vom Sensor überquert wird.

Zur Verwendung als Hubhöhenbestimmung hat sich eine Abfolge von identischen im gleichen Abstand wiederholenden Markierungen als besonders geeignet gezeigt. Die Lasermarkierungen können in einem minimalen Abstand von 2 mm gesetzt werden, um vom Wirbelstrommessgerät zuverlässig voneinander getrennt werden zu können. Der Abstand des Sensorkopfes zum Hubprofil sollte 0,8 mm nicht übersteigen, da ansonsten das Signal-zu-Rauschverhältnis ungeeignet klein wird. Nach vollständiger Aufwärmung des Wirbelstrommessgeräts konnte unter Laborbedingungen eine Fehlerquote von 0,00365 % bei der Erfassung einer einzelnen Lasermarkierung festgestellt werden. Das aufgenommene Messsignal kann für eine Positionsbestimmung in 0,5 mm Schritten ausgewertet werden, wobei die Standardabweichung 0,11 mm beträgt.

Die hohe Sensitivität des Wirbelstromsensors gegenüber Abstandsänderungen zum Hubprofil zeigte sich als größte Herausforderung der Umsetzung. Eine Änderung von 0,1 mm über die Messstrecke ist bereits als Herausforderung für eine zuverlässige Hubhöhenbestimmung zu betrachten. Die Untersuchungen am Flurförderfahrzeug zeigten, dass Fahrbewegungen und Vibrationen durch den Motor das Messsignal nicht nachteilig beeinflussen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass das Ziel des Vorhabens ein verschleißfreies hochauflösendes Messsystem bereitzustellen erreicht wurde. Die angestrebte Auflösung von 2 mm konnte mit 0,5 mm bei geringer Fehlerquote übertroffen werden. Das große Potential der Technik für eine Anwendung im Plagiatschutz wurde demonstriert und lässt sich auf weitere Produkte übertragen und weiterentwickeln.

Inhalt

Zusammenfassung	2
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	8
Einleitung	9
Stand der Technik und Forschung	10
Verfahren zur Positionsbestimmung von Lastragemitteln	10
Mechanische Messverfahren	10
Optische Messverfahren	10
Oberflächenmodifikation durch Laserstrahlung	11
Wirbelstromtechnik	13
Aufgabenstellung und Ziele	15
Ergebnisse	16
Arbeitspaket 1: Auslegung der Erkennungstechnik	16
Auslegung und Spezifikationen des Wirbelstrommessgeräts	16
Aufbau eines Messstands zur Wirbelstrommessung von Hubprofilen	17
Arbeitspaket 2: Aufbringen von detektierbaren Schichten	18
Herstellung von Flachsubstraten aus Profilstahl	18
Modifizierungen der Laserbearbeitungsanlage	19
Untersuchungen zum Laserstrahldispargieren	21
Arbeitspaket 3: Analyse der Detektierbarkeit	27
Bewertung der Wirbelstromsensoren	27
Einfluss der Laserprozessparameter auf das Wirbelstrommesssignal	29
Grenzen und Fehlerquellen der Wirbelstrommesstechnik	31
Arbeitspaket 4: Aufbringen von Messmarkierungen auf Hubprofile	34
Markierung von Hubprofilen zur Hubhöhenbestimmung	34
Überprüfung der Umsetzbarkeit eines Plagiatschutz	38
Arbeitspaket 5: Prüfung der Hubhöhenmessung	39
Langzeitmessungen mit dem Wirbelstrommessgerät	40
Versuche bei Abweichungen vom Abstand zwischen Sensor und Probe	42
Mögliche Auflösung des Messsystems	43
Untersuchungen am Flurförderfahrzeug	46
Arbeitspaket 6: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	48
Ausblick	50

Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen	52
Angaben zu aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben.....	53
Erläuterungen zum Personaleinsatz	53
Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	54
Plan zum Ergebnistransfer	54
Literaturverzeichnis	55
Anhang.....	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Optisches Hubhöhenbestimmungssystem mit Berücksichtigung der möglichen Biegung eines Teleskopmastes unter Last; Grafik erstellt nach [7]	11
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Laserstrahllegierens; Das Pulver wird koaxial dem Laserstrahl zugeführt und mit dem Grundmaterial aufgeschmolzen	12
Abbildung 3: Schliffbild eines mit Molybdän legierten C45 Stahls; der legierte Bereich beschränkt sich auf die oberste aufgeschmolzene Schicht	13
Abbildung 4: Linke Seite zeigt eine Schematische Darstellung einer Wirbelstrommessung [23]; rechte Seite zeigt die beispielhafte Darstellung eines Messsignals in der Impedanzebene	14
Abbildung 5: Lasermarkierungen auf einem 18MnNb6 Substrats zur Auslegung des Wirbelstrommessgeräts; (a) schräg von oben, (b) Seitenansicht	16
Abbildung 6: Aufbau des Labormesstages zur Vermessung von Lasermarkierungen auf Flachsubstraten	17
Abbildung 7: Linke Seite zeigt die Darstellung eines typischen Messsignals einer Testreihe; rechte Seite zeigt ein Standbild eines synchron aufgenommenen Videos der Messung	18
Abbildung 8: (a) Stück eines Hubprofils; (b) Abschnitt einer Seitenfläche des Hubprofils mit laserstrahl-dispergierten Markierungen	19
Abbildung 9: Schematische Darstellung des Strahlengangs im Bearbeitungskopf zum Laserstrahl-dispergieren	19
Abbildung 10: Bestimmung der Pulverfokusebene am Austritt aus dem Bearbeitungskopf.....	20
Abbildung 11: Versuchsmatrix auf einem Hubprofilrandstück; Anstieg der Laserleistung von links nach rechts; Anstieg der Pulverzufuhr von oben nach unten.....	21
Abbildung 12: Bestimmung der Breite (a) und Oberflächentopographie (b) einer Lasermarkierung ohne Zusatzmaterial; verwendete Prozessparameter: $P = 290 \text{ W}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$	22
Abbildung 13: (a) 3D-Höhenbild einer mit ZrO_2 dispergierten Lasermarkierung; (b) Draufsicht mit Schnittebene für Topographiemessung; (c) Topographiemessung über der Lasermarkierung; verwendete Prozessparameter: $P = 290 \text{ W}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$, $\text{TDZ} = 17$	23
Abbildung 14: Laserstrahl-dispergierte Markierung mit den Prozessparametern $P = 490 \text{ W}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$ und $\text{TDZ} = 17$; an den Seiten des Schmelzbades prägt sich eine Erhöhung von ca. $50 \mu\text{m}$ aus; (a) 3D-Ansicht mit Schnittebene; (b) Draufsicht mit Schnittebene	23
Abbildung 15: (a) Zweidimensionale Darstellung der Regressionsgleichung aus Formel 4 mit berechneter Spurbreite für die Prozessparameterkombination $P = 300 \text{ W}$ und $\dot{m} = 17 \text{ TDZ}$; (b) Vergleich der gemessenen Spurbreite mit der berechneten Spurbreite aus Formel 4.....	24
Abbildung 16: Schliffbilder Zirkoniumoxid dispergierter Markierungen; Positionen der Härtemessungen (a) (Prozessparameter: $P = 250 \text{ W}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$, $\dot{m} = 7 \text{ TDZ}$); Positionen der EDX Messungen (b) (Prozessparameter: $P = 250 \text{ W}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$, $\dot{m} = 10 \text{ TDZ}$)	25
Abbildung 17: (a) Mit Wolframschmelzcarbid dispergierte Lasermarkierung mit Position der Schnittebene zur Bestimmung des Höhenprofils (b)	26
Abbildung 19: Beispielprobe mit fünf unterschiedlichen Lasermarkierungen zur Bestimmung der Eignung der unterschiedlichen Wirbelstromsensortypen; als Zusatzmaterial wurde Zirkoniumoxid verwendet	28

Abbildung 20: Verläufe des Wirbelstrommesssignals mit unterschiedlichen Sensortypen zur Bestimmung der Sensoreignung	28
Abbildung 21: Beispielmessung mit dem Halbtransmissionssensor und eingezeichneten untersuchten Merkmalen	30
Abbildung 22: Zweidimensionale Darstellung der Regressionsgleichung zur Bestimmung der Maximumhöhe von Zirkoniumoxid dispergierten Lasermarkierungen.....	31
Abbildung 23: Messreihe mit zwei unterschiedlichen abwechselnden Lasermarkierungen; verwendete Prozessparameter Markierung 1: $P = 350 \text{ W}$, $\dot{m} = 7 \text{ TDZ}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$ und Markierung 2: $P = 200 \text{ W}$, $\dot{m} = 7 \text{ TDZ}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$	32
Abbildung 24: Ausschnitte der Messsignale von Lasermarkierungen mit 1 mm und 2 mm Abstand, die Messgeschwindigkeit beträgt 2000 mm/min; verwendete Prozessparameter $P = 200 \text{ W}$, $\dot{m} = 7 \text{ TDZ}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$	33
Abbildung 25: Ausschnitte von Wirbelstrommessungen mit unterschiedlichem Abstand von Sensor zur Probe	33
Abbildung 26: Ablauf der Untersuchungen an Hubprofilen; (a) Hubprofil in Schutzgasbecken beim Laserprozess; (b) Wirbelstrommessung am Hubprofil in der Laseranlage.....	35
Abbildung 27: (a) Messergebnis einer 640 mm langen Messstrecke mit Lasermarkierungen in 2 mm Abstand; (b) Anstieg des Messsignals bei Messung erster Markierungen; (c) Abweichendes Signal in der Messstrecke verursacht durch eine fehlende Lasermarkierung.....	35
Abbildung 28: Darstellung der unterschiedlichen Messsituationen an einer Lücke zwischen den Lasermarkierungen und im Bereich ohne Lücke; (a) Hubprofil mit Blöcken von Lasermarkierungen getrennt durch Lücken jeweils nach neun Markierungen; (b) resultierendes Messsignal mit Zuordnung zu einzelnen Lasermarkierungen.....	36
Abbildung 29: Beispiel einer Fehlmessung an der vorletzten Messposition vor einer Lücke in den Lasermarkierungen	37
Abbildung 30: Messsignal einer 540 mm langen Messstrecke mit durchgehenden inkrementellen Messmarkierungen begrenzt durch zwei Doppelpeaks am Anfang und Ende (blaue Kreuze).....	37
Abbildung 31: Beispiel zur Lasermarkierung zum Plagiatschutz; zwischen Start- und Endpunkt wird eine bestimmte Abfolge von Lasermarkierungen gesetzt; im Beispiel ist das Codewort „LZHIFL“ in Binärwerte übersetzt; eine Markierung steht für „1“ und eine fehlende Markierung für „0“.....	38
Abbildung 32: Gegenüberstellung der Messsignale von zwei binärisierten Codewörtern.....	39
Abbildung 33: Graphische Darstellung der ermittelten Messstrecken im Langzeitversuch über 7,6 Stunden	40
Abbildung 34: Ermittelte Messstrecken bei vier Stunden Aufwärmzeit des Wirbelstromsensors; drei von 304 Messungen weichen um 2 mm vom Sollwert ab; im unteren Bereich ist ein Beispiel eines Fehlers gegeben, der zur Abweichung in der ermittelten Messstrecke führt, ein Maximum ist im Messsignal fälschlicherweise mit einer Doppelspitze dargestellt.....	41
Abbildung 35: Messsignalverläufe bei unterschiedlichen Steigungen; mit zunehmender Steigung wird das Signal-zu-Rauschverhältnis schlechter	42
Abbildung 36: Ausschnitt des Messsignals transformiert in Graustufen (a) und gleicher Ausschnitt in als Graph der Magnitude (b), jeweils mit eingezeichneten Maxima und Minima.....	43

Abbildung 37: Messsignalausschnitt aus Abbildung 35 mit erhöhter Auflösung durch kubische Interpolation.....	44
Abbildung 38: Abstände zwischen den Extrempunkten; im Originalsignal liegen die Distanzen entweder auf dem Sollwert oder um 0,33 mm (ein Messpunkt) verschoben, im interpolierten Messsignal streuen die bestimmten Distanzen enger um den Sollwert.....	44
Abbildung 39: Messsignalausschnitt aus Abbildung 35 kubisch interpoliert mit einem Faktor von 10; zur weiteren Erhöhung der Auflösung wurden die Wendepunkte im Messsignal bestimmt.....	45
Abbildung 40: Messaufbau am Flurförderfahrzeug; der Messcomputer und die Kontrolleinheit des Wirbelstrommessgeräts befinden sich in einer Kiste am Lasttragemittel; der Sensorkopf ist mit einer Halterung an der Befestigung der Gabel geklemmt und mit 0,8 mm Abstand auf das Hubprofil ausgerichtet.....	46
Abbildung 41: Einflüsse auf das Grundsignal des Wirbelstrommessgeräts in den untersuchten Anwendungsszenarien eines Flurförderfahrzeugs.....	47
Abbildung 42: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Wege beim Laserstrahldispersieren von Hubprofilen.....	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Signifikanz der Prozessparameter auf die Spurbreite (Zirkoniumoxid)	24
Tabelle 2: Elementverteilung der EDX Messungen an den Positionen in Abbildung 16 (b)	26
Tabelle 4: Laserprozessparameter der fünf Markierungen auf der Probe aus Abbildung 19	27
Tabelle 5: Signifikanz der Prozessparameter auf die Höhe der Maxima im Wirbelstrommesssignal	30
Tabelle 6: Verwendung der Zuwendung	53
Tabelle 7: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	54
Tabelle 8: Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens	54
Tabelle 9: Untersuchte Prozessparameter zu Bestimmung der Maximumhöhe beim Laserstrahl dispersieren mit Zirkoniumoxid	57

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

AP	Arbeitspaket
kmU	Kleine und mittelständische Unternehmen
Φ	Magnetischer Fluss
Θ	Divergenzwinkel
A	Fläche
d	Fokusbildungsdurchmesser
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
j	Imaginäre Einheit
\dot{m}	Pulverstrom
P	Laserleistung
R	Spulenwiderstand
R^2	Bestimmtheitsmaß
Sb	Spurbreite
SPP	Strahlparameterprodukt
TDZ	Tellerdrehzahl (Pulverförderer)
X_L	Induktiver Spulenwiderstand
\underline{Z}	Impedanz

Einleitung

Eine präzise und gleichzeitig schnelle Hubhöhenmessung von Flurförderfahrzeugen und Hochregallagersystemen stellt ein zentrales Element der Wirtschaftlichkeit von Lagerstätten dar. Durch eine genaue Positionsbestimmung kann die Packungsdichte im Lager erhöht und bei gleichem Lagervolumen mehr Güter aufgenommen werden. Durch den steigenden Grad an Automatisierung werden zusätzlich die Komponenten der Zuverlässigkeit und Wartungsfreiheit relevanter. Die eingesetzten Systeme müssen zunehmend unbeaufsichtigt und möglichst im Dauerbetrieb ohne längere Wartungspausen eingesetzt werden, um die Wirtschaftlichkeit des Lagers zu erhöhen und dem Unternehmen, insbesondere kmU, bessere Wettbewerbschancen zu generieren.

Die aktuellen Methoden zur Hubhöhenmessung beruhen auf mechanischen und optischen Verfahren. Im Bereich der mechanischen Verfahren werden unter anderem Rollrad-, Seilzug- und hydraulische Durchflusssysteme eingesetzt. Nachteile dieser Systeme sind ein erhöhter Montageaufwand, Anfälligkeit bei Verschmutzungen und die inkrementelle Positionserfassung, die eine mögliche Fehlerfortpflanzung nicht verhindert. Die optischen Verfahren bieten in der Regel die Möglichkeit einer absoluten Hubhöhenbestimmung von Lasttragungsmitteln, benötigen jedoch eine verschmutzungsfreie und unbehinderte optische Messstrecke.

In diesem Vorhaben wird ein neuer Ansatz der Hubhöhenbestimmung untersucht. Dazu werden in Hubprofile Materialinhomogenitäten eingebracht, die eine Änderung der elektrischen und magnetischen Leitfähigkeit verursachen. Diese Inhomogenität dient als Positionsmarkierung und kann unter Verwendung von Wirbelstromtechnik detektiert werden. Die Wirbelstromtechnik bietet den Vorteil, dass sie nicht durch Verschmutzungen und Schmierfette verfälscht wird, sie schnell und kontaktlos arbeitet und somit kein Verschleiß auftritt. Die Wirbelstromtechnik ist bereits zur Detektion von Rissen in Metallen sowie zur Prüfung von Dünnschichten etabliert. In diesem Projekt werden die Materialinhomogenitäten durch das Verfahren des Laserstrahldispersierens eingebracht. Das Verfahren verwendet einen Zusatzwerkstoff in Pulverform, der in eine vom Laserstrahl lokal erzeugte Schmelze eingebracht wird. Beim Laserstrahldispersieren wird der eingebrachte Werkstoff möglichst homogen verteilt und in seiner Ursprungsform im Grundwerkstoff eingebettet.

Zur weiteren Aufwertung der Hubprofile wird die Möglichkeit einer Bauteilidentifizierung geschaffen. Über das Verfahren des Laserstrahldispersierens werden werkstoffinhärente Markierungen, die auch zur Datenspeicherung genutzt werden können, geschaffen. Auf diese Weise können Bauteile markiert und zweifelsfrei über Wirbelstromtechnik identifiziert werden.

Die in diesem Projekt erzielten Forschungsergebnisse kommen sowohl Profile herstellenden Unternehmen, Herstellern von Wirbelstromtechnik und Laseranlagen zugute. Indirekt profitieren alle lagerhaltenden Betriebe durch die Erhöhung von Lagerkapazitäten und gestiegenen Zuverlässigkeitsniveaus von Hubhöhenbestimmungen.

Stand der Technik und Forschung

Im folgenden Kapitel werden aktuelle Positionsbestimmungssysteme von Lasttragemitteln an Flurförderfahrzeugen und Regallagersystemen mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen erläutert. Es folgt eine Betrachtung der in diesem Projekt untersuchten Wirbelstromtechnik sowie des aktuellen Stands der Forschung zur Oberflächenmodifizierung mittels Laserstrahlverfahren.

Verfahren zur Positionsbestimmung von Lasttragemitteln

Grundsätzlich lassen sich die aktuell bekannten Positionsbestimmungssysteme in die Kategorien mechanischer und optischer Messverfahren einordnen. Die unterschiedlichen Systeme werden im Folgenden beschrieben.

Mechanische Messverfahren

Zur mechanischen Bestimmung der Hubhöhe von Lasttragemitteln ist ein Ansatz eine Rolle mit integrierter Messeinheit entlang des Hubmastes zu führen. Gemessen wird der Drehwinkel der Rolle und dadurch wird ein Rückschluss auf die aktuelle Hubhöhe geschlossen. Mögliche Nachteile dieser Technologie bestehen im Schlupf zwischen Rolle und Hubmast sowie einer möglichen Fehlmessung bei verschmutzungsbedingter Änderung des Durchmesser der Rolle. Eine weitere Möglichkeit der Positionsbestimmung über ein Rollensystem und Ermittlung des Drehwinkels stellt die Montage eines Zahnriemens am Lastträger dar, der wiederum eine Rolle bzw. Zahnrad antreibt [1]. Eine Reihe weitere Systeme beruht auf hydraulischen bzw. hydrostatischen Methoden. In [2] wird ein Verfahren beschrieben, bei dem die Hubhöhenbestimmung durch Messung des Füllstandes im Hydraulikreservoir durchgeführt wird. Ein schwimmender Taster detektiert hierbei definierte Füllstandsmarkierungen. Ein Nachteil ist die Einschränkung durch eine begrenzte Anzahl von nicht veränderlichen Messmarkierungen. Flexibler ist der Ansatz eines inkrementellen Messsystems, bei dem die Umdrehungen der Hydraulikpumpe gezählt werden. Die Bestimmung der Hubhöhe erfolgt über die Volumenförderung pro Umdrehung der Pumpe unter der Berücksichtigung der Hubzylinderfläche. Nachteilig zeigt sich die Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur, die sowohl Hydraulikflüssigkeitsvolumen als auch den Hubzylinderquerschnitt beeinflusst [3]. Ein Abwandlung dieses Messprinzips wird in [4] beschrieben. In dieser Abwandlung findet die Volumenmessung nicht durch die Umdrehungszahl der Hydraulikpumpe statt, sondern wird mit einem Durchflusssensor bestimmt. Ein weiteres Messprinzip beruht auf Messung des hydrostatischen Drucks. Hierbei wird ein mit Flüssigkeit gefüllter Schlauch mit einem Ende am Lastträger befestigt, während das zweite Ende am Förderfahrzeug fest installiert ist. Ein Drucksensor am festen Ende des Schlauchs bestimmt den hydrostatischen Druck und korreliert diesen Druck mit der Hubhöhe [5]. Ein Vorteil dieses Messprinzips ist die anpassungslose Anwendbarkeit bei Teleskopmasten. Jedoch hängt die Präzision der Messung von der Umgebungstemperatur und dem Umgebungsdruck ab. Zusätzlich kann die Druckmessung beispielsweise durch Vibrationen gestört werden. Alle in diesem Abschnitt beschriebenen Messmethoden zeigen sich anfällig gegen Störungen durch Umwelteinflüsse und Verschleiß. Das Messergebnis ist abhängig von den Umgebungstemperaturen und Vibrationen oder kann durch Verschmutzungen verfälscht werden.

Optische Messverfahren

Weitestgehend unabhängig gegen die Umgebungsbedingungen des Einsatzortes sind die optischen Messverfahren. Sie bieten ebenfalls den Vorteil nicht zu verschleiben und können in der Regel absolute Messwerte bestimmen. Durch die Bestimmung von absoluten Messwerten können Fehlerfortpflanzungen vermieden werden. Eine Variante besteht aus einem Sender von

elektromagnetischen oder Ultraschallwellen. Diese Wellen werden vom Lasttragemittel reflektiert und am Sender integrierten Empfänger detektiert. Über eine Laufzeitmessung kann die Entfernung, und somit die Hubhöhe, bestimmt werden. Nachteil ist, dass diese Wellen nicht gerichtet ausgestrahlt werden, sondern gefächert. Hierdurch können Störreflektionen zu Fehlmessungen führen. Diese Störungen können verhindert werden, wenn ein vom Sender getrennter Empfänger am Lasttragemittel verwendet wird [6]. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass sowohl für Sender, als auch Empfänger ein Datenkabel und Energieversorgung mit dem Lasttragemittel gefördert werden muss. Dies erfordert erweiterten Montageaufwand und die Kabelführungen sind Verschleiß ausgesetzt. Die Mitführung von Versorgungsleitungen über die Hubhöhe kann vermieden werden, wenn als Emitter ein Laser verwendet wird, dessen Laserstrahl gerichtet verläuft und am Lasttragemittel mittels eines Spiegels reflektiert wird. Der Laserstrahl kann an der Flurförderfahrzeugbasis detektiert werden. Ein solches System ist jedoch anfällig gegen durch Biegemomente verursachte Verschiebungen des Reflektorspiegels. Eine Lösung dieser Herausforderung ist in [7] beschrieben. In diesem Ansatz wird, wie in Abbildung 1 dargestellt, der Laserstrahl über ein optisches Element gescannt. Der gescannte Bereich beinhaltet alle zulässigen Positionen des Reflektorspiegels bei belastetem Lasttragemittel. Voraussetzung für diese Methode der Hubhöhenbestimmung ist eine unbehinderte Messstrecke zwischen optischem Element und Reflektorspiegel, bei allen zulässigen Biegungen des Teleskopmastes. Zusätzlich darf weder Reflektionsfläche, noch optisches Element verschmutzen.

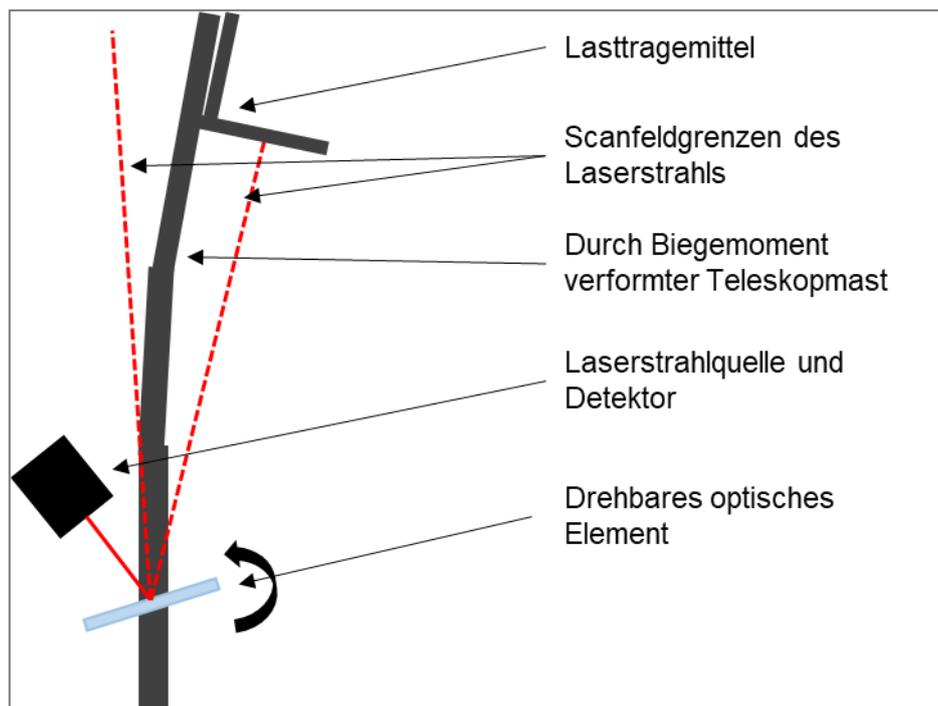


Abbildung 1: Optisches Hubhöhenbestimmungssystem mit Berücksichtigung der möglichen Biegung eines Teleskopmastes unter Last; Grafik erstellt nach [7]

Ein weiterer beschriebener Ansatz nutzt optische Markierungen auf dem Mastprofil für die Bestimmung der Hubhöhe [4]. Neben dem Einfluss der Lichtverhältnisse und Reflektionen stellt die Anfälligkeit gegen Verschmutzungen einen wesentlichen Nachteil dar.

Oberflächenmodifikation durch Laserstrahlung

Durch verhältnismäßig hohe Strahlqualitäten und eine gute Fokussierbarkeit von Laserstrahlung bieten Laserstrahlprozesse im allgemeinen den Vorteil einer lokal eingegrenzten Bearbeitung von

Werkstücken. Im Bereich der Oberflächenmodifikation von Metallen kann zwischen Zusatzmaterial freien und Prozessen mit Zusatzmaterial unterschieden werden. Zu den Verfahren ohne Zusatzmaterial zählen unter anderem das Laserstrahlanlassen, Laserstrahlumschmelzen und das Laserstrahlhärten [8, 9]. Beim Laserstrahlhärten wird das Werkstück lokal begrenzt und oberflächlich durch den Laserstrahl erwärmt und anschließend durch das umgebende Material schlagartig abgekühlt. Durch die hohen Aufwärm- und Abkühlraten stellen sich feinkörnige Gefüge im oberflächennahen Randbereich des Werkstücks ein. Ziel ist die Erhöhung der mechanischen Eigenschaften hinsichtlich einer harten verschleißfesten Schicht, während das Grundmaterial die ursprünglichen Eigenschaften behält [10–12].

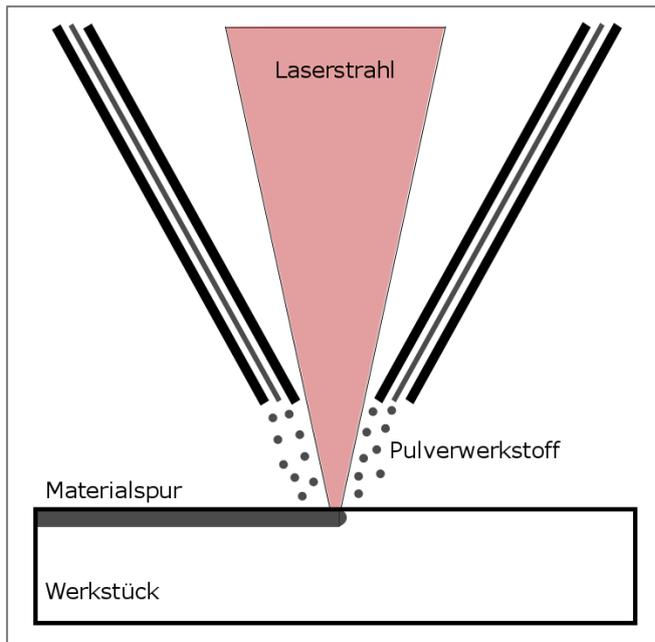


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Laserstrahllegierens; Das Pulver wird koaxial dem Laserstrahl zugeführt und mit dem Grundmaterial aufgeschmolzen

Die Laserstrahlverfahren zur Oberflächenbehandlung mit Zusatzmaterial lassen sich in Laserstrahlauftragschweißen, Laserstrahllegieren und Laserstrahldispersieren unterteilen. Alle Verfahren mit Zusatzmaterial lassen sich mit dem gleichen Bearbeitungsaufbau umsetzen, ein Schema eines solchen Aufbaus ist in Abbildung 2 dargestellt. Beim Auftragschweißen wird ein metallischer Zusatzwerkstoff dem Laserstrahl seitlich oder koaxial zugeführt und aufgeschmolzen. Der Zusatzwerkstoff kann sowohl in Form eines Drahtes oder als Pulver vorliegen und identisch mit dem Grundwerkstoff oder abweichend von diesem sein. Weicht der Zusatzwerkstoff vom Grundmaterial ab, ist das Ziel eine geringe Durchmischung mit dem Grundwerkstoff, um dessen Eigenschaften nicht zu beeinflussen.

Auf diese Weise können Beschichtungen mit vom Grundmaterial abweichenden Eigenschaften erstellt werden. Anwendungen finden sich bspw. im Werkzeugbau und in der Luftfahrt [13, 14]. Neben der Beschichtung von Bauteilen ist das reparierende Auftragschweißen eine weitere Facette. Hierbei werden verschlissene Bauteilbereiche zunächst ausgekoffert und anschließend konturiert durch Auftragschweißen wiederhergestellt. Diese Methode findet vor allem bei Gütern mit hohem Investitionswert Anwendung. Ein Beispiel ist das Reparieren von Turbinenschaufeln aus den Triebwerken von Flugzeugen [15, 16]. Neben dem Wiederherstellen von Gütern lassen sich auch ganze Bauteile durch das Auftragschweißen fertigen. In diesem Fall wird von additiver Fertigung, oder auch 3D-Druck, gesprochen [17]. Das Laserstrahllegieren hat im Gegensatz zum Auftragschweißen nicht das Ziel Schichten auf ein Substrat aufzutragen, sondern die Randschichten von Bauteilen durch die gezielte Zugabe von Legierungselementen zu modifizieren. Auf diese Weise können sich in den laserlegierten Schichten beispielsweise verschleißfeste Karbide bilden und dabei nur ein geringes Aufmaß generieren [18, 19]. Ein beispielhaftes Schlibbild eines mit Molybdän legierten C45 Stahls ist in Abbildung 3 dargestellt. Der legierte Bereich beschränkt sich auf die aufgeschmolzene Oberfläche. Unter der legierten Schicht befindet sich die Wärmeeinflusszone, in der sich Gefügeänderung durch schnelle Aufwärm- und Abkühlraten einstellen können.

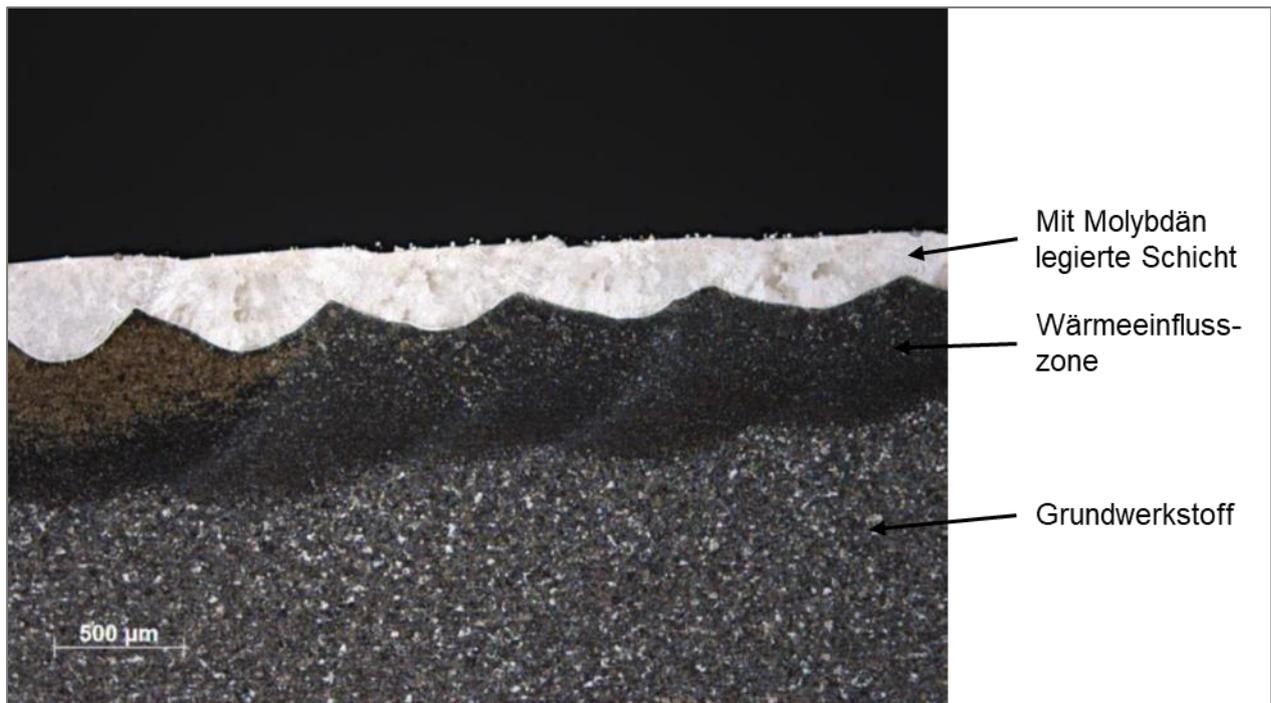


Abbildung 3: Schliffbild eines mit Molybdän legierten C45 Stahls; der legierte Bereich beschränkt sich auf die oberste aufgeschmolzene Schicht

Das Laserstrahldispersieren unterscheidet sich vom Laserstrahllegieren dadurch, dass das Zusatzmaterial nicht aufgeschmolzen und die Legierung des Grundmaterials nicht modifiziert wird. Es werden keramische oder andere Hartpartikel in das lokal geschmolzene Grundmaterial zugeführt, die in der erstarrenden Schmelze eingeschlossen werden. Eine wesentliche Anwendung für das Laserstrahldispersieren ist ebenfalls der Verschleißschutz von stark beanspruchten Bauteilflächen [20–22].

Wirbelstromtechnik

Die Wirbelstromtechnik ist ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, das vor allem für die Bestimmung von Schichtwiderständen und –dicken von Dünnschichten verwendet wird. Weitere klassische Anwendungsgebiete sind im Bereich der Rissprüfung von Metallen und Bestimmung der Leitfähigkeiten von Werkstoffen zu finden. Zentrales Element des Wirbelstromverfahrens ist eine Induktionsspule, die mit einem sich zeitlich hochfrequent ändernden elektrischen Strom belegt wird. Die genutzten Frequenzen liegen zwischen einigen Herz und bis zu 100 MHz. Wie in Abbildung 4 links dargestellt, resultiert durch den Spulenstrom ein primäres Magnetfeld innerhalb der Spulenwicklung. Das primäre Magnetfeld induziert Wirbelströme im unter der Spule liegenden elektrisch leitenden Werkstoff. Die Wirbelströme bilden ihrerseits ein sekundäres Magnetfeld, welches dem primären Magnetfeld entgegengerichtet ist. Aus der Überlagerung der beiden Magnetfelder ergibt sich ein resultierender magnetischer Fluss Φ innerhalb der Spulenwicklung. Wird der Wirbelstrom innerhalb des zu untersuchenden Werkstoffs beeinflusst, bspw. durch Änderungen der Leitfähigkeit und Rissen, ändert sich der magnetische Fluss in der Spulenwicklung. Es existieren Systeme mit einer oder mehreren Spulen, die unterschiedlich angeordnet und dimensioniert sein können. Dabei kann die zweite oder dritte Spule als reiner Empfänger genutzt werden. Gemessen wird der induktive Spulenwiderstand X_L und der Spulenwiderstand R . Die gemessenen Größen lassen sich, wie in Abbildung 4 rechts, in der Impedanzebene darstellen und

auswerten. Neben dem induktiven Spulenwiderstand und dem Spulenwiderstand können die Impedanz \underline{Z} sowie ihr Betrag $|\underline{Z}|$ zur Auswertung der Messsignale herangezogen werden [23, 24].

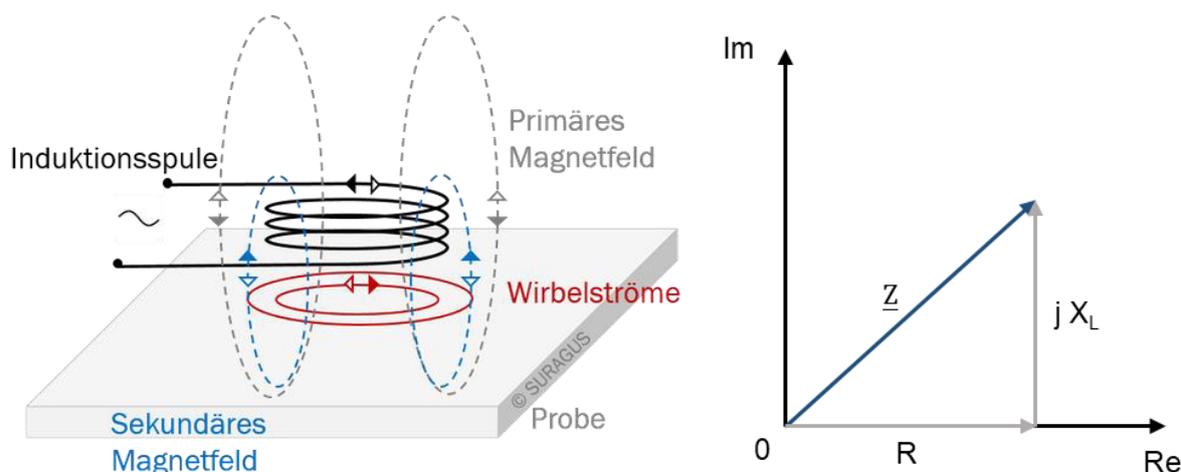


Abbildung 4: Linke Seite zeigt eine Schematische Darstellung einer Wirbelstrommessung [23]; rechte Seite zeigt die beispielhafte Darstellung eines Messsignals in der Impedanzebene

Die Eindringtiefe δ der Wirbelströme in das Werkstück ist abhängig von einer Vielzahl von Faktoren. Grundsätzlich gilt, dass eine höhere elektrische Leitfähigkeit σ und Permeabilität μ des zu prüfenden Werkstoffs sowie höhere Frequenz f der Erregerspule zu niedrigeren Eindringtiefen führen. Es gilt der Zusammenhang nach Formel (1) [23], wobei μ_0 die absolute Permeabilität und μ_r die werkstoffspezifische relative Permeabilität beschreibt.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}} \quad (1)$$

Zu den Vorteilen der Wirbelstromtechnik gehören die Möglichkeit einer kontaktlosen Prüfung sowie die Möglichkeit verhältnismäßig hohe Streckenmessgeschwindigkeit von bis zu 70 m/s zu erreichen [25]. Ferner zeigt sich eine Unempfindlichkeit gegenüber Schmierfetten, Verschmutzungen oder elektromagnetischer Felder [26]. Im Bereich der Prüfung von metallischen Werkstoffen kann sowohl die Belastung durch Kaltverformung, als auch eine Gefügeänderung durch Laserstahlanlassen, -härten und -dispargieren detektiert werden. Als Anwendungsbeispiel wird in [27–29] die Speicherung von Bauteilinformationen als Gefüge-Matrix gezeigt. In diesem Beispiel wurden unterschiedliche Gefüge durch das Laserstrahlhärten mit unterschiedlichen Laserleistungen in einer Matrix erstellt. Die Matrix kann anschließend von einer Arrayanordnung hochauflösender Wirbelstromsensoren detektiert und die gespeicherten Informationen gelesen werden.

Aufgabenstellung und Ziele

Ziel des Vorhabens ist eine neuartige Hubhöhenbestimmung für Lasttragemittel zu entwickeln und zu untersuchen, die unabhängig von Umwelteinflüssen und Verschleiß ist. Zu diesem Zweck sollen in Hubprofile Messmarkierungen, in Form von Linien, durch die Verfahren des Laserstrahldispersierens und Laserstrahllegierens eingebracht werden. Die Messmarkierungen beeinflussen die Permeabilität der Hubprofile lokal. Um die Änderungen der Permeabilität zur Positionsbestimmung heranzuziehen, sollen die Hubprofile beim Anheben der Lasttragemittel mit einem Wirbelstrommessgerät kontaktlos abgetastet werden. Die durch den Laserstrahlprozess modifizierten Markierungen beeinflussen die induzierten Wirbelströme im Hubprofil und können in dem Messsignal des Wirbelstromgeräts bestimmt werden. Öl und Schmutz zeigen auf das Messsignal keine Auswirkung, wodurch die Robustheit des Systems erhöht wird.

Angestrebt wird ein System mit absoluten Messmarkierungen, erreicht durch unterschiedliche Parametereinstellungen im Laserprozess. Durch die Variation von Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit und Pulverzufuhr soll hierzu entsprechend die Permeabilität des Grundwerkstoffs eingestellt werden. Die Auflösung soll unter einem Millimeter betragen, während die Messgeschwindigkeit bei mindestens 50 gemessenen Markierungen pro Sekunde liegen soll. Bei einer Auflösung von einem Millimeter entspricht dies einer Hubgeschwindigkeit von 3000 mm/min. Durch unterschiedliche eingestellte Markierungen können neben der Hubhöhe weitere Informationen im Hubprofil gespeichert werden. Diese Möglichkeit soll genutzt werden um, ein System zur Bauteilidentifikation und zum Plagiatschutz zu integrieren.

Zur Umsetzung des Vorhabens soll in einem ersten Schritt ein Wirbelstrommessgerät für die Detektionsaufgabe angepasst werden. Hierzu erfolgt eine Auslegung basierend auf den verwendeten Materialkombinationen. Es folgt die Untersuchung des Laserstrahldispersierens zur Beeinflussung der lokalen Permeabilität von Hubprofilwerkstoffen an Flachsubstraten. Die erzeugten Markierungen werden hinsichtlich ihrer Detektierbarkeit mit dem Wirbelstrommessgerät untersucht. Anschließend erfolgt ein Übertrag auf Hubprofile, wie sie an Flurförderfahrzeugen zum Einsatz kommen. Die Erkennungstechnik wird abschließend auf Ihre Einsatztauglichkeit unter realitätsnahen Bedingungen untersucht.

Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der jeweiligen Arbeitspakete (AP) des Projekts präsentiert und diskutiert. Es folgt ein Ausblick auf mögliche nächste Schritte im Anschluss an das abgeschlossene Projekt.

Arbeitspaket 1: Auslegung der Erkennungstechnik

Im ersten Schritt erfolgt die Auslegung der Erkennungstechnik. Hierzu werden erste Proben durch Laserstrahldispersieren gefertigt, mit denen ein Wirbelstrommessgerät hinsichtlich der Anforderungen des Projekts vom Sensorhersteller ausgelegt wird. Zuletzt erfolgt die Konstruktion und Anfertigung eines Versuchstandes, an dem die Proben aus AP2 untersucht werden können.

Auslegung und Spezifikationen des Wirbelstrommessgeräts

Das Wirbelstrommessgerät wird vom Hersteller Suragus GmbH für die in diesem Projekt angestrebte Messaufgabe ausgelegt. Zu diesem Zweck werden erste Proben mit dem Profilstahl 18MnNb6 und einem möglichen Zusatzmaterial Zirkoniumoxid benötigt. Zur Fertigung erster Lasermarkierungen wird ein Diodenlaser mit einer maximalen Laserleistung von 680 W bei den Wellenlängen 940 nm und 980 nm verwendet. Nach Fokussierung ergibt sich ein Laserstrahlfokus von 0,8 mm. Als Prozessparameter wurden nach Vorversuchen eine Laserleistung von 200 W, einem Vorschub von 50 mm/s und einer Pulverzufuhr von 0,4 g/min gewählt. Die entstandenen Lasermarkierungen sind in Abbildung 5 dargestellt.

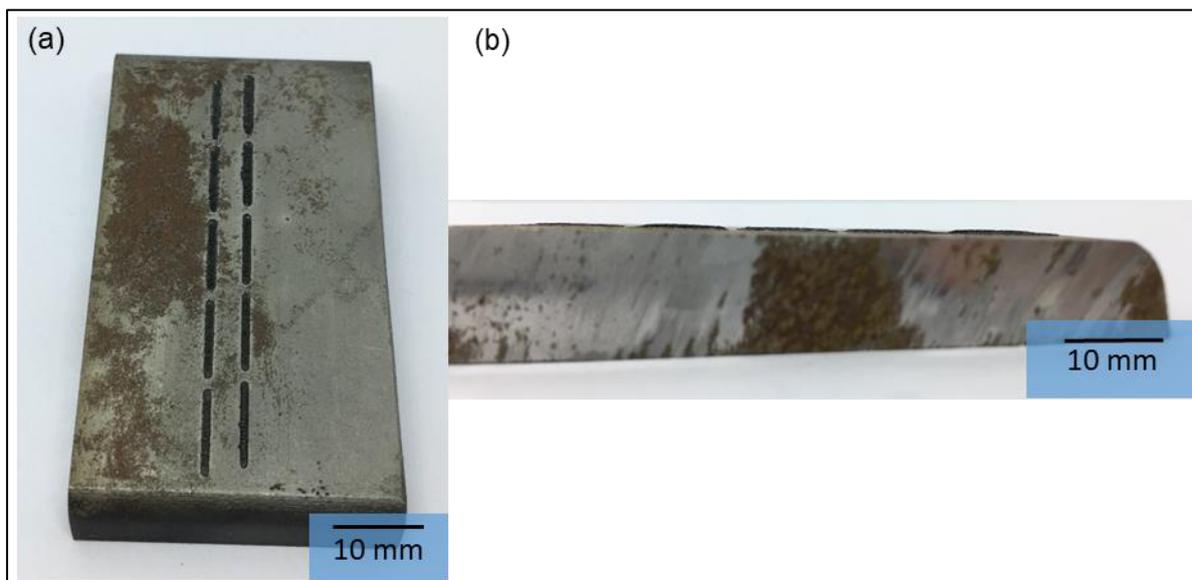


Abbildung 5: Lasermarkierungen auf einem 18MnNb6 Substrats zur Auslegung des Wirbelstrommessgeräts; (a) schräg von oben, (b) Seitenansicht

Die Lasermarkierungen treten aus der Substratoberfläche hervor und sind über einen Millimeter breit. Für die im Vorhaben anvisiert Positionsauflösung von unter einem Millimeter ist dies zu breit und die Markierungen werden in AP2 weiterentwickelt.

Seitens der Suragus GmbH werden drei unterschiedliche kontaktlose Wirbelstromsensortypen anhand der erstellten Proben ausgelegt, die im weiteren Verlauf des Projektes auf ihre Eignung für die Messaufgabe untersucht werden. Bei den drei Sensortypen handelt es sich um einen Absolutsensor, der richtungsunabhängig und mit einer relativ hohen Eindringtiefe absolute Messwerte erfasst und die beiden richtungsabhängigen Differential- und Halbtransmissionsensoren.

Der Differentialsensor weist ebenfalls eine hohe Eindringtiefe auf. Es wird allerdings kein absoluter Messwert durch das Wirbelstrommesssignal bestimmt, sondern der Messwert leitet sich aus der Änderung der Permeabilität ab. Der Halbtransmissionssensor ist eine Mischform aus Absolut- und Differentialsensor. Er besitzt eine vergleichsweise geringe Eindringtiefe und hohe räumliche Auflösung. Allen Sensortypen ist gemein, dass seitens des Herstellers eine Anregungsfrequenz von 10 kHz bis 100 MHz und eine Messfrequenz von 1 Hz bis 50 kHz, unter Berücksichtigung der zu untersuchenden Messaufgabe, voreingestellt werden kann. Die mitgelieferte Software EddyCus® TF control bietet die Möglichkeit der Sensorkalibrierung und Durchführung einzelner Messungen. Die Rohdaten der Messergebnisse können als mit einem Komma getrennte Werte exportiert werden. Zu den standardmäßig exportierten Werten einer Einzelmessung gehören die vergangene Zeit nach Start einer Messaufnahme, die Uhrzeit des jeweiligen Messwertes sowie die Magnitude, die sich aus dem Betrag der Impedanz ableitet. Zusätzlich können Real- und Imaginärteil der Impedanz ausgegeben werden.

Aufbau eines Messstands zur Wirbelstrommessung von Hubprofilen

Damit in AP3 die eingebrachten Lasermarkierungen hinsichtlich ihrer Detektier- und Differenzierbarkeit mit den Wirbelstromsensoren untersucht werden können, wird ein geeigneter Messstand benötigt. Hierzu wird der eingesetzte Sensor höhenverstellbar über einer Linearachse gelagert. Mit Hilfe der Linearachse wird die zu untersuchende Probe unter dem Sensor bewegt. Die Linearachse wird durch einen Gleichstrommotor betrieben. Die Ansteuerung des Motors wird durch einen Mikrocontroller, der mit einem an den Motor angeschlossenen Encoder die aktuelle Position und Umdrehungsgeschwindigkeit des Motors bestimmt, realisiert. Die Probe mit den Lasermarkierungen kann durch einen Präzisionskipptisch horizontal ausgerichtet werden, um den Abstand zwischen Sensor und Probe während der Messung konstant zu halten. Der Aufbau ist in Abbildung 6 dargestellt. Der Sensor ist an der Wirbelstromkontrolleinheit angeschlossen, die das Messsignal über eine Ethernetschnittstelle an den Industrie PC mit der Software EddyCus® TF control weiterleitet.

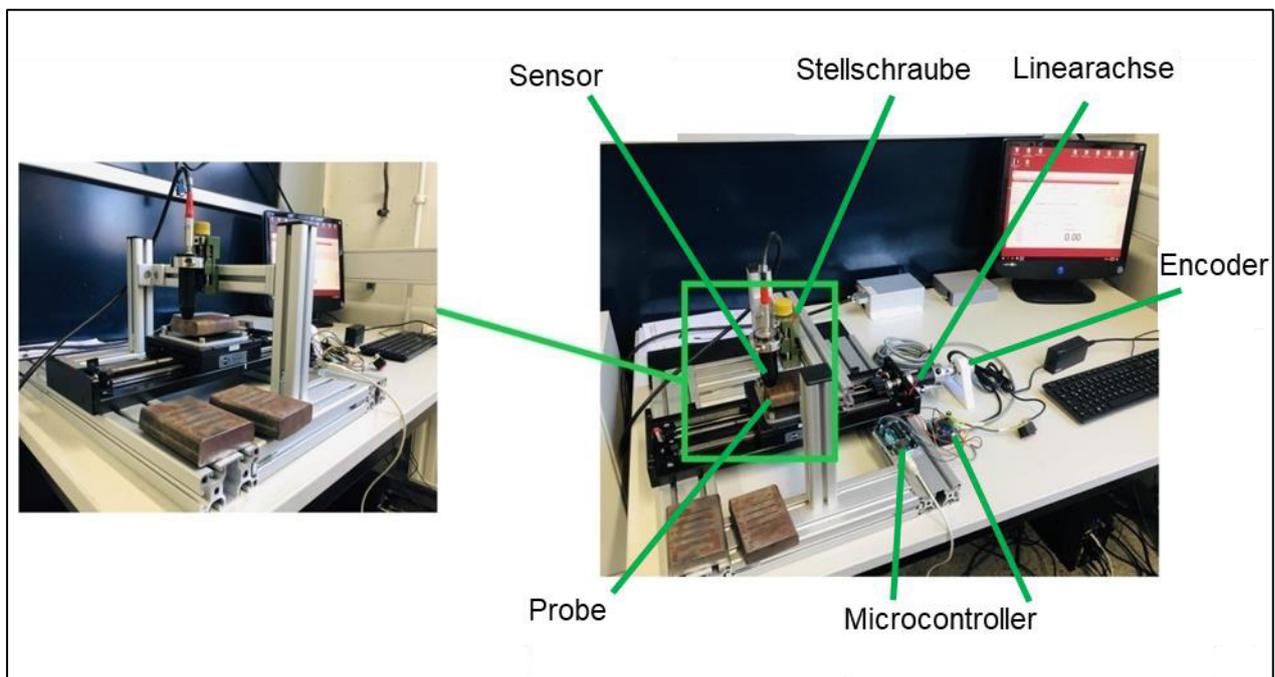


Abbildung 6: Aufbau des Labormessstandes zur Vermessung von Lasermarkierungen auf Flachsubstraten

Die Messung einer Versuchsreihe verläuft nach einem festen Muster:

1. Kalibrierung des Sensors auf der Probe an einer Position ohne Markierung (vgl. Abbildung 7 (b))
2. Start der Messwertaufnahme mit parallelem Start der Videoaufnahme (vgl. Abbildung 7) und starten der Linearachse
3. Beendigung der Messfahrt auf der gegenüberliegenden Seite der Probe, durch Stoppen der Linearachse, Messwert- und Videoaufnahme
4. Exportieren der aufgenommenen Messwerte als kommagetrennte Werte

Die aufgenommenen Messwerte können anschließend mit einem Python-Skript unter Verwendung der Matplotlib [30] visuell dargestellt werden. Ein Beispiel einer solchen Messwertdarstellung ist in Abbildung 7 (a) wiedergegeben. Die Weiterverarbeitung der kommagetrennten Messwerte stellt die Basis für die Analyse der Detektierbarkeit in AP3 dar.

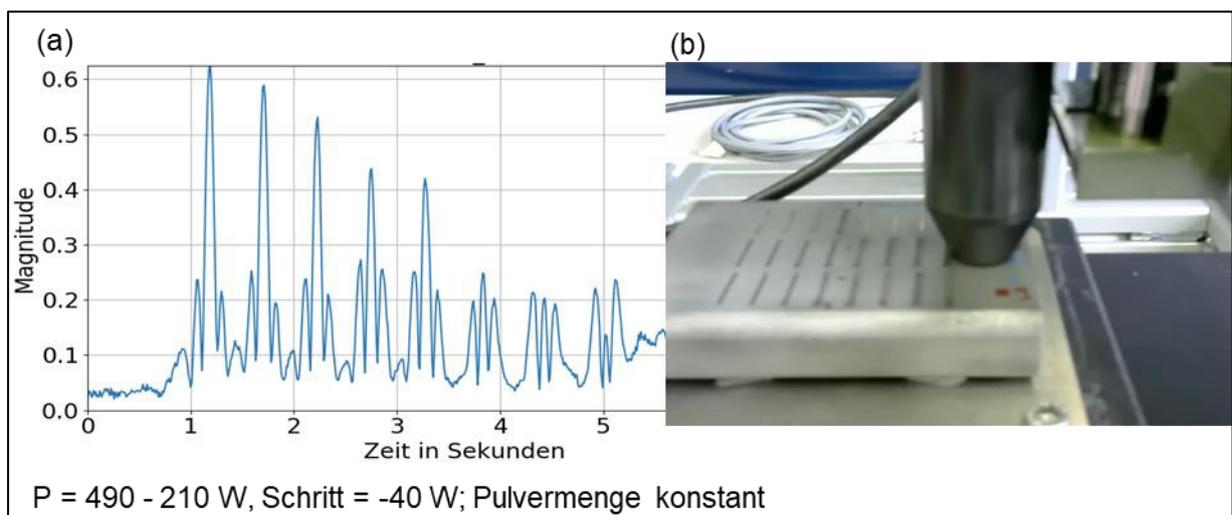


Abbildung 7: Linke Seite zeigt die Darstellung eines typischen Messsignals einer Testreihe; rechte Seite zeigt ein Standbild eines synchron aufgenommenen Videos der Messung

Als Ergebnis des Arbeitspakets 1 steht ein Wirbelstrommessstand, mit drei unterschiedlichen Sensortypen und der Möglichkeit Proben unter einem der Sensoren in einem definierten Abstand und vorgegebener Geschwindigkeit zu verfahren, zur Verfügung.

Arbeitspaket 2: Aufbringen von detektierbaren Schichten

Im zweiten Arbeitspaket des Vorhabens wird der Prozess des Laserstrahldispersierens betrachtet. Es wird vorab auf die Herstellung des Ausgangsmaterials, das verwendete Zusatzmaterial und die notwendigen Modifikationen an der Laserbearbeitungsanlage eingegangen. Abschließend werden die eingebrachten Lasermarkierungen hinsichtlich der Topologie und Spurbreite bewertet.

Herstellung von Flachsubstraten aus Profilstahl

Der Laserstrahlprozess wird zunächst auf Flachsubstraten untersucht, da sich diese mit geringem Aufwand metallographisch präparieren und charakterisieren lassen. Aufgrund mangelnder Verfügbarkeit von Blechen aus 18MnNb6 Stahl werden von der Hoesch Schwerter Profile GmbH Hubprofilstücke mit einer Länge von 100 mm zur Verfügung gestellt. Von den Hubprofilstücken

werden die Randflächen, wie in Abbildung 8 dargestellt, mit einer Säge abgetrennt. Die abgetrennten Randstücke der Hubprofile dienen in den folgenden Untersuchungen als Flachssubstrate.

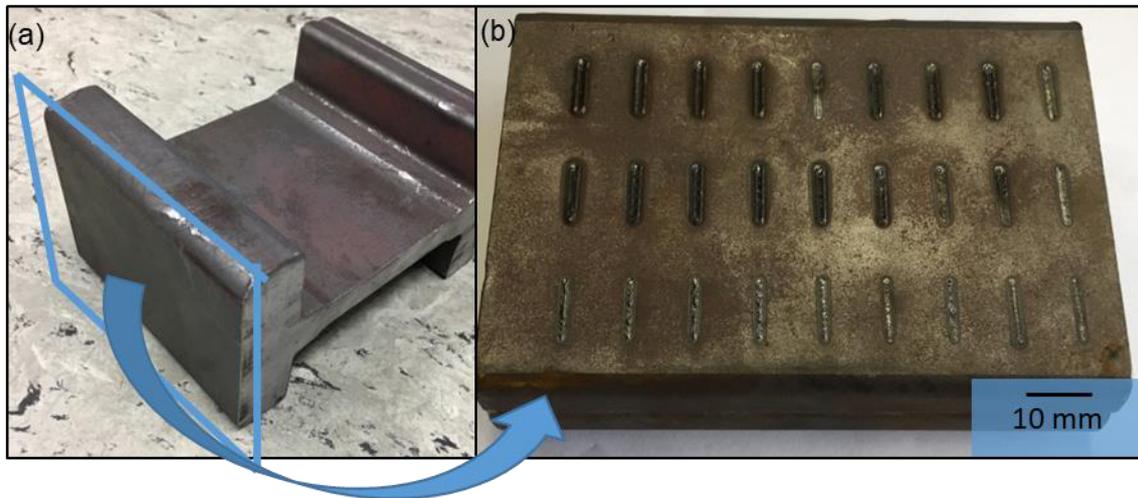


Abbildung 8: (a) Stück eines Hubprofils; (b) Abschnitt einer Seitenfläche des Hubprofils mit laserstrahl-dispergierten Markierungen

Modifizierungen der Laserbearbeitungsanlage

Nach den ersten Vorversuchen zum Laserstrahl-dispergieren in AP1 ist ersichtlich, dass die eingebrachten Lasermarkierungen eine deutliche Erhöhung und Breite von über einem Millimeter aufweisen. Ferner kann der 18MnNb6 Stahl nur in Kombination mit einer induktiven Vorwärmung aufgeschmolzen werden. Dies wird auf die begrenzte Laserleistung P von 680 W bei einem Fokussdurchmesser d von 0,8 mm zurückgeführt. Die resultierende maximale Intensität I , berechnet nach Formel (2) von 1.35 W/mm^2 reicht demnach nicht aus, um das Substratmaterial zum Schmelzpunkt zu erhitzen und anschließend in den schmelzflüssigen Zustand zu überführen.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P \cdot 4}{\pi \cdot d^2} \quad (2)$$

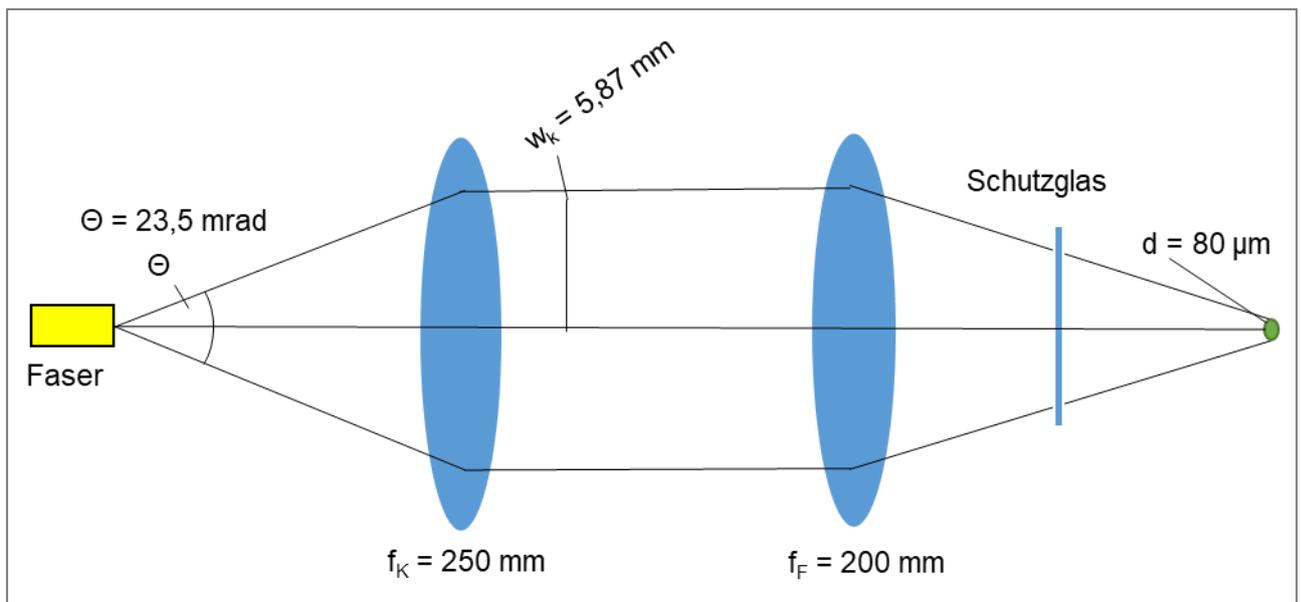


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Strahlengangs im Bearbeitungskopf zum Laserstrahl-dispergieren

Aus diesem Grund wird eine neue Laserstrahlquelle an der Laserbearbeitungsanlage installiert. Mit dem Faserlaser nLIGHT alta steht eine Laserstrahlquelle mit 3 kW Laserleistung zur Verfügung. Zusätzlich wird ein neuer Bearbeitungskopf aufgebaut, welcher mit einer Kollimationseinheit mit 250 mm Brennweite und einer Fokussierlinse mit 200 mm Brennweite ausgestattet ist. Der Strahlengang ist schematisch in Abbildung 9 dargestellt, wobei w_k für den parallelen Laserstrahlradius nach Kollimierung steht. f_k und f_F beschreiben jeweils die Brennweite von Kollimierlinse bzw. Fokussierlinse. Der Faserlaser verfügt über einen Divergenzwinkel Θ am Faserausgang von 23,5 mrad und ein Strahlparameterprodukt SPP von 1,18 mm mrad. Es ergibt sich nach Formel (3) ein Fokusbereich d von ca. 80 μm . Es wird somit ein um Faktor zehn verkleinerter Fokusbereich als mit dem zuvor verwendeten Diodenlaser erreicht. Nach Formel (2) ergibt sich eine um den Faktor 100 gesteigerte Intensität bei gleicher Laserleistung.

$$d = \frac{2 \cdot f_F}{w_k} \cdot SPP \quad (3)$$

Der Pulverfokus des Laserbearbeitungskopfes kann nicht variiert werden und wird, wie in Abbildung 10, durch die Bestimmung des kleinsten Pulverstromdurchmesser definiert. In diesem Fall liegt er bei ca. 8,25 mm ausgehend von der letzten Fläche des Bearbeitungskopfes. Auf diesen Abstand wird auch der Laserfokus justiert. In diesem Projektbericht wird als Einheit für den Pulverstrom die Drehzahl des Tellers im Pulverförderer (TDZ) verwendet. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden am Beispiel von Zirkoniumoxid Messungen zur Bestimmung des Äquivalents in g/min durchgeführt. Es ergibt sich nach Regression ein linearer Zusammenhang nach Formel (4) mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,97. Der bestimmte Wert in g/min kann jedoch nicht als Maß für die tatsächliche Pulverzufuhr in die Schmelze herangezogen werden, da die Schmelze schmaler ist als der Pulverfokus mit ca. 3,7 mm (vgl. Abbildung 10).

$$\dot{m} \left[\frac{\text{g}}{\text{min}} \right] = 0,19 \cdot \frac{\text{g}}{\text{TDZ}} - 0,17 \frac{\text{g}}{\text{min}} \quad (4)$$

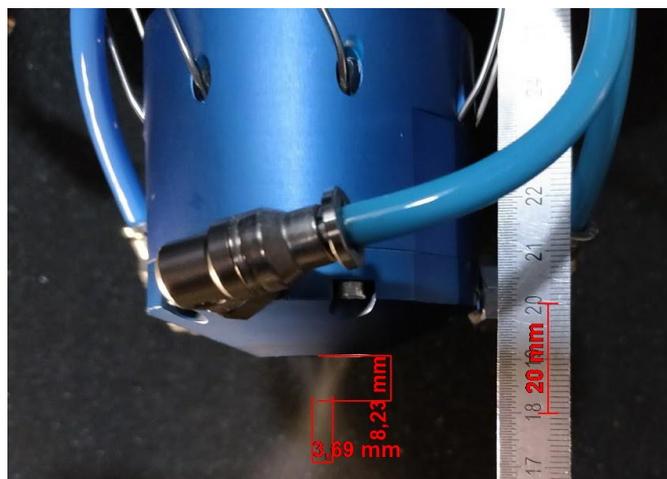


Abbildung 10: Bestimmung der Pulverfokusebene am Austritt aus dem Bearbeitungskopf

Verfahrensbedingt sind die abgesägten Randstücke der Hubprofile nicht vollständig planparallel. Aus diesem Grund wird am Bearbeitungskopf zusätzlich ein Höhenabstandssensor, in Form eines Linienlasers (Micro-Epsilon scanCONTROL LLT 3000BL), angebracht, um Höhenunterschiede vor dem Markierungsprozess zu detektieren und durch einen Z-Achsenausgleich zu kompensieren.

Arbeitspaket 2.1 Untersuchungen zum Laserstrahldispersieren

Nach den Umbaumaßnahmen an der Laserbearbeitungsanlage wird der Prozess des Laserstrahldispersierens untersucht. Zu diesem Zweck werden zwei Zusatzmaterialien, Zirkoniumoxid und Wolframschmelzcarbid betrachtet. Der Zusatzwerkstoff liegt in Pulverform vor und wird durch einen Pulverförderer (PF 2/2, GTV Verschleißschutz GmbH) dosiert und mittels eines Argongasstroms dem Prozess zugeführt. Die Maßeinheit für die Zufuhr des Pulverwerkstoffs wird in der Drehtellerdrehzahl (TDZ) des Pulverförderers angegeben. Die Zufuhr erfolgt koaxial zum Laserstrahl. Vor den Versuchen wird der Hubprofilabschnitt durch Sandstrahlen von Oxidresten und Schmiermitteln befreit und in der Fokusebene des Lasers positioniert. Die Probe befindet sich in einer Schutzgaskammer, die mit Argon gespült wird, um den Restsauerstoffgehalt auf unter 1 % zu reduzieren und Oxidationen der Schmelze zu reduzieren. Die Anordnung der Versuche findet nach dem Muster von Abbildung 11 statt. Auf einer Probe werden bis zu 24 Lasermarkierungen mit unterschiedlichen Prozessparametern in bis zu drei Reihen eingebracht. Variiert werden neben dem Zusatzwerkstoff die Laserleistung, die Vorschubgeschwindigkeit und der Pulverstrom.

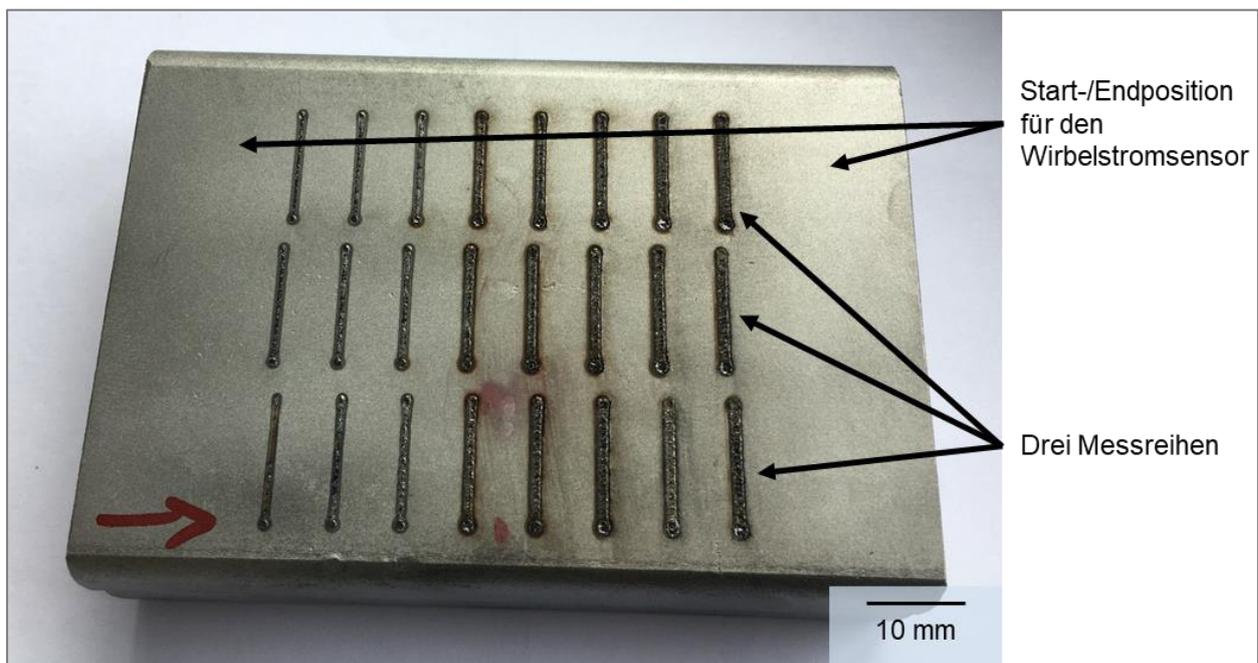


Abbildung 11: Versuchsmatrix auf einem Hubprofilrandstück; Anstieg der Laserleistung von links nach rechts; Anstieg der Pulverzufuhr von oben nach unten

Die Auswertung des Einflusses der Prozessparameter auf das Wirbelstrommesssignal erfolgt in AP3. In diesem AP wird der Einfluss der Prozessparameter auf die Breite der Markierungen und die Oberflächentopologie charakterisiert. Die Untersuchungen werden mit dem konfokalen Laserscanning-Mikroskop Keyence VK-X 1000 durchgeführt. Der Einfluss des Laserstrahlprozesses auf die Härte des Grundmaterials wird anhand von Schliiffbildern im Verfahren nach Vickers HV0,02 ausgewertet. Zu Vergleichszwecken werden zusätzlich zu den Lasermarkierungen mit unterschiedlich starker Zusatzmaterialzufuhr weitere Proben ohne die Zufuhr von Zusatzmaterial

gefertigt. Das Grundmaterial wird in diesem Fall nur umgeschmolzen oder gehärtet. Ein Beispiel einer solchen Markierung ist in Abbildung 12 dargestellt. Im Vergleich zum umgebenden Grundmaterial weist die durch den Laserstrahl erzeugte Spur eine glatte Oberflächenstruktur auf. Die Versuche ohne Zusatzmaterial wurden für die Laserleistungen zwischen 210 W und 490 W in 40 W Schritten durchgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde auf 1000 mm/min festgelegt.

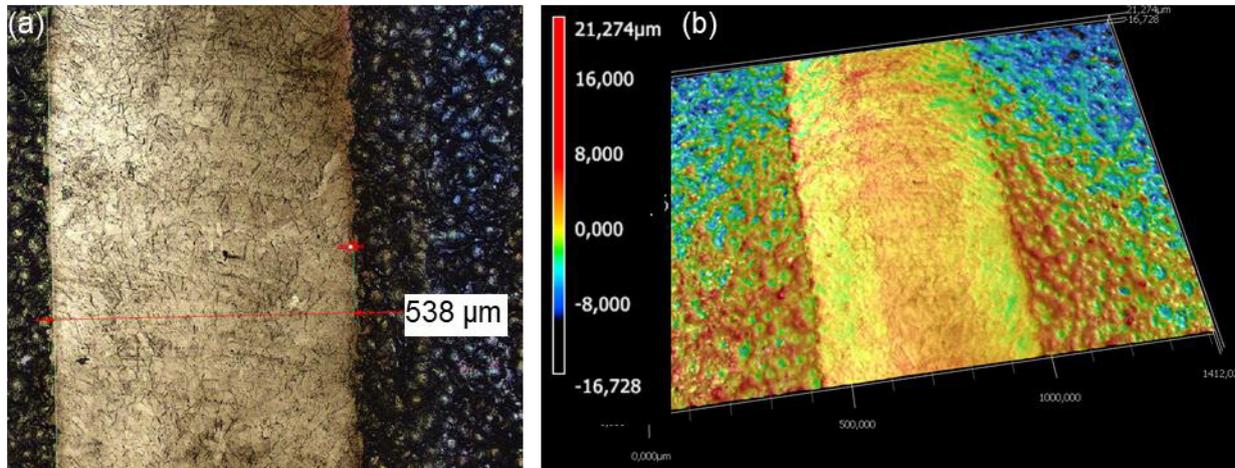


Abbildung 12: Bestimmung der Breite (a) und Oberflächentopographie (b) einer Lasermarkierung ohne Zusatzmaterial; verwendete Prozessparameter: P = 290 W, v = 1000 mm/min

Laserstrahldispersieren mit Zirkoniumoxid

Im ersten Schritt erfolgen die Versuche mit Zirkoniumoxid. Hierzu wird ein kugelförmiges Yttriumstabilisiertes 94,4 prozentiges Zirkoniumoxid (Firma Mühlmeier) verwendet, der Partikeldurchmesser beträgt 80-120 µm. Zur Bestimmung der Oberflächentopologie werden folgende Prozessparameterkombinationen in einem vollfaktoriellen Versuchsplan untersucht:

- Laserleistung P: 210 W – 490 W in 40 W Schritten
- Pulverstrom \dot{m} : 7 TDZ – 17 TDZ in 2 TDZ Schritten
- Vorschubgeschwindigkeit v: 1000 mm/min

Für die Versuche mit Zusatzmaterial ist ein Beispiel mit der Parameterkombination 290 W Laserleistung, 17 TDZ Pulverstrom und 1000 mm/min Vorschubgeschwindigkeit in Abbildung 13 gegeben. In der Schmelzspur sind Zirkoniumoxidpartikel erkennbar. Einige dieser Partikel sind geschmolzen und haben partielle Schichten von bis zu 230 µm Diagonale gebildet, die sich auf der Oberfläche der Lasermarkierung abgelagert haben. Das Höhenprofil wird durch die abgelagerten Zirkoniumoxidschichten um bis zu ca. 100 µm erhöht. Zum Vergleich ist in Abbildung 14 eine Topographiemessung einer Lasermarkierung mit 490 W Laserleistung und ansonsten identischen Prozessparametern dargestellt. Die Schmelzspur, 1,2 mm breit, zeigt um ca. 50 µm erhöhte Ränder mit eingelagerten Zirkoniumoxidpartikeln. Dieses Verhalten zeigt sich bei allen Markierungen ab ca. 410 W Laserleistung bei 1000 mm/min Vorschubgeschwindigkeit.

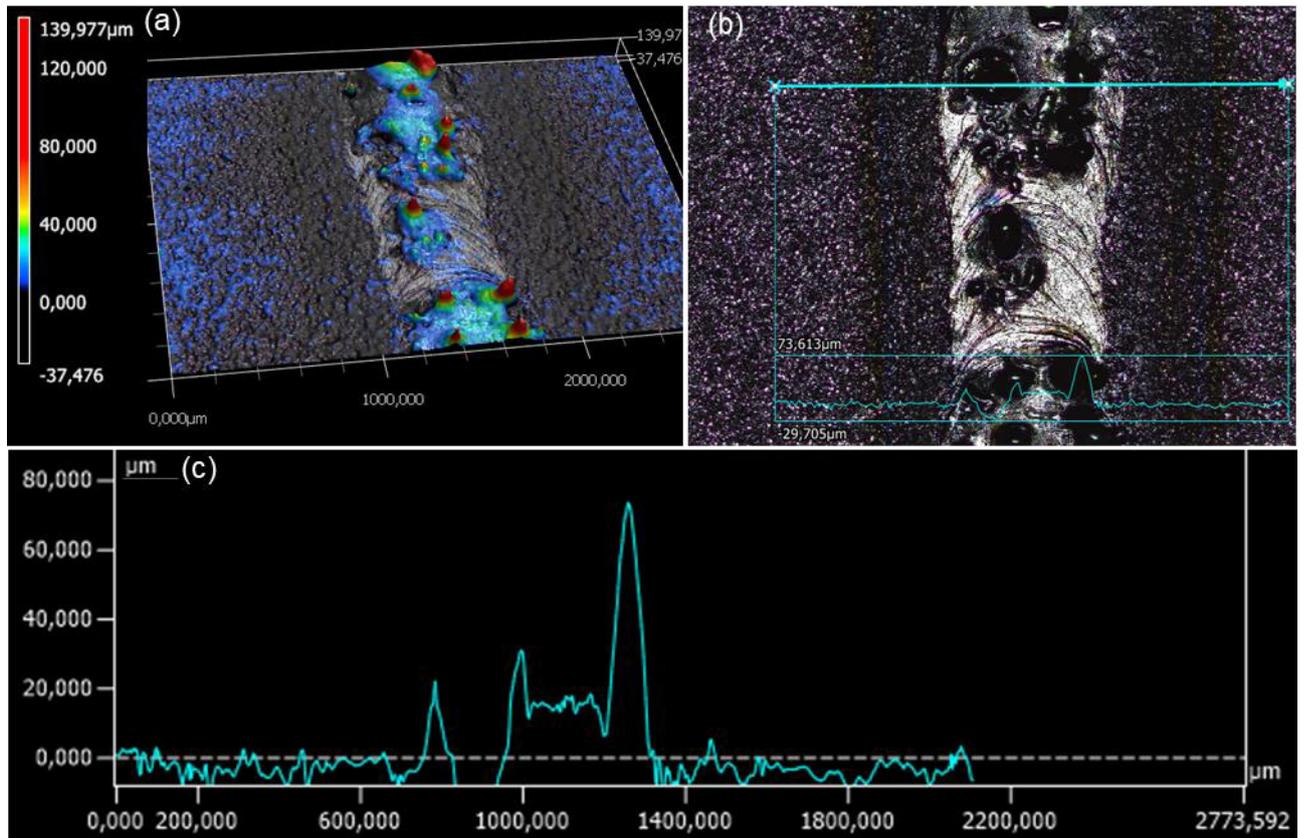


Abbildung 13: (a) 3D-Höhenbild einer mit ZrO_2 dispergierten Lasermarkierung; (b) Draufsicht mit Schnittebene für Topographiemessung; (c) Topographiemessung über der Lasermarkierung; verwendete Prozessparameter: $P = 290 \text{ W}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$, $TDZ = 17$

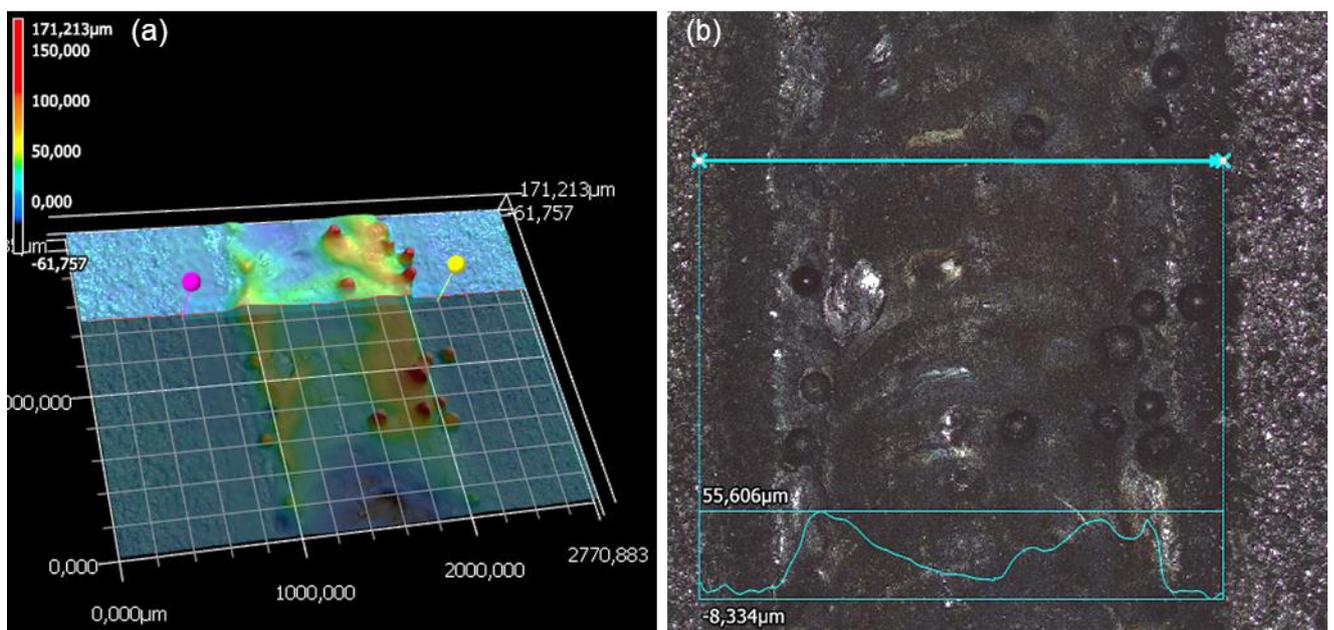


Abbildung 14: Laserstrahldispergierte Markierung mit den Prozessparametern $P = 490 \text{ W}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$ und $TDZ = 17$; an den Seiten des Schmelzbades prägt sich eine Erhöhung von ca. $50 \mu\text{m}$ aus; (a) 3D-Ansicht mit Schnittebene; (b) Draufsicht mit Schnittebene

Zur Bestimmung der Breite der einzelnen Lasermarkierungen, wurden neben den Proben zur Untersuchung der Oberflächentopologie weitere Proben gefertigt. Es wurden zusätzlich alle Kombinationen der folgenden Prozessparameter betrachtet:

- Laserleistung P: 190 W – 330 W in 20 W Schritten
- Pulverstrom \dot{m} : 10 TDZ – 20 TDZ in 5 TDZ Schritten
- Vorschubgeschwindigkeit v: 1000 mm/min

Die Breiten der Lasermarkierungen wurden wie in Abbildung 12 (a) bestimmt. Zur Wiederholbarkeit der Messungen wurde die automatische Kantenerfassungsfunktion der MultiFileAnalyzer Software (Keyence GmbH) verwendet. Die ermittelten Spurbreiten wurden unter zur Hilfenahme der Statistiksoftware JMP (SAS Institute) ausgewertet. In Tabelle 1 sind die Signifikanzen der als signifikant (p -Wert $< 0,01$) auf die Spurbreite (S_b) eingestuften Prozessparameter dargestellt. Betrachtet wurden die Laserleistung die Menge der Pulverzufuhr und Wechselwirkungen der beiden Größen bis zur 2. Ordnung. Es zeigt sich, dass für die Laserleistung sowohl ein quadratischer, als auch linearer Zusammenhang vorliegt, während die zugeführte Pulvermenge linear in die Spurbreite eingeht. Die dargestellten Werte sind nur im untersuchten Prozessparameterfeld gültig. Durch die Messwerte wird eine Regression nach der Methode der kleinsten Quadrate angenähert. Die Regressionsgleichung für die als signifikant eingestuften Prozessparameter ist in (5) wiedergegeben und in Abbildung 15 (a) graphisch dargestellt.

Tabelle 1: Signifikanz der Prozessparameter auf die Spurbreite (Zirkoniumoxid)

Parameter	Log ₁₀ (p)	P-Wert
Laserleistung in W	41,165	0,00000
Pulvermassenstrom in TDZ	3,495	0,00032
Laserleistung in W* Laserleistung in W	3,244	0,00057

$$S_b(P, TDZ) = -4,781 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 + 6,497 \cdot 10^{-3} \cdot P + 9,222 \cdot 10^{-3} \cdot TDZ - 0,908 \quad (5)$$

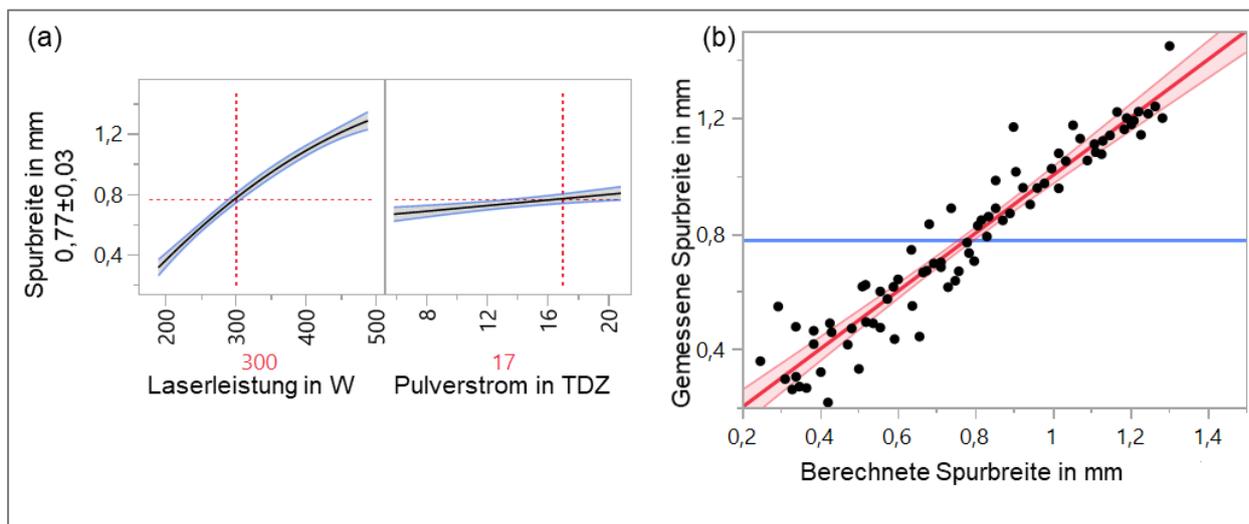


Abbildung 15: (a) Zweidimensionale Darstellung der Regressionsgleichung aus Formel 4 mit berechneter Spurbreite für die Prozessparameterkombination P = 300 W und $\dot{m} = 17$ TDZ; (b) Vergleich der gemessenen Spurbreite mit der berechneten Spurbreite aus Formel 4

Zur Beurteilung der Regressionsqualität zeigt Abbildung 15 (b) den Graphen der gemessenen Spurbreite über der berechneten Spurbreite. Es ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,92. Die Regression ist demnach geeignet die Realität mit hoher Genauigkeit im untersuchten Prozessparameterbereich zu modellieren. Eine Spurbreite von mehr als 0,8 mm ist für die spätere Anwendung als Messmarkierung mit einer Auflösung von <1 mm als nicht geeignet einzustufen. Im Graphen von Abbildung 15 (a) ist ersichtlich, dass diese Voraussetzung für Laserleistungen von unter 300 W gegeben ist. Die Zufuhr des Pulverwerkstoffs hat nur einen geringfügigen linearen Einfluss auf die Spurbreite.

Zur Beurteilung der Lasermarkierung wurden Querschliffe angefertigt. Hierzu wurden die Proben zunächst durch Trennschleifen zerteilt und in Epoxidharz eingebettet. Der Schliff und die Politur erfolgten am Schleifautomaten Tegramin 20 (Struers GmbH). Die Schliffbilder in Abbildung 16 zeigen beispielhaft die Verteilung des Zusatzwerkstoffs und die Wärmeeinflusszone des Laserstrahlprozesses. Es ist ersichtlich, dass das Zirkoniumoxid aufgeschmolzen wurde und sich auf der Oberfläche abgelagert hat. Dabei wurde eine im Laserstahlprozess erzeugte Fuge mit Zirkoniumoxid gefüllt, bzw. die Schmelze durch Zirkoniumoxid verdrängt. Wie die Messungen mittels Energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) in Tabelle 2 zeigen, befindet sich an der Position b2, der Wärmeeinflusszone, (vgl. Abbildung 16 (b)) kein Zirkonium. An der untersuchten Pore bei Position b4 befinden sich lediglich 0,4 % Zirkonium, was vermutlich auf Partikel aus dem Schleifprozess oder die Messunsicherheit der EDX Messungen zurückzuführen ist. Dies lässt den Rückschluss zu, dass kein Zirkoniumoxid vollständig in die Schmelze eingebettet wurde und lediglich die Oberfläche bearbeitet wurde. Während die EDX Analysen an den mit „b“ markierten Positionen durchgeführt wurden, wurden an den mit „a“ markierten Positionen in Abbildung 16 (a) Härtemessungen nach Vickers durchgeführt. Die Schicht aus Zirkoniumoxid (Position a1) weist eine Härte von 1323 ± 27 HV_{0,02} auf. Die Wärmeeinflusszone (a2) ist mit 283 ± 26 HV_{0,02} gegenüber dem Grundmaterial (a3) mit 144 ± 13 HV_{0,02} um ca. Faktor zwei aufgehärtet.

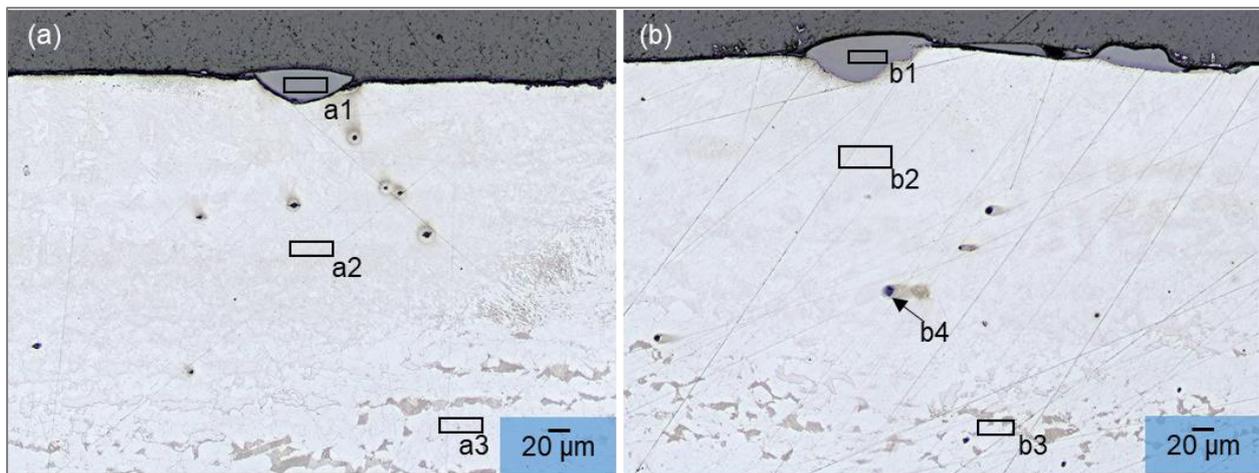


Abbildung 16: Schliffbilder Zirkoniumoxid dispergierter Markierungen; Positionen der Härtemessungen (a) (Prozessparameter: $P = 250$ W, $v = 1000$ mm/min, $\dot{m} = 7$ TDZ); Positionen der EDX Messungen (b) (Prozessparameter: $P = 250$ W, $v = 1000$ mm/min, $\dot{m} = 10$ TDZ)

Tabelle 2: Elementverteilung der EDX Messungen an den Positionen in Abbildung 16 (b)

Elementanteil in m%	b1	b2	b3	b4
Eisen	-	88,7	90,0	64,0
Mangan	-	1,5	1,6	1,4
Niob	-	1,2	1,6	1,4
Zirkonium	56,9	0,4	-	-
Sauerstoff	28,2	0,9	0,7	20,7
Yttrium	4,8	-	-	-
Silizium	0,8	0,8	0,9	0,7
Kohlenstoff	9,3	6,4	5,2	11,3

Laserstrahldispersieren mit Wolframschmelzcarbid

Als zweites Zusatzmaterial wurde Wolframschmelzcarbid untersucht. Die Versuche fanden aufgrund der mit Zirkoniumoxid gewonnenen Erkenntnisse zur Spurbreite mit einem kleineren Versuchsumfang statt. Untersucht wurden die folgenden Prozessparameter in allen Kombinationen:

- Laserleistung P: 190 W – 330 W in 20 W Schritten
- Pulverstrom \dot{m} : 10 TDZ – 20 TDZ in 5 TDZ Schritten
- Vorschubgeschwindigkeit v: 1000 mm/min

Im Vergleich zu Zirkoniumoxid befinden sich kleinere Partikel in der Schmelze. Auch beim Wolframschmelzcarbid lagert sich eine Vielzahl der Partikel an der Oberfläche der Lasermarkierung ab, wie in Abbildung 17 (a) abgebildet. Aufgrund des kleineren Partikeldurchmessers liegen die resultierenden Erhöhungen jedoch bei ca. 50 μm (vgl. Abbildung 17 (b)) im Gegensatz zu 100 μm beim verwendeten Zirkoniumoxid.

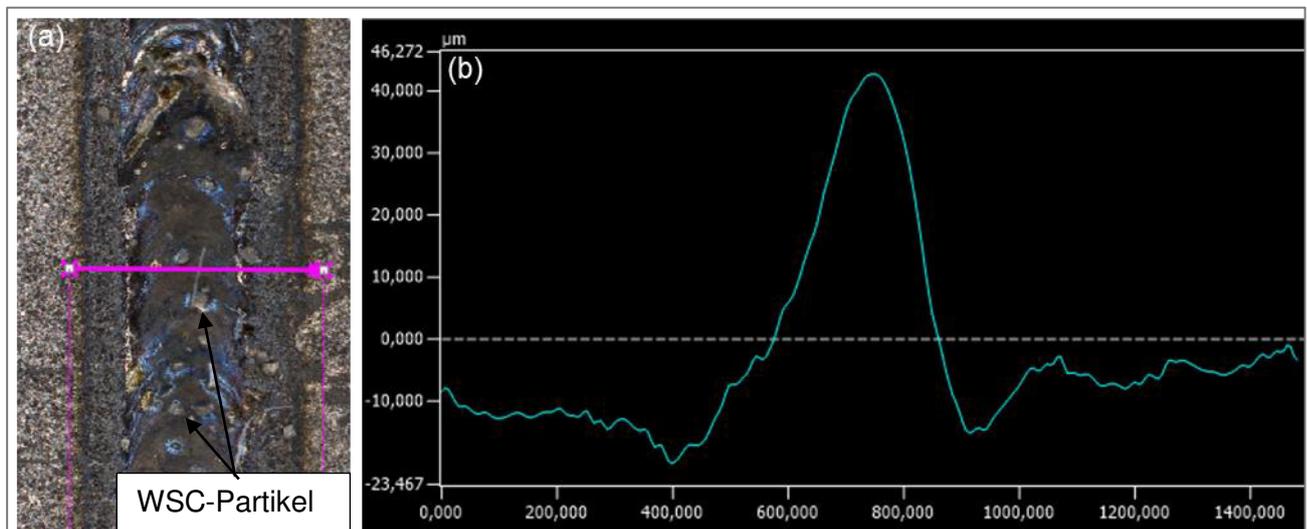


Abbildung 17: (a) Mit Wolframschmelzcarbid dispersierte Lasermarkierung mit Position der Schnittebene zur Bestimmung des Höhenprofils (b)

Die Spurbreite kann im untersuchten Prozessparameterbereich nur bedingt beeinflusst werden. Als größter Einflussfaktor zeigt sich der Pulverstrom. Mit zunehmender Pulverzufuhr steigt auch die Spurbreite. Der Einfluss der Laserleistung ist im Vergleich zu den Versuchen mit Zirkoniumoxid gering und mit größerer Streuung von ca. 0,07 mm, im Vergleich zu 0,03 mm bei Zir-

koniumoxid, behaftet. Da die Ergebnisse aus AP2 Vorteile für die Verwendung von Zirkoniumoxid als Zusatzmaterial zeigen, wird der Fokus in AP3 ebenfalls auf die Untersuchungen mit Zirkoniumoxid gelegt.

Als Ergebnis des Arbeitspaket 2 wird festgehalten, dass sich die Breite der eingebrachten Lasermarkierungen mit dem Zusatzwerkstoff Zirkoniumoxid einstellen lässt. Bei den Untersuchungen mit Wolframschmelzcarbid ergibt sich eine größere Streuung der resultierenden Spurbreite und der Einfluss der Prozessparameter fällt geringer aus. Der Zusammenhang zwischen Breite der Lasermarkierungen und Laserleistung sowie Pulverstrom ist bekannt und durch eine Regressionsgleichung beschrieben. Das Höhenprofil der mit Zirkoniumoxid dispergierten Lasermarkierungen wird partiell um bis zu 100 µm erhöht.

Arbeitspaket 2.2 Untersuchungen zum Laserstrahllegieren

Durch Laserstrahllegieren eingebrachte Lasermarkierungen sollten im Wirbelstrommesssignal über eine Steigerung der Permeabilität detektierbar werden. Da der Grundwerkstoff mit Eisen als Hauptbestandteil jedoch bereits eine sehr hohe Permeabilität aufweist, ist der Ansatz des Laserstrahllegierens wenig vielversprechend. Das Laserstrahllegieren wurde daher, nach Rücksprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss, zugunsten einer tieferen Betrachtung des Laserstrahl-dispergierens, in diesem Vorhaben nicht betrachtet.

Arbeitspaket 3: Analyse der Detektierbarkeit

Im dritten Arbeitspaket werden die unterschiedlichen Wirbelstromsensortypen hinsichtlich ihrer Eignung für die Messaufgabe beurteilt. Mit dem geeignetsten Sensortyp werden anschließend die Untersuchungen der durch Laserstrahldispersieren eingebrachten Lasermarkierungen durchgeführt. Die Lasermarkierungen werden hinsichtlich ihres Einflusses auf das Wirbelstrommesssignal bewertet und die Möglichkeit der Differenzierung der Markierungen beurteilt. Abschließend werden die Grenzen der Detektierbarkeit und mögliche Fehlerquellen bei der Verwendung des Wirbelstrommessverfahrens aufgezeigt.

Bewertung der Wirbelstromsensoren

Wie in AP1 beschrieben wurden drei unterschiedliche Arten von Wirbelstromsensoren beschafft. Im ersten Schritt wird die Eignung der jeweiligen Sensortypen anhand einer Beispielprobe bestimmt. Die Beispielprobe verfügt über fünf unterschiedlich eingebrachte Lasermarkierungen mit Zirkoniumoxid als Zusatzmaterial in einem Abstand von 12,5 mm und ist in Abbildung 18 dargestellt. Die jeweiligen Laserprozessparameter sind in Tabelle 3 aufgelistet. Die Probe wurde mit dem Messstand aus AP1 untersucht. Die Fahrgeschwindigkeit relativ zum Sensorkopf betrug 6,5 mm/s und der Abstand vom Sensor zur Probe 0,5 mm.

Tabelle 3: Laserprozessparameter der fünf Markierungen auf der Probe aus Abbildung 18

Lasermarkierung	1	2	3	4	5
Laserleistung in W	180	360	360	540	720
Vorschub in mm/min	120	120	120	180	240
Pulverstrom in g/min	0,58	0,2	0,58	0,95	0,95



Abbildung 18: Beispielprobe mit fünf unterschiedlichen Lasermarkierungen zur Bestimmung der Eignung der unterschiedlichen Wirbelstromsensortypen; als Zusatzmaterial wurde Zirkoniumoxid verwendet

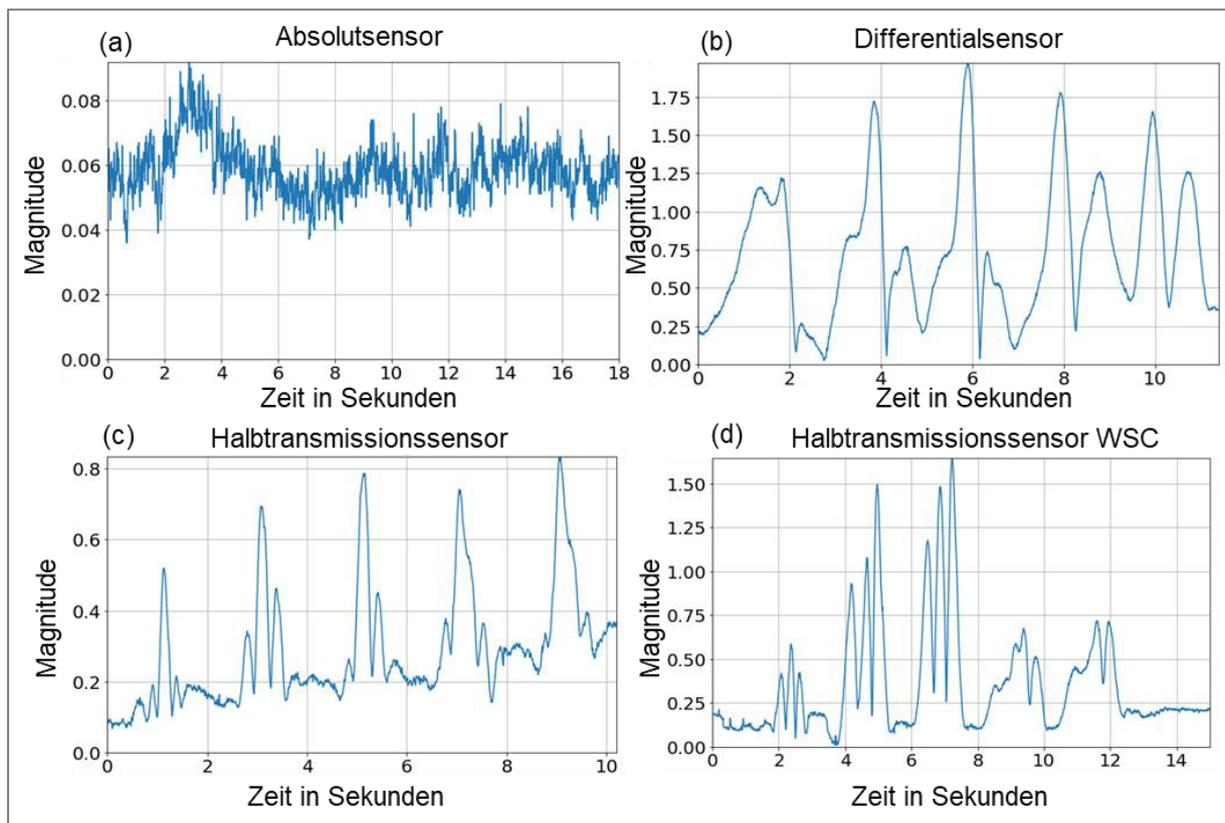


Abbildung 19: Verläufe des Wirbelstrommesssignals mit unterschiedlichen Sensortypen zur Bestimmung der Sensoreignung

Die Verläufe der jeweiligen Wirbelstrommessungen sind in Abbildung 19 dargestellt. Es ist jeweils die Magnitude, der Betrag des komplexen Messergebnisses des Wirbelstrommessgeräts, über der vergangenen Zeit dargestellt. Der Absolutsensor (Abbildung 19 (a)) zeigt als maximalen Messwert ca. 0,09 Magnituden, was der Größenordnung des Rauschens im Sensorsignal entspricht. Es zeigen sich keine signifikanten Signaländerungen bei Positionierung des Sensors über einer Lasermarkierung, der Absolutsensor kann somit vorerst als nicht geeignet für die Messaufgabe betrachtet werden. Der Differentialsensor (Abbildung 19 (b)) zeigt mit einem Wert von fast

2 Magnituden im Messsignal den höchsten maximalen Ausschlag aller Sensoren. Es sind fünf große Ausschläge mit gleichen Abständen erkennbar, es ist anzunehmen, dass es sich um die fünf Lasermarkierungen handelt. Neben den fünf lokalen Maxima im gleichen Abstand sind weitere Maxima zwischen den Markierungen zu erkennen. Diese Zwischenmaxima zeigen eine ähnliche Ausschlaghöhe wie die der eigentlichen Lasermarkierungen. Dieser Umstand und eine mangelhafte Wiederholbarkeit der Messungen legen eine vorerst nur bedingte Eignung des Differentialsensors nahe. In Abbildung 19 (c) ist das Messsignal des Halbtransmissionssensors dargestellt. Die fünf Lasermarkierungen werden als scharf getrennte lokale Maxima abgebildet. Die Maxima sind jeweils von einem deutlich kleineren Nebenmaxima auf beiden Seiten begleitet. Obwohl das maximale Messsignal mit ca. 0,8 Magnituden kleiner ist als das des Differentialsensors wird der Halbtransmissionssensor aufgrund der sich scharf vom Grundsignal abhebenden Maxima an den Lasermarkierungen als am geeignetsten eingestuft. Zusätzlich zeigt sich die Wiederholbarkeit der Messsignale beim Halbtransmissionssensor als zuverlässiger gegenüber dem Differentialsensor. Die Messungen mit dem Halbtransmissionssensor und Wolframschmelzcarbid (Abbildung 19 (d)) zeigen gegenüber denen mit Zirkoniumoxid ausgeprägtere Nebenmaxima. Für den Differentialsensor zeigt sich ebenfalls ein unschärferes Messsignal, wodurch die Zuordnung der Messmarkierungen erschwert wird. Der Absolutsensor zeigt auch bei Markierungen mit Wolframschmelzcarbid lediglich das Rauschen des Sensors im Messsignal.

Einfluss der Laserprozessparameter auf das Wirbelstrommesssignal

Im Folgenden wird der Fokus der Untersuchungen zum Einfluss der Laserprozessparameter auf das Wirbelstrommesssignal, aufgrund der obenstehenden Ergebnisse, auf den Halbtransmissionssensor gelegt. Es werden im Wesentlichen die Ergebnisse mit Zirkoniumoxid als Zusatzmaterial dargestellt. Wenn nicht anders angegeben beziehen sich alle Ergebnisse auf Zirkoniumoxid als Zusatzmaterial.

Für die Untersuchungen in diesem Kapitel wurden auf einem Hubprofilabschnitt jeweils drei Messreihen aufgebracht. Die Wirbelstrommessungen erfolgen an dem Messstand aus AP1 mit einer Messgeschwindigkeit von 33 mm/s und 0,8 mm Abstand vom Sensor zur Probe. Abbildung 20 zeigt einen typischen Verlauf des Messsignals einer Messreihe. Im gezeigten Beispiel werden Lasermarkierungen mit konstanter Laservorschubgeschwindigkeit und konstanter Pulverzufuhr gezeigt. Die Laserleistung der Markierungen wird in diesem Beispiel von links nach rechts erhöht. Mit einer roten Linie sind die acht Hauptmaxima, die aus den acht Lasermarkierungen der Messreihe resultieren, gekennzeichnet. Der maximale Messsignalausschlag, der durch eine Lasermarkierung hervorgerufen wird, ist durch ein oranges Kreuz markiert. Der Bereich, der einer Lasermarkierung zugeordnet wird, ist durch ein schwarzes Rechteck gekennzeichnet. Die Höhe und Abstände der Maxima werden aufgenommen und ausgewertet. Die Auswertung erfolgt mit der in AP1 entwickelten Visualisierung der Messwerte und automatischen Detektion der Maxima. Hierfür wurde das Python-Skript aus AP1 mit Maximadetektion-Algorithmen aus der Bibliothek SciPy [31] erweitert. Die Detektion basiert auf den Prominenzen der lokalen Maxima, wobei die Prominenz den vertikalen Abstand vom Maximum zum vertikal nächsten lokalen Minimum beschreibt.

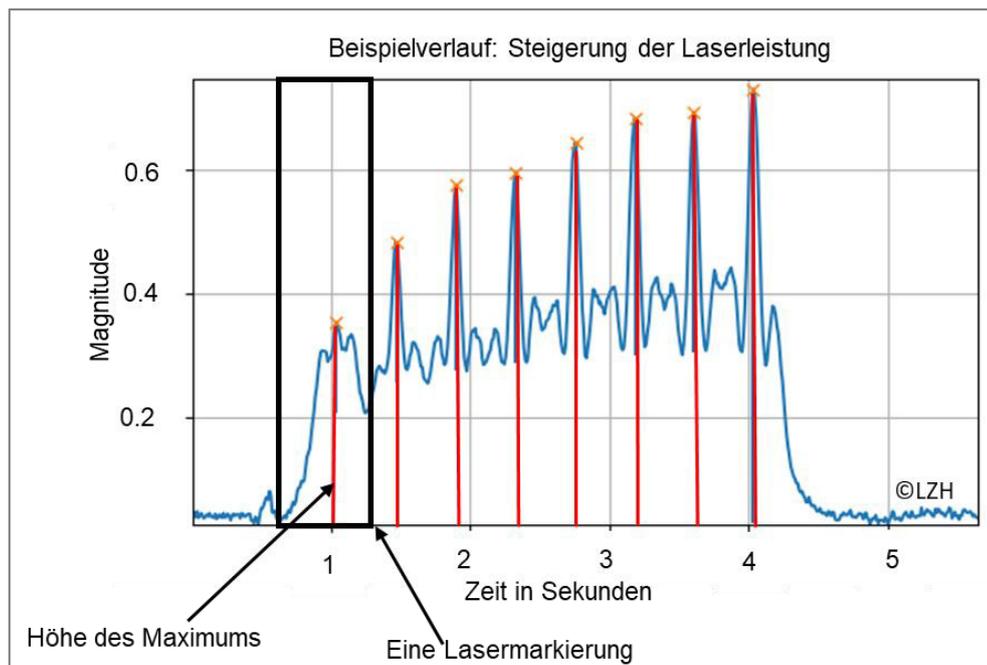


Abbildung 20: Beispielmessung mit dem Halbtransmissionssensor und eingezeichneten untersuchten Merkmalen

Die Auswertung der Höhe erfolgt unter Verwendung der Statistiksoftware JMP. Die untersuchten 125 Prozessparameterkombinationen sind in Tabelle 8 des Anhangs dokumentiert. Die Auswertung der 125 Prozessparameterkombinationen zeigt hoch signifikante Einflüsse von Pulverstrom und Laserleistung auf das Messsignal, auch die quadratischen Effekte werden als signifikant eingestuft. Die signifikanten Einflussgrößen sind mit ihren P-Werten in Tabelle 4 wiedergegeben.

Tabelle 4: Signifikanz der Prozessparameter auf die Höhe der Maxima im Wirbelstrommesssignal

Parameter	Log ₁₀ (p)	P-Wert
Pulverstrom in H	25,087	0,00000
Laserleistung in W	19,442	0,00000
Laserleistung in W*Laserleistung in W	2,595	0,00254
Pulverstrom in H*Pulverstrom in H	2,586	0,00259

Die Regressionsgleichung der signifikanten Prozessparameter weist ein Bestimmtheitsmaß von 0,74 auf. Eine graphische Darstellung ist in Abbildung 21 gegeben. Bei kleineren Laserleistungen zwischen 190 W und ca. 300 W ist der Verlauf der Maximahöhen annähernd linear steigend, während die Werte bei höheren Laserleistungen bis 490 W in eine Sättigung übergehen. Der Einfluss des Pulverstroms auf die Maximahöhen steigt bei kleineren Pulverstromzufuhraten, ca. zwischen 0 TDZ und 7 TDZ, moderat an. Die Steigung des Verlaufs nimmt bei größeren Zufuhraten, ca. ab 7 TDZ, zu. Die erreichbaren Maximahöhen reichen von 0,09 Magnituden für die Parameterkombination von 190 W Laserleistung und 5 TDZ Pulverstrom bis zu 0,74 Magnituden für die Parameterkombination von 490 W Laserleistung und 20 TDZ Pulverstrom.

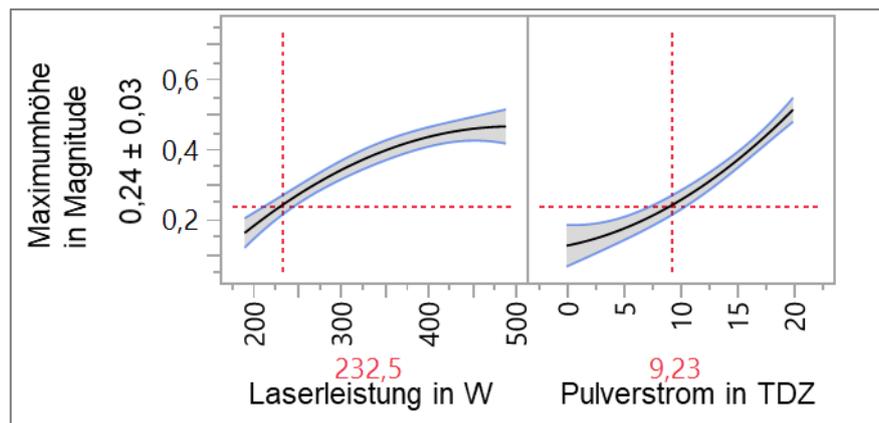


Abbildung 21: Zweidimensionale Darstellung der Regressionsgleichung zur Bestimmung der Maximumhöhe von Zirkoniumoxid dispergierten Lasermarkierungen

Grenzen und Fehlerquellen der Wirbelstrommesstechnik

Im folgenden Abschnitt sind die Grenzen der Wirbelstrommesstechnik, die sich aus der Analyse der Detektierbarkeit ergeben, für den Anwendungsfall der Hubhöhenbestimmung beschrieben. Neben der Beurteilung der Umsetzbarkeit einer absoluten Hubhöhenbestimmung wird auf den minimalen Abstand der Lasermarkierungen zur sicheren Identifizierung sowie den maximalen Abstand des Sensors zur Probe eingegangen.

Umsetzbarkeit einer absoluten Hubhöhenmessung

Im Vorhaben wird eine absolute Hubhöhenmessung mit einer Auflösung von unter einem Millimeter angestrebt. Zu diesem Zweck müssen die Lasermarkierungen in möglichst kurzen Abständen aufeinanderfolgen und sich im resultierenden Maximum des Messsignals zuverlässig unterscheiden. Für eine Hubhöhenmessung mit absoluten Messpositionen würden bei einer Auflösung von einem Millimeter demnach 1000 unterschiedliche Markierungen pro Meter Hubprofil benötigt, die sich in ihrem Messsignalmaximum zuverlässig voneinander unterscheiden lassen. Legt man die Ergebnisse des vorherigen Abschnitts und die Abbildung 21 zugrunde wird deutlich, dass unter Berücksichtigung der Standardabweichung bis zu drei unterschiedliche Lasermarkierungen eine eindeutige Differenzierung über das Messsignalmaximum zulassen würden. In Abbildung 22 (b) ist in der zweiten Messreihe der Probe ein abwechselndes Muster von zwei Lasermarkierungen abgebildet. Ziel der Messreihe ist festzustellen, ob die Lasermarkierungen bei unterschiedlichen Abständen zuverlässig über das Messsignal (Abbildung 22 (a)) unterschieden werden können.

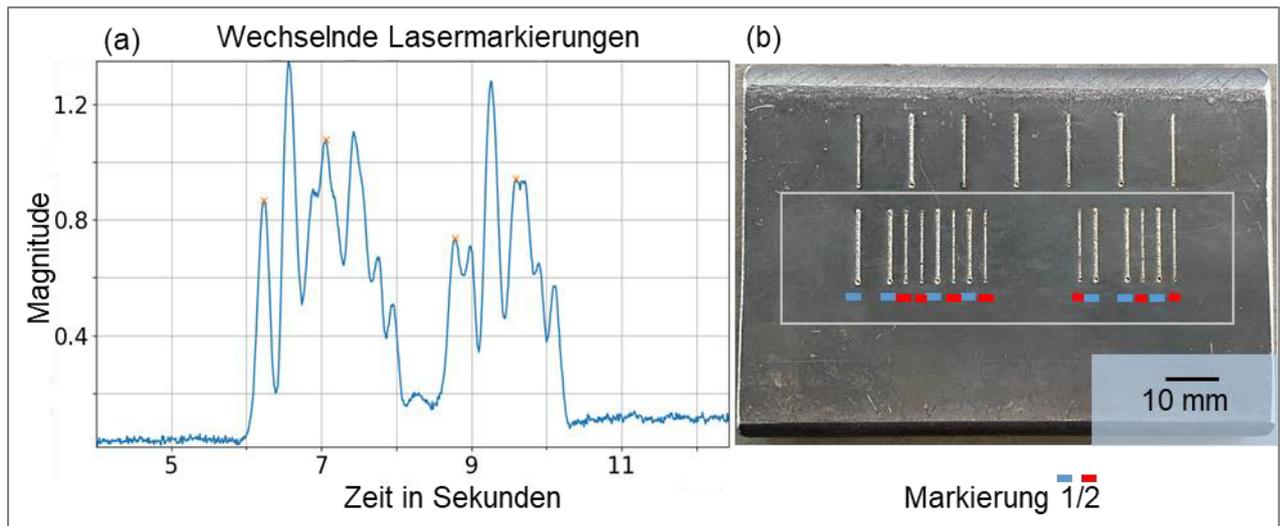


Abbildung 22: Messreihe mit zwei unterschiedlichen abwechselnden Lasermarkierungen; verwendete Prozessparameter Markierung 1: $P = 350 \text{ W}$, $\dot{m} = 7 \text{ TDZ}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$ und Markierung 2: $P = 200 \text{ W}$, $\dot{m} = 7 \text{ TDZ}$, $v = 1000 \text{ mm/min}$

Vergleicht man das Messsignal mit der Abfolge der Lasermarkierungen ist keine eindeutige Zuordnung möglich. Auffällig ist, dass das Signal lediglich bei der mittigen größeren Lücke von 15 mm zwischen den Lasermarkierungen annähernd zurück auf das Grundsignal fällt. Dies lässt darauf schließen, dass der Messfleck des Wirbelstrommessgeräts mehrere Lasermarkierungen, bei 3 mm Abstand der Markierungen zueinander, gleichzeitig erfasst und das Messsignal eine Überlagerung der Lasermarkierungen darstellt. Eine absolute Hubhöhenmessung ist durch die Überlagerung der Messergebnisse mit den benachbarten Lasermarkierungen nicht möglich, ohne den Abstand der Messpositionen, und damit die Auflösung, auf über 15 mm zu erhöhen. Aus diesem Grund wird im folgenden Projektverlauf eine inkrementelle Hubhöhenbestimmung angestrebt, die eine höhere Auflösung erlauben würde. Zur Umsetzung einer inkrementellen Hubhöhenbestimmung werden identische Lasermarkierungen verwendet. Auf diese Weise wird das Messsignal an jeder Messposition identisch von den Nebenpositionen beeinflusst und es ergibt sich die gleiche maximale Höhe.

Minimale Abstände zwischen den Lasermarkierungen

Ein wichtiger Faktor für eine hohe Auflösung der Hubhöhenbestimmung ist der Abstand zwischen den Lasermarkierungen. Um den minimalen Abstand der Lasermarkierungen zu bestimmen, bei dem die einzelnen Positionen korrekt zugewiesen werden können, wurden Messreihen mit 1 mm und 2 mm Abständen gefertigt. Für die verwendeten Lasermarkierungen wurden 200 W Laserleistung, 7 TDZ Pulverstrom und 1000 mm/min Vorschubgeschwindigkeit gewählt. Ein Ausschnitt der jeweiligen Messsignale, bei 2000 mm/min Messgeschwindigkeit und 0,8 mm Abstand vom Sensor zur Probe, ist in Abbildung 23 gezeigt. Beim Abstand von einem Millimeter zwischen den Markierungen sind keine scharfen Maxima erkennbar und eine Detektion der Lasermarkierungen ist nicht möglich. Liegen die Lasermarkierungen zwei Millimeter auseinander, so bildet das Messsignal eine zuverlässig alternierende Abfolge von Minima und Maxima. Die Lasermarkierungen können identifiziert werden. Als Konsequenz wird der minimale Abstand zwischen den Lasermarkierungen auf 2 mm festgelegt.

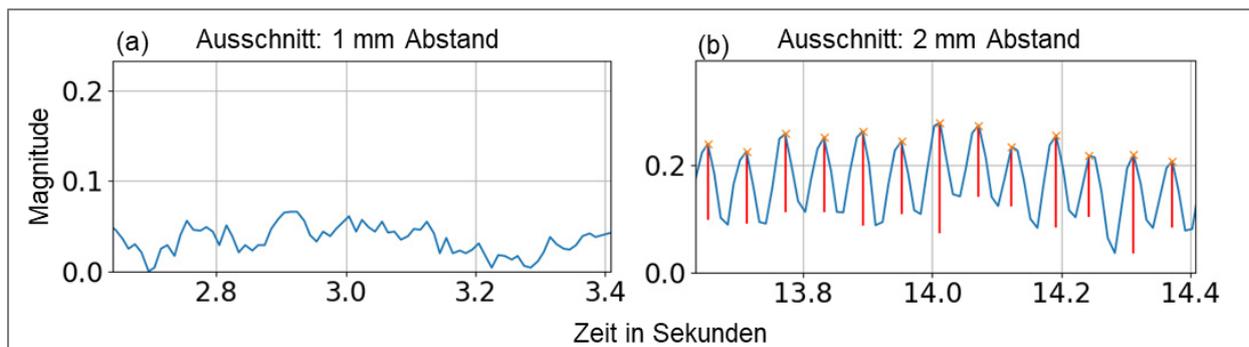


Abbildung 23: Ausschnitte der Messsignale von Lasermarkierungen mit 1 mm und 2 mm Abstand, die Messgeschwindigkeit beträgt 2000 mm/min; verwendete Prozessparameter $P = 200$ W, $\dot{m} = 7$ TDZ, $v = 1000$ mm/min

Maximaler Abstand zwischen Sensor und Probe

Die durch Laserstrahldispersieren hergestellten Lasermarkierungen führen zur einer Änderung der Oberflächentopographie und zu Erhöhungen von ca. 0,1 mm. Zusätzlich sind die Hubprofile im späteren Einsatz durch eine Lackschicht vor Korrosion geschützt. Durch die Erhöhungen des Laserprozesses und durch den zusätzlichen Abstand, bedingt durch die Lackschicht, ist die Kenntnis über den maximalen Abstand vom Wirbelstromsensor zur Oberfläche des Grundwerkstoffs des Hubprofils unerlässlich, um Kollisionen zu verhindern. Zur Untersuchung der Auswirkung des Abstandes zwischen Probe und Sensor wurde eine Messreihe mit 2 mm Distanz zwischen den Lasermarkierungen ($P = 200$ W, $\dot{m} = 7$ TDZ, $v = 1000$ mm/min) wiederholt durchgeführt. Hierbei wurden Abstände zwischen 0,5 mm und 1,5 mm in 0,1 mm Schritten von Probe zum Sensor, untersucht. Zwei Beispiele der Messungen sind in Abbildung 24 dargestellt.

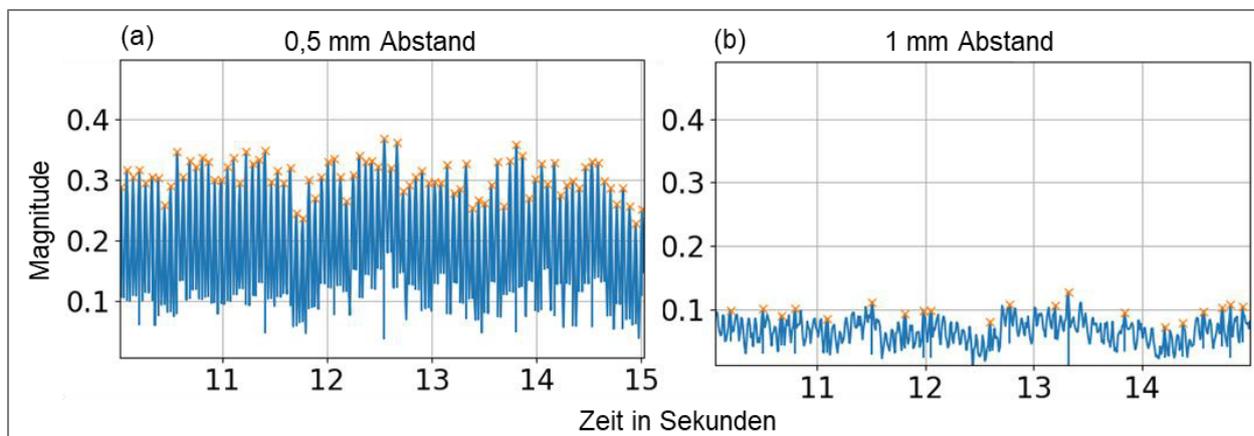


Abbildung 24: Ausschnitte von Wirbelstrommessungen mit unterschiedlichem Abstand von Sensor zur Probe

In Abbildung 24 (a) ist ein Ausschnitt der Messung mit 0,5 mm Abstand gezeigt. Für diesen Abstand liegen die größten Messwertdifferenzen zwischen Maxima und Minima mit ca. 0,2 Magnituden vor. Die orangenen Kreuze markieren die Stellen an denen ein Maximum, und somit eine Lasermarkierung, gefunden wurde. Die Maxima treten in regelmäßigen Abständen auf, so wie es für Lasermarkierungen im gleichen Abstand erwartet wird. Als zweiter Ausschnitt ist in Abbildung 24 (b) das Messsignal mit 1 mm Abstand dargestellt. Die Differenz zwischen Maxima und Minima liegt bei ca. 0,5 Magnituden und das Signal ist unregelmäßiger, was auf ein höheres Signal-zu-Rauschverhältnis zurückgeführt wird. Die zuverlässige Detektion der Maxima ist nicht mehr möglich. Als maximaler Abstand, bei dem die Maxima zuverlässig in regelmäßigen Abständen detektiert werden können, wird 0,8 mm bestimmt. Ein Ausschnitt des Messsignals wird in Abbildung 23

(b) dargestellt. Als Konsequenz finden die folgenden Untersuchungen mit einem Abstand von 0,8 mm zwischen Sensor und Probe statt.

Als Ergebnis von AP3 wird festgehalten, dass das Wirbelstrommesssignal durch unterschiedliche Lasermarkierungen beeinflusst werden kann. Bei höheren Laserleistungen und Pulverströmen nimmt auch das Maximum des Wirbelstrommesssignals zu. Für die Laserleistung tritt bei Leistungen ab ca. 450 W eine Sättigung ein und das Wirbelstrommesssignal wird kaum weiter gesteigert. Für den Pulverstrom tritt dieser Effekt im untersuchten Parameterbereich nicht auf. Identische Lasermarkierungen können in einem Abstand von 2 mm zueinander im Wirbelstrommesssignal voneinander getrennt werden. Der Abstand zwischen Wirbelstromsensor und dem Grundmaterial des Hubprofils sollte 0,8 mm nicht übersteigen, da das Signal-zu-Rauschverhältnis bei größeren Abständen zunimmt und eine zuverlässige Detektion der einzelnen Markierungen nicht mehr möglich ist.

Arbeitspaket 4: Aufbringen von Messmarkierungen auf Hubprofile

Im vierten Arbeitspaket wird der auf Randstücken von Hubprofilzuschnitten erprobte Prozess auf vollständig Hubprofile übertragen. Zu diesem Zweck werden 1 m lange Hubprofile von der Hoesch Schwerter Profile GmbH bereitgestellt. Es werden unterschiedliche Lasermarkierungskonzepte zur Hubhöhenbestimmung untersucht und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Ebenfalls wird in diesem Arbeitspaket die Eignung der Technik für den Plagiatschutz bzw. die Bauteilidentifizierung überprüft.

Markierung von Hubprofilen zur Hubhöhenbestimmung

Für die Bearbeitung von Hubprofilen mit einem Meter Länge muss zunächst die Laserbearbeitungsanlage mit einem größeren Schutzgasbecken ausgestattet werden (vgl. Abbildung 25), damit die Schmelze während der Bearbeitung nicht oxidiert. Zusätzlich können die Untersuchungen mit dem Wirbelstrommessgerät nicht mehr an dem Versuchsstand aus AP1 durchgeführt werden, da dieser für Gewicht und Größe der Hubprofile nicht ausgelegt ist. Aus diesem Grund werden die Wirbelstrommessungen ebenfalls an der Laseranlage durchgeführt. Am Laserbearbeitungskopf wird ein Halter installiert, an dem der Sensorkopf befestigt werden kann. Um Ungenauigkeiten durch Bewegungen im analogen Sensorkabel zu vermeiden, wird die Kontrolleinheit ebenfalls am Achssystem der Laseranlage befestigt und mitgeführt. Die ermittelten Daten werden von der Kontrolleinheit in digitaler Form an den Messstationscomputer übertragen.

Wie in AP3 beschrieben kann eine Positionsbestimmung nur inkrementell erfolgen. Als verwendeter Laserprozessparameter wird eine Laserleistung von 200 W, eine Pulverzufuhr von 7 TDZ und eine Vorschubgeschwindigkeit von 1000 mm/min gewählt, um eine möglichst dünnen Lasermarkierung zu generieren. Im ersten Schritt werden Lasermarkierungen in 2 mm Abständen auf einer Gesamtlänge von 640 mm auf ein Hubprofil aufgetragen, wie in Abbildung 25 (a) dargestellt. Anschließend wird überschüssiges Zirkoniumoxid entfernt und die Messreihe mit dem Wirbelstromsensor (Abbildung 25 (b)) zu vermessen. Das Messsignal ist in Abbildung 26 dargestellt.

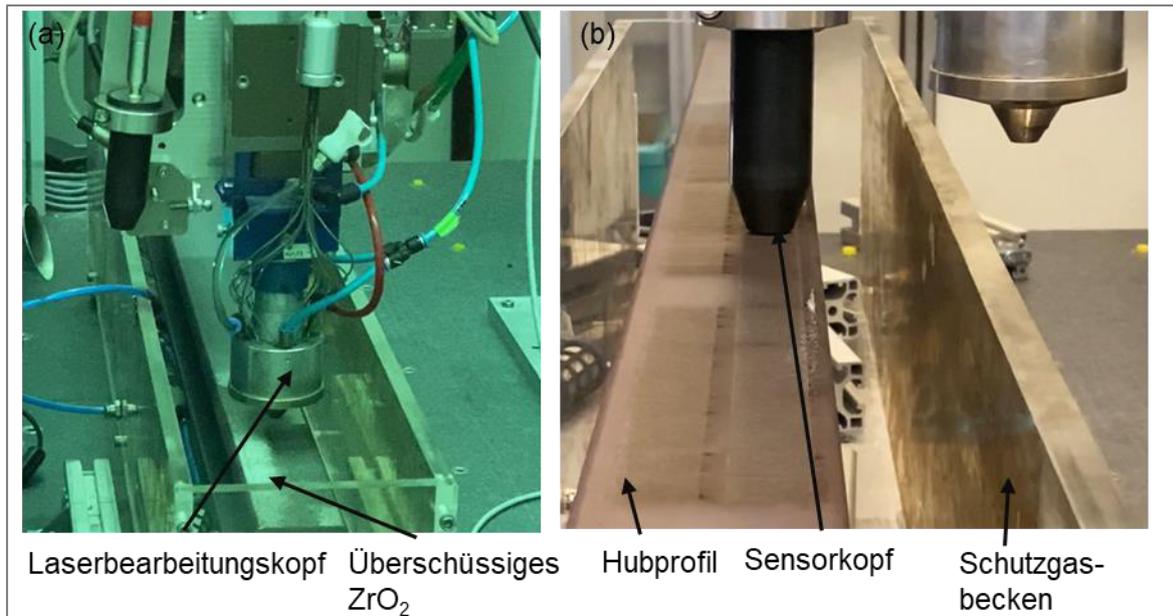


Abbildung 25: Ablauf der Untersuchungen an Hubprofilen; (a) Hubprofil in Schutzgasbecken beim Laserprozess; (b) Wirbelstrommessung am Hubprofil in der Laseranlage

Die Messwertaufnahme startet vor Beginn der ersten Lasermarkierungen. Sobald die ersten Markierungen mit dem Sensor überquert werden, werden im Messsignal erste Maxima gefunden. Das Signal steigt nach ca. sechs Lasermarkierungen auf ein Grundsignal von ca. 0,75 Magnituden und zeigt Maxima im Abstand von ca. 0,6 Sekunden, was bei 2000 mm/min Messgeschwindigkeit dem Abstand der Messmarkierungen von 2 mm entspricht. Am Ende der aufgetragenen Lasermarkierungen fällt das Signal wieder auf ca. den Wert des Grundsignals. Das Plateau bildet sich, weil der Messfleck des Wirbelstromsensors mehrere Lasermarkierungen gleichzeitig erfasst und nach ca. 6 Markierungen im gesamten Messfleck Lasermarkierungen vorliegen.

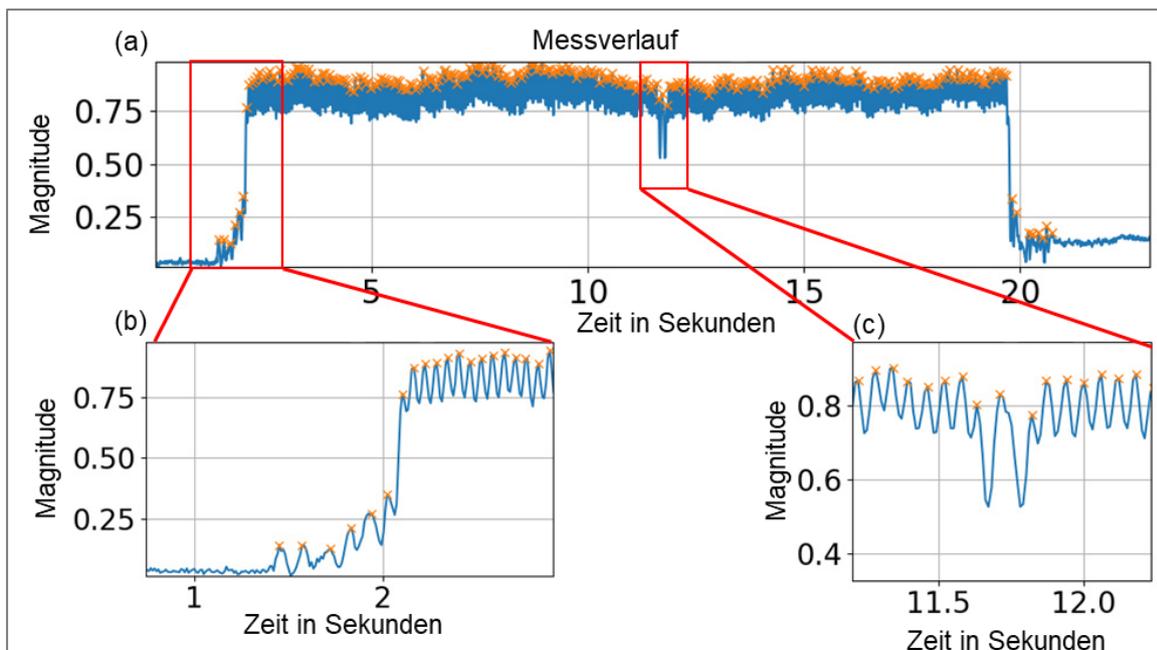


Abbildung 26: (a) Messergebnis einer 640 mm langen Messstrecke mit Lasermarkierungen in 2 mm Abstand; (b) Anstieg des Messsignals bei Messung erster Markierungen; (c) Abweichendes Signal in der Messstrecke verursacht durch eine fehlende Lasermarkierung

Im Bereich um 11,75 Sekunden ist eine Anomalie im Messsignal zu finden (vgl. Abbildung 26 (c)). An dieser Stelle fällt das Messsignal auf unter 0,6 Magnituden, bildet ein Maximum und fällt anschließend wieder auf unter 0,6 Magnituden. Bei Vergleich mit der betrachteten Messstrecke fällt auf, dass an dieser Stelle eine Lasermarkierung durch einen kurzzeitigen Ausfall des Lasers fehlt. Wenn davon ausgegangen wird, dass eine Lasermarkierung im Messsignal ein Maximum bewirkt, dann lässt sich der Messsignalverlauf aus Abbildung 26 (c) nicht erklären. Es müsste eine Lücke von 1,2 Sekunden zwischen zwei Maxima bestehen, es liegen jedoch zwei Lücken mit jeweils ca. 0,9 Sekunden Abstand vor. Betrachtet man statt der Maxima die Minima, so liegt zwischen den Minima eine Distanz von 1,2 Sekunden vor. Dies lässt darauf schließen, dass die genaue Position der Lasermarkierungen nicht durch die Messsignalmaxima, sondern durch die Minima wiedergegeben wird. In den folgenden Untersuchungen wird das Messsignal, aus Gründen der Anschaulichkeit und zur Verwendung der genutzten Maximadetektionsalgorithmen, horizontal gespiegelt.

Bei einer inkrementellen Hubhöhenbestimmung werden mögliche Fehldetektionen nicht korrigiert und pflanzen sich während der gesamten Messung fort. Um eine solche Fehlerfortpflanzung zu verhindern werden im nächsten Schritt Zwischenmarkierungen eingebracht, die ein sich im Messsignal deutlich von den umliegenden Lasermarkierungen unterscheiden. An diesen Stellen kann die aktuelle gemessene Hubhöhe mit einem Sollwert verglichen und ggf. korrigiert werden. Die im vorherigen Absatz beschriebene Lücke in den Lasermarkierungen führt zu einer solchen signifikanten Messsignalabweichung, dass sie für dieses Vorhaben herangezogen wird. In Abbildung 27 (a) ist ein Hubprofil mit zwei parallelen Messreihen abgebildet. In der oberen Messreihe sind jeweils neun Lasermarkierungen von einer Lücke getrennt. Somit liegt jedes vielfache von 20 mm gemessener Hubhöhe in einer Lücke und im Messsignal von Abbildung 27 (b) in einem Minimum zwischen den beiden Maxima der letzten und ersten Lasermarkierung eines Blocks von 9 Markierungen. Während die Maxima der Markierungen innerhalb eines Blocks bei ca. 0,2 Magnituden liegen, erreichen die Markierungen am Rand eines Blocks das dreifache an Magnitude und können somit zuverlässig von den Umliegenden Maxima unterschieden werden.

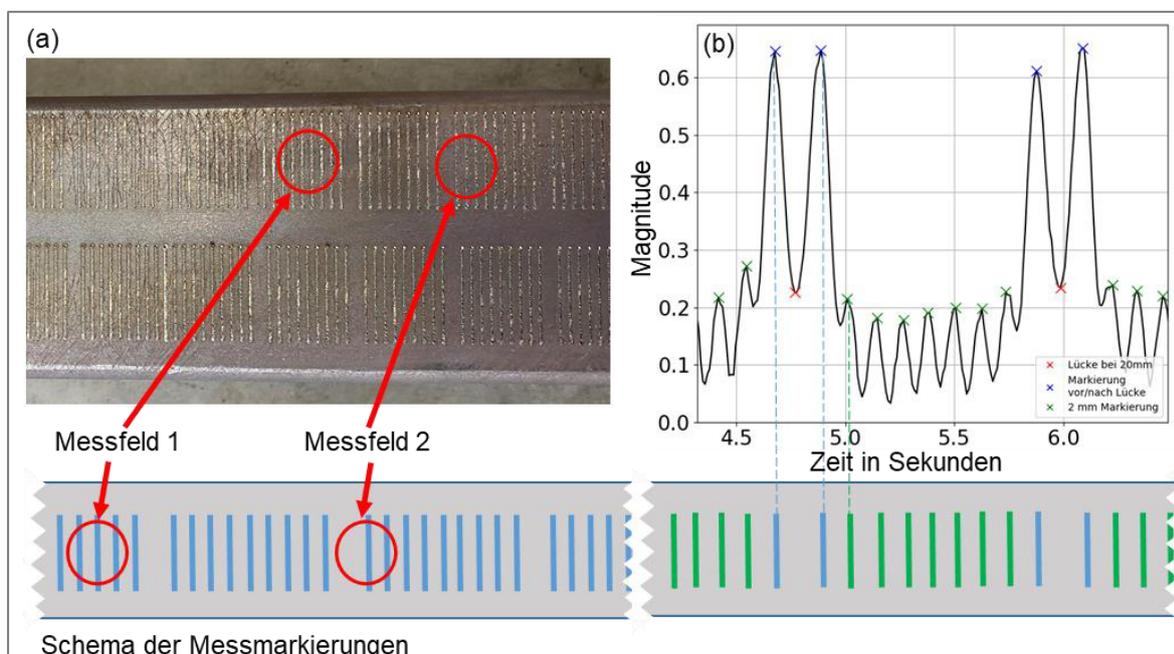


Abbildung 27: Darstellung der unterschiedlichen Messsituationen an einer Lücke zwischen den Lasermarkierungen und im Bereich ohne Lücke; (a) Hubprofil mit Blöcken von Lasermarkierungen getrennt durch Lücken jeweils nach neun Markierungen; (b) resultierendes Messsignal mit Zuordnung zu einzelnen Lasermarkierungen

In Abbildung 29 ist der Graph eines solchen Wirbelstrommesssignals dargestellt. Weder bei einer Messgeschwindigkeit von 2000 mm/min noch bei 4000 mm/min wurde ein Fehler in der bestimmten Hubhöhe festgestellt. Alle Lasermarkierungen wurden durch ein Maximum im Messsignal (grüne Kreuze in Abbildung 29) korrekt wiedergegeben. Aus diesem Ergebnis wird geschlossen, dass eine reine inkrementelle Messmarkierungsstrategie als zuverlässiger zu betrachten ist, als eine mit Zwischenmarkierung zur Behebung von eventuellen Fehlern. Durch die Beeinflussung der Messsignale an benachbarten Lasermarkierungen wurden durch die Zwischenmarkierungen (Lücken) mehr Fehler eingebracht. Eine Beurteilung der möglichen Positionsauflösung und Wiederholbarkeit der Untersuchungen wird in AP5 durchgeführt.

Überprüfung der Umsetzbarkeit eines Plagiatschutz

Die werkstoffinhärenten Lasermarkierungen bieten potential für einen fälschungssicheren Plagiatschutz. Aus diesem Grund wird im Vorhaben die generelle Umsetzbarkeit überprüft.

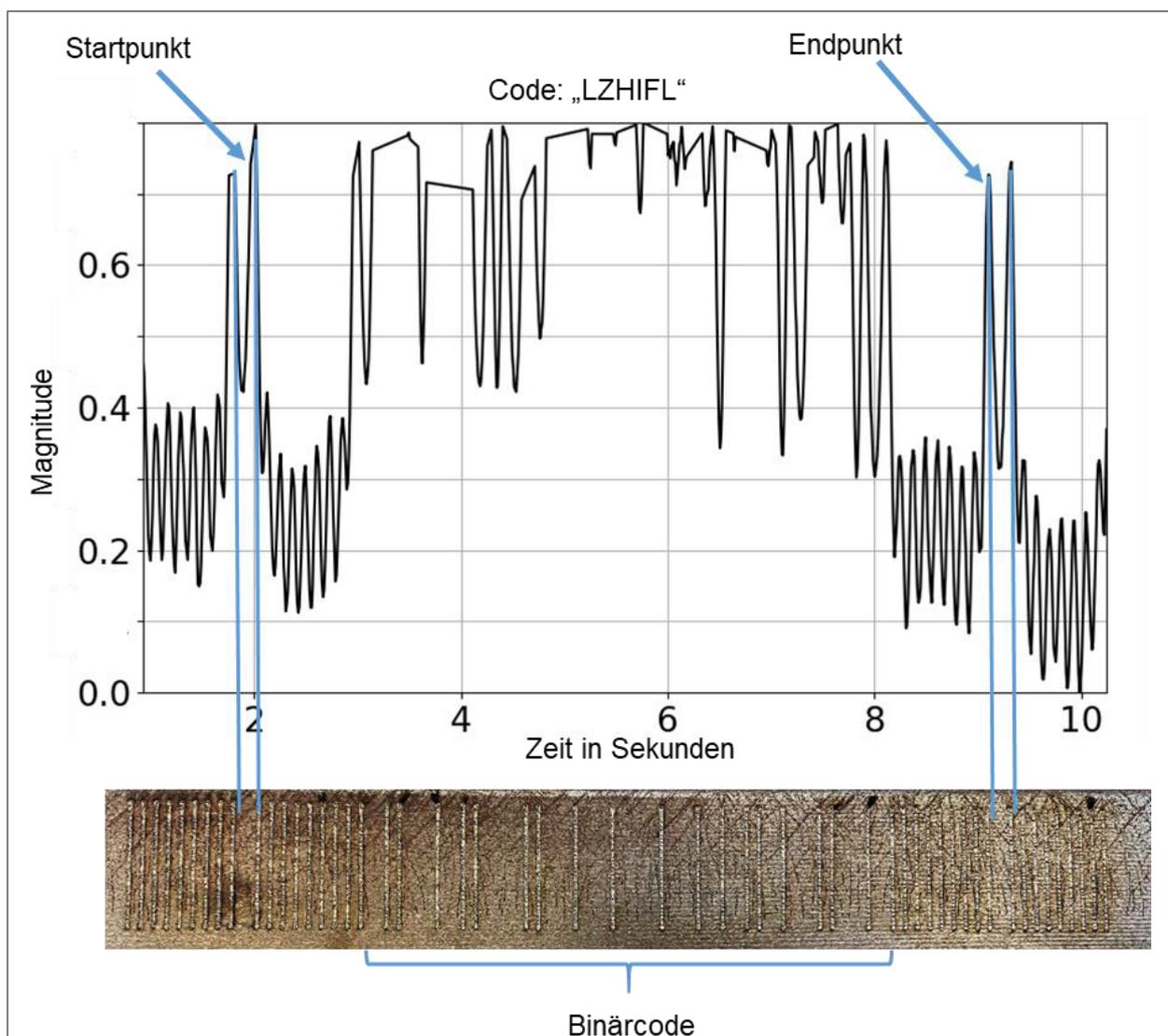


Abbildung 30: Beispiel zur Lasermarkierung zum Plagiatschutz; zwischen Start- und Endpunkt wird eine bestimmte Abfolge von Lasermarkierungen gesetzt; im Beispiel ist das Codewort „LZHIFL“ in Binärwerte übersetzt; eine Markierung steht für „1“ und eine fehlende Markierung für „0“

Grundsätzlich wurde in AP3 gezeigt, dass die Laserprozessparameter und der Abstand sowie die Reihenfolge der Lasermarkierungen das Wirbelstrommesssignal beeinflussen. Auf diese Weise

können individuelle Messsignalverläufe, wie in Abbildung 30 dargestellt, realisiert werden, die von Dritten nicht ohne Kenntnis der genauen Prozessparameter nachgebildet werden können. Im Beispiel aus Abbildung 30 wurde ein Codewort binärisiert, also in einen Code aus Nullen und Einsen übersetzt. An den Positionen mit Wert „1“ wird eine Lasermarkierung gesetzt, an den Positionen mit Wert „0“ wird eine Lücke gelassen. Als Start- und Endmarker für den Detektionsalgorithmus werden wieder jeweils zwei Blöcke mit neun gleichen Lasermarkierungen gesetzt. In Abbildung 31 sind die Messsignale der Codewörter „Profil“ und „LZHIFL“ gegenübergestellt. Beide Signale unterscheiden sich deutlich.

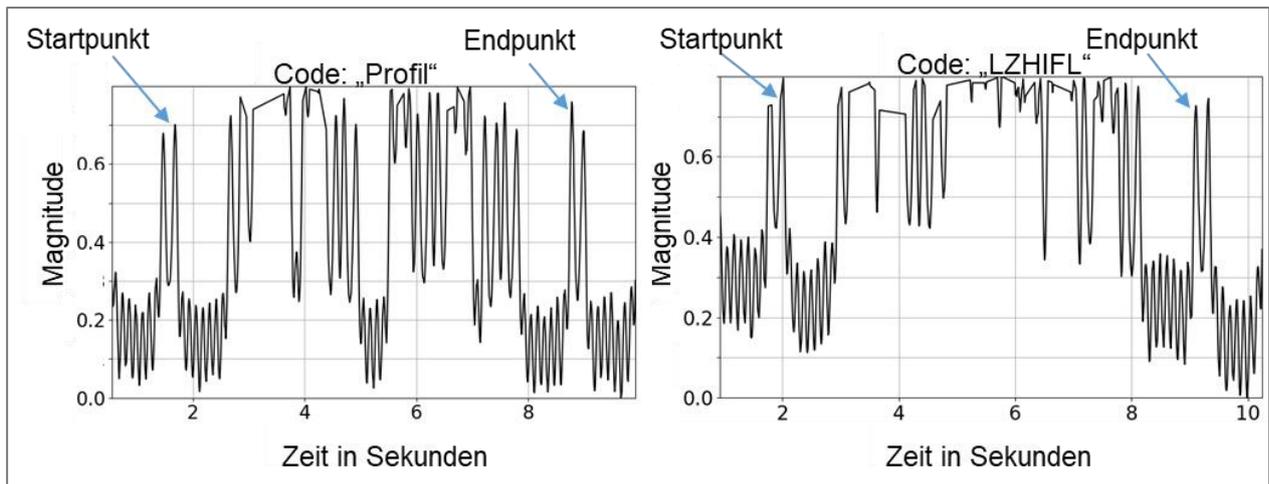


Abbildung 31: Gegenüberstellung der Messsignale von zwei binärisierten Codewörtern

Die Hubprofile, und grundsätzlich auch andere Bauteile, ließen sich nach Fertigung mit einem individuellen Code versehen, welcher einmal als Referenz gemessen und gespeichert wird. Im späteren Produktlebenszyklus kann der Code bei Bedarf wieder mit dem Wirbelstrommessgerät überfahren und gemessen werden. Der detektierte Signalverlauf kann mit der Referenzmessung nach Herstellung verglichen und das Hubprofil identifiziert werden. In den hier gezeigten Beispielen wurde binär codiert. Grundsätzlich ließen sich die Lasermarkierungen über verschiedene Laserleistungen, Pulverströme, Vorschubgeschwindigkeit, Zusatzmaterialien und Abstände variieren, was dem Plagiatschutzmechanismus weitere Sicherheit geben würde.

Als Ergebnis des AP4 wird festgehalten, dass Hubprofile mit einer Positionsmarkierung versehen werden können. Wird eine inkrementelle Markierungsstrategie mit identischen Lasermarkierungen angewendet, so können die die Lasermarkierungen im 2 mm Abstand zueinander zuverlässig detektiert werden. Ferner bietet die Technik ein hohes Potential für den Plagiatschutz, da die Lasermarkierungen nicht von Dritten ohne die Kenntnis der präzisen Prozessparameter gefälscht werden können. Zusätzlich bietet das Verfahren des Laserstrahldispersierens vielzählige Möglichkeiten zur Differenzierung der Lasermarkierungen.

Arbeitspaket 5: Prüfung der Hubhöhenmessung

In Arbeitspaket 5 erfolgt die Untersuchung der Hubhöhenmessung unter realitätsnahen Bedingungen, um die Robustheit und Genauigkeit des Systems zu prüfen. Neben Dauerversuchen während eines gewöhnlichen Arbeitstages wurden Versuche zur Bestimmung des Einflusses einer möglichen Schiefstellung zwischen Fahrweg des Sensors und Hubprofil durchgeführt. Es folgt eine Diskussion zur möglichen Steigerung der Auflösung. Abschließend wird der Einfluss der Randbedingungen am Flurförderfahrzeug auf das Messsignal bestimmt.

Langzeitmessungen mit dem Wirbelstrommessgerät

Bislang wurde der Wirbelstromsensor vor jeder untersuchten Messreihe neu kalibriert, um den Einfluss möglicher Temperaturschwankungen auszugleichen und gleiche Grundvoraussetzungen zu schaffen. In der Praxis wird das Messgerät allerdings nicht nach jeder Messfahrt kalibriert werden können. Daher wird in einem Langzeitversuch ermittelt, wie sich das Messsignal über einen Zeitraum von 7,6 Stunden verändert. Untersucht wird das Hubprofil aus Abbildung 29 mit einer Messgeschwindigkeit von 2000 mm/min. Die Messstrecke von 540 mm wird in beide Richtungen getrennt aufgenommen. Vor Beginn der Messungen wird eine Aufwärmzeit für das Wirbelstrommessgerät von 45 Minuten gewartet. In der Messzeit werden insgesamt 1.107 einzelne Messfahrten aufgenommen und die Messwerte separat gespeichert. Alle Messaufnahmen werden mit dem Maximadetektionsalgorithmus, der in Abbildung 29 verwendet wurde, nach Beendigung aller Messungen untersucht und die mit dem Wirbelstrommessgerät ermittelte Messstrecke ausgegeben. Die Ergebnisse der ermittelten Messstrecke sind in Abbildung 32 dargestellt. Während der ersten 33 Minuten können alle Messaufnahmen ausgewertet werden. Nach Minute 33 wird die erste nicht mögliche Messung festgestellt. Anschließend werden sowohl mögliche als auch nicht mögliche Messungen festgestellt, wobei die ermittelten Messstrecken der möglichen Messungen stärker streuen. Im Bereich zwischen Messung 190 und 310 streuen die ermittelten Messstrecken nicht nur um den Sollwert, sondern auch um den Wert von 300 mm. Nach 133 Minuten wird eine Neukalibrierung des Sensors durchgeführt, da aus dem Livewerten der Sensorsteuerungssoftware eine sehr große Signaldrift festgestellt wird. Im Anschluss vergehen wieder ca. 33 Minuten, bis die erste nicht mögliche Messung festgestellt wird. Der weitere Verlauf ähnelt dem von vor der Neukalibrierung, bis ab ca. Messung 800 nur noch nicht mögliche Messungen und einige Messungen mit ermittelter Messstrecke von 2 mm vorgefunden werden. Diese Ergebnisse legen nahe, dass der Sensor nach der Neukalibrierung von Minute 133, bzw. Minute 178 mit Aufwärmzeit, noch nicht bei einer konstanten Betriebstemperatur vorlag. Es müsste demnach mindestens alle 30 Minuten eine Neukalibrierung des Sensors stattfinden.

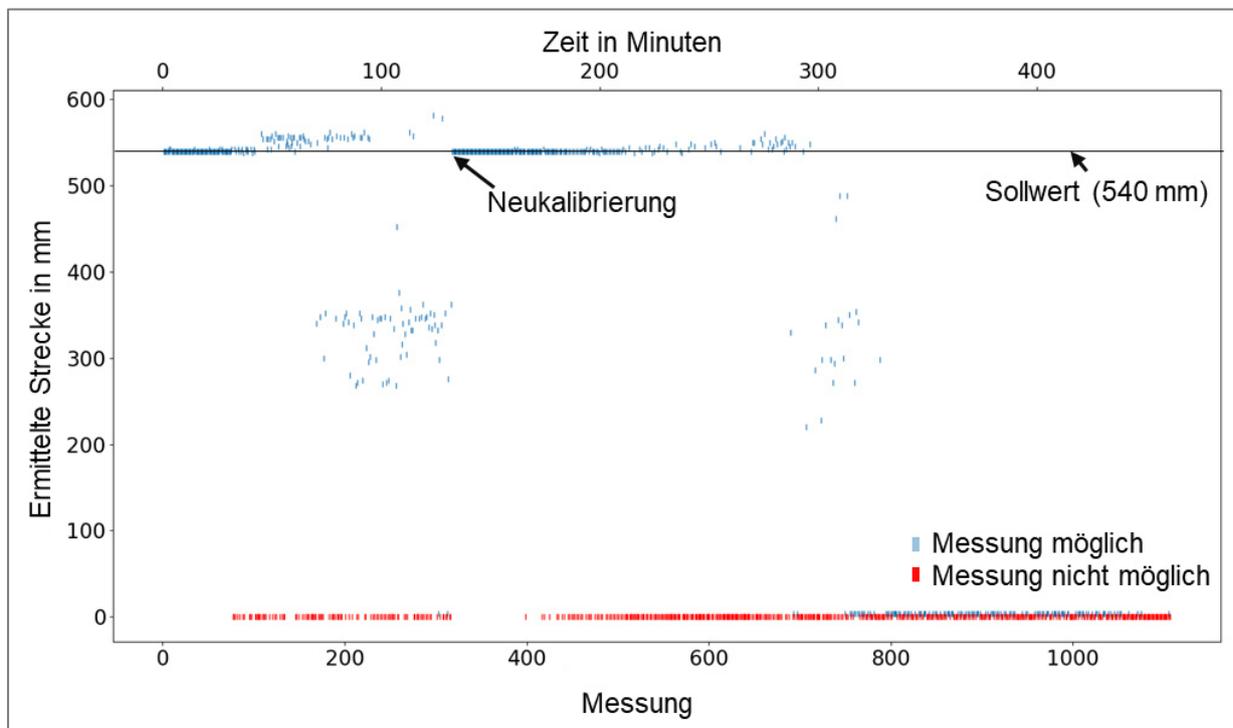


Abbildung 32: Graphische Darstellung der ermittelten Messstrecken im Langzeitversuch über 7,6 Stunden

Aufgrund der Vermutung, dass der Sensor nach 178-minütigen Betrieb noch nicht vollständig aufgewärmt war, werden weitere Langzeitmessungen mit einer Aufwärmzeit von vier Stunden durchgeführt. Die gesamte Messzeit beläuft sich in diesem Fall auf ca. 2 Stunden und es wurden 304 Messfahrten durchgeführt. In Abbildung 33 werden die ermittelten Messstrecken graphisch dargestellt.

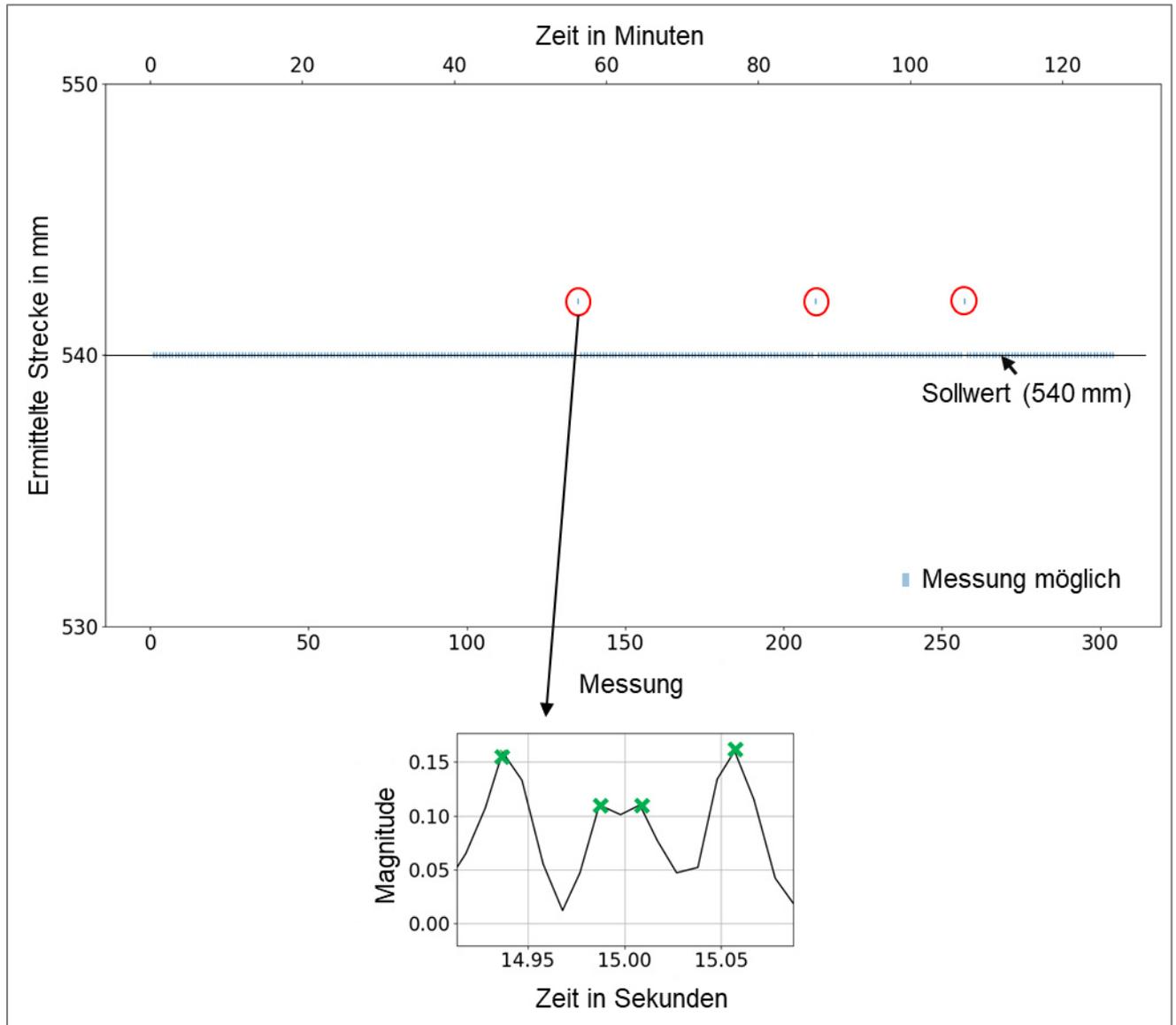


Abbildung 33: Ermittelte Messstrecken bei vier Stunden Aufwärmzeit des Wirbelstromsensors; drei von 304 Messungen weichen um 2 mm vom Sollwert ab; im unteren Bereich ist ein Beispiel eines Fehlers gegeben, der zur Abweichung in der ermittelten Messstrecke führt, ein Maximum ist im Messsignal fälschlicherweise mit einer Doppelspitze dargestellt

Von den 304 Messungen weichen drei Messungen vom Sollwert ab. Die Differenz beträgt bei allen drei Messungen 2 mm. Ursache für diese Abweichungen sind selten auftretende Artefakte im Maximum des Messsignals einer Lasermarkierung. Das Maximum ist an diesen Stellen nicht korrekt ausgeprägt und stattdessen ergibt sich ein Doppelmaximum im Messsignal. Beide einzelne Maxima werden detektiert und die ermittelte Messstrecke erhöht sich um 2 mm. Anhand der Ergebnisse kann angenommen werden, dass der Sensor nach ca. vier Stunden vollständig aufgewärmt ist. Die Messungen mit dem vollständig aufgewärmten Sensor sind über den gesamten

Versuchszeitraum zuverlässig wiederholbar. Nach Formel (6) wird die Fehlerquote bei der Detektion einer einzelnen Lasermarkierung bestimmt. Lediglich bei 0,0036 % der einzelnen Lasermarkierungen trat ein Fehler in der Positionsbestimmung auf und die zugehörige ermittelte Messstrecke wurde um 2 mm fälschlich verlängert.

$$Fehlerq. = \frac{\text{Anzahl Fehlmessungen}}{\text{Anzahl Lasermarkierungen} \cdot \text{Anzahl Messdurchläufe}} \cdot 100 \% \quad (6)$$

Versuche bei Abweichungen vom Abstand zwischen Sensor und Probe

Das Wirbelstrommesssignal ändert sich bei unterschiedlichen Abständen zur Probe. Um den Einfluss einer Ungenauigkeit im Abstand von Sensor und Probe zu simulieren, wurden Messungen mit 0,015 % und 0,03 % Steigung im Abstand durchgeführt.

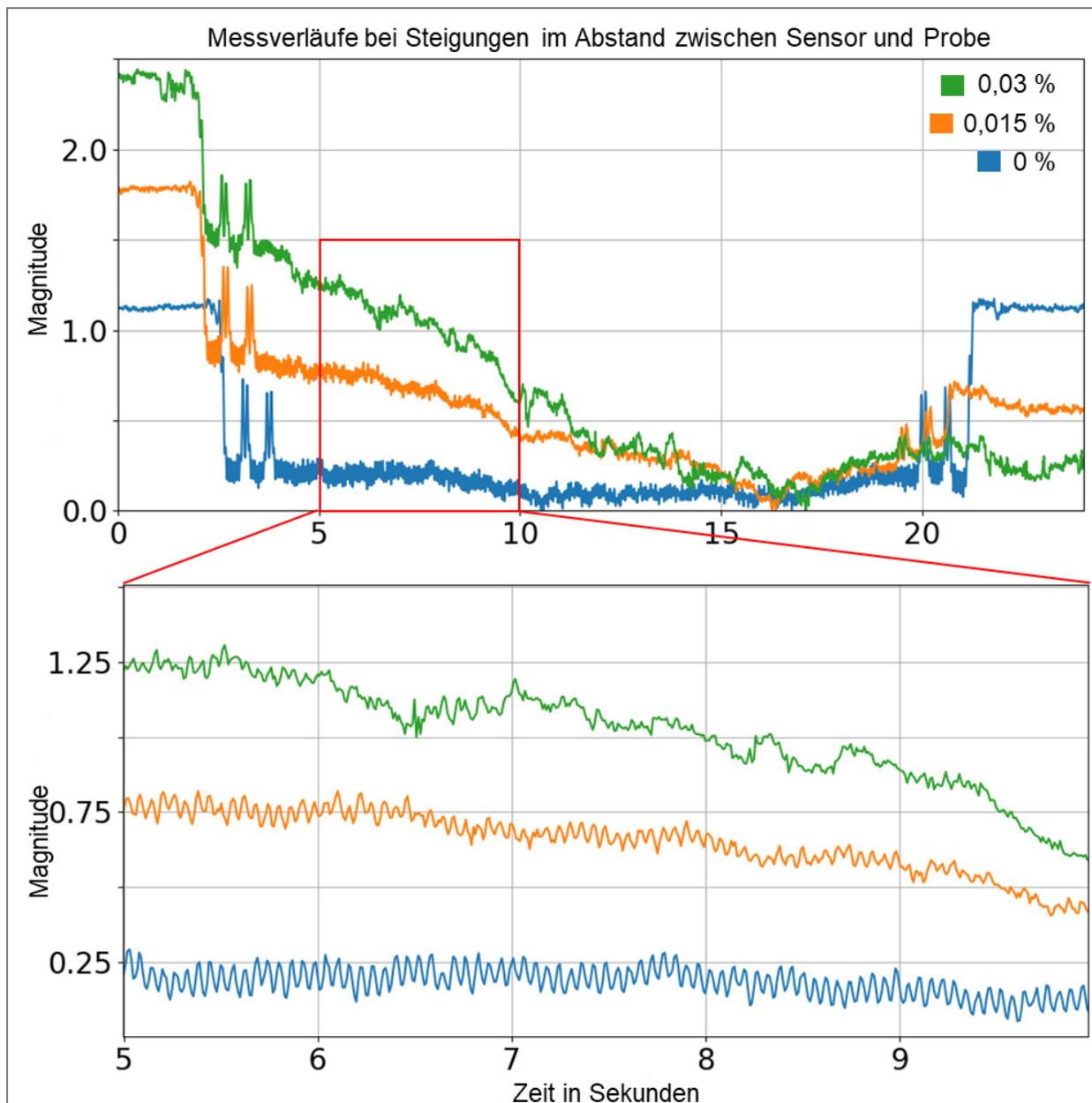


Abbildung 34: Messsignalverläufe bei unterschiedlichen Steigungen; mit zunehmender Steigung wird das Signal-zu-Rauschverhältnis schlechter

Dies entspricht auf 640 mm Strecke einem Abstandsgewinn von 0,1 mm bzw. 0,2 mm. Die Messsignalverläufe sind in Abbildung 34 dargestellt. Bei dem blauen Messsignalverlauf handelt es sich um eine Referenzmessung ohne Steigung und einem Abstand von 0,8 mm zwischen Probe und Sensor. Die Maxima, die die Position der Lasermarkierungen beschreiben, sind deutlich erkennbar. Bei einer Steigung von 0,015 % liegt eine Drift und ein erhöhtes Rauschen im Messsignal vor. Eine Hubhöhenbestimmung wird hierdurch ungenauer. Bei einer Steigung von 0,03 % ist eine Bestimmung der Hubhöhe durch die große Messsignaldrift und das Rauschen nicht mehr möglich.

Mögliche Auflösung des Messsystems

In den vorangegangenen Untersuchungen wurde lediglich die Detektierbarkeit der einzelnen Lasermarkierungen adressiert. Werden nur die Positionen der Lasermarkierungen in die erreichbare Messauflösung einbezogen, so ist diese mit dem Abstand der Lasermarkierungen identisch bei 2 mm. Das Wirbelstrommesssignal bietet allerdings mehr Informationen als die Position der Lasermarkierungen in den Maxima des Messsignals. Werden zusätzlich die Messsignalminima bestimmt, liegen neben der Information zur Position der Lasermarkierungen auch die Positionen der Mitten zwischen den einzelnen Markierungen vor. Die erreichbare Auflösung erhöht sich auf 1 mm. In Abbildung 35 (b) ist ein Ausschnitt eines Messsignalverlaufs der Langzeitmessungen mit vierstündiger Vorwärmzeit dargestellt. Die Messgeschwindigkeit beträgt 2000 mm/min, somit liegen bei einer Messfrequenz von 100 Hz 0,33 mm zwischen den einzelnen Messpunkten. In Abbildung 35 (b) sind sowohl die Minima als auch die Maxima eingezeichnet. Für den gesamten Beispielmessverlauf wird für den Mittelwert aller Abstände der aufeinanderfolgenden Maxima und Minima $1,0 \text{ mm} \pm 0,23 \text{ mm}$ bestimmt. Zur Veranschaulichung der geringen Auflösung zwischen den Maxima und Minima ist in Abbildung 35 (a) das Messsignal in Graustufen konvertiert.

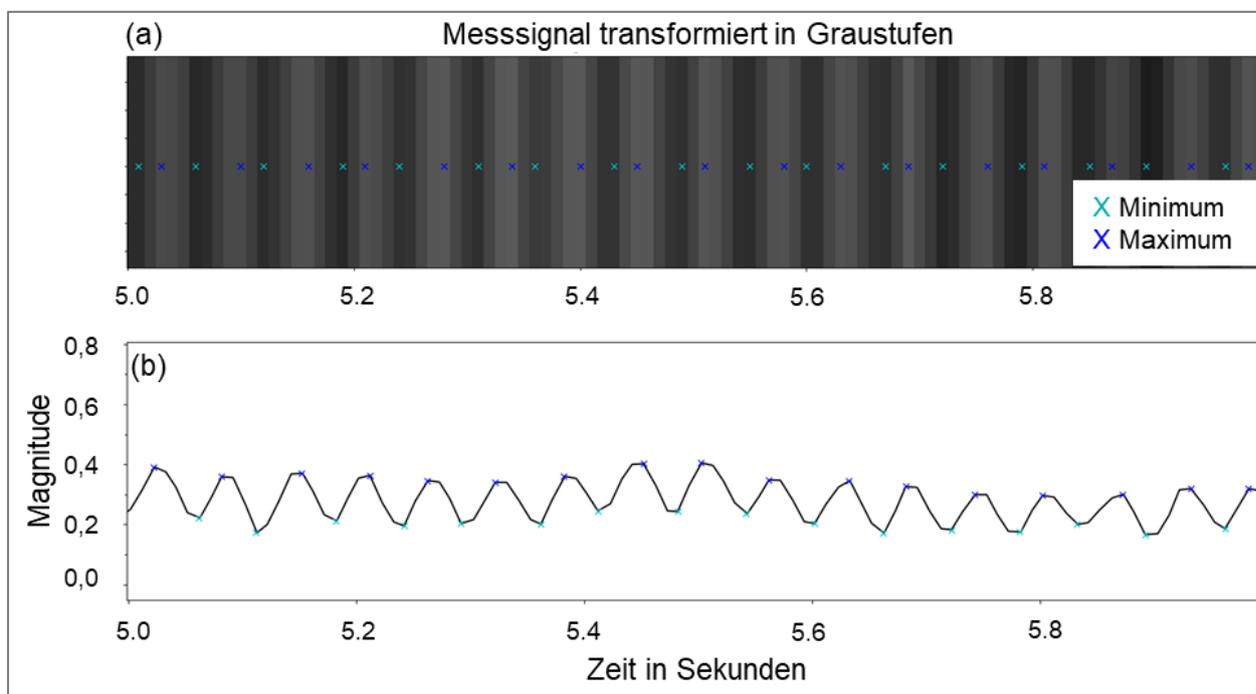


Abbildung 35: Ausschnitt des Messsignals transformiert in Graustufen (a) und gleicher Ausschnitt in als Graph der Magnitude (b), jeweils mit eingezeichneten Maxima und Minima

Das Signal in Grauwerten stellt ein 1-dimensionales Bild dar. Eine Möglichkeit die Auflösung von Bildern zu erhöhen ist die Verwendung von einer pixelinterpolierenden Bildverarbeitung. In Abbildung 36 ist der gleiche Messsignalausschnitt wie in Abbildung 35 dargestellt. In dieser Abbildung wurde mittels der Open Source Computer Vision Library OpenCV [32] eine bikubische Interpolation auf das Grauwertebild des Messsignals angewandt. Da es sich bei dem Messsignal um ein 1-dimensionales Bild handelt, ist eine bikubische Interpolation mit einer kubischen Interpolation gleichzusetzen. Aus jedem Pixel des Ursprungsbildes wurden in diesem Fall zehn neue Pixel interpoliert.

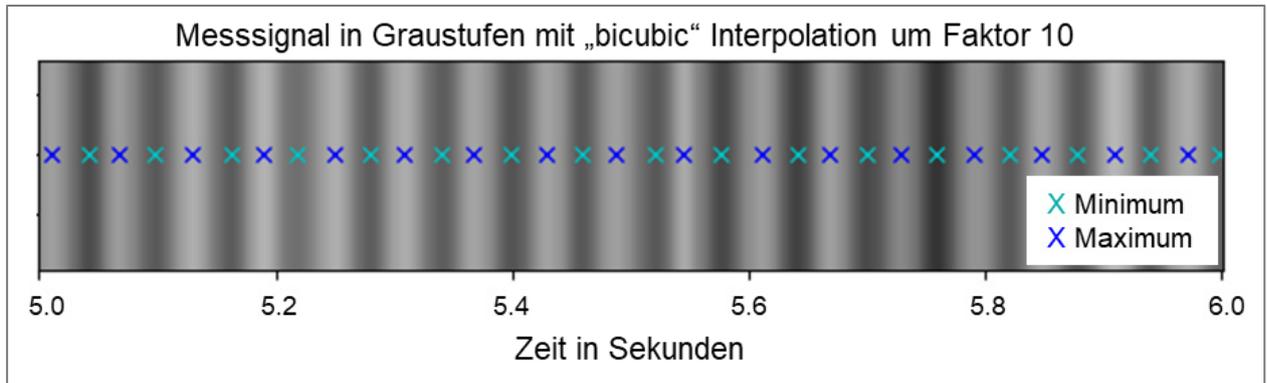


Abbildung 36: Messsignalausschnitt aus Abbildung 35 mit erhöhter Auflösung durch kubische Interpolation

Das interpolierte Messsignal wird erneut auf Maxima und Minima untersucht und der Abstand zwischen den einzelnen Extrempunkten bestimmt. Es ergibt sich für den gesamten Beispielverlauf eine mittlere Auflösung von $1,0 \text{ mm} \pm 0,09 \text{ mm}$. Dies entspricht einer Reduktion der Standardabweichung von ca. 61 % gegenüber dem nicht interpolierten Originalsignal. Zur Veranschaulichung sind die jeweiligen Abstände zum nächsten Extrempunkt in Abbildung 37 dargestellt.

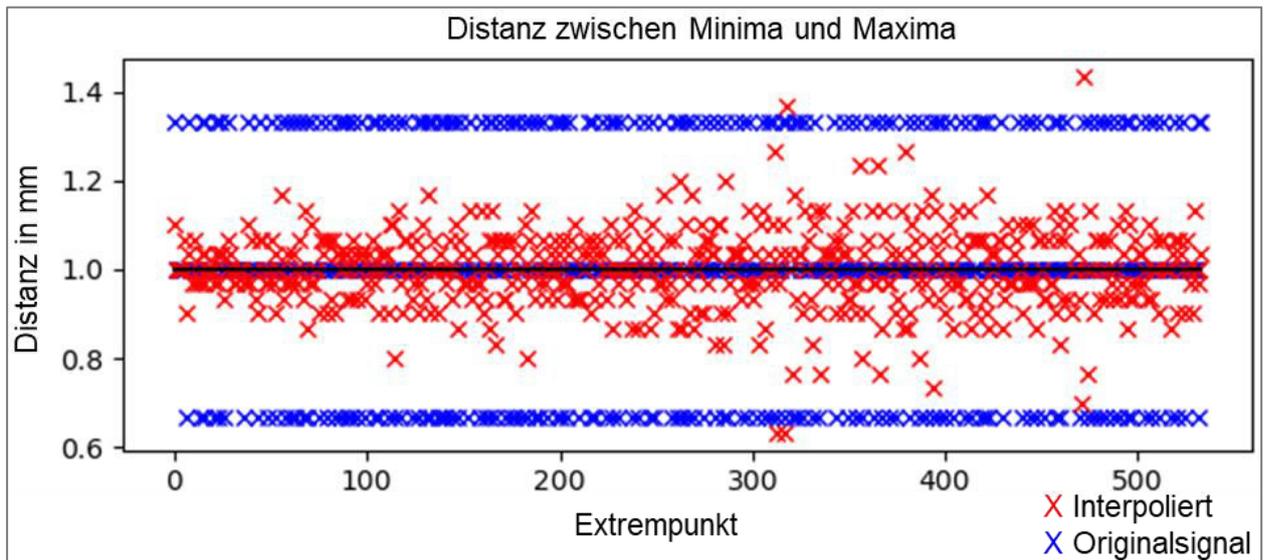


Abbildung 37: Abstände zwischen den Extrempunkten; im Originalsignal liegen die Distanzen entweder auf dem Sollwert oder um 0,33 mm (ein Messpunkt) verschoben, im interpolierten Messsignal streuen die bestimmten Distanzen enger um den Sollwert

Aufgrund der geringen Auflösung des Originalsignals liegen zwischen den einzelnen Extrempunkten entweder die angestrebten 1 mm Distanz oder 0,67 mm bzw. 1,33 mm. Die Abweichung entspricht einem Messwert bei 2000 mm/min Messgeschwindigkeit und 100 Hz Messfrequenz. Die Distanzen des interpolierten Messsignals streuen enger um den Sollwert von 1 mm. Die Methode der kubischen Interpolation kann demnach für diesen Beispielmessverlauf als geeignet betrachtet werden.

Zwischen den Extrempunkten des interpolierten Messsignals liegen Wendepunkte, die im nächsten Schritt für eine weitere Erhöhung der Auflösung herangezogen werden sollen. Hierzu werden die Grauwertdifferenzen der benachbarten Signalwerte gebildet, sie Stellen die Steigung des interpolierten Messsignals dar. Auf die Grauwertdifferenzen wird wiederum ein Maximadetektionsalgorithmus angewendet, die bestimmten Maxima und Minima entsprechen den Wendepunkten des interpolierten Messsignals. In Abbildung 38 sind die Extrem- und Wendepunkte im interpolierten Beispielsignalausschnitt eingetragen. Es ergibt sich eine Auflösung von $0,5 \pm 0,09$ mm, was im Vergleich zur alleinigen Betrachtung der Extrempunkte einer Verdopplung der relativen Standardabweichung entspricht.

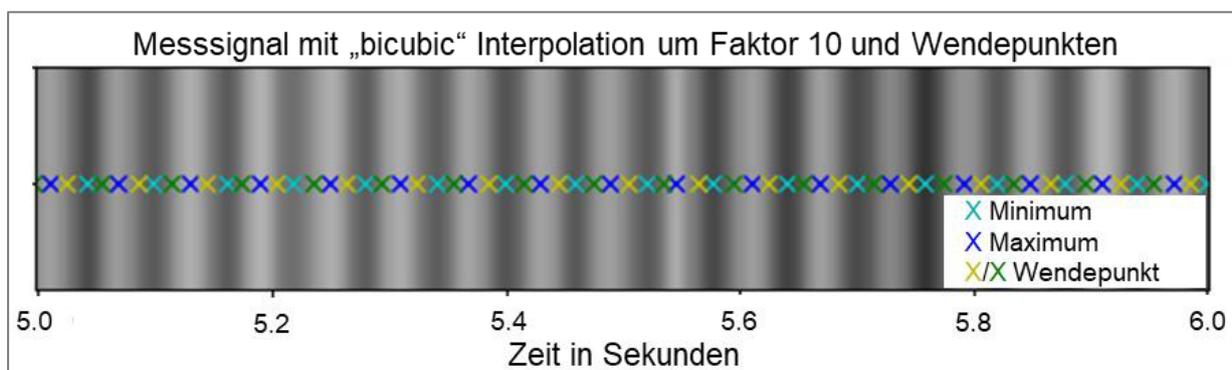


Abbildung 38: Messsignalausschnitt aus Abbildung 35 kubisch interpoliert mit einem Faktor von 10; zur weiteren Erhöhung der Auflösung wurden die Wendepunkte im Messsignal bestimmt

Die hier bestimmten Auflösungen bezogen sich nur auf den gezeigten Beispielmessverlauf. Zur Bestimmung von allgemeineren Werten der Auflösung, wird die Untersuchung für alle 304 Messsignalverläufe der Langzeitmessung mit vierstündiger Aufwärmzeit (vgl. Abbildung 33) wiederholt. Es ergeben sich folgende Kennwerte:

- Nicht interpolierte Messsignalverläufe (Extrempunkte): $1,0 \text{ mm} \pm 0,14 \text{ mm}$
- Interpolierte Messsignalverläufe (Extrempunkte): $1,0 \text{ mm} \pm 0,10 \text{ mm}$
- Interpolierte Messsignalverläufe (Extrem- und Wendepunkte): $0,5 \text{ mm} \pm 0,11 \text{ mm}$

Werden nur die Extrempunkte betrachtet relativiert sich der Mehrwert der Messsignalinterpolation über die Menge an Messverläufen leicht. Werden zusätzlich die Wendepunkte hinzugezogen, bleibt die absolute Standardabweichung annähernd identisch, verdoppelt sich jedoch bei relativer Betrachtung. Die Auswertungen erfolgten retrospektiv anhand der aufgenommenen Sensordaten. Welche Auswertungsmethode gewählt werden sollte, hängt vor allem von den Anforderungen einer Echtzeitmessung im Einsatz ab. Die Interpolation der Messpunkte benötigt mehr Rechenaufwand und einen Vorlauf der Messwerte zur Anwendung des kubischen Filters. Im Einsatz wird eine Erhöhung der Messfrequenz angestrebt, wodurch die Auflösung auch ohne Interpolation gesteigert werden könnte. Die in diesem Abschnitt bestimmten Kennwerte dienen daher als theoretische Betrachtung der Auswertungsmöglichkeiten beim aktuellen Versuchsaufbau.

Untersuchungen am Flurförderfahrzeug

Die Untersuchungen in diesem Projekt wurden in für das Wirbelstrommessgerät idealen Laborbedingungen durchgeführt. Dies entspricht allerdings nicht den realen Bedingungen an einem Flurförderfahrzeug. Sind die Einflüsse durch Vibrationen und Schockbelastungen auf das Wirbelstrommesssignal zu groß, kann unter Umständen ein Auslesen der Lasermarkierungen gestört werden. Um abschätzen zu können, ob die Wirbelstromtechnik auch beim Einsatz am Flurförderfahrzeug zur Bestimmung der Hubhöhe genutzt werden kann, werden im folgenden Versuche an einem Gabelstapler (H30T, Linde AG) durchgeführt. Hierzu wird, wie in Abbildung 39, der Sensorkopf an die Gabelhalterung des Flurförderfahrzeugs geklemmt. Der Abstand zwischen Sensorkopf und Hubprofil beträgt 0,8 mm. Der Messcomputer und die Kontrolleinheit des Wirbelstrommessgeräts befinden sich in einer Kiste auf den Zinken des Lasttragemittels.

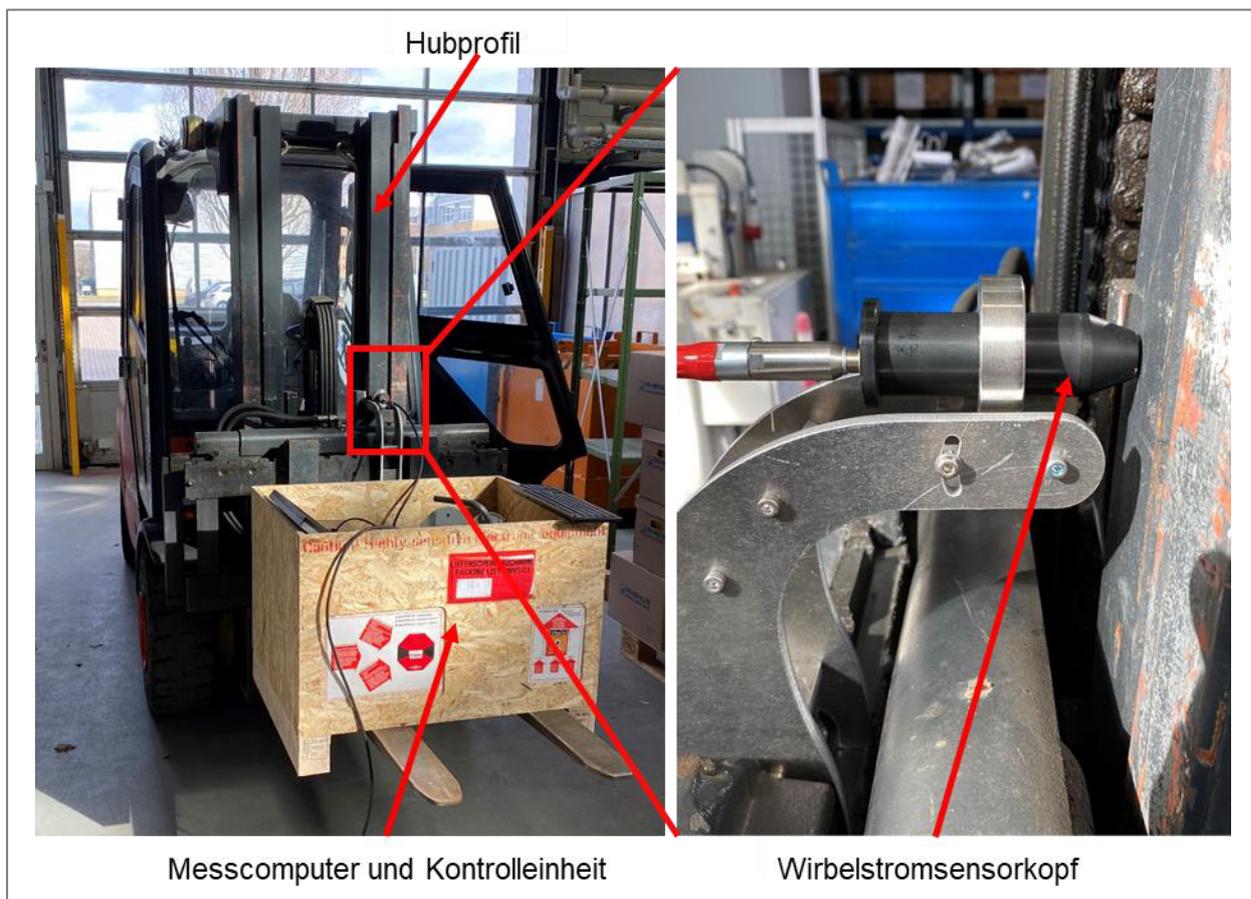


Abbildung 39: Messaufbau am Flurförderfahrzeug; der Messcomputer und die Kontrolleinheit des Wirbelstrommessgeräts befinden sich in einer Kiste am Lasttragemittel; der Sensorkopf ist mit einer Halterung an der Befestigung der Gabel geklemmt und mit 0,8 mm Abstand auf das Hubprofil ausgerichtet

Es wird der Einfluss unterschiedlicher Szenarien auf das Grundsignal des Wirbelstrommessgeräts untersucht. Vor jeder Messung wird das Wirbelstrommesssignal referenziert, um gleiche Ausgangsbedingungen zu schaffen. Zu den untersuchten Szenarien gehören:

1. Einschalten des Motors des Flurförderfahrzeugs
2. Laufender Motor ohne Aktion
3. Langsames Vorwärts- und Rückwärtsfahren
4. Langsames Anheben und Absenken des Lasttragemittels
5. Schnelles Anheben und Absenken des Lasttragemittels

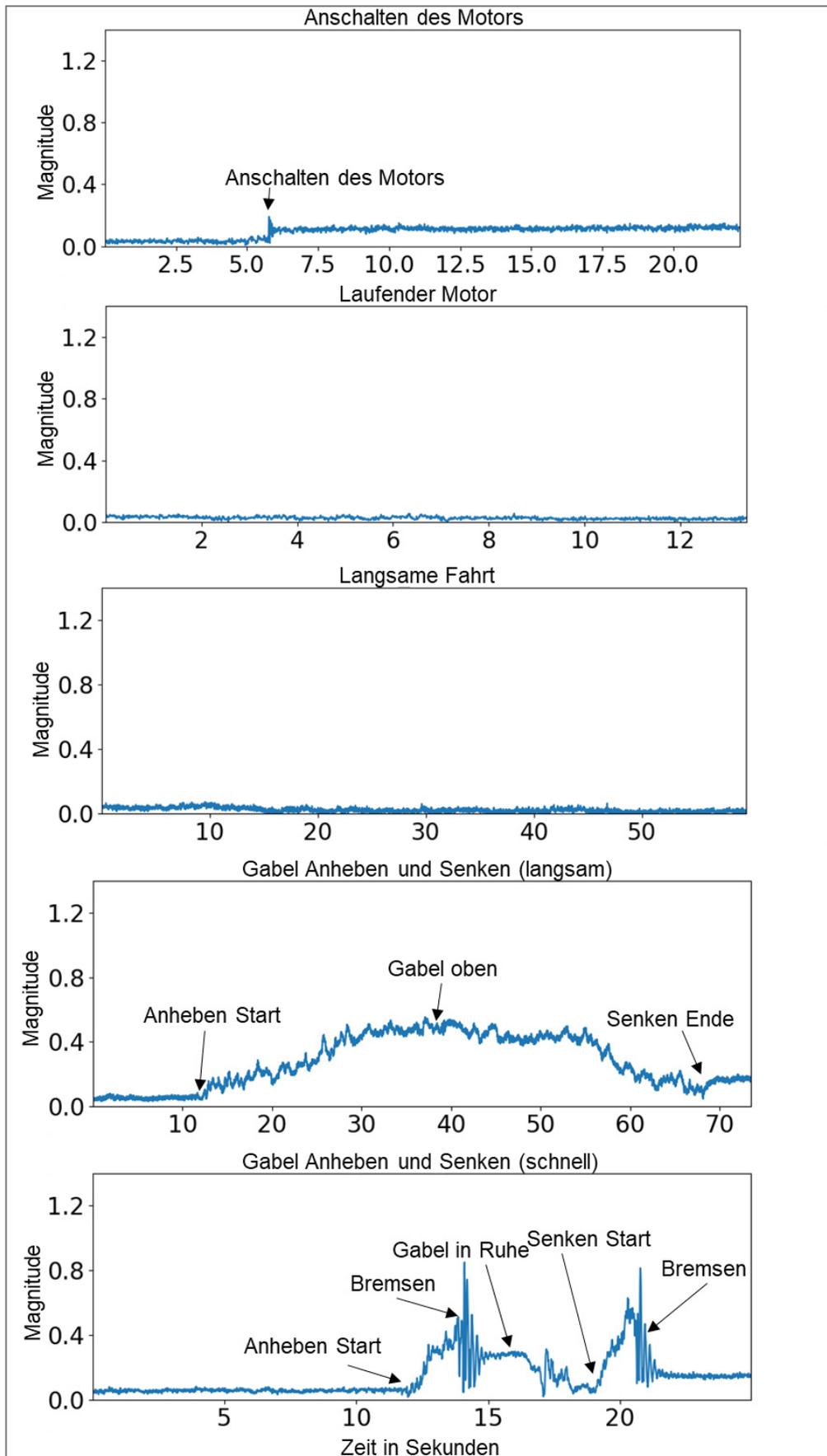


Abbildung 40: Einflüsse auf das Grundsignal des Wirbelstrommessgeräts in den untersuchten Anwendungsszenarien eines Flurförderfahrzeugs

Die jeweiligen Messverläufe sind in Abbildung 40 dargestellt. Zur besseren Einschätzbarkeit der Messverläufe wurde die Skalierung der Ordinatenachse an eine herkömmliche Messung einer Messstrecke auf den lasermarkierten Hubprofilen angepasst (vgl. Abbildung 29).

Als erstes wird der Vorgang des Einschaltens des Motors betrachtet. Zum Zeitpunkt der Zündung steigt das Grundsignal sprunghaft an und pendelt sich, verglichen mit vor der Zündung, auf einem leicht erhöhten Grundsignal ein. Eine Zunahme des Signalrauschens wird nicht festgestellt. Beim zweiten Szenario wird der Leerlauf des Flurförderfahrzeugs betrachtet. Es ist kein Einfluss auf das Grundsignal erkennbar. Beim langsamen vorwärts und rückwärts fahren (dritter Messverlauf in Abbildung 40) wird eine minimale Steigerung der Messsignalrauschens festgestellt. Das Rauschen liegt allerdings im Bereich des Grundsignals und kann als für die Hubhöhenmessung nicht störend angenommen werden. Bei dem vierten und fünften Messverlauf wurde das Lasttragemittel des Flurförderfahrzeugs angehoben. Zunächst wurde der Einfluss des langsamen Anhebens bestimmt. Zum Start des Anhebevorgangs beginnt das Messsignal unter Zunahme des Rauschens zu steigen, bis es bei der maximalen Höhe ein Plateau erreicht. Die Anstiege des Rauschens und des Messsignals liegen vermutlich einer Änderung des Abstandes zwischen Sensor und Hubprofil zugrunde. Auf der linken Seite von Abbildung 34 kann abgelesen werden, dass eine Abstandsdifferenz von 0,1 mm zu einer Änderung des Messsignals um etwa 0,6 Magnituden führt. Dies entspricht in etwa der Signaländerung an der höchsten Stelle des Fahrwegs des Lasttragemittels. Die vermutete Abstandsänderung kann zum einen durch die Fertigungstoleranzen des Hubprofils und zum anderen durch eine Biegung unter Last hervorgerufen werden. Beim Anheben unter maximaler Geschwindigkeit (fünfte Messung in Abbildung 40) nimmt das Messsignal zunächst schnell zu und schwingt beim Abbremsen stark. Dies wird auf Schwingungen der Bauteile unter der Bremskraft zurückgeführt. Anschließend pendelt sich das Grundsignal auf einen Wert von ca. 0,4 Magnituden ein, ehe es sich beim schnellen Senken ein ähnliches Messsignal, wie beim Anheben, zeigt. Aus den Messungen am Flurförderfahrzeug wird geschlossen, dass die Vibrationen des Motors und ein langsames Vor- und Zurückfahren eine Wirbelstrommessung nicht beeinflussen. Es findet lediglich eine leichte Erhöhung des Grundsignals gegenüber dem ausgeschalteten Zustand statt. Beim Ändern der Hubhöhe beeinflussen Abweichungen des Abstandes zwischen Sensor und Hubprofil die Wirbelstrommessungen. Vor allem bei Schockbelastungen, wie beim Abbremsen von hoher Geschwindigkeit des Lasttragemittels, ergeben sich starke Beeinträchtigungen des Messsignals. Vor einem möglichen Einsatz der Wirbelstromtechnik zu Erkennung der Hubhöhe, muss die exakte Positionierung des Sensors in Relation zum Hubprofil sichergestellt werden. Die Konstruktion der Befestigung mit entsprechender Steifigkeit auszulegen, um bei Schockbelastungen nicht zu Schwingen. Eine Untersuchung der einzelnen Wirbelstrommesssignalkomponenten, aus denen die Magnitude abgeleitet wird, wird zeigen, ob der Einfluss einer Abstandsänderung zwischen Hubprofil und Sensor abgeschwächt werden kann. Hierdurch kann die Eignung zum Einsatz am Flurförderfahrzeug begünstigt werden.

Arbeitspaket 6: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Um den Prozess des Laserstrahldispersierens zur Hubhöhenfassung von Flurförderfahrzeugen aus wirtschaftlicher Sicht zu beurteilen, wird im Folgenden eine Analyse der Prozessgeschwindigkeiten und erwarteten Kosten durchgeführt.

Die im Vorhaben angestrebte Messauflösung von unter einem Millimeter wurde erreicht. Auch wenn die absolute Hubhöhenbestimmung nicht möglich ist, wurde eine unter idealen Bedingungen zuverlässige Methode entwickelt, die unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen und War-

tungsarm ist. Ferner wurde eine Möglichkeit geschaffen einen Plagiatschutz in Hubprofilen zu integrieren, welcher die Informationen direkt im Werkstoff speichert und ohne Kenntnis der genauen Prozessparameter des Herstellungsprozesses nicht zu kopieren ist. Der Plagiatschutzmechanismus kann auf andere Metallische Bauteile übertragen werden und bietet somit branchenübergreifend einen Mehrwert für kleine und mittelständische Unternehmen.

Zur Umsetzung des Laserstrahldispersierens von Hubprofilen ist eine Investition zur Beschaffung der nötigen Laseranlage zu tätigen. Die Kosten werden je nach Ausführung auf 100 - 200 k€ geschätzt. Enthalten ist ein entsprechender Laser, ein Achssystem mit drei Achsen, ein Pulverförderer und ein geeigneter Laserbearbeitungskopf mit optischen Komponenten. Die Kosten für Verbrauchsmaterialien sind vergleichsweise gering. So kostet ein Kilogramm des verwendeten Zirkoniumoxidpulvers ca. 300 €, was in Anbetracht der geringen verwendeten Menge von Zusatzmaterial zu vernachlässigen ist. Gleiches gilt für das verwendete Schutzgas. In den Untersuchungen in diesem Projekt wurde Argon als Schutzgas verwendet, ein Umstieg auf den günstigeren Stickstoff kann weitere Kosten einsparen. Zusätzlich kann Stickstoff über eigene Generatoren, von Zulieferern unabhängig, aus der Umgebungsluft gewonnen werden. Für die Implementierung der Erkennungstechnik am Flurförderfahrzeug oder zum Auslesen des Plagiatschutz ist ein Wirbelstrommessgerät nötig. Für die Anschaffung werden ca. 25 k€ geschätzt, wobei mit Rabatten durch höhere Abnahmemengen der Gabelstaplerfertiger zu rechnen ist.

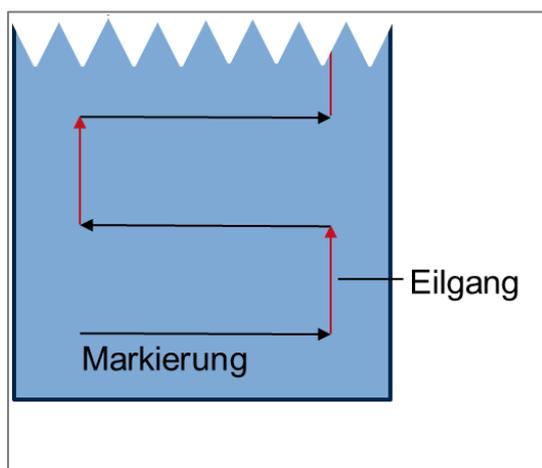


Abbildung 41: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Wege beim Laserstrahldispersieren von Hubprofilen

Ein wichtiger Aspekt zur Einschätzung der genannten Kosten ist der zu erwartende Durchsatz bei der Markierung von Hubprofilen. Zur Berechnung der Markierungsgeschwindigkeit werden die Prozessparameter aus den vorangegangenen Untersuchungen betrachtet. In Abbildung 41 sind schematisch die Fahrwege des Laserbearbeitungskopfes bei der Markierung von Hubprofilen dargestellt. Die eigentliche Lasermarkierung erfolgt mit einer Geschwindigkeit von 1000 mm/min, während der Eilgang zwischen den Lasermarkierungen mit der Maximalgeschwindigkeit der Portalanlage von 4000 mm/min zurückgelegt werden kann. Eine Lasermarkierung hat die Länge von 10 mm und der Abstand, der im Eilgang zurückgelegt wird, beträgt 2 mm. Es ergibt sich für den mittleren Vorschub über das Hubprofil eine

Geschwindigkeit von ca. 190 mm/min nach Formel (7). Der Prozess könnte hinsichtlich der Geschwindigkeit weiter optimiert werden, indem anstelle von Linien Punkte als Positionsmarkierung genutzt werden oder anstelle des Laserstrahldispersierens das Laserstrahlhärten mit einem Scannersystem genutzt wird.

$$v_{Hub} = \frac{S_{Hub}}{\frac{S_{Laser}}{v_{Laser}} + \frac{S_{Eil}}{v_{Eil}}} \quad (7)$$

Aufgrund der hohen Anschaffungskosten könnte zunächst auf einen Lohnfertiger der Lasermaterialbearbeitung zurückgegriffen werden. Durch die zum aktuellen Zeitpunkt relativ langsame Lasermarkierungsgeschwindigkeit, könnte sich zunächst ein Einsatz als Plagiatschutztechnik für kostenintensive Investitionsgüter empfehlen.

Ausblick

Im abgeschlossenen Vorhaben wurde ein auf Laserstrahldispersieren und Wirbelstromtechnik basierender Mechanismus zur Hubhöhenbestimmung entwickelt. Es wurde der Prozess zur Erstellung der Lasermarkierungen untersucht, sowie der Einfluss der Prozessparameter auf das Messsignal des Wirbelstrommessgeräts. Ein Konzept zur Hubhöhenbestimmung wurde entwickelt und untersucht. Auflösungen von $0,5 \text{ mm} \pm 0,11 \text{ mm}$ sind erreichbar. Der Fokus der Untersuchungen lag auf den Lasermarkierungen bzw. dem Einfluss auf das Wirbelstrommesssignal, daher wurden die Untersuchungen an Aufnahmen des Signals retrospektiv durchgeführt. Bei Speicherung der Messwerte in einer Datenbank bzw. Textdatei ist die Messfrequenz auf 100 Hz beschränkt, dies begrenzt auch die Auflösung. Die oben angegebene Auflösung wurde bei einer Messgeschwindigkeit von 2000 mm/min bestimmt, dies entspricht einem Messwert alle 0,33 mm. Die Positionsgenauigkeit wird hierdurch entsprechend eingeschränkt. Zur Erhöhung der Genauigkeit und Realisierung von Messgeschwindigkeiten im Bereich von 10 m/min, müsste die Auswertung auf Echtzeit angepasst werden. Messfrequenzen von bis zu 50 kHz sind mit dem verwendeten Messgerät realisierbar.

Mit durchschnittlich ca. 190 mm/min ist die Bearbeitungsgeschwindigkeit zum Lasermarkieren von Hubprofilen relativ gering. Eine Erhöhung der Geschwindigkeit könnte erreicht werden, wenn die Geometrie der Lasermarkierungen gekürzt oder zu einem Punkt geändert wird. Der Laser könnte entsprechen gepulst das relativ zum Laserbearbeitungskopf bewegte Hubprofil markieren. Der Verzicht auf Zusatzmaterial, also ein reines Härten oder Umschmelzen des Hubprofils, bietet weitere Optionen zur Optimierung der Bearbeitungsgeschwindigkeit. Die Eignung des Härten zur Detektion im Wirbelstrommesssignal wird in [28, 29] demonstriert. Beim Laserhärten könnten die Markierungen durch einen galvanometrischen Scanner eingebracht werden, was Geschwindigkeiten in der Lasermarkierung von 1000 mm/s und mehr ermöglichen würde. Ein weiterer Vorteil wäre die geringere Beeinflussung der Oberflächentopologie, da kein Zusatzmaterial auf der Schmelze angesintert wird.

Die Wirbelstromtechnik ist sehr sensitiv gegenüber Abstandsänderungen. Im Bereich der Hubhöhenbestimmung ist durch die angewandten Fertigungstoleranzen und Lastfälle am Lasttragemittel jedoch mit Abstandsänderungen zu rechnen, die das Messsignal erheblich beeinflussen. Dies zeigten auch die Versuche am Flurförderfahrzeug in diesem Vorhaben. Die Eignung der Wirbelstromtechnik zur Bestimmung von Hubhöhen hängt demnach davon ab, ob es den Unternehmen der Wirbelstromtechnik gelingt das komplexe Messsignal mit Fokus auf die Lasermarkierungen auszuwerten und die Effekte der Abstandsänderungen zu minimieren. Ferner zeigten die Versuche am Flurförderfahrzeug, dass Schockbelastungen, wie schnelles Abbremsen und Beschleunigen, zu starken Schwankungen im Messsignal führen. Die Schockbelastungen müssten minimiert und die Komponenten möglichst steif ausgelegt werden, um Schwingungen am Sensor zu vermeiden.

Bei wechselnden Temperaturbedingungen oder nach Anschalten bei längerer Pause ist eine häufige Neukalibrierung des Sensors unerlässlich, wie die Langzeitversuche in diesem Projekt gezeigt haben. Inwiefern der Einfluss der Temperaturdrift auf das Messsignal reduziert werden kann, müsste im Folgenden untersucht werden.

Grundsätzlich kann der Ansatz zur Hubhöhenbestimmung nicht nur am Flurförderfahrzeug eingesetzt werden. Der Einsatz am Hochregallager oder an Aufzügen ist ebenfalls denkbar. Großes Potential birgt der untersuchte Ansatz für den Plagiatschutz, da das Wirbelstrommesssignal durch

alle Prozessparameter des Laserstrahlprozesses und durch die Position der Markierungen beeinflusst werden kann. Die Anwendung beschränkt sich nicht auf Hubprofile, sondern könnte auf beliebige Produkte aus metallischen Werkstoffen angepasst werden. Vor allem im Bereich von kostenintensiven Investitionsgütern bietet dieser Ansatz einen Mehrwert für die Bauteilidentifikation.

Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Im Vorhaben wurde ein neuer Ansatz zur Hubhöhenbestimmung von Flurförderfahrzeugen entwickelt und untersucht. Der untersuchte Ansatz werkstoffinhärenter Messmarkierungen in Hubprofilen, die mittels Wirbelstromtechnik ausgelesen werden können, bietet die Möglichkeit einer wartungsarmen und gegen Umwelteinflüsse, wie Schmutz und Schmierfett, resistenten Hubhöhenbestimmung. Die Wirbelstrommesstechnik arbeitet dank der Möglichkeit hohe Messfrequenzen bereitzustellen zudem auch bei hohen Fahrgeschwindigkeit zuverlässig. Nach Überwindung der im Ausblick dargestellten verbleibenden Herausforderungen sind für die Unternehmen, insbesondere kmU, vieler Branchen Wettbewerbsvorteile zu erwarten.

In erster Linie profitieren Endanwender, also alle Unternehmen die Lagerhaltung betreiben, von der entwickelten Technologie. Ihnen wird ein verschleißarmes, präzises Hubhöhenmesssystem zur Verfügung gestellt, das Ausfallzeiten minimiert und den vorhandenen Lagerplatz durch die hohe Präzision ausnutzt. Die Hubhöhenbestimmung kann nicht nur an Flurförderfahrzeugen zum Einsatz kommen, sondern auch mit geringem Aufwand auf Hochregallagersysteme übertragen werden.

Die Hersteller von Hubprofilen erhalten die Möglichkeit ein Alleinstellungsmerkmal für ihre Profile zu implementieren. Aufgrund der werkstoffinhärenten Messmarkierungen können die Hubprofile herstellenden Unternehmen die nötigen Lasermarkierungen selbst einbringen, bevor die Profile weiterverarbeitet werden. Auf diese Weise erhöhen die Unternehmen ihren Anteil an der Wertschöpfungskette. Sollten insbesondere kmU, die Hubprofile herstellen, die Investitionskosten nicht aufbringen können, so besteht die Möglichkeit einen Lohnfertiger zu beauftragen. Die Lohnfertiger in der Lasertechnik, oftmals kmU, haben die Möglichkeit ihre vorhandene Anlagentechnik zu verwenden. Bieten die Unternehmen das Laserstrahldispersieren nicht an, so können Laseranlagen zum Auftragschweißen mit geringem Aufwand umfunktioniert werden. Die Investitionskosten für die kmU sind daher gering und einer schnellen Umsetzbarkeit der Forschungsergebnisse wird zugetragen.

Neben den Herstellern der Hubprofile profitieren die Hersteller der Flurförderfahrzeuge, da ihnen eine neue Technologie der Hubhöhenbestimmung zur Verfügung steht. Die dafür nötigen Sensoren werden von Herstellern in der Wirbelstromtechnikbranche gefertigt und setzen bei den Unternehmen Entwicklungsimpulse, um den neuen Markt für Ihre Messgeräte gerecht zu werden.

Durch die Vielfältigkeit der Einsatzmöglichkeiten der im Vorhaben entwickelten Lasermarkierungen profitieren nicht nur Hersteller der Hubprofile, sondern ggf. auch Hersteller von Investitionsgütern, die die Lasermarkierungen zum Plagiatschutz verwenden können. Das Wirbelstrommesssignal lässt sich über die Prozessparameter des Laserstrahldispersierprozesses individualisieren und Produktcodes können direkt in das Bauteil integriert werden. Im Laufe des Produktlebenszyklus können die Daten mit einem geeigneten Wirbelstrommessgerät ausgelesen und das Produkt zweifelsfrei identifiziert werden.

Angaben zu aus der Zuwendung finanzierten Ausgaben

Tabelle 5: Verwendung der Zuwendung

Wissenschaftliches und technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)	Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)	Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
155.588,41 €	34.775,00 €	-

Erläuterungen zum Personaleinsatz

Für die Durchführung des Vorhabens wurde die Ausgaben aus Tabelle 5 getätigt. Sie beinhalten den im Folgenden erläuterten Personaleinsatz. Ein Angestellter mit abgeschlossener wissenschaftlicher Hochschulausbildung (Wissenschaftlicher Mitarbeiter). Die Aufgaben dieses Mitarbeiters umfassten im Wesentlichen koordinative Tätigkeiten im Projektmanagement, die Planung und die Durchführung der Versuche sowie die Einweisung und die Betreuung studentischer Hilfskräfte. Zugleich oblag dem wissenschaftlichen Mitarbeiter die Verantwortung für die wissenschaftliche Auswertung der Versuche, die Beurteilung und die Dokumentation der erzielten Arbeitsergebnisse, sowie die Veröffentlichung der Vorhabenergebnisse. Der wissenschaftliche Mitarbeiter wurde hinsichtlich der Durchführung der experimentellen Versuchsführung von Technikern unterstützt. Die Aufgaben der Techniker umfassten dabei den Aufbau und die Inbetriebnahme von Versuchseinrichtungen, die Anleitung studentischer Hilfskräfte sowie die Durchführung spezieller Analysen, wie etwa elektronenmikroskopische Messungen oder metallographische Probenanalyse. Sowohl der wissenschaftliche Mitarbeiter, als auch die Techniker wurden durch studentische Hilfskräfte unterstützt. Unter Anleitung und Überwachung des wissenschaftlichen Mitarbeiters richteten studentische Mitarbeiter den Versuchsstand ein, führten mit diesem Versuche durch und beteiligen sich bei der Auswertung und Dokumentation der Versuche. Im Rahmen des Vorhabens bestand der Bedarf der Mitarbeit von studentischen Mitarbeitern. Die geleisteten Arbeiten waren für die Durchführung des Vorhabens erforderlich und entsprechen in angemessener Weise dem begutachteten und bewilligten Antrag.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren notwendig und angemessen um das Projektziel zu erreichen.

Plan zum Ergebnistransfer

Während der Projektlaufzeit von 01.04.2018 bis zum 28.02.2021 wurden vier Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses abgehalten. Die Ergebnisse wurden auf der VDMA Sitzung am 03.02.2021 präsentiert. Darüber hinaus wurden und werden die Ergebnisse bei Messeauftritten, Konferenzbeiträgen, Schulungsmaßnahmen und im Rahmen von studentischer Lehre und Arbeiten vermittelt. Ein Überblick über die Transfermaßnahmen ist in Tabelle 6 und Tabelle 7 gegeben

Tabelle 6: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Sitzungen des PA	PA-Mitglieder	LZH und Onlinesitzungen	23.11.2018
			27.03.2020
			02.10.2020
			03.03.2021
VDMA Sitzungen	VDMA-Mitglieder	Onlinesitzung	03.02.2021
Berufliche Weiterbildung	Teilnehmer aus Fachschulungen	LZH Laserakademie	Fortwährend
Studentische Lehre	Studenten	Vorlesungen zum Themengebiet der Lasertechnik	Ab Sommersemester 2019
Studentische Arbeiten	Studenten	Abschlussarbeiten und HiWi-Tätigkeiten	Fortlaufend während der Projektlaufzeit

Tabelle 7: Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
Schlussbericht	Öffentlichkeit	Bericht	31.03.2021
Konferenzbeitrag	Konferenzteilnehmer	Einreichung geplant für: ICALEO 40th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics	18-21.10.2021
Berufliche Weiterbildung	Teilnehmer aus Fach- schulungen	LZH Laserakademie	Fortwährend
Studentische Lehre	Studenten	Vorlesungen zum Themengebiet der Lasertechnik	Fortwährend

Durch das Forschungsvorhaben konnte das Prozessverständnis zum Laserstrahldispersieren erweitert und das Potential in Kombination mit der Wirbelstromtechnik aufgezeigt werden. Neben einer Umsetzung als Hubhöhenbestimmung liegt die Verwendung als Plagiatschutz nahe. Das Konzept zum Transfer der Projektergebnisse erscheint realisierbar und wird wie geplant verfolgt.

Literaturverzeichnis

1. Korf W, Mehloch P (2006) Vorrichtung zur Bestimmung der Hubhöhe eines Lasttragmittels an einem Flurförderzeug
2. Ritter S (1993) Verfahren zur Bestimmung der Hubhöhe eines höhenverstellbaren Lastaufnahmemittels eines Flurförderzeugs
3. Klatt A, Claussen H-P, Dos H-J, Baginski R (1995) Verfahren zur Bestimmung der Hubhöhe eines höhenverstellbaren Lastaufnahmemittels eines Flurförderzeugs
4. Korf W, Mehloch P (2006) Device for determining the lifting height of a load carrier on an industrial truck
5. Jahns C-P, Tödter J (2002) Lifting-height measuring device for warehouse truck, has flexible tube filled with fluid and attached to liftable component of truck, and connected to pressure sensor
6. Delius H, Fromme G (2007) Flurförderzeug mit einem anhebbaren Lastaufnahmemittel
7. Viereck V, Krüger-Basjmeleh T (2013) Industrial vehicle with lift height measurement
8. Zhang W (2011) Intelligent Energy Field Manufacturing. CRC Press
9. Steen WM, Mazumder J (2010) Laser Material Processing. Springer London, London
10. Claus G (2004) Transformation hardening with high power diode laser systems using single and multiple tracks. In: International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Laser Institute of America, p 1203
11. Müller K (1999) Werkstoffkundliche Qualifizierung des Randschichthärtens mit Laserstrahlung. Universität Bayreuth
12. Wagner K (2011) Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
13. Gasser A, Olainck C (2010) Maßgeschneiderte Oberflächen und Bauteile. Laser Tech J 7:22–26. <https://doi.org/10.1002/latj.201090087>
14. Weidlich N, Grüninger A, Meier O, et al (2008) Individual laser cladding for high pressure turbine blades. European Conference on Materials and Structures in Aerospace, pp 227–233
15. Pereira A de SP, van Hooff C, Pereira M, et al (2019) Laser metal deposition strategies for repairing flat and notched substrates made of Ni-based single crystalline superalloys. J Laser Appl 31:022513. <https://doi.org/10.2351/1.5096134>
16. Buchbender I, Hoff C, Hermsdorf J, et al (2020) Single-crystal height extension by Laser Metal Deposition of CMSX-4. Procedia CIRP 94:304–309. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.057>
17. Bernhard R, Neef P, Wiche H, et al (2021) Laser Cladding – Additive Manufacturing. In: Laser Cladding of Metals. Springer International Publishing, Cham, pp 1–8
18. Joanneum Research Forschungsgesellschaft (2006) Laserlegieren als innovatives Verfahren zur Werkstoffmodifikation. Laser Mag 24–25
19. Görgl R, Brandstätter E (2011) Laser Cladding vs. Laser Alloying – A Comparative Study. In: Proc. of the 3rd Int. Conf. on “Heat Treatment and Surface Engineering of Tools and

Dies." Wels, pp 74–83

20. Nölke C, Claußen S, Dudziak S, et al (2010) Reduced wear and adhesion forces by laser dispersing of ceramics. *Phys Procedia* 5:431–437. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.08.165>
21. Nölke C, Luecke M, Kaielerle S, et al (2014) Laser-dispersing of forging tools using AlN-ceramics. In: Dorsch F (ed) *High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications III - SPIE LASE*. San Francisco, p 89630L
22. Hilgenberg K, Behler K, Steinhoff K (2014) Localized dispersing of ceramic particles in tool steel surfaces by pulsed laser radiation. *Appl Surf Sci* 305:575–580. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.137>
23. Suragus GmbH SURAGUS Technologie der Wirbelstromprüfung. <https://www.suragus.com/de/technologie/wirbelstrom/>. Accessed 16 Feb 2021
24. Weber W (2002) Zerstörungsfreie Prüfung dickwandiger austenitischer Rohre und Rohrbögen mit fortschrittlicher Wirbelstromtechnik. Universität Hannover
25. Maier J, Ferstl G (2008) Wirbelstromprüfung an Walzprodukten. In: DACH-Jahrestagung. St. Gallen
26. Meier O, von der Haar C, Kallage P (2008) Laserschweißen kombiniert mit Wirbelstromtechnik. *Laser Tech J* 5:35–37. <https://doi.org/10.1002/latj.200890004>
27. Denkena B (2015) Die vernetzte Produktion. TEWISS Verlag, Hannover
28. Barton S, Mroz G, Reimche W, Maier HJ (2016) Inherent Load Measurement and Component Identification by multi-dimensional Coded Data in the Component's Subsurface Region. *Procedia Technol* 26:537–543. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.067>
29. Barton S, Reimche W, Maier HJ (2018) Three-Dimensional Data Storage in the Subsurface Region and Fast Read-Out Technologies for Determining the Mechanical Load History of Components. *HTM J Heat Treat Mater* 73:13–26. <https://doi.org/10.3139/105.110343>
30. Hunter JD (2007) Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Comput Sci Eng* 9:90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
31. Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, et al (2020) SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nat Methods* 17:261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
32. Itseez (2015) Open Source Computer Vision Library

Anhang

Tabelle 8: Untersuchte Prozessparameter zu Bestimmung der Maximumhöhe beim Laserstrahldispersieren mit Zirkoniumoxid

Laserleistung in W	Vorschub in mm/min	Pulverstrom in TDZ	Maximumhöhe in Magnitude
210	1000	7	0,061
250	1000	7	0,074
290	1000	7	0,045
330	1000	7	0,096
370	1000	7	0,136
410	1000	7	0,134
450	1000	7	0,135
490	1000	7	0,147
210	1000	9	0,051
250	1000	9	0,091
290	1000	9	0,109
330	1000	9	0,143
370	1000	9	0,145
410	1000	9	0,187
450	1000	9	0,17
490	1000	9	0,15
210	1000	11	0,115
250	1000	11	0,112
290	1000	11	0,128
330	1000	11	0,17
370	1000	11	0,186
410	1000	11	0,199
450	1000	11	0,199
490	1000	11	0,195
210	1000	13	0,095
250	1000	13	0,096
290	1000	13	0,099
330	1000	13	0,136
370	1000	13	0,158
410	1000	13	0,174
450	1000	13	0,177
490	1000	13	0,19
210	1000	15	0,114
250	1000	15	0,105
290	1000	15	0,138
330	1000	15	0,166
370	1000	15	0,202
410	1000	15	0,211
450	1000	15	0,225
490	1000	15	0,204
210	1000	17	0,096
250	1000	17	0,092
290	1000	17	0,088

Laserleistung in W	Vorschub in mm/min	Pulverstrom in TDZ	Maximumhöhe in Magnitude
330	1000	17	0,169
370	1000	17	0,209
410	1000	17	0,181
450	1000	17	0,212
490	1000	17	0,214
210	1000	19	0,055
250	1000	19	0,053
290	1000	19	0,092
330	1000	19	0,166
370	1000	19	0,163
410	1000	19	0,155
450	1000	19	0,186
490	1000	19	0,193
190	1000	10	n.b.
210	1000	10	n.b.
230	1000	10	0,093
250	1000	10	0,093
270	1000	10	0,129
290	1000	10	0,126
310	1000	10	0,176
330	1000	10	0,185
190	1000	15	0,094
210	1000	15	0,092
230	1000	15	0,096
250	1000	15	0,1
270	1000	15	0,113
290	1000	15	0,131
310	1000	15	0,159
330	1000	15	0,148
190	1000	20	0,101
210	1000	20	0,121
230	1000	20	0,119
250	1000	20	0,114
270	1000	20	0,145
290	1000	20	0,151
310	1000	20	0,174
330	1000	20	0,199
190	1000	10	0,157
210	1000	10	0,136
230	1000	10	0,138
250	1000	10	0,171
270	1000	10	0,179
290	1000	10	0,184
310	1000	10	0,211
330	1000	10	0,225
190	1000	15	0,093
210	1000	15	0,128

Laserleistung in W	Vorschub in mm/min	Pulverstrom in TDZ	Maximumhöhe in Magnitude
230	1000	15	0,123
250	1000	15	0,177
270	1000	15	0,199
290	1000	15	0,187
310	1000	15	0,213
330	1000	15	0,247
190	1000	20	0,084
210	1000	20	0,132
230	1000	20	0,134
250	1000	20	0,175
270	1000	20	0,203
290	1000	20	0,22
310	1000	20	0,215
330	1000	20	0,218
290	400	5	0,14
290	600	5	0,119
290	800	5	0,11
290	1000	5	0,086
290	1200	5	0,081
290	1400	5	0,076
290	1600	5	0,074
290	400	10	0,243
290	600	10	0,208
290	800	10	0,19
290	1000	10	0,144
290	1200	10	0,138
290	1400	10	0,14
290	1600	10	0,122
290	400	15	0,289
290	600	15	0,215
290	800	15	0,199
290	1000	15	0,168
290	1200	15	0,174
290	1400	15	0,177
290	1600	15	0,135