



Lehrstuhl für Umformtechnik

Masterarbeit

Design eines InSitu Laser-Ultraschall-
Prüfungsaggregats für den variablen
Einsatz bei unterschiedlichen
Fertigungstechniken

Oliver Lukas Tobin, BSc

Januar 2020



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 27.01.2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Oliver Lukas, Tobin".

Unterschrift Verfasser/in
Oliver Lukas, Tobin

Vorwort, Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meines Masterstudiums am Lehrstuhl für Umformtechnik an der Montanuniversität Leoben.

Für die Unterstützung, die Betreuung und den einen oder anderen guten Denkanstoß möchte ich mich an erster Stelle bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Stockinger herzlich bedanken. Aber auch meinen Kollegen am Lehrstuhl für Umformtechnik möchte ich für die freundliche Aufnahme und die vielfältige Hilfe danken.

Stellvertretend für RECENDT gebührt Dipl.-Ing. Bernhard Reitingner, der sich immer wieder Zeit für meine Fragen zum Thema Laserultraschall genommen hat, herzlicher Dank. Ohne seine Bemühungen wäre eine Einarbeitung in dieses mir bislang fremde Thema wesentlich schwieriger gewesen.

Für die Bereitstellung von Messausrüstung und die Hilfestellung bei elektrotechnischen Fragen sei Andreas Schmid und Thomas Winkler vom Institut für Elektrotechnik gedankt.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern Gerlinde und Kurt, die mir mein Studium ermöglicht und mich in all meinen Entscheidungen unterstützt haben.

Nicht zuletzt möchte ich meine Freunde erwähnen, die die Studienzeit in Leoben zu einer unvergesslichen gemacht haben – Dankeschön!

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Konzeptionierung, der Aufbau und die Überprüfung einer Anlage zur Laserultraschallmessung beschrieben. Die Anlage dient vorrangig zur Erweiterung der Prüfmöglichkeiten eines thermomechanischen Prüfaggregats vom Typ Gleeble 3800. Nach einer Recherche zu Grundlagen der Laserultraschallprüfung wird auf das Prüfaggregat und der Stand der Technik eingegangen. Die Anforderungen an die zu entwickelnde Anlage werden gemeinsam mit den Umwelteinflüssen untersucht, sodass im nächsten Schritt der mechanische Aufbau und die ausgewählten Komponenten vorgestellt werden. Da die zu entwickelnde Anlage bei mechanischen Simulationen nachgeführt werden muss, wird die Entwicklung einer Steuerungssoftware beschrieben, die eine Anbindung zur Steuerung der Gleeble herstellt. Anschließend wird der Aufbau der Anlage zu Demonstrationszwecken und die Verifizierung der Anlage anhand von Testfahren mit einem Kamerasystem dokumentiert. Dabei wird gezeigt, dass die geforderte Qualität der Nachführung für die geforderten Stauchversuche erreicht werden konnte. Abschließend erfolgt ein Ausblick über die notwendigen Schritte zur Fertigstellung und in-Dienst-Stellung der Anlage, wobei auch auf mögliche alternative Anwendungen bei anderen Prüfmaschinen eingegangen wird.

Abstract

This thesis discusses the design, setup and testing of a device used for laser ultrasonic measurements. The main purpose of the device is to expand the testing capabilities of a thermomechanic simulator type Gleeble 3800. After a literature research on the basic concepts of laser ultrasonics, the thermomechanic simulator and the state of the art are reviewed. The requirements and environmental factors affecting the design of the device are gathered and discussed. In the next step, the developed design and its main components are presented. Since the device has to move simultaneously with the stroke of the Gleeble during mechanical tests, the development of a control software that allows the coupling of the device and the Gleeble is described. Subsequently, the assembly and setup of the device for testing purposes is addressed. The ability of the device to follow the Gleeble stroke with the required precision is assessed using a camera system mounted on the device. It is shown that for the predefined type of bulge experiments, the tracking quality is sufficient. Finally, an overview of steps to finalize the device and put it to a ready-to-use state is given. Also, the potential of appliances with testing machines other than the Gleeble is reviewed.

Inhalt

1	Einleitung.....	7
1.1	Motivation.....	7
1.2	Technik der Laserultraschallmessung.....	8
1.3	Prüfaggregat Gleeble 3800	20
1.4	Stand der Technik.....	22
2	Projektierung der LUS-Anlage	23
2.1	Anforderungen und Einsatzbereich.....	23
2.2	Umwelteinflüsse.....	27
3	Mechanischer Aufbau der LUS-Anlage	28
3.1	Stages.....	29
3.2	Positionierer	32
3.3	Grundrahmen und Türen	32
3.4	Sicherheitseinrichtungen	33
3.5	Fenster	34
4	Regelungstechnik und Software.....	34
4.1	Akquisition der Positionsdaten	36
4.2	Verbindung mit den Stages.....	37
4.3	Software.....	37
5	Inbetriebnahme und Test	39
5.1	Problem mit Massenschleife	41
5.2	Qualität der Nachführung.....	42
5.3	Zuverlässigkeit.....	45
5.4	Vakuumdichtheit.....	45
6	Fazit und Ausblick.....	45
6.1	Ausständige Erweiterungen und mögliche Verbesserungen	45
6.2	Weitere Anwendungsmöglichkeiten	47
7	Literaturverzeichnis.....	48
8	Abbildungsverzeichnis.....	52

1 Einleitung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Anlage zur Laserultraschallmessung (im weiteren Verlauf als „LUS-Anlage“ bezeichnet) zu entwerfen und aufzubauen, welche insbesondere auf den Einsatz mit einer thermomechanischen Prüfmaschine vom Typ Gleeble 3800 abgestimmt ist. Die Gleeble 3800 ist eines der Aggregate welches am Lehrstuhl für Umformtechnik für produktionsnahe Versuche Verwendung findet.

In dieser Einleitung wird auf die Motivation zum Bau einer solchen Anlage eingegangen. Anschließend werden die Technik der Laserultraschallmessung für Festkörper und das betrachtete Prüfaggregat, die Gleeble 3800, näher erläutert. Unter diesen Gesichtspunkten soll abschließend der derzeitige Stand der Technik besprochen werden.

In den weiteren Kapiteln werden zunächst Anforderungen und Umwelteinflüsse gesammelt. Danach wird die Lösung für die gestellte Aufgabe erarbeitet und diskutiert. Schließlich erfolgt ein Einblick in den derzeitigen Ausbauzustand der LUS-Anlage („Demonstrator“) und eine Auseinandersetzung mit den nötigen Schritten zur Fertigstellung.

1.1 Motivation

Durch den konstanten Trend in Maschinenbau und Fertigungstechnik, Bauteile hinsichtlich Leichtbau, verbesserter Funktion oder Kosteneffizienz zu optimieren, ergeben sich neue Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe und deren Verarbeitung. Am Lehrstuhl für Umformtechnik werden unterschiedliche Prüfaggregate zur Durchführung von Experimenten unter produktionsnahen Bedingungen eingesetzt. Dabei können sowohl Probengeometrien als auch Temperaturführung und die mechanische Umformung in einem hohen Bereich variiert werden und deren Einflüsse auf das Fertigungsergebnis dargestellt werden. Von besonderem Interesse im Hinblick auf moderne Verarbeitungsmethoden sind hierbei Vorgänge, die während des Versuchs oder unmittelbar danach ablaufen. Dazu zählen beispielsweise Rekristallisation, Kornwachstum, Phasenumwandlungen, Bildung oder Auflösung von Eigenspannungen oder das Entstehen von Defekten.

Traditionell sind diese Größen nur nach einem erfolgten Experiment darstellbar, etwa durch das Herstellen von Schliffen (Kristallstruktur, Defekte) oder durch Anbringen von Dehnmessstreifen (Eigenspannungsmessung). Diese und andere Methoden kosten einerseits Zeit und bieten andererseits nur eine beschränkte Sicht auf die Situation im Bauteil. So ist z.B. die Gefügeentwicklung beim Schmieden oder Schweißen ein komplexer Prozess, der neben vieler anderer Variablen vor allem eine Funktion der Zeit ist. Die Herstellung eines Schliffes Stunden nach Versuchsende vermag somit nicht mehr als den Endzustand abzubilden. Wertvolle Information über den Prozessablauf ist nicht zugänglich.

Daher besteht ein großes Bestreben, die genannten Eigenschaften „InSitu“ zu überwachen, also die Messung während des Prozesses durchzuführen. Dadurch werden die Messergebnisse um eine zeitliche Dimension erweitert und es können neue Erkenntnisse über den Prozess gewonnen werden. Prinzipiell eignet sich die Technik der Ultraschallmessung zur Ermittlung dieser Prozessgrößen sehr gut. Durch Messung von Schallgeschwindigkeit bzw. der Schallschwächung beim Durchwandern des Prüfstücks kann nach sorgfältiger Kalibrierung auf die genannten Parameter rückgeschlossen werden. [1] Die klassische Ultraschallmessung stößt dort an ihre Grenzen, wo die Ankoppelung der piezoelektrischen Schallwandler an das Bauteil bzw. das Prüfstück nicht möglich ist. Dies kann einerseits durch die Geometrie gegeben sein, andererseits

durch die rauen Umgebungsbedingungen, die bei den genannten Fertigungstechnologien auftreten. Es ist leicht vorstellbar, dass die Ankoppelung eines Schallwandlers an eine glühende oder verzünderte Probe aussichtslos ist. Die Laserultraschall-Technologie stellt in solchen Fällen eine Alternative dar, mit der auch unter solchen Verhältnissen eine Messung an Werkstücken und Proben InSitu vollzogen werden kann.

1.2 Technik der Laserultraschallmessung

Die Laserultraschallmessung ermöglicht es, berührungslos Schallwellen in ein Bauteil einzubringen und sie ebenso berührungslos zu detektieren.

Unabhängig von der Methode der Anregung und Detektion des Schalls werden im Folgenden die Grundcharakteristiken von Ultraschall in Festkörpern zusammengefasst. Anschließend werden Methoden zur Anregung und Detektion von Schall mittels Laserlicht zusammengefasst. Den Abschluss bilden eine Vorstellung unterschiedlicher Messprinzipien und einige Beispiele aus der Praxis.

1.2.1 Ultraschall in Festkörpern

Das technisch relevante Frequenzspektrum für Ultraschall reicht von der menschlichen Hörgrenze von etwa 20 kHz bis zu einigen 100 MHz. [2] Die beiden maßgeblichen Parameter, die bei einer Ultraschallmessung bestimmt werden können, sind die Geschwindigkeit und die Schwächung des Schalls beim Durchgang durch das Bauteil. [3]

In Festkörpern kann sich Schall als Longitudinalwelle (Druckwelle) oder als Transversalwelle (Scherwelle) ausbreiten. Je nach Wellentyp ergeben sich folgende Schallgeschwindigkeiten: [1]

$$c_{lon} = \sqrt{\frac{E(1-\vartheta)}{\rho(1+\vartheta)(1-2\vartheta)}} \quad (1)$$

$$c_{trans} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\vartheta)}} \quad (2)$$

Hierbei ist E der Elastizitätsmodul, ρ die Dichte und ϑ die Querkontraktionszahl des Materials. Hierbei muss gesagt werden, dass diese einfachen Formeln nicht allgemein gelten. Für die Ausbreitung in bzw. entlang der Oberfläche endlich großer Körper werden die Verhältnisse komplexer und der komplette Elastizitätstensor muss zur Berechnung verwendet werden. [3] [4] Geht man von bekannter Schallgeschwindigkeit aus, lässt sich die Laufzeit einer Schallwelle durch eine gegebene Materialstärke s berechnen mit:

$$t = \frac{s}{c} \quad (3)$$

Da Dichte und Elastizitätsmodul Funktionen der Materialtemperatur und der Kristallstruktur sind, lassen sich über eine Beobachtung der Schalllaufzeit Phasenumwandlungen, Temperaturänderungen oder – durch Umkehrung von Formel 3 – die Materialdicke bei bekannter Schallgeschwindigkeit bestimmen.

Der Energieverlust, den eine Schallwelle zwischen Erzeugung und Detektion erfährt, bezeichnet man als Schallschwächung. [5] Die Schwächung ist einerseits auf Absorption der Energie im Festkörper zurückzuführen. Unter anderem haben die innere Struktur und die Frequenz des

Schalls einen starken Einfluss auf die Höhe dieser Absorption. [2] Andererseits kann eine Schwächung auch durch Streuung und Reflexion der Schallwellen an Grenzflächen innerhalb des Festkörpers auftreten. Solche Grenzflächen können z.B. Korngrenzen, nichtmetallische Einschlüsse, Poren, Lunker oder Risse sein. Im Gegensatz zur Absorption tritt hier kein Energieverlust an der Schallwelle im eigentlichen Sinne auf, allerdings erreicht nur ein Teil der erzeugten Schallenergie den Detektor. Durch Charakterisierung der Schallschwächung ist es möglich, einen Rückschluss auf die Entwicklung der inneren Struktur von Materialien zu ziehen. [6] [7]

1.2.2 Schallerzeugung

Die Schallerzeugung mittels Lasern beruht auf der Energieabsorption der optischen Energie eines Laserpulses an der Oberfläche des Festkörpers. Im Unterschied zur herkömmlichen Ultraschallmessung kann diese Energieübertragung ohne Koppelung an die Probe erfolgen. Werden Pulse mit der Pulsdauer t und der Pulsenergie E auf einen Oberflächenpunkt der Fläche A gerichtet, lässt sich deren Leistungsdichte definieren:

$$P := \frac{E}{tA} \quad (4)$$

Abhängig von der Leistungsdichte erfolgt die Schallerzeugung auf zwei Arten, wobei der Übergang von den Versuchsbedingungen abhängt, aber in der Literatur im Bereich von 10 MW/cm^2 angegeben wird. [2] [4]

- **Thermoelastisch:** Bei niedriger Leistungsdichte wird der beleuchtete Oberflächenpunkt schlagartig erwärmt und expandiert, bleibt jedoch im festen Zustand. Die dabei erreichte Eindringtiefe der Erwärmung ist durch den für Licht hohen Schwächungskoeffizienten von Metallen und die kurze Pulsdauer zwischen Millisekunden und Nanosekunden sehr gering. Scruby und Drain errechnen mit den Wärmeleitungskoeffizienten für Stahl und Aluminium eine signifikante Erwärmung im Bereich der ersten $2\text{-}3 \mu\text{m}$ der Oberflächenschicht. [2] Nimmt man näherungsweise eine rein oberflächliche Erwärmung an und betrachtet die Auswirkung der thermischen Expansion, muss beachtet werden, dass an einer freien Bauteiloberfläche ein ebener Spannungszustand vorherrscht, bei dem keine Bewegungsbehinderung senkrecht zur Oberfläche besteht. Daher wird durch die Expansion eine radiale Druckwelle erzeugt, die weitgehend in der Oberfläche verläuft. Diese Lösung wird von White näher diskutiert. [8] Wie Scruby und Drain weiter ausführen, entspricht diese Betrachtung nicht der Realität, da in der Praxis sehr wohl auch eine Ausbreitung senkrecht zur Oberfläche stattfindet. (vgl. Abbildung 1) Diese lässt sich durch die nicht unendlich kleine Dicke der erwärmten Schicht erklären. Die Charakteristik lässt sich außerdem durch das Aufbringen von Beschichtungen verändern, die durch geringe optische Schwächungskoeffizienten ein tieferes Eindringen der optischen Energie ermöglichen und durch feste Verbindung mit dem Grundmaterial den ebenen Spannungszustand aufheben. [9] Dadurch und durch andere Faktoren lässt sich die ins Bauteil eingeleitete Schallwelle auf verschiedene Arten steuern. [10] Die Amplitude des erzeugten Schalls ist proportional zur Pulsenergie, hängt jedoch nicht von der Leistungsdichte ab. [11] Da keine Phasenumwandlung des Werkstoffs erfolgt, ist die thermoelastische Schallerzeugung zerstörungsfrei.
- **Ablativ:** Bei hoher Leistungsdichte erfolgt eine so starke Erwärmung, dass eine Phasenumwandlung und Verdampfung von Material stattfindet bzw. ein Plasma gebildet wird. Durch die hohe Leistungsdichte und die kurzen Pulse spielt die Wärmeleitung innerhalb des

Materials eine vernachlässigbare Rolle. Die Menge des umgewandelten Materials kann durch Vergleich von Verdampfungswärme und Pulsenergie abgeschätzt werden. [2] Der durch Ablation auftretende Massenverlust am Körper erzeugt gemäß der Impulserhaltung einen Rückstoß, der eine Schallwelle im Körper anregt. Scruby und Drain errechnen für Stahl und Aluminium bei Leistungsdichten von 100 MW/cm^2 Oberflächendrucke von ca. 50 MPa . [2] Der Kraftstoß führt zu einer Ausbreitung von Longitudinal – und Transversalwellen im Festkörper, qualitativ in Abbildung 2 dargestellt. Durch die ablativ Schallerzeugung entsteht ein Materialabtrag am Prüfstück, weswegen das Verfahren nicht zerstörungsfrei ist. Ready gibt für einen 44 ns langen Laserpuls von 10^9 W/cm^2 je nach Metall eine Abtragtiefe zwischen 1 und $4 \text{ }\mu\text{m}$ an. [12] Da je nach Versuchsdauer und Messrate zahlreiche Pulse erzeugt werden, ist die Beschädigung der Oberfläche ein Parameter, der nicht außer Acht gelassen werden darf. Ein begrenzender Faktor bei der Erzeugung einer möglichst hohen Schallleistung durch Ablation stellt die Abschirmung der Oberfläche durch das gebildete Plasma selbst dar. [9] [12] Da dieses Plasma mit der Laserstrahlung in Wechselwirkung steht und diese absorbiert, kann nur noch wenig Strahlungsleistung die Oberfläche erreichen. Scruby und Drain beschreiben diesen Effekt jedoch positiv im Hinblick auf die Laserultraschallprüfung, da weniger Zerstörung an der Oberfläche auftritt.

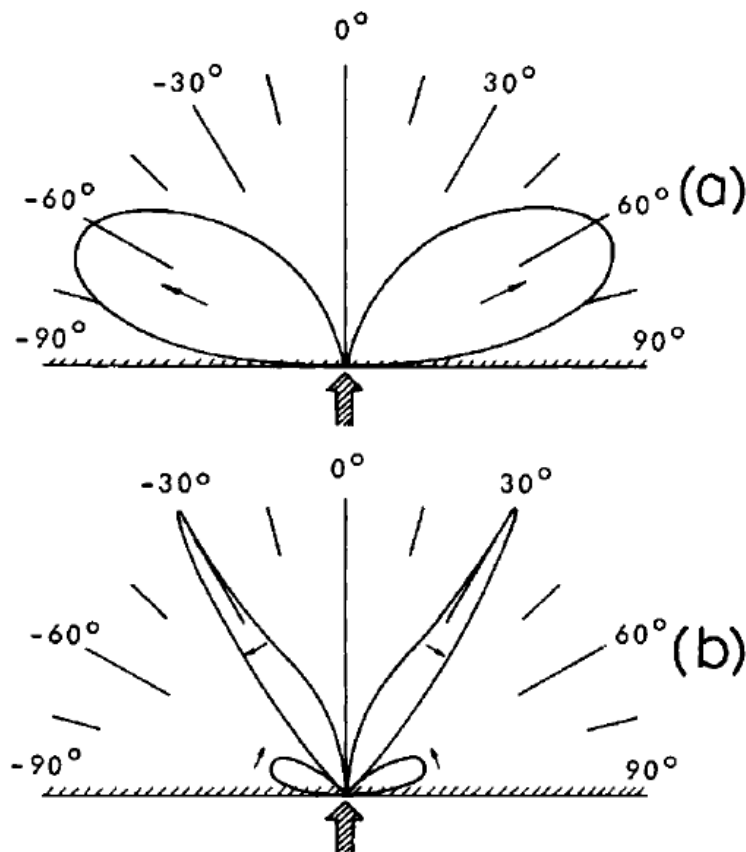


Abbildung 1: Richtungsabhängige Schallintensität durch thermoelastische Schallerzeugung berechnet für Longitudinalwellen (a) und Transversalwellen (b) nach [9]

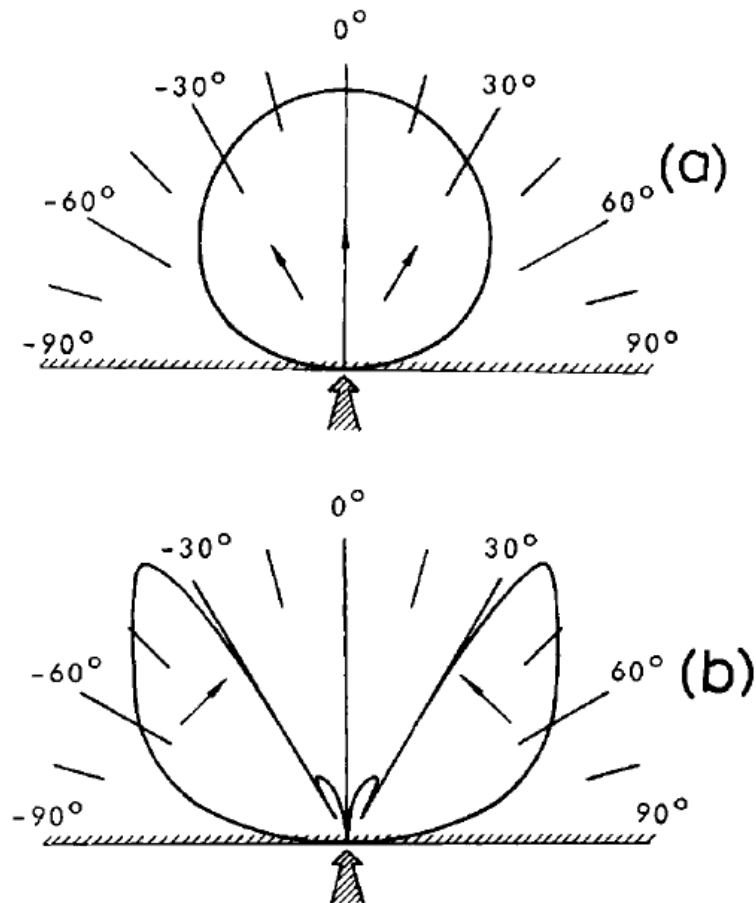


Abbildung 2: Richtungsabhängige Schallintensität durch einen Kraftstoß bei Ablation berechnet für Longitudinalwellen (a) und Transversalwellen (b) nach [9]

Vergleicht man die Schallerzeugung der beiden Anregungsmechanismen, wird erkennbar, dass die thermoelastische Schallerzeugung hauptsächlich Longitudinalwellen nahe der Oberfläche erzeugt, während bei der Ablation Longitudinalwellen entstehen, die sich am stärksten senkrecht zu dieser ausbreiten. Neben Volumenwellen können bei beiden Arten der Schallerzeugung auch Oberflächenwellen erzeugt werden, die wiederum andere Charakteristiken aufweisen. Diese werden beispielsweise bei Scruby und Drain [2] und Hutchins [9] näher behandelt.

Bei den zur Anregung verwendeten Lasern handelt es sich um gepulste Systeme. Sie zeichnen sich durch hohe Pulsenergien und kurze Pulsdauern aus. Das Spektrum des erzeugten Schalls ist abhängig von der Dauer der Laserpulse und liegt für gängige Pulsdauern zwischen 5 und 30 Nanosekunden im Bereich von 1-20 MHz. [2] [4] [13] Das Strahlprofil soll wohldefiniert sein, im Idealfall kreisförmig mit starkem Abfall an den Rändern. [4]. Die verwendete Wellenlänge und die Monochromatik sind von untergeordneter Bedeutung. Um eine effiziente Schallerzeugung zu erreichen, sollte allerdings eine Wellenlänge gewählt werden, bei der die zu prüfenden Materialien eine brauchbare Absorption zeigen. [2] Wie in Abbildung 3 gezeigt wird, steigt die Absorption von Licht bei den Metallen in der Regel mit fallender Wellenlänge an.

Für gewöhnlich werden heutzutage Nd:YAG-Laser eingesetzt, die entweder von einer Blitzlampe (bis ca. 100 Hz Wiederholrate) oder durch Diodenlaser gepumpt werden. Für die Schallerzeugung in Metallen kann deren Wellenlänge mittels Frequenzverdoppelung von 1064 nm auf 532 nm reduziert werden, sodass die Absorption gesteigert wird. Weitere Eckdaten typischer Anregungssysteme sind in Kapitel 1.4.1 und 2.1.2 zu finden. Die Verwendung von Excimerlasern, die je nach Lasermedium zwischen 126 und 351 nm Wellenlänge produzieren, ist ebenfalls

dokumentiert. [14] Für Nichtmetalle wie Keramik oder organische Materialien stellen CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10.6 μm eine leistungsfähige Alternative dar. [14]

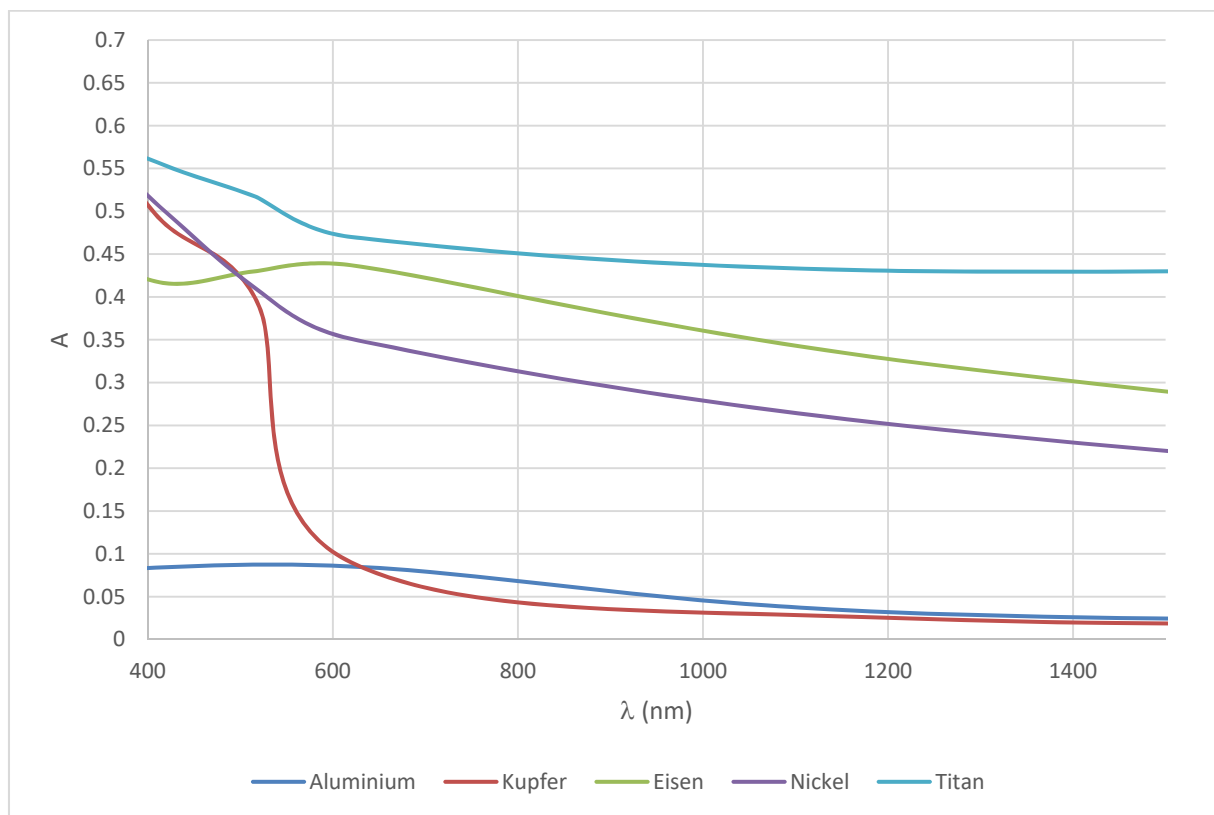


Abbildung 3: Absorptionsfaktor ausgewählter Metalle in Abhängigkeit von der Wellenlänge nach [15] für Einstrahlung senkrecht zur Metalloberfläche

1.2.3 Schalldetektion

Die Schalldetektion unter Verwendung von Lasern macht sich zunutze, dass Schallwellen zu einer Schwingung der Grenzflächen eines Körpers führen. Diese Bewegung lässt sich über unterschiedliche Methoden detektieren, wodurch die Darstellung des gemessenen Schalls möglich wird. Wie von Monchalin ausgeführt wird, lassen sich die Verfahren zur Detektion in zwei Hauptgruppen unterteilen, nämlich mit oder ohne die Verwendung von Interferometrie. [16] Methoden, die mit Interferenz arbeiten, bedienen die Wellennatur des Lichts, um Phasen – oder Frequenzverschiebungen zwischen zwei Lichtstrahlen zu ermitteln. Die dafür verwendeten Lichtquellen haben eine wesentlich höhere Anforderung an die klassischen Eigenschaften von Lasern als es bei der Anregung der Fall ist. Monochromatik und Kohärenz der Lichtquelle sind für die Funktion von interferometrischen Systemen Voraussetzung. [2] Die im Folgenden vorgestellten Methoden sind hauptsächlich auf eine senkrechte Verschiebung der beobachteten Oberfläche, also durch die Auswirkungen von Longitudinalwellen durch Ablation, empfindlich. [4] Auf die Messung von Transversalwellen, beispielsweise diskutiert von Monchalin et al. [17] wird hier nicht näher eingegangen.

- **Kantenverfahren:** Das Kantenverfahren ist eine Methode, die ohne Interferometrie auskommt. Hier wird ein von der Probenoberfläche reflektierter Laserstrahl teilweise von einer scharfen Kante abgedeckt und trifft einen Fotodetektor. Bei Deformation der Oberfläche durch Schall wird der Strahl abgelenkt und mehr oder weniger durch die Kante abgedeckt. Die

Helligkeitsschwankungen lassen einen Rückschluss auf die Schallsignale zu. Die Technik ist einsetzbar für Volumen - und Oberflächenwellen. Sie ist einfach, verlangt aber nach einer polierten Probenoberfläche. [16] [18]

- **Michelson-Interferometer:** Die einfachste Interferometer-Anordnung stellt das Michelson-Interferometer dar, siehe Abbildung 4. Es besteht aus einem Strahlteiler, der einen Lichtstrahl in einen Detektionsstrahl und einen Referenzstrahl aufteilt. Nach Reflexion der Teilstrahlen an der Probenoberfläche bzw. an einem Spiegel kehren sie zum Strahlteiler zurück und interferieren. Je nach Phasenlage der Teilstrahlen zueinander ergibt sich konstruktive oder destruktive Interferenz. Der überlagerte Strahl erreicht einen Fotodetektor, der dessen Intensität aufzeichnet. Schwingt die Probenoberfläche im Schall, entsteht eine Phasenverschiebung, die letztlich zu einem Helligkeitsunterschied am Detektor führt. Wird eine Messung an einer Oberfläche vollzogen, die Rauheiten im Bereich der Wellenlänge aufweist, entsteht bereits durch die unterschiedlichen Pfadlängen im Strahl ein zufälliges Muster von konstruktiven und destruktiven Interferenzen, bekannt als Speckle. [19] Wenn der Detektionsstrahl nicht sehr scharf fokussiert wird, geht ein großer Teil der zu detektierenden Interferenz im Rauschen verloren. [14] Bei genauem Fokus auf einen Speckle ist wiederum die Lichtausbeute so klein, dass der Signal-Rausch-Abstand eine genaue Messung schwierig macht. [2] [13] Die Anwendbarkeit des Systems bei rauen Oberflächen ist damit eingeschränkt.
- **Verbessertes Michelson-Interferometer:** Ein anderer Nachteil am Michelson-Interferometer ist, dass beim Wiedereintritt der Teilstrahlen in den Strahlteiler ein Teil des Lichts zurück in die Lichtquelle strahlt. Dies verringert einerseits die Effizienz und kann andererseits zu Instabilitäten im Laser führen (Feedback). Eine Verbesserungsmöglichkeit ist die Verwendung von polarisierenden Strahlteilern und Verzögerungsplatten, wodurch das Rückstrahlen verhindert werden kann. Alternativ kann mit Retroreflektoren gearbeitet werden, die einen räumlichen Versatz von abgehendem und ankommendem Strahl im Strahlteiler hervorrufen. Eine weitere wichtige Verbesserung ist die Differenzialmessung mittels zweier Fotodetektoren, die hinter einem weiteren polarisierenden Strahlteiler sitzen. Dies entkoppelt das Messergebnis von der tatsächlichen Polarisationsrichtung und von Störungen. [2] Ein solcher Aufbau wird in Abbildung 5 gezeigt. Weitere Verbesserungen und Details zum Michelson-Interferometer werden ebenfalls von Scruby und Drain ausgeführt.

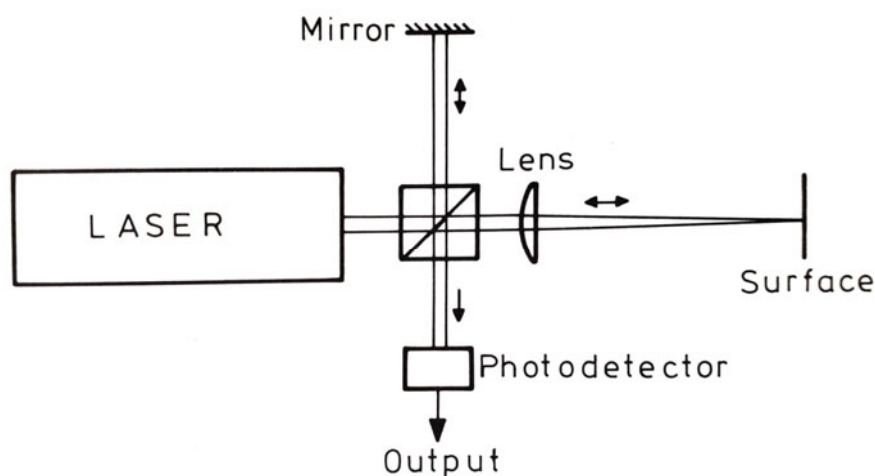


Abbildung 4: Michelson-Interferometer nach [2]

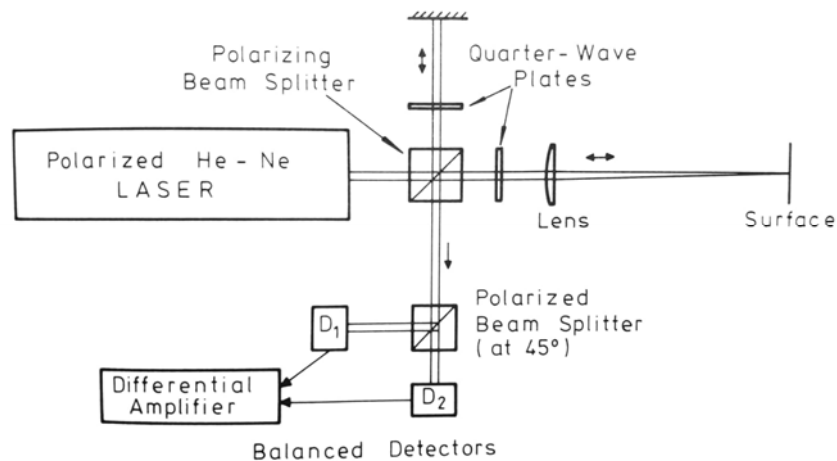


Abbildung 5: Verbessertes Michelson-Interferometer mit polarisierenden Strahlteilern und Differenzialmessung nach [2]

- **Stabilisierte Interferometer:** Der Hauptgrund, warum die bisher vorgestellten Systeme nicht für Messungen unter praxisnahen Bedingungen einsetzbar sind, ist ihre Empfindlichkeit gegenüber Vibrationen und anderen, niederfrequenten Bewegungen der Probenoberfläche. In der Literatur werden zahlreiche Methoden diskutiert, mit denen dieses Hindernis umgangen werden kann. Eine einfache Methode sieht vor, den Referenzspiegel absichtlich mit einer niederfrequenten Schwingung mit einer Amplitude größer als $\lambda/4$ und einer Frequenz von 20 – 100 kHz (also niedrig verglichen mit Ultraschall im MHz-Bereich) anzuregen und dann jene Messungen mit der höchsten Empfindlichkeit und Signalamplitude auszuwählen. Dieses, von Mezrich und Vilkomerson [20] vorgestellte System erfordert eine kontinuierliche Schallerzeugung und funktioniert nicht mit den kurzen Schallpulsen, die bei der Anregung von Laserultraschall entstehen. Dem gegenüber stehen Systeme, die aktiv stabilisiert werden, indem die Pfadlänge des Referenzstrahls über eine Feedbackschleife an das Detektorsignal gekoppelt wird. Dies kann entweder elektromechanisch durch piezoelektrische Wandler oder durch einen elektrooptischen Modulator erfolgen. Generell sind diese Techniken durch den aktiven Regelkreis und dessen Stabilitätsgrenzen nicht geeignet für Störungsamplituden größer als $\lambda/8$. [2]
- **Geschwindigkeits-Interferometer:** Die oben genannten Interferometer arbeiten mit der Überlagerung zweier phasenverschobener Strahlen. Alternativ gibt es auch Systeme, die nach dem Prinzip des Dopplereffekts arbeiten. Durch die Geschwindigkeit, mit der die zu prüfende Oberfläche im Schall schwingt, entsteht eine Dopplerverschiebung zwischen erzeugtem und reflektiertem Strahl. Die Problematik von niederfrequenten Vibrationen und Bewegungen kommt bei dieser Methode nicht zu tragen, da die niederfrequenten Störungen keine nennenswerte Dopplerverschiebung hervorrufen. [13] [21] Weiters kann mit diesen Systemen auch bei Speckles auf rauen Oberflächen eine hohe Lichtausbeute erzielt werden, ohne die Messung zu stören. [2] Eine Möglichkeit, ein Geschwindigkeitsinterferometer aufzubauen, ist in Abbildung 6 dargestellt. Der von der Probe reflektierte Strahl hat in Bezug auf die Grundfrequenz abwechselnd (nach einer halben Periodendauer der Schallwelle) eine leicht erhöhte oder verringerte Frequenz. Um diese beiden Extremzustände interferometrisch zu vergleichen, müssen sie gemeinsam überlagert werden. Dies gelingt, indem ein Teilstrahl im oberen Strahlteiler erzeugt und entlang eines Pfades der Länge L geschickt wird. L wird idealerweise so gewählt, dass bei Rückkehr des Teilstrahls der andere Extremzustand gerade am anderen Eingang des unteren Strahlteilers eintritt. Monchalin gibt L in Abhängigkeit der

Schallfrequenz mit $L = c/4f$ an. [13] Setzt man hier Frequenzen im Bereich der MHz ein, wird erkennbar, dass L im Bereich von mehreren Metern liegt, wodurch das System sehr unhandlich wird. Außerdem muss L von einem stabilen mechanischen Aufbau in sehr engen Toleranzen gehalten werden, da sich ansonsten die Phasenlage der Strahlen verschiebt. Dieser Umstand schränkt die praktische Verwendbarkeit auf hohe Schallfrequenzen ab 100 MHz ein, was in der Prüfung von Metallen zu hoher Schwächung führt.

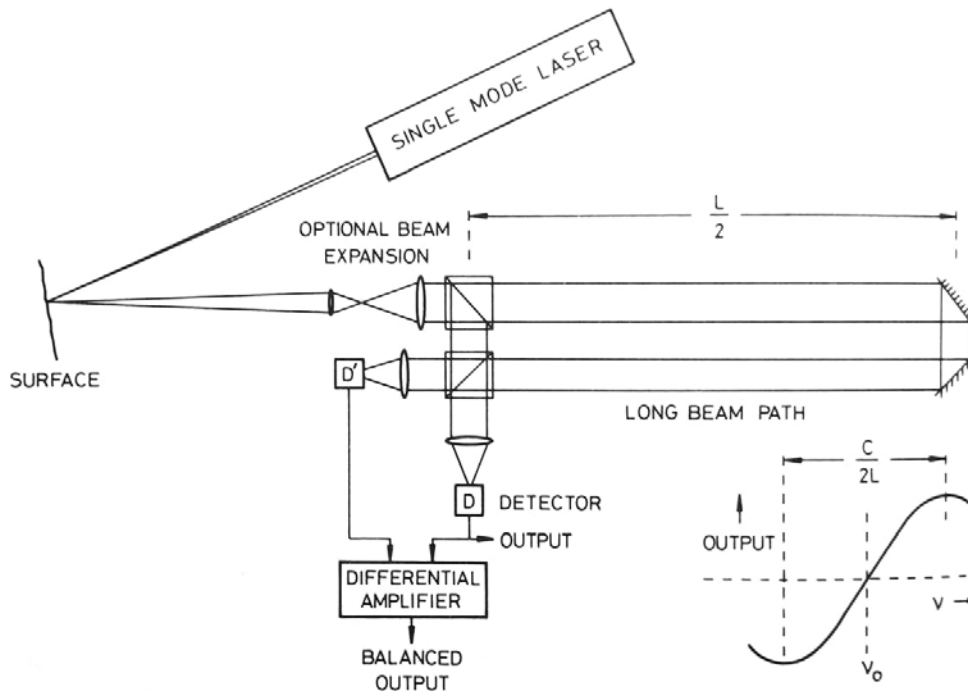


Abbildung 6: Geschwindigkeits-Interferometer nach [2]

- Fabry-Perot-Interferometer:** Monchalin stellte 1986 ein System vor, bei dem die große Pfadlänge L durch ein Fabry-Perot-Interferometer ersetzt wird. [13] Der Lichtstrahl wird hierbei viele Male zwischen hochreflektierenden Flächen gespiegelt, vgl. Abbildung 7a. Der Aufbau ist also ein optischer Resonator, den nur nennenswerte Mengen an Licht verlassen, wenn konstruktive Interferenz entsteht, vgl. Abbildung 7b. Dies ist der Fall, wenn der Plattenabstand $h = n\lambda/2$ gesetzt wird, wobei n eine natürliche Zahl ist. Für die Verwendung zur oben beschriebenen Geschwindigkeits-Interferometrie wird der Resonator so eingestellt, dass die originale Wellenlänge des Detektionslasers in der Mitte der Flanke („Operating Point“ in Abbildung 7b) liegt. Die detektierte Lichtintensität, die das Fabry-Perot-Interferometer verlässt, ist dadurch maximal empfindlich gegenüber Frequenzänderungen durch Dopplerverschiebung an der schwingenden Probenoberfläche. Das Fabry-Perot-Interferometer vereint viele Vorteile, hat aber nur eine begrenzte Bandbreite des detektierbaren Schalls, wie Krishnaswamy ausführt. [21] Bei zu kleiner Schallfrequenz wird die Dopplerverschiebung so klein, dass sie unter der Detektionsschwelle liegt. Bei zu großer Frequenz wird der annähernd lineare Zusammenhang, der rund um den „Operating Point“ gegeben ist, verlassen. In der Praxis werden konfokale Fabry-Perot-Interferometer (CFPI) bevorzugt, da sie eine höhere Lichtstärke aufweisen und auch bei rauen Oberflächen eine gute Lichtausbeute erzielen. [2] [13] [16]. Die seither entwickelten möglichen Aufbauten mit solchen Interferometern sind zahlreich und komplex, in Abbildung 8 ist das 1986 von Monchalin vorgestellte System dargestellt. Auf weitere Artikel, die (erweiterte und

verbesserte) Fabry-Perot-Interferometer in der Detektion von Laserultraschall diskutieren, sei hier nur verwiesen. [22] [23] [24] [25]

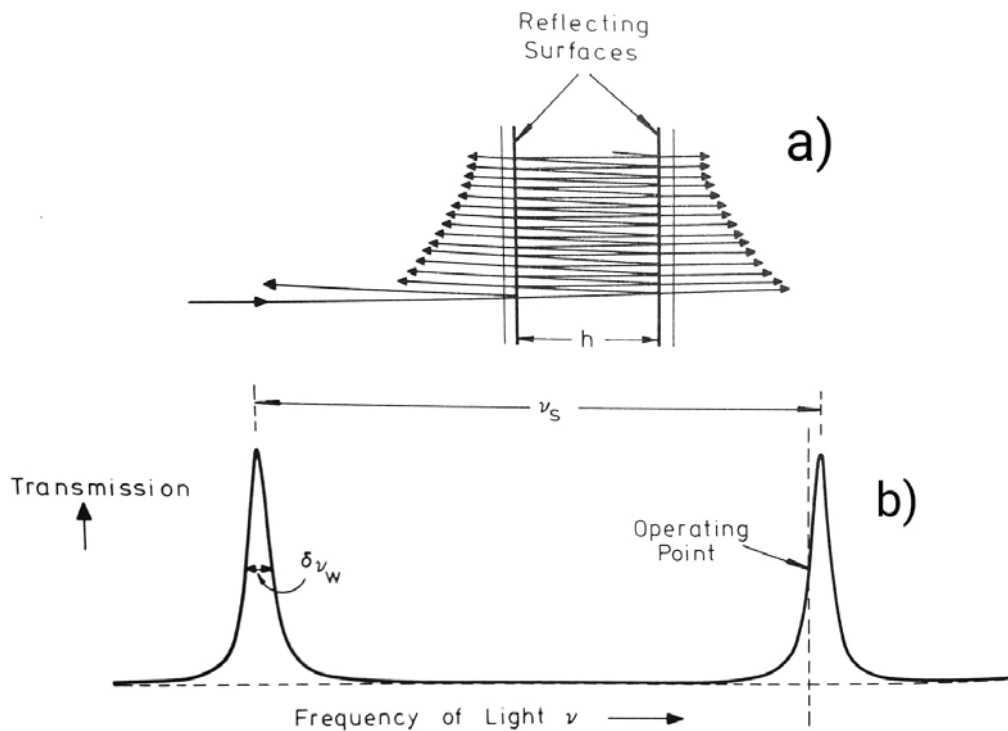


Abbildung 7: Prinzipskizze eines planaren Fabry-Perot-Interferometers (a) und Abhängigkeit zwischen Frequenz und austretender Lichtintensität (b) nach [2]

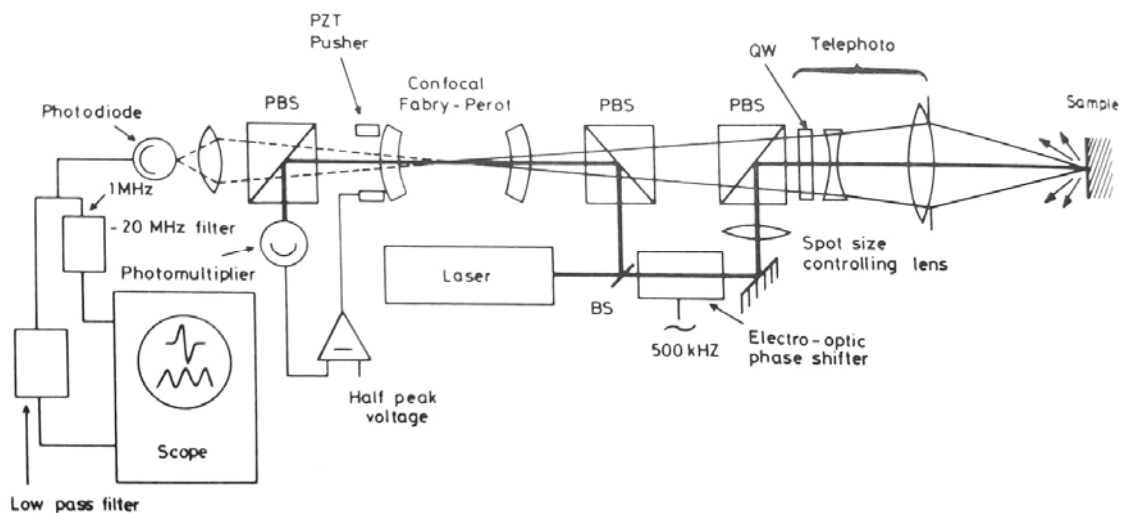


Abbildung 8: Aufbau eines Detektorsystems mit einem konfokalen Fabry-Perot-Interferometer nach [13]

- **Photorefraktive Interferometer:** Diese Interferometer verwenden die besonderen Eigenschaften von photorefraktiven Medien. Dabei handelt es sich um Kristalle, die bei ungleichmäßiger Beleuchtung ihren Brechungsindex verändern. [26] Der Vorgang umfasst die Ladungstrennung innerhalb des Kristalls durch den photoelektrischen Effekt. Das dadurch entstehende elektrische Feld beeinflusst über den elektrooptischen Effekt den Brechungsindex des Mediums. Ein photorefraktiver Kristall kann in einem Two-Wave-Mixing-Interferometer (TWM) wie in Abbildung 9 dargestellt, eingesetzt werden. Das prinzipielle Konzept wird von Krishnaswamy beschrieben. [21] Ein Referenzstrahl und der von der Probe zurückgeworfene

Signalstrahl werden in dem Kristall überlagert, was zur Bildung eines eindeutigen räumlichen Intensitätsfelds im Kristall führt. Durch den photorefraktiven Effekt passt sich dieser an und „speichert“ so die Interferenzinformation in Form eines Beugungsgitters. Durch die Beugung erreicht eine bestimmte Zusammensetzung aus Referenzstrahl und Signalstrahl den Detektor, der am Ausgang des Kristalls sitzt. Tritt nun eine niederfrequente Störung (Vibration) auf, beginnt der Prozess von neuem und der Kristall passt sich an. Daher ist das System unempfindlich gegen niederfrequente Einflüsse. Bei hochfrequenten Auslenkungen durch Ultraschall reicht die Geschwindigkeit des photorefraktiven Effekts nicht aus und eine Änderung der detektierten Zusammensetzung ist feststellbar. Die Bandbreite von photorefraktiven Interferometern variiert je nach Aufbau, Filterung und verwendetem Kristall. Beispielsweise stellen Ing und Monchalin ein System vor, das eine Bandbreite zwischen 1 kHz und 20 MHz aufweist. [27] Photorefraktive Interferometer sind besonders bei rauen Probenoberflächen überlegen, weil Speckles keine Probleme bereiten, wie Zamiri et al. darlegen. [28] Weitere Informationen zu photorefraktiven Interferometern finden sich z.B. bei [22] [29] [30].

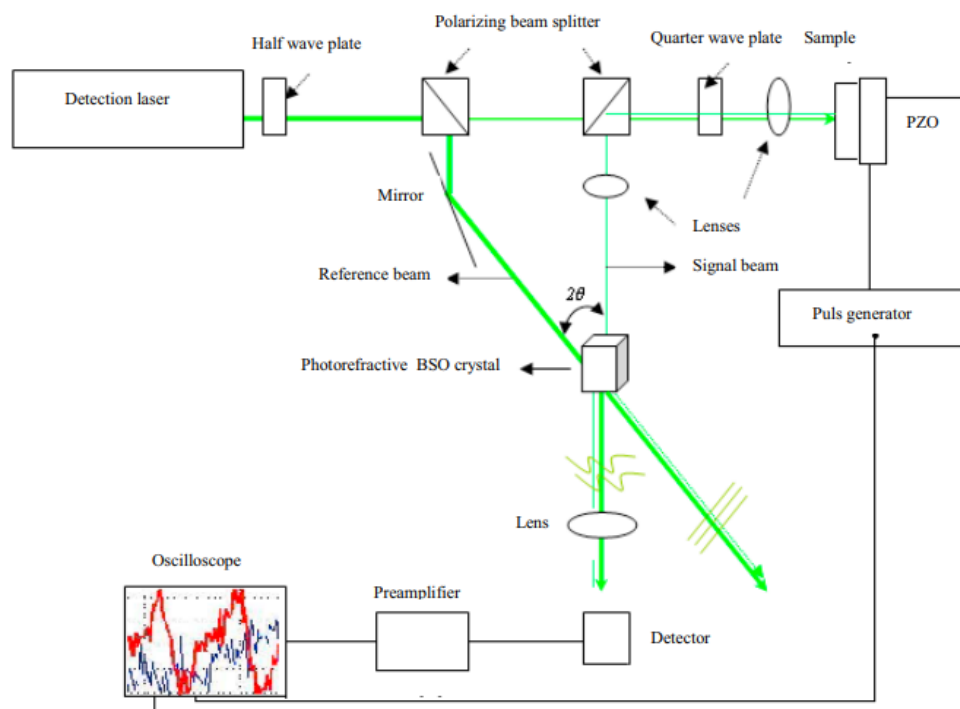


Abbildung 9: Schema eines TWM mit einem photorefraktiven Kristall nach [28]

Für praktische Applikationen haben sich die beiden letztgenannten Interferometer als die robustesten und vielseitigsten herausgestellt. Aus ihnen wurden marktreife, fertig verfügbare Systeme entwickelt, z.B. vom Kanadischen Hersteller Tecnar. [31] [32] Die Verwendung von Lichtwellenleitern ermöglicht dabei eine räumliche Trennung von Detektionslaser, Detektoroptik und Interferometer.

Die verwendeten Laser sind für gewöhnlich entweder kontinuierliche oder lang gepulste Quellen. [2] In letzterem Fall muss die Pulsdauer hoch genug sein, um die Entwicklung eines Ultraschallsignals verfolgen zu können, z.B. 10-100 μs . [4] Der Detektionspuls wird dann vom Anregungslaser getriggert. Bei lichtstarken Interferometern verbessert eine hohe Lichtleistung den Signal-Rausch-Abstand. Die Pulsleistungen liegen jedoch um das ca. 1000-fache unter jenen

der Anregungslaser. Monochromatik und eine hohe Kohärenzlänge sind zur Detektion wichtig. Zum Einsatz kommen z.B. frequenzstabilisierte Nd:YAG-Laser [32] oder He-Ne-Laser [2].

1.2.4 Messprinzipien

Eine Aufzeichnung einer LUS-Messung sieht exemplarisch aus, wie in Abbildung 10 dargestellt. Zu erkennen sind aufeinanderfolgende Echos, die zwischen den Grenzflächen der Probe hin- und her-reflektiert werden und dabei durch Schwächung immer weiter an Intensität verlieren. Wie Moreau ausführt, ist die detektierte Amplitude von der Oberflächenbeschaffenheit, der Temperatur und der inneren Struktur der Probe abhängig und ändert sich ständig. Statt Absolutwerten werden bei der Auswertung des Signals daher immer nur Echos miteinander verglichen. [4]

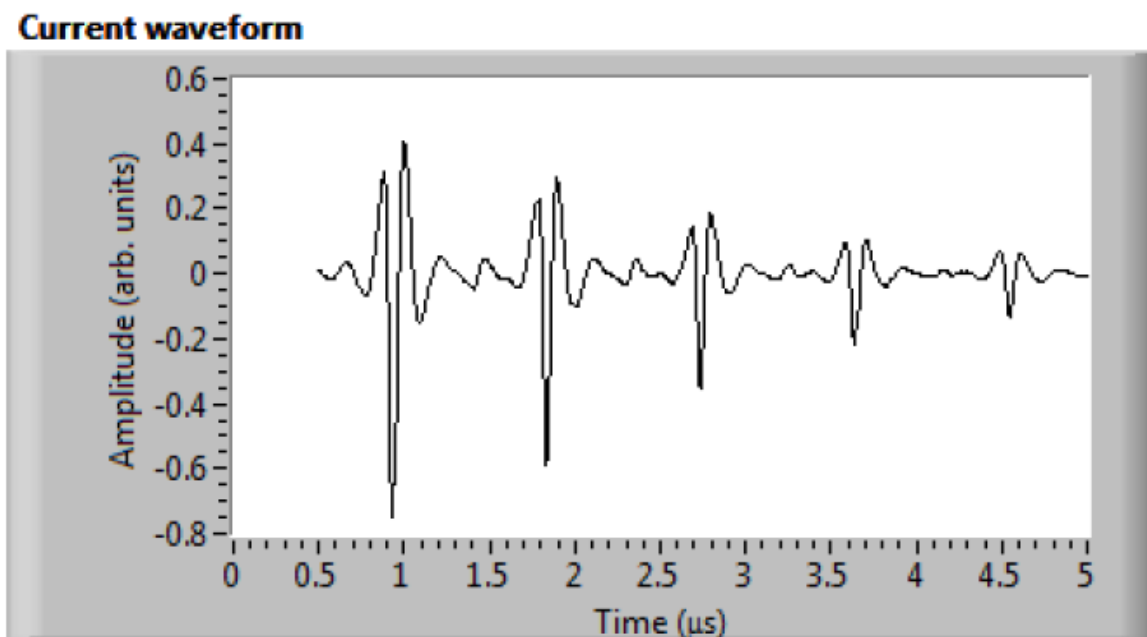


Abbildung 10: Typische Wellenform aus einer LUS-Messung, bestehend aus mehreren Echos nach [4]

Ähnlich wie bei der herkömmlichen Ultraschallmessung können Anregung und Detektion auf der gleichen Seite der Probe (reflexiv) oder gegenüberliegend (transmissiv) angeordnet sein.

1.2.5 Beispiele aus der Praxis

Durch Auswertung der Messergebnisse lassen sich nun, wie bereits eingangs erwähnt, vielfältige Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften ziehen. In diesem Kapitel sollen einige Forschungsarbeiten mit Fokus auf die Verarbeitung und Prüfung von metallischen Werkstoffen zusammengefasst werden.

- **Applications of Laser Ultrasonics to studies of microstructural and mechanical properties of metals (Lindth-Ulmgren, Ericsson, [3]):** Erforscht wurden die Zusammenhänge zwischen den Materialeigenschaften von Metallen und den Messergebnissen eines LUS-Systems bestehend aus Ablationslaser und Detektor (CFPI). Der E-Modul unterschiedlicher Stahlproben wurde über Auswertung der Schallgeschwindigkeit bestimmt und mit Messungen aus konventionellen Verfahren verglichen. Es wurde gezeigt, wie eine plötzliche Änderung der Schallgeschwindigkeit auf Phasenumwandlungen hindeutet. Das Spektrum des empfangenen Schalls ist von der Korngröße abhängig, da eine feine Kornstruktur hohe Frequenzen stärker schwächt. Aus diesem Umstand wurde ein mathematisches Modell

zur Berechnung der Korngröße aus den mittels LUS bestimmten Schwächungsparametern angegeben. Eine gute Korrelation zwischen der so bestimmten Korngröße und der lichtmikroskopischen Auswertung ebendieser wurde dargestellt.

- **Laser ultrasonic sensitivity to grain growth and twinning during metal processing (Garcin, [33]):** Ein LUMet-System (vgl. Kapitel 1.4.1) wurde eingesetzt, um das Kornwachstum niedriglegierter und mikrolegierter Stähle im Austenitgebiet von der Schwächung abzuleiten. Das Auftreten von abnormalem (d.h. nicht-parabolischem) Kornwachstum in einigen der betrachteten Stähle wurde diskutiert. Die Möglichkeiten zur Kalibrierung der Messungen z.B. mittels Simulationen wurden vorgestellt.
- **Laser-Ultrasonic Characterization of the Microstructure of Aluminium (Moreau, [34]):** Die Auswirkungen von (Eigen)Spannungen auf die Schallgeschwindigkeit von Aluminium wurden modelliert und anhand von Vergleichen mit LUS-Messungen diskutiert. Die Ergebnisse wurden mit anderen Methoden zur Eigenspannungsmessung (Bohrlochmethode, Röntgen) verglichen. Untersuchungen zur Rekristallisation wurden auch durchgeführt.
- **LUS for Hardness Penetration Depth Imaging (Haderer, [35]):** Ein Verfahren zur Messung der Einhärtetiefe bei randschichtgehärteten Bauteilen wurde präsentiert. Dazu wurden der Einfluss der unterschiedlichen Korngrößen von gehärteter Randschicht (fein) und Kernmaterial (grob) ausgenutzt. In Zukunft sollen die Ergebnisse mit denen einer herkömmlichen, zerstörenden Auswertung durch Zerschneiden des Bauteils verglichen werden.
- **Spatially Resolved Acoustic Spectroscopy (SRAS) Microstructural Imaging (Clark et al., [36]):** Ein bildgebendes Verfahren zur Darstellung der Mikrostruktur und Bestimmung der Kristallorientierung mittels LUS-generierten Oberflächenwellen wird vorgestellt. Zurückzuführen ist das Verfahren auf die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Kristallorientierung. Abbildung 11 zeigt das Prinzip des Verfahrens. Ein Anregungslaser wird mittels einer Maske auf Oberflächenpunkte mit einem Abstand von jeweils λ aufgeteilt. Durch konstruktive Interferenz wird eine Oberflächenwelle der Wellenlänge λ erzeugt. Für einen entfernten Oberflächenpunkt wird mit der Gleichung $c = \lambda f$ die Schallgeschwindigkeit bestimmt, indem das Frequenzspektrum (und sein Maximum) des detektierten Schalls analysiert wird. Durch Scannen der Oberfläche in zwei Richtungen kann so eine Karte unterschiedlicher Schallgeschwindigkeiten erzeugt werden. Die unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten entsprechen dabei unterschiedlichen Kristallen.

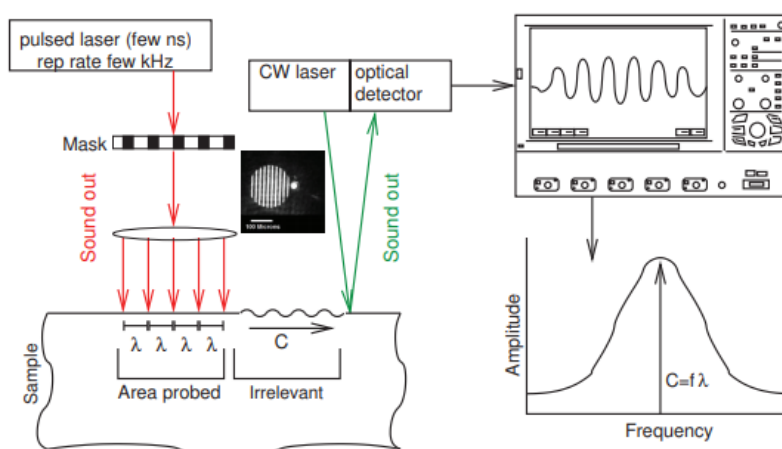


Abbildung 11: Prinzipskizze des SRAS-Systems nach [36]

1.3 Prüfaggregat Gleeble 3800

Die Gleeble 3800 ist eine thermomechanische Prüfmaschine, welche vom US-Amerikanischen Hersteller Dynamic Systems Inc. produziert wird. Die Maschine verfügt über ein resistives Heizsystem, eine servohydraulische Bewegungseinheit zur Umformung der Proben und bietet die Möglichkeit, Proben mittels Flüssigkeiten oder Druckluft abzukühlen. Um Umwelteinflüssen und der Bildung von Oxidschichten entgegenzuwirken, werden die Versuche in einer Probenkammer vollzogen, die wahlweise unter Grob- oder Feinvakuum gesetzt oder mit Inertgas gespült werden kann. Beliebige Kombinationen von Temperaturzyklen und Verformung sind während eines Versuchs programmierbar. Ein Messrechner zeichnet die Versuchsdaten auf. Dazu gehören Stempelweg, benötigte Kraft oder die Temperaturmessung mittels Thermoelementen. Die Eckdaten der Maschine sind in Tabelle 1 aufgelistet. Sowohl rein thermische als auch Zug- und Druckversuche werden am Lehrstuhl für Umformtechnik an unterschiedlichen Probengeometrien vorgenommen.

Tabelle 1: Eckdaten der Gleeble 3800 [37]

Mechanisch	Max. Stempelkraft (Druck)	200 kN
	Max. Stempelkraft (Zug)	100 kN
	Max. Stempelweg	125 mm
	Max. Stempelgeschwindigkeit	2000 mm/s
	Min. Stempelgeschwindigkeit	0.001 mm/s
Thermisch	Max. Temperatur	3000 °C
	Max. Heizrate (je nach Geometrie)	10000 K/s
	Max. Kühlrate (je nach Geometrie)	10000 K/s
Probe	Max. Durchmesser	20 mm

Um die Funktionalität zu erweitern, bietet Dynamik Systems sog. „Mobile Conversion Units“ (MCU) an. Das bedeutet, dass der Grundaufbau der Maschine mit Antriebsaggregaten und Messeinheit gleich bleibt, die Probenkammer mit den Spannelementen für die Probe allerdings Modular ist und ausgetauscht werden kann. Dadurch lässt sich die Gleeble z.B. auch für Torsionsversuche umrüsten. Die betrachtete Maschine am Lehrstuhl für Umformtechnik verfügt über zwei solcher MCUs:

- General Purpose MCU: Die Standard-MCU, die eine Vielfalt an Zug- und Druckversuchen an unterschiedlichen Probengeometrien abdeckt (Abbildung 12a).
- Hydrawedge MCU: Für Schmiede- und Walzsimulationen erlaubt diese MCU eine schnelle Stempelbewegung bis zu einem definierten Anschlag (Abbildung 12b).

Bei thermomechanischen Versuchen führt die von der Maschinenvorderseite betrachtete linke Spannbacke die Umformbewegung aus, während die rechte Backe steht.

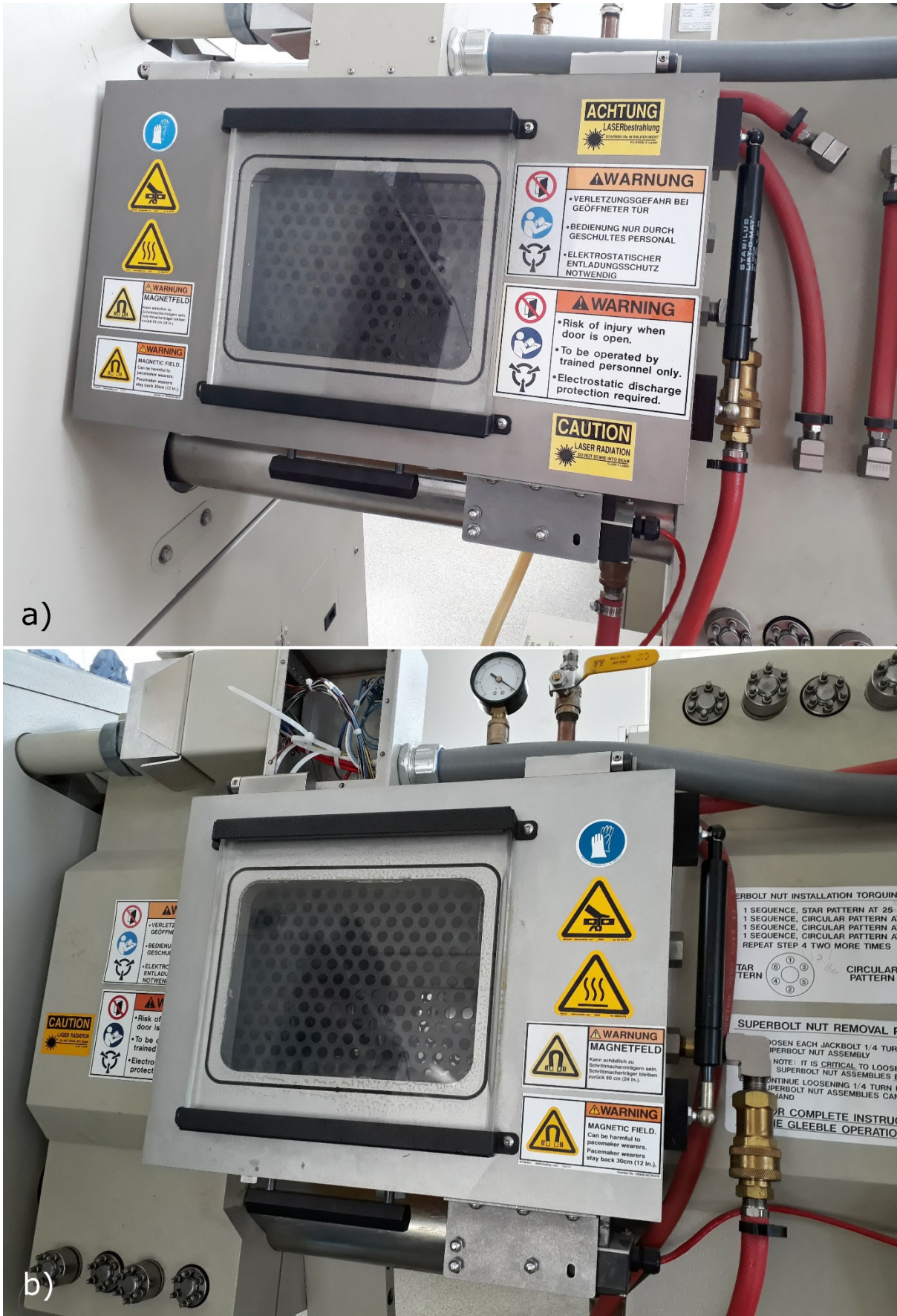


Abbildung 12: MCUs der Gleeble am Lehrstuhl für Umformtechnik, a) General Purpose MCU, b) Hydrawedge

1.4 Stand der Technik

Die Ausrüstung von Prüfmaschinen mit Laserultraschall-Messsystemen ist bereits Stand der Technik. Hier sollen beispielhaft drei Systeme vorgestellt werden.

1.4.1 Dynamic Systems: LUMet

Als Zusatzoption zur Gleeble 3800 wird von Dynamic Systems Inc. das System „LUMet“ angeboten. [38] Zur Laserultraschallmessung verwendet dieses System einen Anregungslaser von Quantel und Detektionshardware des Herstellers TECNAR. Die Systeme sind im reflexiven Modus angeordnet und besitzen die in Tabelle 2 genannten Spezifikationen. [39] [40] [33]

Tabelle 2: Eckdaten des LUMet Systems

Anregung	Typ	Quantel CFR 200 (frequenzverdoppelter Nd:YAG Laser)
	Pumpquelle	Blitzlampe (Lebensdauer 50 Mio. Schüsse)
	Wellenlänge	532 nm
	Pulsenergie	Bis 200 mJ
	Pulsdauer	9 ns
	Wiederholrate	50 Hz
Detektion	Typ	TECNAR TWM - PDL (Two-Wave-Mixing-Interferometer mit Nd:YAG Laser)
	Wellenlänge	1064 nm
	Pulsenergie	50 mJ
	Pulsdauer	50 μ s
	Wiederholrate	50 Hz

Dieses System wird statt der hinteren Tür der Probenkammer an die Gleeble montiert und kann Messungen an thermischen oder thermomechanischen Versuchen durchführen. Durch die Messrate von 50 Hz ist die Verwendbarkeit bei schnellen Experimenten, wie z.B. Schmiedeversuche mit hohen Umformgeschwindigkeiten, eingeschränkt.

1.4.2 RECENDT: Dilatometer mit LUS-Anlage

Eine von der Linzer Firma RECENDT GmbH aufgebaute Prüfmaschine kombiniert ein Umformdilatometer des Herstellers Linseis Messgeräte GmbH mit Laserultraschallmesstechnik zur transmissiven Messung. [41] [42] Zur Anregung wird ein kurz gepulster Laser (Quantel Brilliant B), zur Detektion ein Interferometer (Tecnal TWM-PDL) eingesetzt. Die Messrate liegt bei 10 Hz. Das Umformdilatometer ist ein flexibler und kompakter Tischaufbau, bei dem das LUS-Messequipment einfach gewechselt werden kann. Bei einer maximalen Temperatur von 1600°C, einer Aufheizrate von bis zu 2500 K/s und einer Umformkraft von maximal 25 kN liegen die thermomechanischen Prüfmöglichkeiten jedoch unter denen der Gleeble 3800.

1.4.3 Swerim: GLUS

Das Schwedische Unternehmen Swerim AB hat unter dem Namen GLUS eine Gleeble 3800 mit einem LUS-Messsystem ausgestattet, um Veränderungen der Kornstruktur bei Umformvorgängen abzubilden. [43]

2 Projektierung der LUS-Anlage

Die Entwicklung der Anlage umfasste folgende Schritte:

- 1) Das Festlegen der Anforderungen an die zu entwickelnde Anlage
- 2) Das Feststellen der technischen Einflussgrößen und zu beachtenden Parameter
- 3) Die Aufstellung potentieller Lösungsansätze im Hinblick auf Anforderungen und Einflussgrößen
- 4) Die Auswahl der besten Lösung für das Gesamtsystem
- 5) Die Anschaffung oder Eigenentwicklung der Komponenten und der Software
- 6) Aufbau und Test der Anlage

In diesem Kapitel wird auf die ersten beiden Punkte eingegangen, bevor dann in Kapitel 3 und 4 auf die Lösungsansätze eingegangen wird.

2.1 Anforderungen und Einsatzbereich

Vor Beginn des Anlagenentwurfs war es notwendig, den Einsatzbereich und die Anforderungen festzulegen und einzuschränken. Durch Betrachten der Bedürfnisse am Lehrstuhl für Umformtechnik und Vergleich mit dem Stand der Technik ergaben sich die folgenden Anforderungen.

2.1.1 Versuchstyp

Bereits bei rein thermischen Zyklen auf der Gleeble 3800 könnte mittels Laserultraschall viel Wissen über die im Material herrschenden Verhältnisse gewonnen werden. Um jedoch das volle Potential der Gleeble ausschöpfen zu können, war eine Messung während thermomechanischer Versuche eine zentrale Voraussetzung.

Für die erste Ausbaustufe der Anlage wurde entschieden, das Augenmerk auf einen besonders oft durchgeführten Versuch zu legen: mit der häufig zum Einsatz kommenden Stauchprobe mit Durchmesser 10 mm, Höhe 12 mm sollten Versuche mit einer mittleren Umformgeschwindigkeit von $\dot{\phi}_m := 1$ durchführbar – und auch messbar – sein. Wird dabei beispielsweise auf eine Endhöhe von 3 mm gestaucht, ergibt sich ein Umformgrad von

$$\varphi = \ln\left(\frac{12 \text{ mm}}{3 \text{ mm}}\right) = 1.39$$

und somit eine Versuchsdauer von 1.39 s. Die mittlere Stempelgeschwindigkeit beträgt hierbei 6.5 mm/s.

2.1.2 Eingesetzte LUS-Messtechnik

Während eines wie in Kapitel 2.1.1 angeführten Stauchversuchs sollte es möglich sein, zumindest 10 Messpunkte mittels der LUS-Anlage aufzuzeichnen, was einer Wiederholrate von 7.2 Hz entspricht. Um aber beispielweise bei besonders schnellen Aufheizraten auch noch eine gute zeitliche Auflösung zu erreichen, wurden die Möglichkeiten geprüft, eine wesentlich höhere Wiederholrate zu installieren. Die Komponenten des oben diskutierten LUMet-Systems erlauben Messraten von max. 50Hz. Von RECENTD wurde im Oktober 2019 ein System angeboten, welches eine Wiederholrate bis 400 Hz erlaubt und für eine transmissive Messung vorgesehen ist. Die Spezifikationen sind in Tabelle 3 angeführt. [44]

Tabelle 3: Spezifikationen des von RECENDT angebotenen Systems

Anregung	Typ	Quantel Merion C (frequenzverdoppelter Nd:Yag Laser)
	Pumpquelle	Laserdiode (Lebensdauer 2 Mrd. Schüsse)
	Wellenlänge	532 nm
	Pulsenergie	100 mJ
	Pulsdauer	<10 ns
	Wiederholrate	400 Hz
	Abmessungen	400x142x118 mm (Laserkopf, LxBxH)
	Masse	ca. 10 kg (Laserkopf)
Detektion	Typ	RECENDT LP-DPSSL (noch in Entwicklung)
	Wellenlänge	1064 nm
	Pulsenergie	40 mJ
	Pulsdauer	80 μ s
	Wiederholrate	400 Hz
	Abmessungen	390x220x195 mm (vergleichbarer Detektorkopf von TECNAR)
	Masse	ca. 8 kg

Dieses System bzw. dessen Komponenten stellen die Randbedingung der weiteren Anlagenentwicklung dar. Für die Entwicklung der Anlage sind die Abmessungen und Massen der bewegten Teile von besonderer Bedeutung. Die Maße von Laserkopf und Detektorkopf sind daher in der Tabelle angeführt. Zusätzlich benötigen diese noch (in der Regel größere) Aggregate zur Energieversorgung, Kühlung oder Erfassung von Messergebnissen. Die Verbindung erfolgt hierbei über Kabel bzw. Lichtwellenleiter und ist somit hinsichtlich der Aufstellung flexibel.

2.1.3 Kompatibilität und Flexibilität

Die Gleeble am Lehrstuhl für Umformtechnik verfügt über zwei MCUs (siehe Kapitel 1.3), deren Probenkammern unterschiedliche Breiten aufweisen. Die Kammer der General Purpose MCU ist 565 mm breit, die der Hydrawedge MCU 420 mm. Weitere Unterschiede betreffen die Position der Türbefestigungen und Sicherheitsschalter. Gefordert wurde ein Anlagendesign, das mit beiden Kammern kompatibel ist, sodass eine Erweiterung des unterstützten Proben – und Versuchsspektrums einfach ist. Bei der Kompatibilität ist zu beachten, dass bereits vorhandene Sicherheitsmechanismen wie Türkontaktschalter und Verriegelungen weiterhin funktionieren.

Wird die LUS-Anlage nicht benötigt, soll eine einfache Demontage von der Gleeble möglich sein. Beim Montieren soll das System wiederholgenau positioniert werden können, sodass eine mühsame Einrichtung der Komponenten entfällt.

Für den Bediener soll es durch mechanische Positionierer oder Software einfach sein, die Anlage für einen Versuch zu kalibrieren.

2.1.4 Freiheitsgrade und Kennwerte der Bewegung

Zur Kalibrierung des optischen Systems werden Freiheitsgrade im mechanischen Aufbau der Anlage benötigt. Abbildung 13 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer transmissiven LUS-Anlage mit

den benötigten Freiheitsgraden. Die Bewegung von Anregungs – und Detektorsystem in den Ebenen X1/Y1 bzw. X2/Y2 ist erforderlich,

- da die optischen Achsen von Anregung und Detektion für eine erfolgreiche Messung zusammenfallen müssen und
- damit justiert werden kann, welcher Bereich der Probe einer Messung unterzogen werden soll.

Die Unterstützung thermomechanischer Versuche stellt zusätzliche Forderungen an den mechanischen Aufbau, weil sich bei der Verformung ein betrachteter Oberflächenpunkt der Probe mitverschiebt, siehe Abbildung 2. Für gewöhnlich wird bei thermomechanischen Versuchen die Probenmitte betrachtet, da durch die Widerstandsheizung der Gleeble eine relativ schmale Heizlinse mit der gewünschten Prozesstemperatur in der Probenmitte entsteht. Verfährt der Stempel der Gleeble um Δx nach rechts und geht man von einer Verfolgung der Probenmitte aus, ergibt sich für die optischen Achsen der Systeme ein Fahrweg $\Delta x_1 = \Delta x/2$. Die Nachführung dieses Weges muss simultan mit dem Stempel der Gleeble erfolgen. Geht man nun von einer Stempelgeschwindigkeit von 6.5 mm/s aus (vgl. Kapitel 2.1.1), muss die Anlage mit 3.25 mm/s verfahren. Die geforderte Genauigkeit der Nachführung wurde mit 0.2 mm definiert, damit sichergestellt werden kann, dass die Heizlinse nicht verlassen wird.

Durch den großen Öffnungswinkel der Detektoroptik hat das Detektorsystem eine geringe Toleranz gegenüber Veränderungen der Fokallänge (beim betrachteten System im Bereich von ± 1 mm). Das bedeutet, dass der Detektor so einjustiert werden muss, dass die Oberfläche der Probe genau im Brennpunkt der Detektoroptik liegt. Gegen eine einmalige, starre Einstellung des Detektors sprechen dabei folgende Punkte:

- Bei Veränderungen des Versuchs oder der Probengeometrie soll eine Anpassung des Fokus unkompliziert sein.
- Bei thermomechanischen Versuchen entsteht durch die Umformung der Probe häufig eine signifikante Ausbauchung oder Einschnürung quer zur Bewegungsrichtung des Stempels. Um die Messung aufrecht zu erhalten, muss der Fokus des Detektors nachgeführt werden (Δr in Abbildung 2).

Daher wird ein Freiheitsgrad Z1 in Richtung der optischen Achse des Detektors benötigt. Insgesamt ergeben sich für das kinematische System der LUS-Anlage fünf Freiheitsgrade, von denen drei (X1, X2 und Z1) während eines Versuchs verstellt werden müssen.

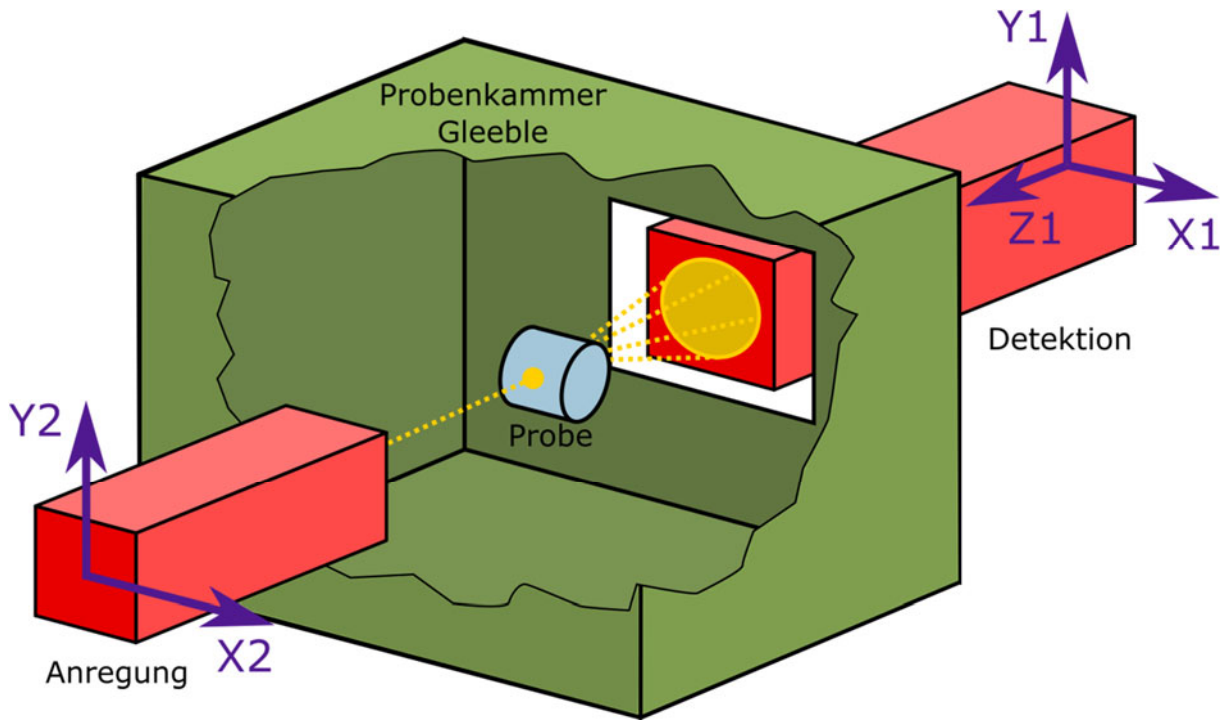


Abbildung 13: Benötigte Freiheitsgrade bei einer transmissiven LUS-Messung an einer umgeformten Probe.

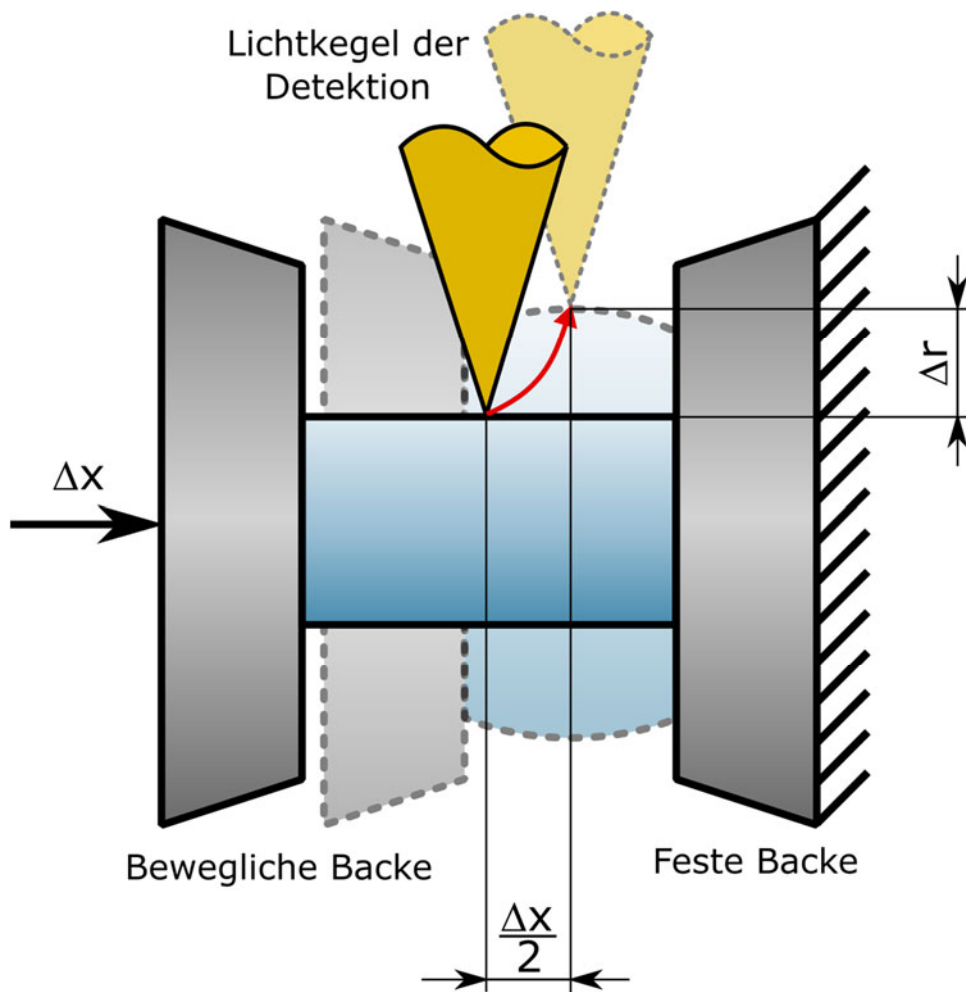


Abbildung 14: Zweiachsige Nachführung der Detektion während der Messung.

2.1.5 Laserschutz

Die in der LUS-Anlage verwendeten Lasersysteme sind, aufgrund ihrer Leistung, nach ÖNORM EN 60825-1 Klasse 4 Systeme:

„Lasereinrichtungen, für die ein direkter Blick in den Strahl und eine Hautbestrahlung gefährlich sind und für die auch das Betrachten diffuser Reflexionen gefährlich sein kann. Diese Laser stellen auch häufig eine Brandgefahr dar.“ [45, p. 88]

Befindet sich die Anlage jedoch in einem abgeschlossenen Gehäuse ohne Austritt von Laserstrahlung, wird das Gesamtsystem als Klasse 1 System betrachtet, wodurch die Anlage als ungefährlich betrachtet wird.

Die Gleeble und somit die LUS-Anlage befindet sich in einer Versuchshalle mit mehreren anderen Anlagen. Die bei Klasse 4 Systemen benötigten Schutzmaßnahmen würden das Arbeiten an diesen Anlagen erschweren bzw. verunmöglichen und zudem zusätzliche Schulungen der anwesenden Personen erfordern. Daher wurde gefordert, die LUS-Anlage so zu entwickeln, dass sie in einem vollständig geschlossenen Gehäuse untergebracht werden kann. Um eine Klasse 1 Einstufung zu erreichen, muss dabei beachtet werden, dass sämtliche Gehäuseteile, deren Demontage zum Austritt von Laserstrahlung (in größerem Ausmaß als Klasse 1) führen könnte, nur mit Werkzeugen gelöst werden können. [45, p. 47]

2.2 Umwelteinflüsse

Bei der Entwicklung einer Anlage, die die genannten Anforderungen erfüllt, sind die Umwelteinflüsse, denen die Anlage ausgesetzt ist, zu bedenken. Im Folgenden sind hierzu einige Überlegungen aufgeführt.

2.2.1 Vakuum

In der Kammer der Gleeble kann während den Versuchen Vakuum bis zu 10^{-6} Torr eingestellt werden. Vakuumbedingungen erfordern ein besonderes Vorgehen beim Entwickeln von eingesetzten Komponenten hinsichtlich Design und Materialwahl. Zusätzlich sind aufgrund der vorhandenen Messeinrichtungen und Spannwerkzeuge die Platzverhältnisse in der Kammer beengt. Daher erscheint es zweckmäßig, die LUS-Anlage außerhalb der Kammer aufzubauen und die Laserstrahlung über Sichtfenster einzuleiten.

2.2.2 Wärmeeinfluss

Nach Erfahrung der Bediener erwärmen sich bei derzeitigen Versuchen an der Gleeble die Außenflächen von Probenkammer und Türen lediglich leicht über Raumtemperatur (ca. 25°C). Liegt die LUS-Anlage außerhalb der Probenkammer, ist sie nur geringen Temperaturschwankungen ausgesetzt.

2.2.3 Verschmutzung

Außerhalb der Probenkammer ist die Anlage hauptsächlich den Verschmutzungseinflüssen ausgesetzt, die durch die anderen Maschinen am Aufstellort entstehen. Die wichtigsten davon sind eine Sandstrahlkabine, ein Kerbschlaghammer, eine Hydraulikpresse und mehrere Handgeräte zur Blechumformung. Allgemein wird die Verschmutzung als gering eingeschätzt, es erscheint ausreichend, Staubabdeckungen bei bewegten Teilen vorzusehen.

Aus Erfahrungen der Bediener des in Kapitel 1.4.2 erwähnten Dilatometers kommt es je nach Probenmaterial und Versuchsparametern zu einem Beschlagen der Sichtfenster mit Metaldämpfen. Für eine korrekte Funktion des optischen Systems wäre daher eine regelmäßige Reinigung bzw. ein Austausch der Fenster nötig.

3 Mechanischer Aufbau der LUS-Anlage

Mit den gegebenen Anforderungen und äußeren Einflüssen wurde für die Montage an der Gleeble ein Aufbau entwickelt, der aus den folgenden wesentlichen Komponenten besteht:

- 1) Linearantriebe („Stages“) zur Positionierung der Anlage entlang der drei nachzuführenden Freiheitsgrade X1, X2 und Z1
- 2) Positionierer zur Kalibrierung des Systems in den zwei anderen Freiheitsgraden Y1 und Y2
- 3) Grundrahmen und Befestigung an der Gleeble
- 4) Adapterplatten, um Anschlussmaße kompatibel zu machen
- 5) Sicherheitseinrichtungen und Abdeckungen inklusive Kabeldurchführungen
- 6) Fenster und Dichtungen zum Erreichen der Vakuumdichtheit der Probenkammer
- 7) Mess – und Laserkopf von Anregung und Detektion.

Zur besseren Abschätzung der Platzverhältnisse wurde mit der Software PTC Creo Parametric ein CAD-Modell des Aufbaus und der Montagesituation an der Gleeble erstellt. Die Kammern der beiden MCUs wurden dafür zunächst nachmodelliert. Die restlichen Komponenten wurden entweder selbst designt oder als CAD-Modelle von den jeweiligen Herstellern importiert. In Abbildung 15 ist das CAD-Modell des Aufbaus (ohne Schutzbleche) dargestellt. Für Detektion und Anregung wurden jeweils getrennte Aufbauten in Form von Türen entwickelt, die alternativ zu den Originaltüren in der Probenkammer der Gleeble eingehängt werden. Durch die Türscharniere ergeben sich gute Montagepunkte und ein schneller und wiederholgenauer Einbau. Bei vollständiger Einhausung der LUS-Anlage müssen außerdem keine weiteren Sichtfenster, wie sie in den Originaltüren vorhanden sind, abgedeckt werden, um den Laserschutzkriterien zu entsprechen. Die Detaillösungen und die Entscheidungsfindung werden in den folgenden Unterkapiteln diskutiert.

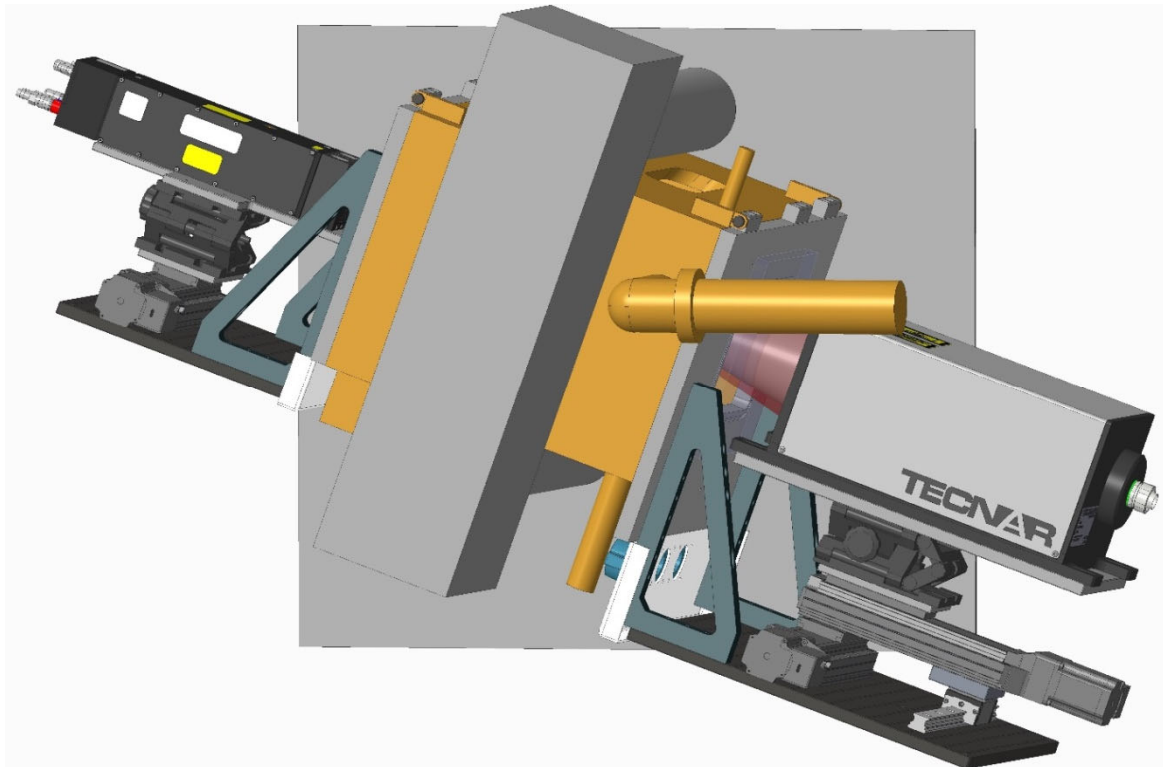


Abbildung 15: CAD-Modell der LUS-Anlage

3.1 Stages

Für die drei Freiheitsgrade X1, X2 und Z1 (vgl. Kapitel 2.1.4) ist eine Bewegung der Anlage als Funktion des Stempelwegs vorgesehen. Folgende in Kapitel 2 festgelegten Anforderungen sind für die Auswahl relevant:

- Verfahrensgeschwindigkeit zumindest 3.25 mm/s in den Achsen X1 und X2, ähnlich für Z1
- Fahrweg zumindest 9 mm, allerdings deutlich mehr zur Kalibrierung
- Unempfindlichkeit gegenüber Verschmutzung
- Gewicht des LUS-Equipments ca. 8kg für Detektion, 12kg für Anregung, allerdings sind auch Adapterplatten und Positionieren zu beachten.
- Aufnahme der Massenkräfte und Massenmomente durch schnelle Beschleunigungen und auskragende Lasten

Prinzipiell sind zur Erfüllung der Aufgabe unterschiedliche Konzepte denkbar:

- Mechanische Kopplung: Der Stempel der Gleeble wird mechanisch direkt oder indirekt (z.B. über Hebelübersetzungen, Seilzüge) mit der LUS-Anlage gekoppelt, um diese nachzuführen.
- Hydraulische Kopplung: Die Nachführung der Anlage wird an das Hydrauliksystem der Gleeble angebunden.
- Elektromechanische Kopplung: Die Sollposition wird basierend auf Informationen über die Stempelposition elektromechanisch angefahren.



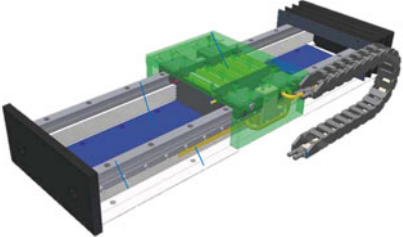



In Tabelle 4 sind diese Konzepte im Hinblick auf den Nutzen im vorliegenden Fall gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass ausschließlich die elektromechanische Kopplung sinnvoll integrierbar ist. Besonders bei der Nachführung des Fokus (Z1) würden die anderen Systeme versagen bzw. deren Komplexität unüberschaubar werden, da die Kompensation der Ausbauchung allgemein nicht mehr in einem linearen Verhältnis mit dem Stempelweg steht.

Tabelle 4: Vergleich der Konzepte zur Kopplung der LUS-Anlage mit dem Stempelweg der Gleeble

	Mechanische Kopplung	Hydraulische Kopplung	Elektromechanische Kopplung
Wiederholgenauigkeit	Sehr gut, sofern Spiel und plastische Verformungen beherrscht werden	Begrenzt durch Leckagen	Gut, aber abhängig von der Antriebstechnik und Regelung
Steifigkeit	Gut bis schlecht, abhängig vom eingesetzten Aufbau	Gut, nur begrenzt durch die Kompressibilität des Fluids	Gut bis schlecht, abhängig vom eingesetzten Aufbau
Verfahrgeschwindigkeit	Prinzipiell beliebig hoch, sofern Verformungen aufgrund von Massenkräften beherrscht werden.	Ausreichend	Ausreichend
Verzögerung bei Positionsänderung	Sehr gut, sofern Verformungen aufgrund von Massenkräften beherrscht werden.	Gut, nur begrenzt durch die Kompressibilität des Fluids	Je nach Laufzeit in der Regelung gut bis unbrauchbar
Flexibilität (ändern des Verhältnisses Stempelweg zu Nachführweg)	Kaum vorhanden	Gering	Sehr gut, nur abhängig von programmierten Parametern
Invasivität (Eingriffe in die bestehende Maschine)	Sehr hoch, eventuell Beeinflussung der Messdaten der Gleeble	Sehr hoch, eventuell Beeinflussung der Messdaten der Gleeble	Kaum vorhanden
Kosten und Installationsaufwand	Mittel bis hoch	Hoch	Gering
Machbarkeit im konkreten Fall	Nahezu unmöglich, keine mechanische Verbindung mit dem Stempel (geschlossene Probenkammer)	Nahezu unmöglich, nur mit radikalem Eingriff in das Hydrauliksystem der Gleeble	Einfach

Aus diesen Gründen fiel die Wahl auf eine Kopplung mittels elektromechanischer Antriebe. Elektromechanisch betriebene Positionierer („Stages“) bestehen in der Regel aus einer Linearführung, die die Führungskräfte aufnimmt und einem Antriebssystem, das den Führungsschlitten verfährt. Die Linearführung kann dabei als Gleit- oder Wälzlagerung aufgebaut sein. Weitere Unterscheidungsmerkmale sind die Einbausituation, der Typ des Antriebsmotors oder die Art, wie dessen Drehbewegung in eine lineare Bewegung umgewandelt wird. Einige Lösungen, die exemplarisch für die zahlreichen verfügbaren Systeme stehen, sind in Tabelle 5 verglichen.

Tabelle 5: Vergleich elektromechanischer Lineareinheiten.

	Beschreibung	Eckdaten
Newport IDL165 [46] 	Robustes System mit Staubabdeckungen; Kugelumlaufführung mit Linearmotor.	Fahrweg: 100-1200 mm Breite x Höhe: 165 x 70 mm Max. Belastung: ¹ 450 N, <18 Nm Max. Schubkraft: 289 N V_{\max} : 2 m/s Positioniergenauigkeit: 2 μm
Parker Hannifin LCB060 [47] 	Robustes System mit großen Führungslängen; Staubabdeckungen; Gleitführung mit Zahnriemenantrieb und Servo – oder Schrittmotor; Bei großen Momentenbelastungen am Schlitten hoher Verschleiß.	Fahrweg: 250-5500 mm Breite x Höhe: 120 x 90 mm Max. Belastung: 300 N Max. Beschleunigung: 20 m/s^2 V_{\max} : 8 m/s Positioniergenauigkeit: 200 μm
SKF LTS [48] 	Robustes System mit großen Führungslängen; Hohe Steifigkeit; Staubabdeckungen; Kugelumlaufführung mit Drehstrom-Linearmotor; Hohe Dynamik; Schwer und groß; Benötigt Kühlsystem; Wegmesssystem integriert.	Fahrweg: 80-2000 mm Breite: 154-212 mm Höhe: 81-86 mm Max. Belastung: >30 kN, >2 kNm Max. Schubkraft: >600 N ^{II} V_{\max} : 2.2 m/s Positioniergenauigkeit: 33 μm
Vogel OSP-E25BHD [49] 	Staubabdeckungen; Rollenführung mit Zahnriemenantrieb; Weitere Kenndaten abhängig von Motorisierung.	Fahrweg: <7000 mm Breite x Höhe: 93 x 52.5 mm Max. Belastung: 3kN, 50 Nm V_{\max} : 3 m/s
Zaber LRT...-C [50] 	Robustes System; Hohe Steifigkeit; Staubabdeckungen; Kugelumlaufführung mit Spindelantrieb und Schrittmotor; Je nach Spindel unterschiedliche Kennwerte.	Fahrweg: 100-1500 mm Breite x Höhe: 90 x 58 mm Max. Belastung: 5 kN, 120 Nm Max. Schubkraft: 180-1200 N V_{\max} : 20-360 mm/s Positioniergenauigkeit: 25-375 μm
Zaber LSQ [51] 	Rollenführung mit Spindelantrieb und Schrittmotor; Je nach Spindelsteigung unterschiedliche Kennwerte; Geringe Momentenbelastbarkeit.	Fahrweg: 75-600 mm Breite x Höhe: 65 x 36 mm Max. Belastung: 200 N, 8 Nm Max. Schubkraft: 20-160 N V_{\max} : 53-1000 mm/s Positioniergenauigkeit: 35-230 μm

¹ Angegeben ist in der Tabelle jeweils die Tragkraft bei mittig positionierter Last und das Lastmoment bei Verdrehung entlang der Achse der Bewegungsrichtung (M_x)

^{II} Durch den Linearantrieb stark von der Baulänge abhängig

Einige weitere Aspekte sind bei der Auswahl zu bedenken:

- Es sollte eine gewisse Zukunftssicherheit mit eingeplant werden, sodass bei einer späteren Erweiterung der Anforderungen (z.B. schnellere Umformgeschwindigkeiten oder andere Probengeometrien) keine Neuanschaffung von Teilen notwendig wird.
- Bei den ertragbaren Lasten sollen Sicherheitsreserven gegen Fehlbedienung oder Kollisionen vorhanden sein.
- Die max. Belastbarkeit und Schubkraft sollten ausreichend, jedoch nicht überdimensioniert sein, da dies in der Regel mit einem höheren Einheitengewicht, einer höheren bewegten Masse und größeren Hauptmaßen erkauft wird.
- Für die Kombination der Achsen X1 und Z1 ist eine direkte Montierbarkeit einer Achse auf der anderen wünschenswert.
- Die Verfügbarkeit von Controllern, Dokumentation und Programmbibliotheken sollte gegeben sein.

Diese Aspekte gemeinsam mit den Spezifikationen der zuvor angegebenen Kandidaten führten letztendlich zur Auswahl drei baugleicher Stages vom Typ Zaber LRT0100BL-C. Wie in Tabelle 5 gezeigt, sind diese Einheiten zwar wesentlich langsamer als die Alternativen mit Zahnriemen – oder Linearantrieben, weisen dafür aber eine hohe Schubkraft bei kleinem Platzbedarf auf. Die mögliche Geschwindigkeit ist dabei immer noch um den Faktor 28 höher als derzeit gefordert. In Tabelle 6 sind die Spezifikationen zusammengefasst. Weitere Datenblätter sind online Verfügbar. Die ebenfalls von Zaber angeschafften Controller können über USB mit einem Computer verbunden werden und sind durch die vielfältigen Programmierschnittstellen einfach integrierbar.

Tabelle 6: Daten der ZABER LRT0100BL-C [50]

Verfahrweg	100 mm
Positioniergenauigkeit	25 μ m
V_{\min} - V_{\max}	0.0003 - 90 mm/s
Schubkraft Spitze / Kontinuierlich	600 / 600 N
Max. Belastbarkeit	5 kN, 120 Nm
Masse	3.65 kg
Positionsbestimmung	Hall-Sensor für Home-Position, Zählen der Schritte durch Controller

3.2 Positionierer

In den Freiheitsgraden Y1 und Y2 wurden zwei identische Positionierer vorgesehen, die nach dem Prinzip eines Scherentisches arbeiten und einen vertikalen Verstellweg von 50 mm bieten. Das gewählte Modell vom Hersteller Newport besitzt Scherengelenke in zwei Richtungen, wodurch die Steifigkeit deutlich erhöht wird.

3.3 Grundrahmen und Türen

Die Grundrahmen bestehen im Wesentlichen aus zwei optischen Lochbrettern („Optical Breadboards“) mit 15 mm Stärke, die mit massiven Aluminiumwinkeln an die eigens angefertigten Türen der Probenkammer geschraubt werden. Die Breadboards sind Standardartikel beim Aufbau optischer Anordnungen und besitzen ein Lochraster aus M6

Gewindebohrungen im Abstand von 25 mm. Dieses Bohrmuster ist direkt kompatibel zu den Montagewinkeln und den Stages. Bei den Winkeln wurde ein Fabrikat gewählt, bei dem ein außenliegender Gurt für hohe Steifigkeit sorgt. Die Türen wurden durch Wasserstrahlschneiden und Fräsen individuell aus 20 mm Aluminiumplatten angefertigt. Dabei war darauf zu achten, dass zum Erreichen der Vakuumdichtheit keine Durchgangsbohrungen gesetzt werden durften.

Bei den Türen ist zu bedenken, dass die beiden betrachteten MCUs unterschiedlich breite Kammern besitzen. Für die schmalere Kammer der Hydrawedge mussten die Türen daher so entwickelt werden, dass sie problemlos die Dichtfläche der Kammer überragen können. Die Türdichtungen bestehen aus O-Ringen, die bereits Kammerseitig in einer Nut sitzen. Dadurch ist auf Seiten der Tür nur eine ebene Fläche notwendig, die fein genug ist, um Dichtigkeit mit einem O-Ring zu gewährleisten. Eine gemittelte Rauftiefe von $R_z = 10 \mu\text{m}$ ist dafür laut Herstellerangaben ausreichend und wurde durch Fräsen hergestellt. [52] Abbildung 16 stellt die Einbausituation bei breiter und schmaler Probenkammer dar.

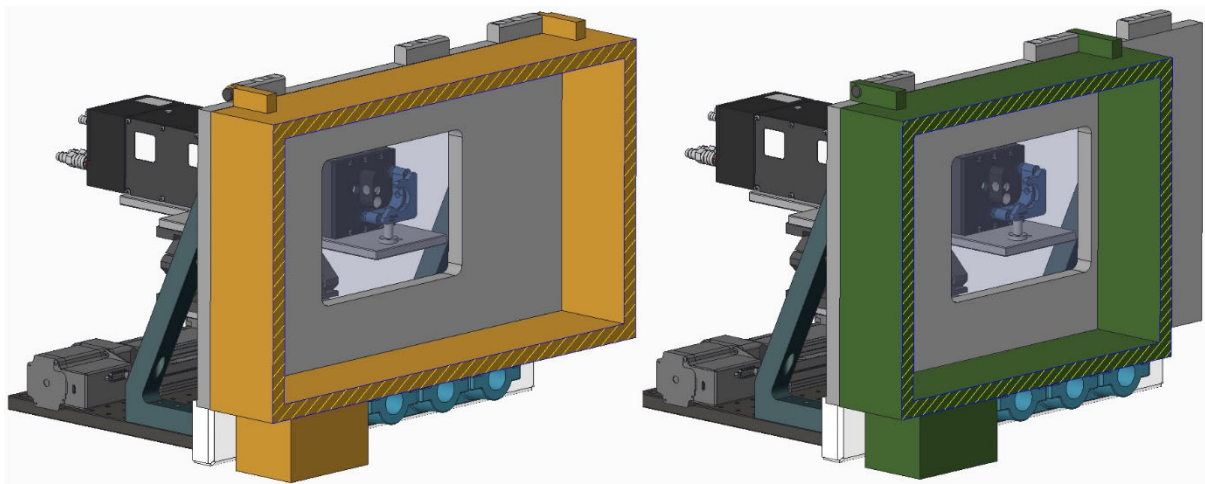


Abbildung 16: Einbausituation der Anregungseinheit bei breiter und schmaler Probenkammer (beim Detektor analog dazu)

Zur Befestigung der Türen wurden Scharnierblöcke aus rostfreiem Stahl gefräst, die kompatibel zu den Original-Gegenstücken auf der Kammer sind. Auch hier sind für die Kammer der Hydrawedge zwei extra Scharnierblöcke vorgesehen, da der Abstand der Scharniere kleiner ist.

3.4 Sicherheitseinrichtungen

Während die hintere Anlagentür durch Schrauben zugehalten wird, ist die vordere mit einem elektrischen Sicherheitsschalter ausgestattet, der die Tür im Betrieb verriegelt. Für diesen Schalter wurde die vordere Kammertür mit einer Schließzunge ausgestattet.

Wie in Kapitel 2.1.5 erläutert, muss die LUS-Anlage letztendlich vollständig eingehaust werden. Dafür wurden, wie in Abbildung 17 dargestellt, Schutzbleche aus 3mm Aluminium entwickelt.

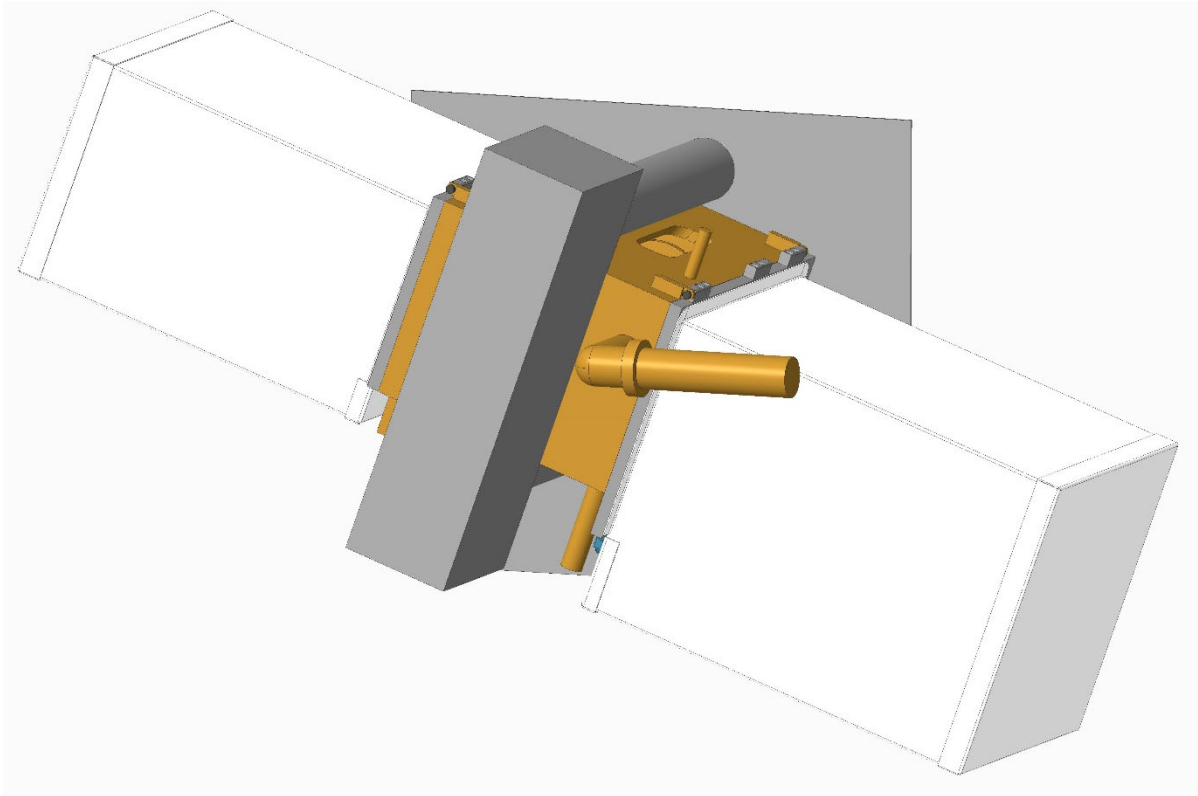


Abbildung 17: Einhausung der Anlage

Zum Betrieb der Anlage werden folgende Leitungen ins Innere der Einhausung benötigt:

- Optische Fasern zum Detektorkopf
- Stromversorgung und Kühlung für den Anregungslaser
- Elektrische Anschlüsse für die Stages
- Zur Kalibrierung der Anlage vor Versuchen könnten Webcams platziert werden, die einen Blick in die Probenkammer von außerhalb der Einhausung ermöglichen. Diese besitzen auch Anschlusskabel.

Da alle diese Leitungen mit vorkonfektionierten Steckern kommen, wurden hierfür teilbare Kabeldurchführungen vorgesehen.

3.5 Fenster

Die Fenster der Originaltüren bestehen je aus einer 16 mm Plexiglasscheibe, die von zwei Blechrahmen gegen eine O-Ring-Dichtung gedrückt wird, die in einer Ausfräsung in der Tür sitzt. (vgl. Abbildung 12) Dieses Konzept wurde weitgehend übernommen, mit dem Unterschied, dass wegen der hohen optischen Anforderungen Fenster aus BOROFLOAT 33 [53] verwendet wurden.

4 Regelungstechnik und Software

Nach Konzeptionierung des mechanischen Aufbaus wurden die Möglichkeiten untersucht, diesen mit der Steuerung der Gleeble zu verbinden, so dass die Nachführung während der Versuche durchgeführt werden kann. Folgende Ansätze sind denkbar:

- 1) Die Weg-Zeit-Kurven, die für einen Gleeble-Versuch definiert werden, werden ebenso für die LUS-Anlage hinterlegt. Die Bewegung der Anlage wird zeitgleich mit dem Experiment gestartet. Dafür muss von der Steuerung der Gleeble ein Trigger-Signal ausgegeben werden können. Vorteilhaft ist hier die geringe Informationsmenge, die während des Versuchs ausgetauscht werden muss. Dadurch werden die Fehleranfälligkeit und die Verarbeitungsgeschwindigkeit erhöht. Nachteilig ist die geringe Flexibilität, da für jeden Versuchstyp die Weg-Zeit-Information extra für die LUS-Anlage einprogrammiert werden muss. Wird ein Gleeble-Versuch nicht über Weg-Zeit-Kurven definiert, sondern kraftgesteuert, ist keine Nachführung der LUS-Equipments möglich.
- 2) Der Stempelweg der Gleeble wird als Stellgröße für die Position der LUS-Anlage verwendet. Diese Methode erfordert eine schnelle Regelung, die permanent die Position der Gleeble erfasst und entsprechend verarbeitet. Bei Änderungen der Versuchsparameter sind dadurch keine Adaptionen an der LUS-Anlage notwendig. Auch bei kraftgesteuerten Versuchen kann das Equipment nachgeführt werden. Die höhere Flexibilität der Anlage wird allerdings durch höheren Aufwand in der Implementierung eines Regelkreises erkauft.

Die Durchführbarkeit der Konzepte hängt nicht zuletzt von der Verfügbarkeit der Daten ab. Trigger-Signale wurden bei früheren Versuchen auf der Gleeble bereits ausgegeben. Bei Untersuchungen an der Gleeble konnte darüber hinaus mithilfe eines Oszilloskops festgestellt werden, dass der Stempelweg (0-66 mm) an einer Analog-Messkarte der Maschinensteuerung in Form eines Gleichspannungssignals zwischen 0-10 V ausgegeben wird. Der Zusammenhang ist linear.

Daher wurde entschieden, eine Regelung gemäß 2) aufzubauen, um die Vorteile der erhöhten Flexibilität nutzbar zu machen. Kritisch ist hier die Laufzeit von Akquisition der Positionsdaten bis hin zur Ansteuerung der Stages. Eine erste Abschätzung der erlaubten Laufzeit ergibt sich, wenn man die geforderte Verfahrgeschwindigkeit der LUS-Anlage mit der benötigten Positioniergenauigkeit in Beziehung setzt (vgl. Kapitel 2.1.4).

$$\Delta t_{max} = \frac{0.2 \text{ mm}}{3.25 \text{ mm/s}} \cong 62 \text{ ms}$$

Um der Forderung nach einfacher Bedienung und Kalibrierung der Anlage nachzukommen, wurde beschlossen, die Regelung auf jenem Messrechner laufen zu lassen, der zur Verarbeitung der LUS-Messdaten eingesetzt werden soll. Da diese durchaus beträchtlichen Datenmengen immer erst nach den Versuchen verarbeitet werden, wird erwartet, dass während der Versuche selbst genug Rechenkapazität zur Regelung der Nachführung bereitsteht. Die Software soll folgende Funktionen bieten:

- Herstellen der Verbindung zu Messhardware und zu den Controllern der Stages
- Umrechnung der eingelesenen Spannungswerte in einen Stempelweg
- Kalibrieren der optischen Systeme der LUS-Anlage vor dem Versuch
- Berechnen der Positionswerte für die Nachführung während des Versuchs basierend auf der Kalibrierung und dem Stempelweg
- Berechnen der Positionswerte für die Kompensation der Ausbauchung
- Funktionen zum manuellen Testen der Anlage
- Unterstützung der Fehlersuche durch Ausgabe von Fehlern

Als Lösung für solche Steuerungs – und Regelungsaufgaben bietet sich das Programmiersystem LabVIEW an. Hier werden Programme aufgebaut, indem Funktionsblöcke („VIs“) in einem Blockschaltbild verdrahtet werden. Auch Kontrollstrukturen wie Schleifen und Fallunterscheidungen sind grafisch umgesetzt. Parallel dazu entsteht im sogenannten Frontpanel eine grafische Benutzeroberfläche aus allen Bedienelementen, die im Blockschaltbild eingesetzt werden (z.B. Buttons, Textboxen). Unterprogramme lassen sich durch die Erstellung eigener VIs erzeugen. Vor der Ausführung werden die Programme kompiliert, was sich positiv auf die Ausführungs­geschwindigkeit auswirkt. LabVIEW bringt bereits eine reiche Funktionspalette zur Anbindung von externer Hardware mit, die von vielen einschlägigen Herstellern um eigens für deren Produkte entwickelte VIs ergänzt wird.

In den folgenden Unterkapiteln wird die Hardware – und softwareseitige Umsetzung der Regelung diskutiert.

4.1 Akquisition der Positionsdaten

Um das analoge Wegsignal der Gleeble in der Regelungssoftware nutzbar zu machen, muss es mit geeigneter DAQ-Hardware digitalisiert werden. Die verfügbaren Lösungen reichen dabei von günstigen Bastellösungen (Arduino, Raspberry Pi) bis hin zu hochspezialisierten Messkarten, die mehrere tausend Euro kosten können. Die im vorliegenden Fall relevanten Auswahlkriterien sind:

- Messbereich: z.B. 0-10 Volt
- Auflösung der Signalumwandlung: z.B. eine 10 Bit Konvertierung unterteilt den Messbereich in $2^{10} = 1024$ Schritte. Die feinste auflösbare Spannung wäre bei einem Messbereich von 0-5 V dann beispielsweise 0.0049 V.
- Die Geschwindigkeit der Signalumwandlung: welche zeitliche Verzögerung entsteht zwischen Messung und Ausgabe des Werts?
- Messrate: wie viele Messwerte können pro Sekunde ermittelt werden?
- Ist die Kommunikation mit dem PC einfach? Als Standard hat sich hier beispielsweise die RS-232-Schnittstelle etabliert. Bereits verfügbare Programmierschnittstellen für LabVIEW erleichtern die Arbeit.
- Sind Features zur Signalkonditionierung bereits eingebaut? Das betrifft beispielsweise Entstörung, Filterung oder Mittelwertbildung
- Zuverlässigkeit der Hardware
- Integrierbarkeit in eine Anlage z.B. über Hutschienenmontage

Aufgrund der einfachen Verfügbarkeit und der guten Dokumentation wurde für den ersten Ausbaustand der Anlage (Demonstrator) eine Lösung basierend auf einem Arduino UNO aufgebaut. Dessen ADC verfügt über einen Eingangsbereich von 0-5 V und wandelt das Signal in einer Auflösung von 10 Bit um. Das 0-10 V Signal aus der Gleeble wurde zur Verwendung mit dem Arduino mittels eines Spannungsteilers auf 0-5 V reduziert, wie Abbildung 18 zeigt. Mit dieser Konfiguration kann eine Ausgangsspannung aus der Gleeble mit 0.0098 V aufgelöst werden. Bei einem Stempelweg von 66 mm entspricht dies einer Wegauflösung von 0.064 mm.

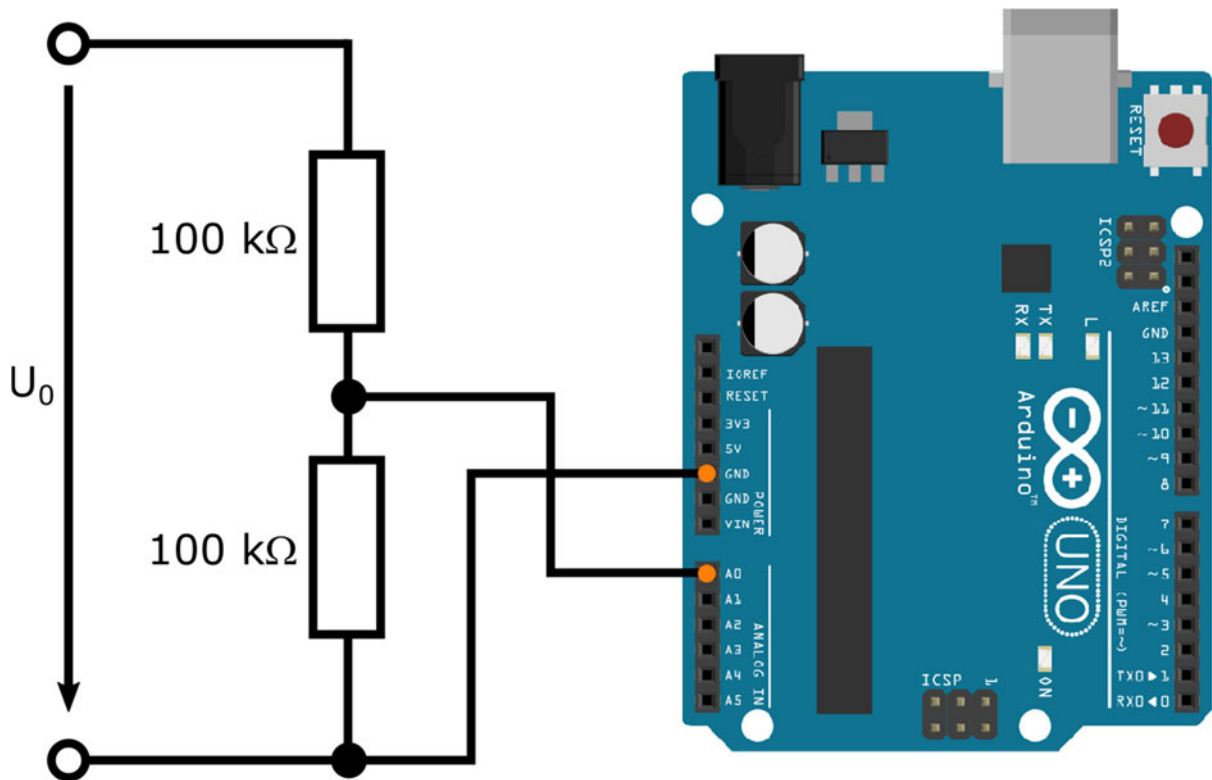


Abbildung 18: Beschaltung des Arduinos über einen Spannungsteiler

Die Anbindung des Arduino an den PC erfolgt über USB. Am Rechner erscheint der Arduino als serielles Gerät. Softwareseitig konnte in LabVIEW auf die Bibliothek LINX zurückgegriffen werden. Diese stellt alle I/O Funktionen des Arduino durch VIs in LabVIEW bereit und bringt auch die Firmware mit, die Arduino-Seitig dafür installiert werden muss.

4.2 Verbindung mit den Stages

Gemeinsam mit den Stages wurden auch zwei Controller der Firma Zaber angeschafft. Der X-MCB2 kann zwei Stages gemeinsam oder unabhängig voneinander ansteuern und wird zur Nachführung von Anregung und Detektion mit dem Stempelweg verwendet. Der X-MCB1 kann eine Stage ansteuern und wird für die Bewegung des Detektors zur Kompensation der Ausbauchung verwendet. Auch diese Controller werden mit USB am Rechner angeschlossen und erscheinen als serielle Anschlüsse.

Von Zaber wird ein Hilfsprogramm (Zaber Console) angeboten, mit dem die verbundenen Controller direkt angesprochen und konfiguriert werden können und testweise Bewegungsfahrten gemacht werden können. Für LabVIEW werden von Zaber Bibliotheken bereitgestellt, die den vollen Funktionsumfang der Controller abdecken.

4.3 Software

In LabVIEW wurde schließlich eine Software entwickelt, die die eingangs erwähnten Anforderungen erfüllt.

Das Programm besteht im Wesentlichen aus einer Schleife, die folgende Schritte abarbeitet:

- 1) Die Spannung am Arduino wird eingelesen und über ein Unterprogramm zu einem Positionswert umgerechnet. Die Umrechnung erfolgt über eine lineare Funktion, deren Parameter experimentell schnell ermittelt werden konnten.

- 2) Je nach Bewegungsmodus werden die Sollpositionen der Stages berechnet: im Kalibrierungsmodus können alle Stages individuell eingerichtet werden. Die Kalibrierung wird als Position der Gleeble (x_0) und aller Stages ($x_{0,i}$) zum Kalibrierzeitpunkt gespeichert. Im Nachführungsmodus wird basierend darauf und der aktuellen Position der Gleeble (x) eine Sollposition (x_i) berechnet:

$$x_i = x_{0,i} + a(x - x_0)$$

Der Faktor a beträgt bei Verfolgung der Probenmitte 0.5 (halber Weg).

- 3) Für die Kompensation der Ausbauchung kann eine .csv Datei geladen werden, die den Umformweg Δx einer Verschiebung der Probenoberfläche Δr zuordnet (vgl. Kapitel 2.1.4). In jedem Zeitschritt wird für den aktuellen Stempelweg innerhalb dieser Wertetabelle linear interpoliert. Dadurch ist die größtmögliche Flexibilität gewährleistet, da die Änderung von Probenlänge und ausgebauchtem Durchmesser allgemein nicht in einem linearen Zusammenhang stehen.
- 4) Die Bewegungsanweisungen mit den Sollpositionen werden an die Controller der Stages gesendet.

Für Tests und Fehlersuche stehen folgende Hilfsmittel zur Verfügung:

- Die Fehlermeldungen von Arduino und Controllern werden in Error-Out-Fenstern angezeigt
- Alternativ zum Arduino kann ein Testmodus aktiviert werden, bei dem das Positionssignal über einen Schieberegler simuliert wird.
- Von den Controllern können die Positionen der Stages zurückgegeben werden. Dies erhöht allerdings das Kommunikationsvolumen zwischen Computer und Controllern und führt so zu längeren Laufzeiten der Schleife.
- Zu Beginn und Ende der Schleife werden die Zeiten gemessen. Aus deren Differenz kann die Laufzeit der Schleife und somit der Regelung bestimmt werden.

Abbildung 19 zeigt die erste Seite der Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware. Weitere Screenshots und Details zum Programmaufbau sind im Rahmen der Bedienungsanleitung im Anhang A angeführt.

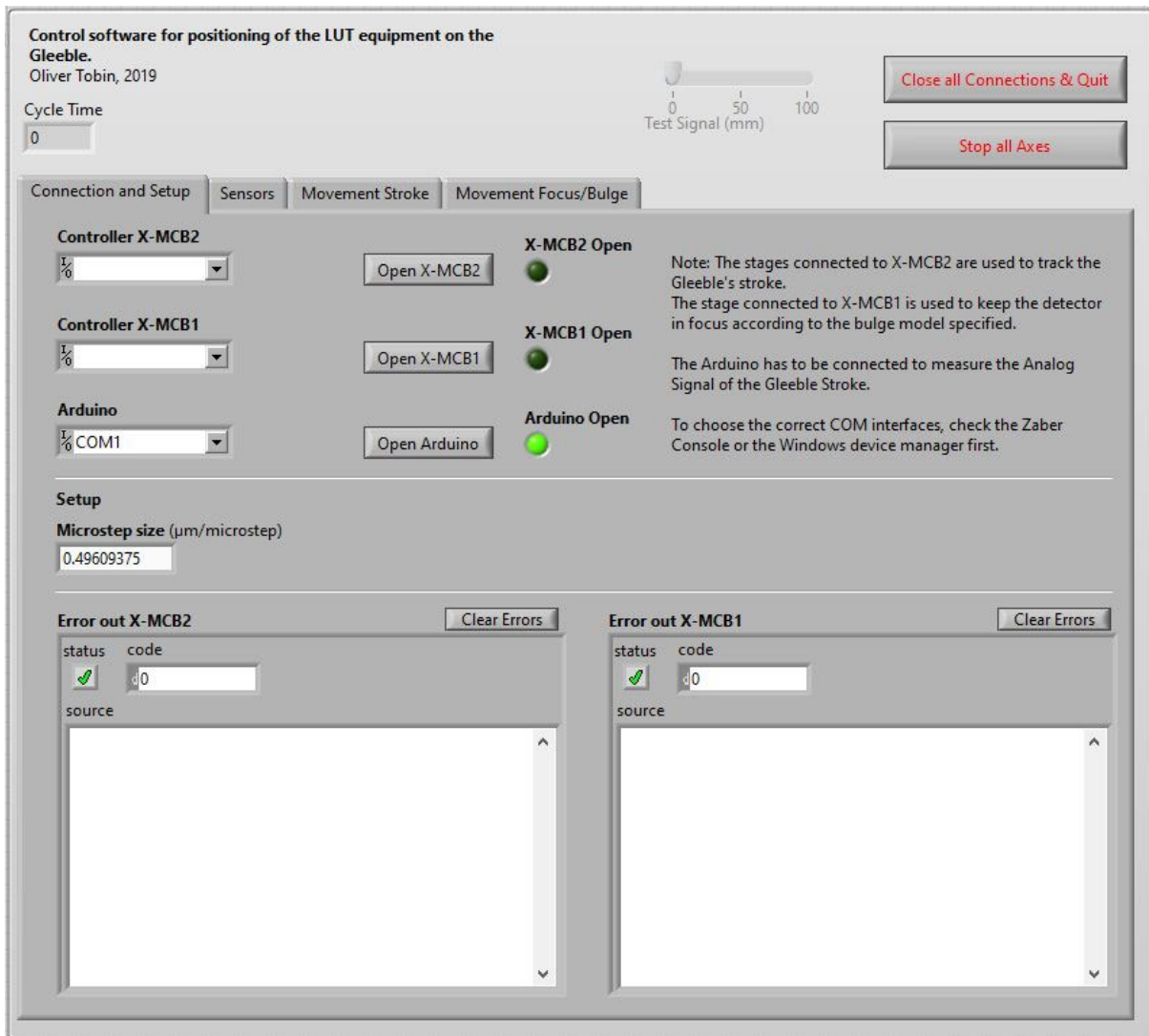


Abbildung 19: Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware

5 Inbetriebnahme und Test

Im Oktober 2019 waren die wesentlichen Hardware – und Softwarekomponenten bereit und es erfolgte der Zusammenbau der Anlage. Da während der Bearbeitungszeit der vorliegenden Arbeit das LUS-Equipment noch nicht geliefert war, wurde lediglich ein Demonstrator aufgebaut mit dem Ziel, Antworten auf folgende Fragen zu geben:

- 1) Ist die Nachführung präzise und schnell genug für die in Kapitel 1.3 geforderten Versuche?
- 2) Kann mit den alternativen Türen und Fenstern Vakuumdichtheit in der Probenkammer hergestellt werden?
- 3) Ist die Anlage zuverlässig und ausfallsicher genug?
- 4) Welche Verbesserungen sind für den Betrieb in realen Versuchen notwendig?

Abbildungen 20 bis 22 zeigen die Einbausituation der Anlagenteile. Weil auch der Messrechner noch nicht geliefert war, erfolgte die Inbetriebnahme mittels eines Laptops, auf dem LabVIEW installiert war. Die Controller der Stages wurden direkt auf eines der Breadboards der Anlage montiert.



Abbildung 20: Anregungsseite der LUS-Anlage mit einer Stage.



Abbildung 21: Detektorseite der LUS-Anlage mit zwei Stages

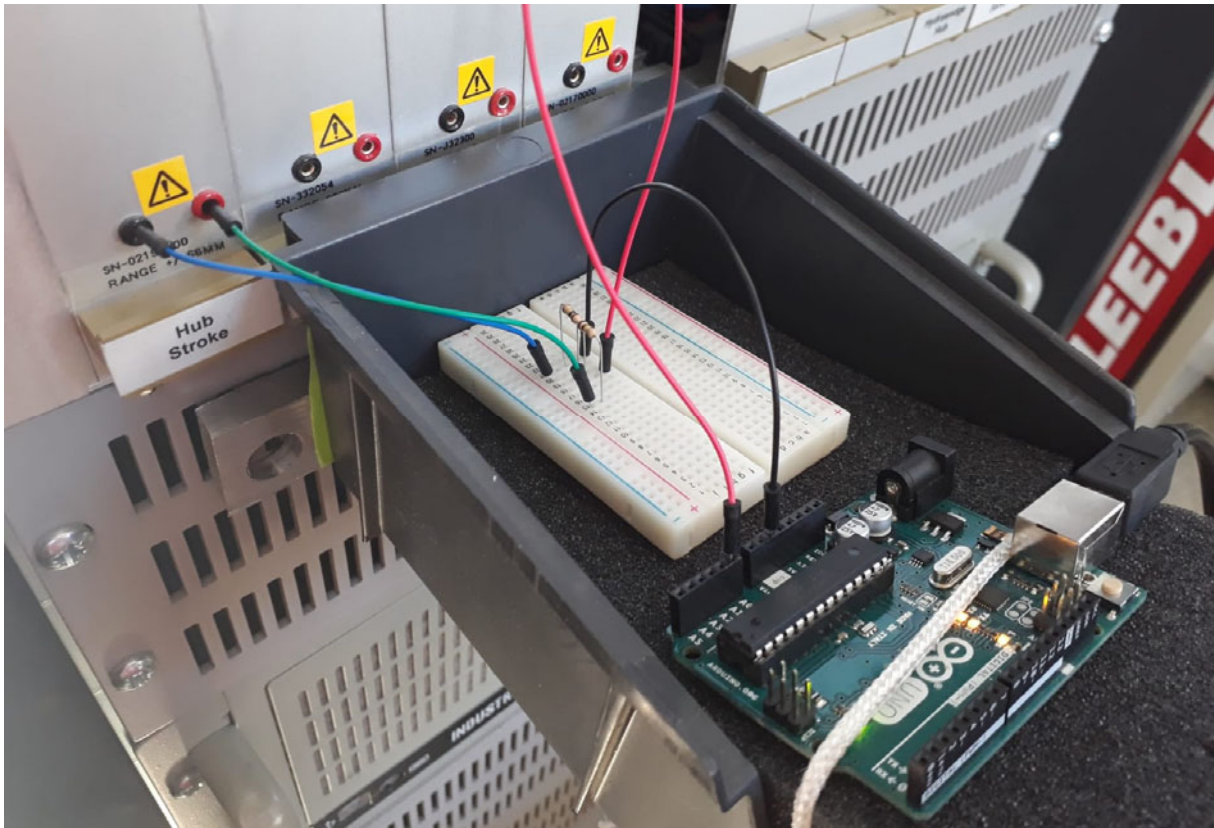


Abbildung 22: Verbindung von Arduino mit Gleeble für den Demonstrator

Ein Versuch mit der Anlage umfasst folgende Schritte:

- 1) Einrichtung von Probe und Gleeble wie gewohnt.
- 2) Start der Software und Verbinden mit Controllern und Arduino.
- 3) Kalibrieren der LUS-Anlage auf den Messpunkt mittels der Freiheitsgrade. Da die Anlage eingehaust ist, können hierfür Webcams mit geeigneten Schutzfiltern verwendet werden.
- 4) Für die Kompensation der Ausbauchung kann eine .csv Datei geladen werden.
- 5) Nach der Kalibrierung kann der Nachfolgemodus aktiviert werden (vgl. Kapitel 4.3). Die Anlage ist jetzt an den Stempelweg gekoppelt.
- 6) Durchführung des Versuchs.
- 7) Deaktivierung des Nachfolgemodus.

5.1 Problem mit Massenschleife

Bei der Inbetriebnahme fiel auf, dass das gemessene Spannungssignal am Arduino wesentlich stärker verrauscht war, als die Auflösung des ADCs zu erwarten ließ. Wie in Kapitel 4.1 berechnet, muss erwartet werden, dass das Signal um 0.0098 V zwischen zwei benachbarten Messwerten hin und her springen kann. Das Rauschen war allerdings etwa um den Faktor 10 höher. Eine weitere Beobachtung des Verhaltens zeigte, dass die Störung besonders stark wird, wenn der Klimakompressor der Gleeble-Halle arbeitet. Die Störung verschwand hingegen vollständig, sobald die Controller der Stages vom Kontrollrechner abgesteckt wurden. Das Problem ließ sich als Massenschleife identifizieren, in welcher insbesondere die Ableitströme der Leistungselektronik in der Kompressorsteuerung einen Störstrom verursachten. Die Massenschleife wird über die Netzteile der Controller mittels der USB-Verbindung zum Rechner und von dort weiter zum Arduino geschlossen, und sorgt für die Störung des Messsignals wie in Abbildung 23 veranschaulicht.

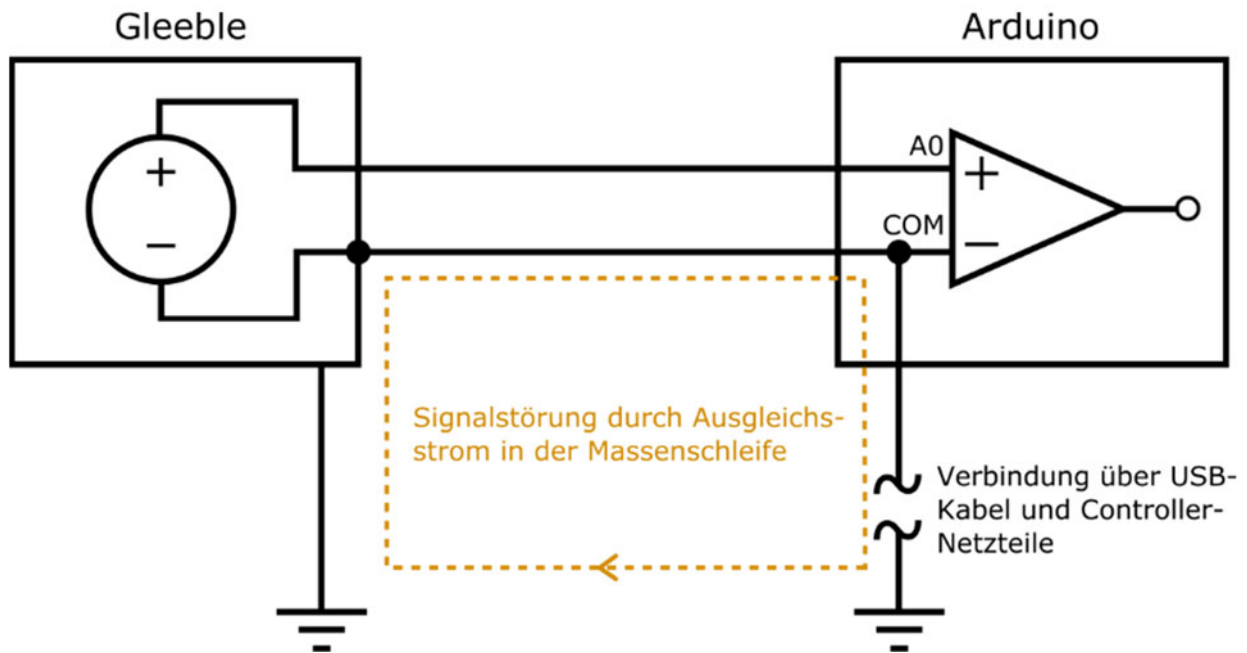


Abbildung 23: Masseschleife beim Messen des Analogsignals aus der Gleeble

Die Störung kann entfernt werden, indem der Kreislauf der Massenschleife unterbrochen wird. Im konkreten Fall geschah dies durch den Einbau von USB-Entkopplern in die Verbindung zwischen Computer und Stage-Controllern. Diese Entkoppler stellen mittels Optokopplern eine galvanische Trennung der Verbindung her. Dadurch erfolgt die Spannungsmessung auf differenzielle Weise und es wird der tatsächliche Spannungsabfall zwischen den Buchsen der Messkarte ermittelt (vgl. auch [54]). Eine zeitliche Verzögerung durch die Entkoppler konnte nicht festgestellt werden.

5.2 Qualität der Nachführung

Um die Frage nach der Genauigkeit und Schnelligkeit der Nachführung besser beantworten zu können, wurde auf der Stage der Anregungseinheit eine High-Speed-Kamera inklusive Beleuchtung montiert (Abbildung 24). Am Stempel der Gleeble wurde ein Kunststofflineal aufgeklebt (Abbildung 25). Dieses Lineal wurde mit der High-Speed-Kamera gefilmt, während auf der Gleeble eine programmierte Stempelbewegung abgefahren wurde. In Zyklen von 20 s erfolgte eine Bewegung von 0 mm bis 32.5 mm und wieder zurück, was der geplanten Verfahrgeschwindigkeit von 3.25 mm/s entspricht (vgl. Kapitel 2.1.4). Dadurch kann quantifiziert werden, wie sich die Laufzeit der Regelung in einem Positionierungsfehler der LUS-Anlage niederschlägt.

Die Kamera wurde mittels der Stage so eingerichtet, dass vor Versuchsbeginn ein eingeblendetes Fadenkreuz im Kamerabild genau über der Null-Markierung des Lineals zu liegen kam. Abbildung 26 zeigt das Kamerabild bei Verfahren von Stempel und Stage nach rechts bzw. links. Man erkennt, dass durch die Laufzeit der Regelung ein Wegfehler von ca. ± 0.15 mm entsteht, was innerhalb des zulässigen Bereichs liegt. Die in der Software bestimmte Schleifenzeit während des Testlaufs lag bei ca. 35 ms.

Für die in Kapitel 2.1.1 definierten Stauchversuche mit $\dot{\varphi}_m = 1$ erfüllt die Anlage die Anforderungen.

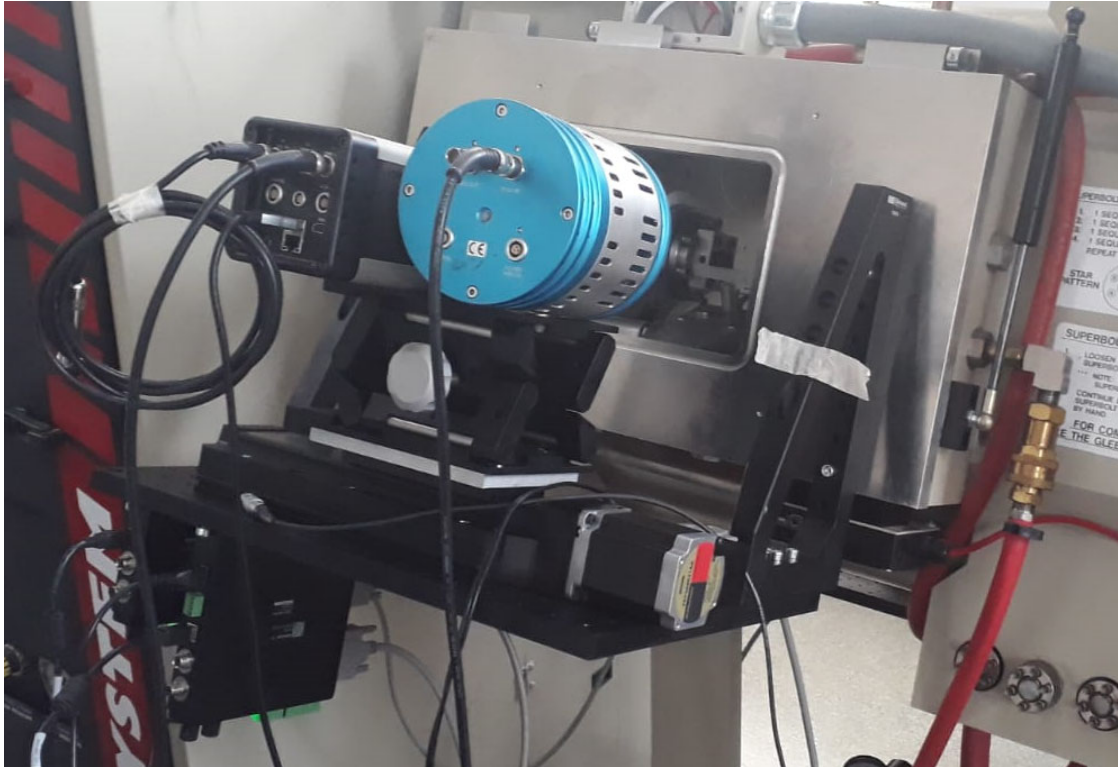


Abbildung 24: High-Speed-Kamera und Stroboskoplicht

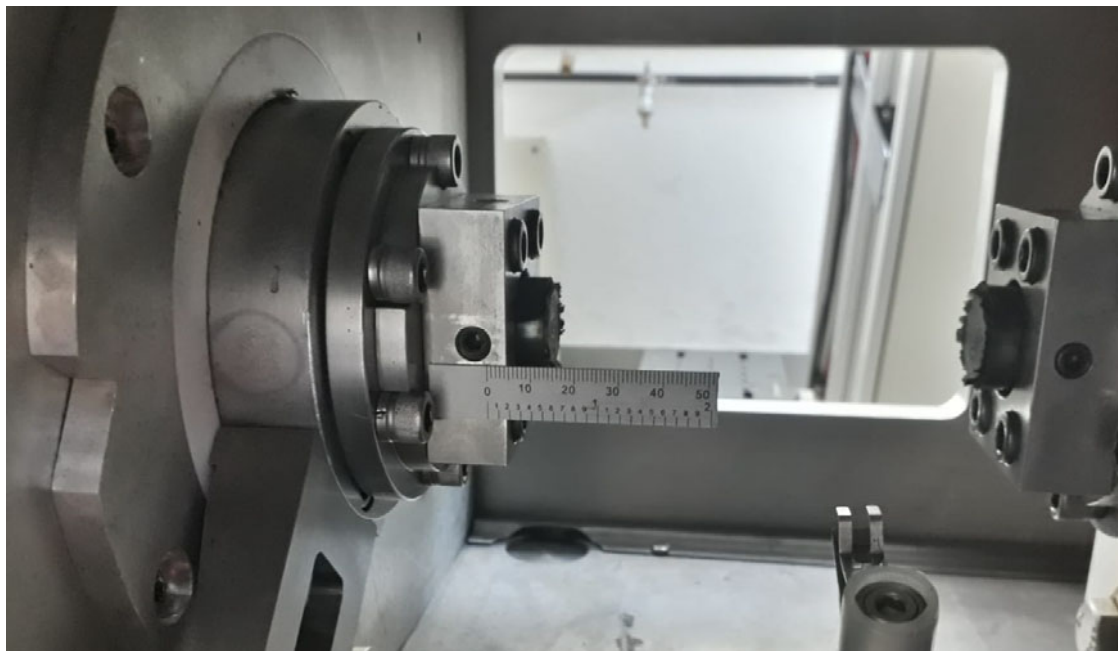


Abbildung 25: Kunststofflineal am Stempel

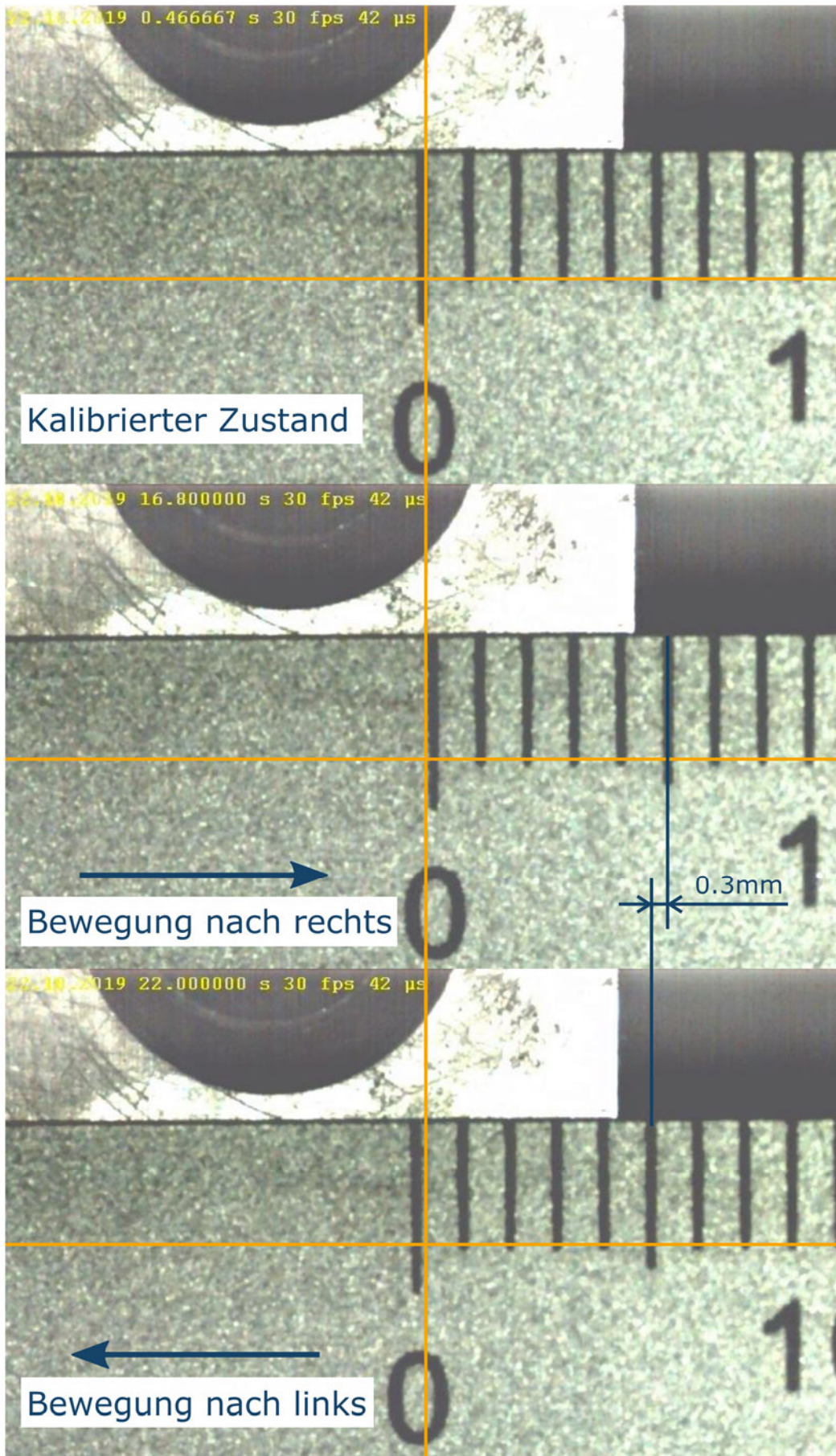


Abbildung 26: Kamerabilder für unterschiedliche Bewegungszustände der LUS-Anlage

5.3 Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit eines technischen Systems kann auf verschiedene Arten bewertet werden. Im Testbetrieb fiel auf, dass die Verbindung zum Arduino nicht sehr zuverlässig hergestellt werden kann und gelegentlich ausfiel. Abgesehen davon konnten beim Testlauf keine Ausfälle beobachtet werden.

Versucht man die Zuverlässigkeit zu quantifizieren, stehen verschiedene Kennwerte zur Verfügung. Ein gängiges Maß ist der MTBF-Wert, der die gemittelte Zeit zwischen zwei Ausfällen bezeichnet. Nachfragen bei den Herstellern ergaben, dass für keine der Komponenten in der Anlage MTBF-Werte ermittelt wurden. Es wurde im Folgenden trotzdem versucht, einige Information zu den Einzelkomponenten zusammenzutragen.

- Stages und Controller: Es gibt keine Daten bzgl. der Lebensdauer der X-MCB Controller. Für die Stages vom Typ LRT wurde bei Zaber unter 500 kg Beladung eine Fahrdistanz von 3082 km ermittelt, bevor ein Ausfall auftrat. [55] Setzt man diese Fahrdistanz in Bezug zum Stauchversuch, entspricht dies 3.4×10^8 Versuchen. Diese Werte sind statistisch nicht abgesichert und können außerdem je nach Beladung und Fahrgeschwindigkeit stark variieren.
- Die Schrittmotoren, mit denen die Stages angetrieben werden, sind vom Typ PKP der Herstellers Oriental Motor. Hierzu wurde direkt beim Hersteller eine MTBF-Angabe von 5000 Betriebsstunden bei einer Drehzahl von 3000 U/min gefunden. [56]
- Arduino: Der Arduino ist eine Bastellösung, für die Zuverlässigkeitswerte nicht festgestellt werden.

5.4 Vakuumdichtheit

Bei einem Test der Vakuumdichtheit war es möglich, mit den neu konstruierten Türen ein Vakuum von 0.42 Torr (0.56 mbar) herzustellen, was den Werten entspricht, die auch mit den Originaltüren der Gleeble erreicht werden können. Die für Tests mit Feinvakuum benötigte Feinvakuumpumpe stand zum Testzeitpunkt nicht zur Verfügung.

6 Fazit und Ausblick

Die Laserultraschallprüfung stellt der Forschung ein wichtiges Werkzeug zur Verfügung, Materialverhalten InSitu zu charakterisieren. Die vorliegende Arbeit hat ein mechanisch-elektrisches Konzept zur Verwendung einer LUS-Anlage auf der Gleeble hervorgebracht. Die Tests mit dem Demonstrator zeigten, dass die wesentlichen Ziele der ersten Ausbaustufe erreicht werden konnten. Zusätzlich zur Fertigstellung inklusive der LUS-Messtechnik sind noch weitere Verbesserungen der Anlage wünschenswert, die im Folgenden erörtert werden. Abschließend werden weitere Anwendungsmöglichkeiten diskutiert.

6.1 Ausständige Erweiterungen und mögliche Verbesserungen

Der Demonstrator verfügt noch über keine Schutzbleche. Diese wurden zwar, wie in Kapitel 3.4 dargelegt, geplant, allerdings waren die genauen Maße des von RECENDT empfohlenen LUS-Equipments noch nicht bekannt. Mit der Fertigung wird daher gewartet, bis bei einem endgültigen Aufbau der Anlage alle Unklarheiten bzgl. des Platzbedarfs geklärt werden können.

Bei der Anlagenplanung wurde außer Acht gelassen, dass die Gesamtanlage noch Zusatzaggregate wie Stromversorgungseinheiten, Kühlgeräte und Geräte zur Erfassung der Messdaten

(Messrechner, Anbindung zum IBA-System) beinhaltet. Durch die Verbindungen mittels Kabeln, Schläuchen oder Lichtwellenleitern besteht dabei eine höhere Flexibilität in der Anordnung, weswegen noch keine spezifische Anordnung entwickelt wurde.

Wie in Kapitel 5.2 gezeigt, erlaubt der derzeitige Ausbauzustand der Anlage, Stauchversuche mit einer mittleren Umformgeschwindigkeit von $\dot{\varphi}_m = 1$ zu verfolgen. Der Kameraversuch wurde auch mit $\dot{\varphi}_m = 5$ wiederholt, wobei eine 5-fach höhere Verfahrgeschwindigkeit programmiert wurde. Hier zeigt sich eine Abweichung von ± 1.2 mm, wodurch bei thermischen Versuchen bereits u.U. die Heizlinse der resistiven Heizung verlassen werden würde. Experimente mit $\dot{\varphi}_m = 5$ sind von Interesse, da sich dadurch das Umformverhalten von schnelleren Schmiedeaggregaten wie z.B. Spindelpressen abbilden lassen kann. Ein künftiges Ausbauziel ist daher, die Qualität der Nachführung so anzupassen, dass der Positionierfehler auch bei erhöhter Geschwindigkeit gering bleibt. Es wird vermutet, dass das Verbesserungspotential größtenteils in der Verkleinerung der Laufzeit des Regelkreises (derzeit ca. 35 ms) liegt. Folgende Möglichkeiten erscheinen denkbar:

- Die Controller der Stages erlauben den Betrieb im „Lockstep“-Modus. Dies bedeutet, dass mehrere Stages gruppiert und gemeinsam verfahren werden können. Da die Freiheitsgrade X1 und X2 im Nachführungsmodus stets die gleichen Relativbewegungen ausführen, können diese gruppiert und gemeinsam angesprochen werden. Dadurch halbiert sich das Kommunikationsvolumen zwischen Computer und Controller.
- Von den 35 ms Laufzeit werden ca. 15 ms nur für die Akquisition des Analogsignals vom Arduino benötigt. Aus Gründen der Zuverlässigkeit, Messgeschwindigkeit und Signalauflösung erscheint es empfehlenswert, den Arduino durch ein DAQ-Modul zu ersetzen, welches besser geeignet und integrierbar ist. Das Modul AI4 des Herstellers LucidControl stellt für diesen Zweck eine interessante Lösung dar. Die Eckdaten sind in Tabelle 7 zusammengefasst.
- Bei den Tests aus Kapitel 5.2 wurde die Steuerungssoftware auf einem alten Laptop ausgeführt. Es ist zu erwarten, dass mit einem moderneren, sauber aufgesetzten Rechner die Laufzeit weiter sinkt.
- Die Bibliotheken, die von Zaber zur Verwendung der Controller mit LabVIEW bereitgestellt werden, warten nach Senden eines Positionierbefehls (z.B. *move abs 24003*) stets die Antwort des Controllers (z.B. *0 OK IDLE*) ab. Dies ermöglicht zwar eine differenzierte Fehlersuche, bedeutet aber, dass einige Millisekunden auf eine Antwort gewartet werden muss, deren Inhalt im Rahmen einer Echtzeitanwendung ohnehin nicht weiterverarbeitet wird. Eine Untersuchung der Möglichkeiten, die Programmibliotheken dahingehend zu optimieren, erscheint vielversprechend.

Tabelle 7: Daten des LucidControl AI4 Moduls [57]

Messbereich	0-10 V, 4 Kanäle
Auflösung	14 Bit
Genauigkeit	0.25%, verbesserbar durch Oversampling
Messrate	Bis zu 250 Werte pro Sekunde, je nach Oversampling und Anzahl der aktiven Kanäle
Anbindung	USB / RS232
Entkopplung	Galvanische Trennung der USB-Schnittstelle serienmäßig
Montage	Hutschiene DIN EN 60715

6.2 Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Durch den modularen Aufbau mit standardisierten optisch-mechanischen Komponenten könnte die LUS-Anlage mit vertretbarem Aufwand auf anderen Prüfmaschinen im Umfeld des Lehrstuhls für Umformtechnik nutzbar gemacht werden:

- Schweißroboter am Lehrstuhl für Umformtechnik
- Reibschweißanlage am Lehrstuhl für Umformtechnik
- Linearschweißanlage am Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau
- Überwachung der Gusserstarrung z.B. am ÖGI
- Ähnliche Gleeble-Prüfmaschinen in den Forschungsabteilungen von Unternehmen

Folgende Änderungen an der Anlage können dafür notwendig sein:

- Anstatt des Konzepts, die Anlage wie zwei Türen in die Probenkammer einzuhängen, müssten andere Montagekonzepte je nach Maschine entwickelt werden.
- Je nach benötigten Freiheitsgraden kann die Anlage unterschiedlich zusammengebaut werden.
- Falls auch in diesen Fällen eine Nachführung erforderlich ist, muss je nach Maschine eine individuelle Lösung für das Regelungskonzept bzw. die Kommunikation mit der jeweiligen Maschinensteuerung gefunden werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] J. Krautkrämer und H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, fünfte völlig überarbeitete Auflage, Heidelberg: Springer, 1986.
- [2] C. B. Scruby und L. E. Drain, *Laser Ultrasonics Techniques and Applications*, New York: Taylor & Francis, 1990.
- [3] E. Lindth-Ulmgren und M. Ericsson, „Applications of Laser Ultrasonics to studies of microstructural and mechanical properties of metals,“ Swedish Institute for Metals Research, Stockholm, 2004.
- [4] A. Moreau, „Laser-Ultrasonics for Metallurgy: Software and Applications,“ 2012. [Online]. Available: <http://ctome.org/wp-content/uploads/2016/08/LUMet-documentation-2012-05.pdf>. [Zugriff am 18. 12. 2019].
- [5] D. Royer und E. Dieulesaint, *Elastic waves in Solids*, Berlin Heidelberg: Springer, 2000.
- [6] D. Lévesque, S. Kruger und N. Legrand, „Laser-ultrasonic methods to characterize steel microstructure: Overview and recent developments,“ in *3rd International Workshop on Laser-Ultrasound for Metals*, Stockholm, 2017.
- [7] T. Garcin, J. Schmitt und M. Militzer, „Application of laser ultrasonics to monitor microstructure evolution in Inconel 718 superalloy,“ *MATEC Web of Conferences Vol. 14*, 29. 08. 2014.
- [8] R. M. White, „Generation of Elastic Waves by Transient Surface Heating,“ *Journal of Applied Physics* 34(12), p. 3559–3567, 1963.
- [9] D. A. Hutchins, „Ultrasonic Generation by Pulsed Lasers,“ *Physical Acoustic*, p. 21–123, 1988.
- [10] J. C. Cheng, S. Y. Zhang und L. Wu, „Excitations of thermoelastic waves in plates by a pulsed laser,“ *Appl. Phys. A* 61, pp. 311-319, 1995.
- [11] R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins, S. B. Palmer und C. B. Scruby, „Quantitative measurements of Laser generated acoustic waves,“ *J. Appl. Phys.*, 53, pp. 4064-4071 , 1982.
- [12] J. F. Ready, *Effects of High-Power Laser Radiation*, New York: Academic Press, 1971.
- [13] J. P. Monchalín, „Detection at a distance of laser-generated ultrasound using a confocal Fabry-Perot interferometer,“ *Can. J. Phys* 64, pp. 1320-1323, 1986.
- [14] J. P. Monchalín, „Progress towards the Application of Laser-Ultrasonics in Industry,“ *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 12*, pp. 495-506, 1993.
- [15] e. David R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 90th Edition (CD-ROM Version 2010)*, Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor and Francis.
- [16] J. P. Monchalín, „Optical Detection of Ultrasound,“ *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 33(5), p. 485–499, 1986.

- [17] J. P. Monchalín, J. D. Aussel, R. Héon, C. K. Jen, A. Boudreault und R. Bernier, „Measurement of in-plane and out-of-plane ultrasonic displacements by optical heterodyne interferometry,“ *Journal of Nondestructive Evaluation*, 8(2), p. 121–133, 1989.
- [18] H. Sontag und A. C. Tam, „Optical Detection of Nanosecond Acoustic Pulses,“ *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 33(5), pp. 500-506, 1986.
- [19] J. Hecht, *Understanding Lasers, An Entry-Level Guide*, 4th Edition, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2019.
- [20] R. Mezrich, D. Vilkomerson und K. Etzold, „Ultrasonic waves: their interferometric measurement and display,“ *Applied Optics*, 15(6), pp. 1499-1505.
- [21] S. Krishnaswamy, „Theory and Applications of Laser-Ultrasonic Techniques,“ *Ultrasonic Nondestructive Evaluation*, pp. 435-494, 2003.
- [22] R. J. Dewhurst und Q. Shan, „Optical remote measurement of ultrasound,“ *Meas. Sci. Technol.* 10, pp. 139-168, 1999.
- [23] B. Reitingner, J. Roither, T. Beres, C. Hornhuber und P. Burgholzer, „Remote ultrasound detection with a quasi-balanced confocal Fabry–Perot interferometer,“ *Nondestructive Testing and Evaluation Vol. 26*, p. 229–236, 2011.
- [24] Q. Shan, S. M. Jawad und R. J. Dewhurst, „An automatic stabilization system for a confocal Fabry-Perot interferometer used in the detection of laser-generated ultrasound,“ *Ultrasonics Vol 31 No 2*, pp. 105-115, 1993.
- [25] C. S. Lim, H. C. Park, H. J. Huh, M. K. Kang, J. Oh, Y. Nagata, H. Yamada und N. Hamada, „Measurement of Laser-Ultrasound using a Fiber Fabry-Perot Interferometer,“ in *1st International Symposium on Laser Ultrasonics: Science, Technology and Applications*, Montreal, 2008.
- [26] P. Yeh, *Introduction to Photorefractive Nonlinear Optics*, New York: John Wiley and Sons, 1993.
- [27] R. K. Ing und J. P. Monchalín, „Broadband optical detection of ultrasound by twowave mixing in a photorefractive crystal,“ *Applied Physics Letters* 59, pp. 3233-3235, 1991.
- [28] S. Zamiri, B. Reitingner, T. Berer, S. Bauer und P. Burgholzer, „Determination of nanometer vibration amplitudes by using a homodyne photorefractive crystal interferometer,“ *Procedia Engineering* 5, pp. 299-302, 2010.
- [29] S. Zamiri, B. Reitingner, M.-A. Rodríguez-Rivera, G. Ramos-Ortíz, P. Burgholzer, S. Bauer und J.-L. Maldonado, „Employing 532 nm Wavelength in a Laser Ultrasound Interferometer Based on Photorefractive Polymer Composites,“ *Open Access Library Journal*, 2, p. 1247, 2015.
- [30] A. Hochreiner, B. Reitingner, K.-D. Bouchal, S. Zamiri, P. Burgholzer und T. Berer, „Quasi-balanced two-wave mixing interferometer for remote ultrasound detection,“ *Journal of Modern Optics*, 60:16, pp. 1327-1331, 2013.

- [31] Tecnar, „FPC Interferometer,“ [Online]. Available: <http://insightkk.xsrv.jp/en/products/laser-ultrasound/fpc-interferometer>. [Zugriff am 23.12.2019].
- [32] Tecnar, „TWM Interferometer,“ [Online]. Available: <http://insightkk.xsrv.jp/en/products/laser-ultrasound/twm-interferometer>. [Zugriff am 23.12.2019].
- [33] T. Garcin, „Laser ultrasonic sensitivity to grain growth and twinning during metal processing,“ in *3rd International Workshop on Laser-Ultrasound for Metals*, Stockholm, 2017.
- [34] A. Moreau, „Laser-Ultrasonic Characterization of the Microstructure of Aluminium,“ *Materials Science Forum*, pp. 519-521, 2006.
- [35] W. Haderer, „LUS for Hardness Penetration Depth Imaging,“ in *4th International Workshop on Laser-Ultrasound for Metals*, Linz, 2019.
- [36] M. e. a. Clark, „Spatially resolved acoustic spectroscopy (SRAS) microstructural imaging,“ *45th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Volume 38*, 2019.
- [37] Dynamic Systems Inc., „Thermal-Mechanical Physical Simulation System Gleeble 3800-GTC,“ [Online]. Available: <https://www.leeble.com/products/leeble-systems/leeble-3800.html>. [Zugriff am 10.10.2019].
- [38] Dynamic Systems Inc., „LUMet: Laser ultrasonic sensor for InSitu metallurgical microstructure studies,“ [Online]. Available: <https://leeble.com/lumet.html>. [Zugriff am 10.10.2019].
- [39] Lumibird, „Quantel CFR (200-400 mJ),“ [Online]. Available: <http://www.quantel-laser.com/en/products/item/cfr-200-400-mj--133.html>. [Zugriff am 11.10.2019].
- [40] Insight k.k., „Laser Ultrasonic Systems,“ [Online]. Available: <http://www.insightkk.co.jp/index.php/en/laser-ultrasonic-systems>. [Zugriff am 11.10.2019].
- [41] E. Scherleitner, „The use of LUS in a Dilatometer,“ in *4th International Workshop on Laser-Ultrasound for Metals*, Linz, 2019.
- [42] E. Scherleitner, B. Reitingner, M. Gruber und P. Burgholzer, „Implementation and Use of a Laser-Ultrasonic System in a Deformation and Quenching Dilatometer,“ *Materials Science Forum Vol. 941*, pp. 2423-2428, 2018.
- [43] M. Malmström, M. Åslund, E. Lindh-Ulmgren, B. Hutchinson, D. Martin und J. Pyykkönen, „Recent experience of LUS in hot deformation of steels using Gleeble and rolling experiments,“ in *3rd International Workshop on Laser-Ultrasound for Metals*, Stockholm, 2017.
- [44] Lumibird, „Quantel Merion C,“ [Online]. Available: <https://www.quantel-laser.com/de/produkte/item/merion-c-879.html>. [Zugriff am 15.10.2019].

- [45] ÖNORM EN 60825-1:2014 Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen.
- [46] Newport, „IDL Long-Travel Industrial Linear Stages,“ [Online]. Available: <https://www.newport.com/f/idl-industrial-grade-long-travel-linear-motor-stages>. [Zugriff am 16. 10. 2019].
- [47] Parker Hannifin, „LCB - Kompaktes Linearmodul,“ [Online]. Available: https://www.parker.com/Literature/Electromechanical%20Europe/Literature/190_510012_LCB_catalog.pdf. [Zugriff am 16. 10. 2019].
- [48] SKF, „Profilschienenschlitten LTS mit Linearantrieb,“ [Online]. Available: <https://www.skf.com/binary/12-68754/6611DE%20Profilschienenschlitten%20LTS.pdf>. [Zugriff am 16. 10. 2019].
- [49] Vogel Gruppe, „Modulare elektrische Linearantriebe OSP-E,“ [Online]. Available: https://www.vogel-gruppe.de/fileadmin/user_upload/Produktinformationen_Parker/Aktuatoren/Parker_Aktuatoren_Modulare%20Elektrische%20Linearantriebe_Pdf_P-A4P017D.pdf. [Zugriff am 16. 10. 2019].
- [50] Zaber, „LRT-C Series: High-load motorized linear stages with dust covers,“ [Online]. Available: <https://www.zaber.com/products/linear-stages/LRT-C>. [Zugriff am 16. 10. 2019].
- [51] Zaber, „LSQ Series: Motorized linear stages,“ [Online]. Available: <https://www.zaber.com/products/linear-stages/LSQ>. [Zugriff am 16. 10. 2019].
- [52] trygonal, „Einbauarten und Oberflächengüten bei Verwendung von O-Ringen,“ [Online]. Available: https://de.trygonal.com/orings_assembly.htm. [Zugriff am 06 11 2019].
- [53] pgo, „BOROFLOAT 33 Temperaturbeständiges Borosilikatglas,“ [Online]. Available: <https://www.pgo-online.com/de/borofloat.html>. [Zugriff am 18. 10. 2019].
- [54] National Instruments, „Messen von Spannungen,“ [Online]. Available: <http://www.ni.com/tutorial/7113/de/>. [Zugriff am 15 11 2019].
- [55] Abert David, Zaber, *Email-Korrespondenz bzgl. MTBF-Werten*, 2019.
- [56] Oriental Motor, „Service Life,“ [Online]. Available: https://www.orientalmotor.com/products/pdfs/2015-2016/H/Service_Life.pdf. [Zugriff am 4. 12. 2019].
- [57] Lucid Control, „USB Analog Input Module,“ [Online]. Available: <https://www.lucid-control.com/product/lucidcontrol-ai4-4-channel-analog-input-usb-module/>. [Zugriff am 4. 12. 2019].

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Richtungsabhängige Schallintensität durch thermoelastische Schallerzeugung berechnet für Longitudinalwellen (a) und Transversalwellen (b) nach [9]	10
Abbildung 2: Richtungsabhängige Schallintensität durch einen Kraftstoß bei Ablation berechnet für Longitudinalwellen (a) und Transversalwellen (b) nach [9]	11
Abbildung 3: Absorptionsfaktor ausgewählter Metalle in Abhängigkeit von der Wellenlänge nach [15] für Einstrahlung senkrecht zur Metalloberfläche.....	12
Abbildung 4: Michelson-Interferometer nach [2]	13
Abbildung 5: Verbessertes Michelson-Interferometer mit polarisierenden Strahlteilern und Differenzialmessung nach [2]	14
Abbildung 6: Geschwindigkeits-Interferometer nach [2]	15
Abbildung 7: Prinzipskizze eines planaren Fabry-Perot-Interferometers (a) und Abhängigkeit zwischen Frequenz und austretender Lichtintensität (b) nach [2]	16
Abbildung 8: Aufbau eines Detektorsystems mit einem konfokalen Fabry-Perot-Interferometer nach [13].....	16
Abbildung 9: Schema eines TWM mit einem photorefraktiven Kristall nach [28]	17
Abbildung 10: Typische Wellenform aus einer LUS-Messung, bestehend aus mehreren Echos nach [4]	18
Abbildung 11: Prinzipskizze des SRAS-Systems nach [36]	19
Abbildung 12: MCUs der Gleeble am Lehrstuhl für Umformtechnik, a) General Purpose MCU, b) Hydrawedge	21
Abbildung 13: Benötigte Freiheitsgrade bei einer transmissiven LUS-Messung an einer umgeformten Probe.....	26
Abbildung 14: Zweiachsige Nachführung der Detektion während der Messung.....	26
Abbildung 15: CAD-Modell der LUS-Anlage.....	29
Abbildung 16: Einbausituation der Anregungseinheit bei breiter und schmaler Probenkammer (beim Detektor analog dazu)	33
Abbildung 17: Einhausung der Anlage.....	34
Abbildung 18: Beschaltung des Arduinos über einen Spannungsteiler	37
Abbildung 19: Benutzeroberfläche der Steuerungssoftware	39
Abbildung 20: Anregungsseite der LUS-Anlage mit einer Stage.	40
Abbildung 21: Detektorseite der LUS-Anlage mit zwei Stages	40
Abbildung 22: Verbindung von Arduino mit Gleeble für den Demonstrator.....	41
Abbildung 23: Masseschleife beim Messen des Analogsignals aus der Gleeble.....	42
Abbildung 24: High-Speed-Kamera und Stroboskoplicht.....	43
Abbildung 25: Kunststofflineal am Stempel	43
Abbildung 26: Kamerabilder für unterschiedliche Bewegungszustände der LUS-Anlage	44