



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Konstruktion und Aufbau einer Messvorrichtung zur Erfassung der Strahlungsemission beim CO₂-Laserschneiden

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

A.o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Liedl
E 311

Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Stefan Heidlmayr

Matr.Nr. 0025069

Franz-Koci-Straße 2/6/28

1100 Wien

Wien, am

.....

Unterschrift

Danksagung!

Mein besonderer Dank gilt Herrn A.o. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Liedl, für die interessante Aufgabenstellung und die fachliche Betreuung meiner Arbeit.

Des weiteren danke ich den Mitarbeitern des Instituts für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Gerald Humenberger, der mir bei Fragen und Anliegen jederzeit zur Verfügung stand.

Danke an meinen langjährigen Freund und Studienkollegen Dipl.-Ing. Michael Grill für die gute Zusammenarbeit während des Studiums und die hilfreichen Ratschläge zu dieser Arbeit.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern und meiner Freundin Gerlinde bedanken, die mir während der gesamten Studienzeit sowohl finanziellen als auch emotionalen Beistand geleistet haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation	8
1.1	Zeitliche Entwicklung	8
1.2	Laserschneiden	8
1.3	Optische Prozessüberwachung	9
2	Problemstellung	11
2.1	Aufgabe und Zielsetzung	11
2.1.1	Grundsätzlicher Versuchsaufbau	12
3	Theoretische Grundlagen	13
3.1	Strahlwerkzeug Laser	13
3.1.1	CO ₂ -Laser	13
3.2	Laserschneiden	17
3.2.1	Sublimierschneiden	17
3.2.2	Schmelzschneiden	18
3.2.3	Brennschneiden	19
3.3	Physikalische Grundlagen der zu untersuchenden Strahlung	19
3.4	Grundgrößen	20
3.4.1	Strahlungsleistung (auch Strahlungsfluss/-strom)	20
3.4.2	Strahlstärke (auch Strahlintensität)	21
3.4.3	Strahldichte	21
3.4.4	Bestrahlungsstärke	22
3.4.5	Strahlungsübertragung	22
3.4.6	Spektrale Reflexion, Transmission und Absorption	22
3.4.7	Spektraler Emissionsgrad	23
3.5	Der Schwarze Körper	26
3.5.1	Hohlraumstrahler	26
3.6	Strahlungsgesetze	27
3.6.1	Das Kirchhoffsche Gesetz	27
3.6.2	Das Wiensche Verschiebungsgesetz	27
3.6.3	Das Plancksche Strahlungsgesetz	28

4	Sicherheitsaspekte	30
4.1	Wechselwirkung Laser - Gewebe	30
4.1.1	Das menschliche Auge	30
4.1.2	Schädigungsmechanismen	31
4.2	Laserklassen	32
4.3	Schutzmaßnahmen seitens des Herstellers	32
4.4	Schutzmaßnahmen seitens des Anwenders	33
5	Versuchsaufbau	34
5.1	Vorgangsweise	34
5.2	Optische Komponenten	35
5.2.1	Strahlauskoppler	35
5.2.2	Polarisator	38
5.2.3	Sammellinse	40
5.3	Mechanischer Aufbau	40
5.4	Messelektronik	45
5.4.1	Optoelektrische Sensoren	45
5.4.2	Transimpedanzverstärker	47
5.4.3	Testschaltung	48
5.5	Messdatenerfassung	52
5.5.1	Hardware	52
5.5.2	Software	52
6	Versuchsdurchführung	53
6.1	Laserquelle	53
6.1.1	Der Resonator	54
6.1.2	Versorgung	54
6.1.3	Bedienungsorgane am Laser	55
6.1.4	Fehlermeldungen	57
6.1.5	Inbetriebnahme des Lasers	57
6.1.6	Kurzzeitiges Abschalten	58
6.1.7	Herunterfahren des Lasers	58
6.2	Versuchsvorbereitung	58
6.2.1	Parameterfindung	59
6.3	Schneidversuche mit Baustahl	64
6.3.1	Strahlungsemission einer erhitzten Materialprobe	67
6.3.2	Anpassung des Versuchsaufbaus	69
6.3.3	Messung mit Interferenzfilter	71
6.3.4	Messung mit Filter und angepasster Verstärkung	73
6.4	Schneidversuche mit Edelstahl	75
6.4.1	Messungen mit eingebauter Fotodiodenabschirmung	78
6.4.2	Überprüfung des Versuchsaufbaus	80
6.4.3	Versuch mit abgeglichenem Versuchsaufbau	83

7 Zusammenfassung und Ausblick	84
7.1 Schlussbetrachtung	84
7.2 Anregungen	84
7.2.1 Positionssignal	85
7.2.2 Referenzkurve	85
7.2.3 Verstellmechanismus	85
7.2.4 Einfluss der Plasmawolke	85
7.2.5 Wellenlänge	86
7.2.6 Optische Blende	86

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zusammenhang von Emissionsgrad und Abstrahlwinkel	11
3.1	Energieniveaus des CO ₂ -Moleküls	15
3.2	Quergeströmter CO ₂ -Laser	16
3.3	Längsgeströmter CO ₂ -Laser	16
3.4	Laserstrahlschneiden	17
3.5	Elektromagnetisches Spektrum	20
3.6	Strahldichte	21
3.7	Emissionsgrad unterschiedlicher Materialien	24
3.8	Wellenlängenabhängigkeit des Emissionsgrades	25
3.9	Winkelabhängigkeit des Emissionsgrades	26
3.10	Plancksches Strahlungsgesetz	29
4.1	Augenabsorption von optischer Strahlung	30
4.2	Gewebescheidung	31
4.3	Gefahrenpotenzial der einzelnen Laserklassen	32
5.1	Transmissionskurve für ZnSe	36
5.2	Transmissions- und Reflexionskurve für Strahlkombinierer	37
5.3	Reflexionskurve für Strahlkombinierer aus ZnSe von ULO Optics	38
5.4	Kennlinien des Polarisationsstrahlteilerwürfels	40
5.5	Versatz des Laserstrahls beim Durchdringen von ZnSe	41
5.6	Zwischenring für Strahlauskoppler	43
5.7	Strahlauskoppler in Haltevorrichtung	43
5.8	Strahlenverlauf	44
5.9	Gesamter Aufbau	45
5.10	Kennfeld einer Fotodiode	47
5.11	Transimpedanzschaltung	48
5.12	Beleuchtungsstärke über Abstand	49
5.13	Spannung über Widerstand	50
5.14	Testschaltung	51
5.15	Testschaltung, in Gehäuse verbaut	51
5.16	Komponenten des VIs	52

6.1	Verwendete CO ₂ -Laserquelle	53
6.2	Versuch 1.1: Baustahl mit 2mm, Verstärkung 200kΩ	60
6.3	Versuch 1.2: Baustahl mit 3mm, Verstärkung 200kΩ	61
6.4	Versuch 1.3: Baustahl mit 5mm, Verstärkung 200kΩ	61
6.5	Versuch 1.4: Baustahl mit 2mm, Verstärkung 150kΩ	62
6.6	Versuch 1.5: Baustahl mit 3mm, Verstärkung 150kΩ	62
6.7	Versuch 1.6: Baustahl mit 5mm, Verstärkung 150kΩ	63
6.8	Versuch 2.1 mit 1000W Laserleistung	64
6.9	Versuch 2.2 mit 800W Laserleistung	65
6.10	Vergrößerter Schnittbeginn von Versuch 2.2	66
6.11	Versuch 2.3 mit 1000W Laserleistung und 5mm Baustahl	66
6.12	Versuch 3.1 mit 500W Laserleistung	68
6.13	Versuch 3.2 mit 1500W Laserleistung	68
6.14	Transmissionkurve des Interferenzfilters für λ=770nm	69
6.15	Filteraufnahme	70
6.16	Gesamter Messaufbau	70
6.17	Versuch 4.1 mit 1000W Laserleistung, in Y-Richtung geschnitten	71
6.18	Versuch 4.2 mit 1000W Laserleistung, in X-Richtung geschnitten	72
6.19	Versuch 5.1 mit 1000W Laserleistung, in X-Richtung geschnitten	73
6.20	Versuch 5.2 mit 1000W Laserleistung, in X-Richtung geschnitten	74
6.21	Versuch 6.1 mit 1500W Laserleistung, Rechteck in Edelstahl	76
6.22	Versuch 6.2 mit 1500W Laserleistung, Rechteck in Edelstahl	76
6.23	Versuch 6.3 mit 1500W Laserleistung, Kreis in Edelstahl	77
6.24	Versuch 7.1, 1500W Laserleistung, 50mm in X, 10mm in Y, 50mm in X	78
6.25	Versuch 7.2, 1500W Laserleistung, steigende Vorschubgeschwindigkeit .	79
6.26	Versuch 7.3, 1500W Laserleistung, steigende Vorschubgeschwindigkeit .	79
6.27	Versuch 8.1: Blende an Kaltlichtquelle verstellt	80
6.28	Versuch 8.2: Ohne Interferenzfilter und mit R=156kΩ	81
6.29	Versuch 8.3: Mit Interferenzfilter und mit R=4,7MΩ	81
6.30	Versuch 8.4: Abgleich des Versuchsaufbaus	82
6.31	Versuch 9.1, 1500W Laserleistung, 50mm in X, 10mm in Y, 50mm in X	83

Tabellenverzeichnis

5.2	Bauteilliste	48
6.2	Parameter für erste Versuchsreihe	60
6.4	Parameter für zweite Versuchsreihe	64
6.6	Parameter für dritte Versuchsreihe	67
6.8	Parameter für vierte Versuchsreihe	71
6.10	Parameter für fünfte Versuchsreihe	73
6.12	Parameter für sechste Versuchsreihe	75
6.14	Parameter für siebende Versuchsreihe	78

Kapitel 1

Einleitung und Motivation

1.1 Zeitliche Entwicklung

Im Jahr 1960 entwickelte der US-amerikanische Physiker Theodore Harold Maiman den ersten funktionstüchtigen Laser. Von den anfänglich fehlenden Einsatzmöglichkeiten dieser aufsehenerregenden naturwissenschaftlichen Entdeckung, eröffneten sich mit steigender Leistung erste Anwendungsgebiete. In der Fertigungstechnik waren dies das Verschweißen von dünnen Metalldrähten und das Bohren von Uhrensteinen. Hierfür kamen Nd:YAG-Laser mit einer noch relativ geringen Leistung von einigen Watt zum Einsatz.

Bereits 10 Jahre später standen leistungsfähigere Laser zur Verfügung, wie zum Beispiel der CO₂-Laser, mit dem Versuche zum Schneiden von Metallen erfolgreich durchgeführt wurden. Damit war der Weg für einen breiten industriellen Einsatz dieser Technologie geebnet.

Ganz ähnlich entwickelte sich das Laser-Schweißen, wofür noch höhere Leistungen als für das Laserschneiden notwendig sind.

Bis heute hat sich der Laser zu einem unverzichtbaren Werkzeug in vielen Gebieten der Industrie, der Medizin und der Forschung entwickelt [8].

1.2 Laserschneiden

Durch die hohe Geschwindigkeit und Präzision wurde das Laserschneiden in der Materialbearbeitung und Großserienproduktion zu einer Schlüsseltechnologie. Doch noch immer gilt es unter anderem folgendes Problem zu lösen: beim Konturschneiden zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Schnittfugegeometrie vom Verhältnis der eingekoppelten Energie zum umgebenden Materialvolumen. Die Werkstückgeometrie hat also entscheidenden Einfluss auf die Qualität des Schnittes. Während lange gerade Schnitte oder große Kreisbögen von diesem Problem nicht betroffen sind, zeigt sich bei kleinen Konturelementen, wie beispielsweise bei Spitzen oder Materialstegen, eine Verschlechterung der Schnittqualität. Die Ursache dieses Phänomens ist die, bei konstan-

ter Schnittgeschwindigkeit, gleichförmige Erwärmung des zu schneidenden Materials, wo die eingebrachte Wärme mit einem hohen Temperaturgradienten in den Werkstoff abfließen kann. Ist nun kein ausreichend großes Materialvolumen vorhanden, um ein entsprechendes Temperaturgefälle zu erzeugen, kann die Wärme nicht schnell genug abtransportiert werden. Der damit entstehende Wärmestau hat eine übermäßige Erhitzung des Schnittbereichs zur Folge, was eine Verschlechterung der Schnittqualität mit sich bringt. Auch Inhomogenitäten im zu schneidenden Materialgefüge, verschmutzte Materialoberflächen, fluktuierende Laserleistung und vieles mehr können zu einer Verschlechterung der Schnittqualität führen.

Es muss also eine permanente Anpassung der Schnittparameter vorgenommen werden. Diese Schnittparameter können die Schnittgeschwindigkeit oder die ins Werkstück eingebrachte Laserleistung sein [13].

Der aktuelle Trend in der Produktions- und Fertigungstechnik geht zu immer höher werdenden Qualitätsanforderungen mit gleichzeitig wachsenden Ansprüchen an eine wirtschaftliche Fertigung. Daraus resultieren Produktionsprozesse die mit einem hohen Automatisierungsgrad und höchster Präzision ablaufen. Um diese Anforderungen erfüllen zu können, ist eine Prozessüberwachung unumgänglich. Eine moderne Prozessüberwachung ist in der Lage, durch Online-Qualitätsprüfung und -regelung, Fehler frühzeitig zu erkennen und damit bereits während des Bearbeitungsprozesses entgegenzuwirken. Voraussetzung für eine gut funktionierende Prozessüberwachung ist eine permanente Erfassung des Ist-Zustandes der Schnittqualität.

1.3 Optische Prozessüberwachung

Der Vorteil der hohen Prozessgeschwindigkeit beim Laserschneiden macht hoch auflösende Messsysteme erforderlich. Durch die kraftfreie Energieeinbringung scheidet taktile Sensorsysteme grundsätzlich aus. Diese beiden Rahmenbedingungen machen die Umsetzung einer gut funktionierenden Prozessüberwachung, bei der ein Fehler mit hoher Wahrscheinlichkeit auch als solcher erkannt wird, äußerst schwierig.

Zwei wichtige Größen in der Überwachung von Laserbearbeitungsprozessen sind:

- Akustische Emissionen
- Optische Emissionen

Akustischen Emissionen erweisen sich als wenig praxistauglich, da sie sich meist nur schwer aus den Umgebungsgeräuschen herausfiltern lassen. Daher setzen sich hauptsächlich optische Emissionen als Indikatoren für die Schnittqualität durch.

Ein weiterer Vorteil optischer Systeme besteht darin, dass die Strahlungsemissionen in verschiedenen Wellenlängenbereichen entstehen. So kann beispielsweise die Plasmaemission im visuellen Bereich des Spektrums und gleichzeitig die Wärmestrahlung der

Wechselwirkungszone im infraroten Bereich des Spektrums gemessen werden. Vorteilhaft für den Aufbau eines optischen Messsystems sind die für die Führung des Lasers bereits vorhandenen Optiken, die zum Teil für das Messsystem genutzt werden können. Ein Nachteil des berührungslosen Messens ist das Fehlen direkter Indikatoren für die Bewertung der Qualität. Als Beispiel soll die Messung der erzielten Einschweißtiefe genannt werden. Hierfür wird der indirekte Indikator der rückreflektierten Laserstrahlung gemessen und ausgewertet.

Optische Systeme zur Prozessüberwachung lassen sich in integrierende und ortsauflösende Systeme aufteilen:

- Integrierende Systeme sind einfach aufzubauen und bestehen häufig aus einer geeigneten Fotodiode und einem optischen Filter. Sie zeichnen Signale in einem Wellenlängenbereich von etwa 200 bis 1100 nm als direktes analoges Signal über der Zeitachse auf.
- Ortsauflösende Systeme sind meist kamerabasiert und liefern eine große Anzahl von Informationen, die aber oft erst durch entsprechende Algorithmen in Formparameter gebracht werden müssen. Diese sind natürlich zeitabhängig und ergeben somit die gewünschten Qualitätsparameter.

Auch wenn von verschiedenen Firmen Systeme für eine Online-Prozessüberwachung angeboten werden, ist noch kein wirklicher Durchbruch auf diesem Gebiet gelungen. Die angebotenen Produkte erfüllen häufig nicht die an sie gestellten Anforderungen. Da wäre zum Einen die mangelnde Zuverlässigkeit beim Erkennen von Fehlern und zum Anderen die Vermeidung von „Pseudo-Fehlern“. Darunter versteht man Fehlermeldungen ohne dem Vorliegen eines tatsächlichen Problems.

Hintergrund für diese Schwierigkeiten ist die meist starke Abhängigkeit von einer sowohl gleichbleibenden Ausgangssituation als auch gleichbleibenden Umgebungseinflüssen. Hier kann schon eine kleine Veränderung die Zuverlässigkeit der Qualitätsaussage gefährden. Für ein zuverlässiges System ist ein grundlegendes Verständnis der Mechanismen, die zur Fehlerentstehung führen, notwendig [5].

Kapitel 2

Problemstellung

2.1 Aufgabe und Zielsetzung

Im Zuge dieser Arbeit soll eine Vorrichtung geplant, konstruiert und aufgebaut werden, mit deren Hilfe die emittierte Strahlung beim Laserstrahlschneiden beobachtet werden kann. Durch eine Auswertung dieser Strahlung soll eine Aussage über die zu erwartende Schnittqualität getroffen werden.

Grundlage dafür ist die Tatsache, dass das Verhältnis von s- zu p-polarisierter Strahlungsemission aus dem Schnittspalt, genauer von der Schneidfront selbst, sehr stark vom Abstrahlwinkel (Winkel zwischen Strahlungsrichtung und Flächennormalen) abhängt. Mit diesem Verhältnis kann auf den aktuellen Schneidfrontwinkel rückgeschlossen werden, der ein wichtiger Indikator für die Schnittqualität ist.

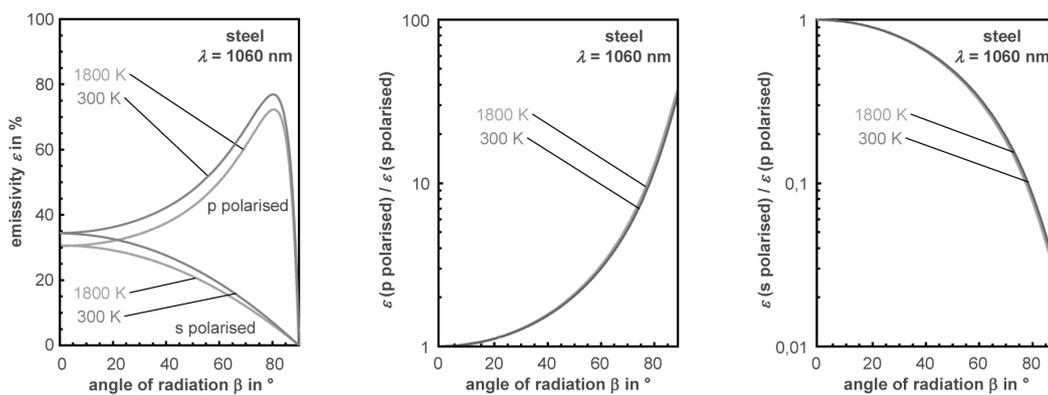


Abbildung 2.1: Zusammenhang von Emissionsgrad und Abstrahlwinkel [31]

In Abbildung 2.1 ist im linken Diagramm der Emissionsgrad für Stahl bei einer Wellenlänge von $\lambda = 1060 \text{ nm}$ gegeben. Es soll einen Eindruck über die starke Abhängigkeit

des Emissionsgrads von Polarisationszustand und Abstrahlwinkel vermitteln. Dabei ist weiters der relativ geringe Einfluss der Temperatur auf den Emissionsgrad deutlich zu erkennen. Wie im mittleren Diagramm ersichtlich, wird der Temperatureinfluss durch die Bildung des Quotienten aus p-/s-polarisierter Strahlung nahezu vollständig eliminiert, was die angestrebte Messung der Schnittqualität erheblich vereinfacht. Im rechten Diagramm wird der Quotient aus s-/p-polarisierter Strahlung gebildet.

2.1.1 Grundsätzlicher Versuchsaufbau

Die zu beobachtende Strahlung soll durch ein geeignet gewähltes System ausgekoppelt und mittels eines Polarisationsstrahlteilers in einen s- und einen p-polarisierten Strahl aufgespalten werden. Die jeweiligen Intensitäten dieser Strahlen werden unter Verwendung von optoelektrischen Sensoren gemessen und aufgezeichnet. Diese können im Anschluss ins Verhältnis zueinander gesetzt werden, um so den aktuellen Erosionsfrontwinkel bestimmen zu können.

Daraus ergeben sich folgende Aufgaben:

- Wahl des Auskoppelsystems
- Bestimmung der zu messenden Wellenlänge
- Recherche passender Optiken
- Konstruktion des Messaufbaus
- Auswahl des Sensorsystems
- Bestimmung und Aufbau einer geeigneten Verstärkerschaltung
- Implementierung des Versuchsaufbaus in die bestehende Laserschneidanlage
- Durchführung von Versuchen
- Erkennung und Beseitigung von grundlegenden Problemen

Der Aufwand, den gesuchten Winkel mit ausreichender Sicherheit messen zu können, wird den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit übersteigen. Dennoch sollen erste Messungen durchgeführt werden, um eventuell notwendige Verbesserungen durchzuführen und so für nachfolgende Arbeiten eine Basis zu schaffen.

Kapitel 3

Theoretische Grundlagen

3.1 Strahlwerkzeug Laser

Das Wort „Laser“ ist ein Akronym für „light amplification by stimulated emission of radiation“, was soviel bedeutet wie „Lichtverstärkung durch stimulierte Emission“ und womit der Prozess, der zu Laserstrahlung führt, beschrieben wird. Laser lassen sich nach den Besonderheiten ihres laseraktiven Mediums wie folgt einteilen:

- Gaslaser
- Festkörperlaser
- Diodenlaser (Halbleiterlaser)
- Faserlaser
- Excimerlaser
- Farbstofflaser

Zusätzlich ist eine Einteilung nach der Art des Pumpens möglich: hier unterscheidet man optisch, elektronisch und chemisch angeregte Laser.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird auf den CO₂-Laser näher eingegangen, da dieser als Laserquelle für die späteren Schneidversuche dient.

3.1.1 CO₂-Laser

Der CO₂-Laser gehört zu den Gaslasern und wird durch Elektronenstöße in einer Gasentladestrecke angeregt. In der Materialbearbeitung ist er weit verbreitet, da mit ihm Leistungen von einigen 10W bis hin zu mehreren kW erreicht werden können. Im Vergleich zum Festkörperlaser besticht er durch geringere Investitionskosten pro benötigtem Kilowatt, was natürlich die Wirtschaftlichkeit verschiedenster Prozesse verbessert.

Funktion

Das CO₂-Molekül kann drei unterschiedliche Schwingungszustände annehmen:

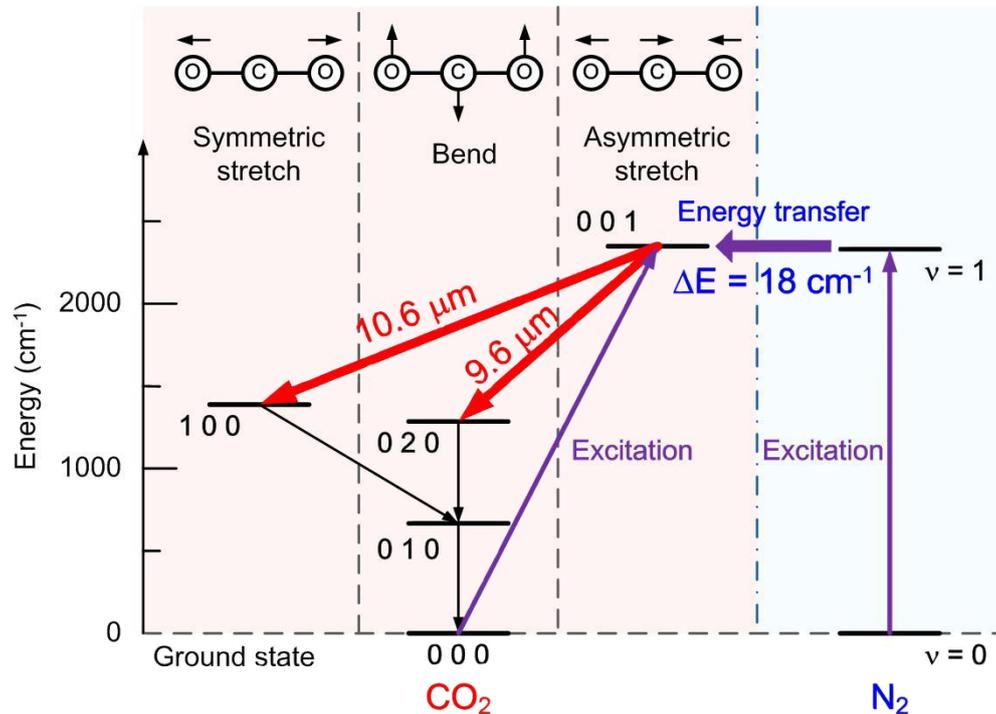
- die **symmetrische Streckschwingung** ν_1 mit dem angeregten Zustand 100^1 , bei der sich die beiden Sauerstoffatome symmetrisch zum Kohlenstoffatom hin und her bewegen;
- die **Biegeschwingung** ν_2 (010) bei der das Molekül V-förmig schwingt und damit zwei Richtungsfreiheitsgrade im Raum besitzt und
- die **asymmetrische Streckschwingung** ν_3 (001), bei der sich immer abwechselnd ein Sauerstoffatom und das Kohlenstoffatom aufeinander zu bewegen und sich das zweite Sauerstoffatom nach außen verlagert.

Geht man vom angeregten Zustand 001 (asymmetrische Streckschwingung) aus, gibt es für einen Laserbetrieb zwei geeignete Übergänge. Der erste Übergang führt zu einer symmetrischen Streckschwingung (100), mit einer Wellenlänge von $10,6\ \mu\text{m}$. Der zweite Übergang ist mit der Biegeschwingung (020) verknüpft, was zu einer Wellenlänge von $9,6\ \mu\text{m}$ führt. Befinden sich die Moleküle in einem der beiden unteren Laserniveaus, gelangen sie über den Zustand 010 wieder zurück in den Grundzustand 000.

Üblicherweise emittiert ein CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von $10,6\ \mu\text{m}$, was sich durch den größeren Wirkungsquerschnitt erklären lässt. Ist die Wellenlänge des zweiten Laserüberganges von $9,6\ \mu\text{m}$ gewünscht, kann dies durch den Einsatz schmalbandiger Spiegel erreicht werden.

Die Anregung des oberen Laserniveaus 001 ist grundsätzlich durch Elektronenstöße möglich. Es gibt jedoch einen effizienteren Weg zur Anregung, und zwar durch den Einsatz von Stickstoffmolekülen N₂. Diese besitzen einen relativ langlebigen Energiezustand nahe des oberen Laserniveaus und lassen sich zudem auch sehr effizient durch Elektronenstöße anregen. Die damit im Stickstoffmolekül gespeicherte Energie wird durch Stöße auf das CO₂-Molekül übertragen. Diese Tatsache erklärt auch die Zusammensetzung des Gasgemisches eines CO₂-Lasers, wo der N₂-Anteil drei bis fünf mal höher als der CO₂-Anteil ist. Neben N₂ enthält die Gasmischung eines typischen CO₂-Lasers auch He, um die Entleerung der unteren Niveaus 100, 020 und 010 zu beschleunigen. Darüber hinaus wirkt es sich aufgrund seiner hohen thermischen Leitfähigkeit positiv auf die Stabilität und Homogenität der elektrischen Gimmmentladung aus [9]. Diese Zusammenhänge bilden die Grundlage für eine CO₂-Laserquelle. Auf konstruktive Ausführungen soll hier nicht näher eingegangen werden.

¹Der Schwingungszustand des Moleküls wird als Zahlentripel (n_1, n_2, n_3) angegeben, wobei n_i die Anzahl der Quanten in der i -ten Schwingung ist.

Abbildung 3.1: Energieniveaus des CO₂-Moleküls [29]

Bauformen

CO₂-Laser mit höheren Leistungen (>2kW) werden hauptsächlich durch Hochfrequenz angeregt². Das Lasergas befindet sich zwischen zwei Platten an denen ein hochfrequentes Wechselfeld angelegt wird. Ab Leistungen des Lasers von ca. 500 W ist es üblich den Resonator zu falten um das Modenvolumen des Lasermodus zu vergrößern und um die Baugröße zu reduzieren.

Durch die elektrische Entladung im Resonator wird das Lasergas erhitzt. Die überschüssige Wärme muss abgeführt werden, was durch Umwälzen des Gases über einen Wärmetauscher geschieht.

Man unterscheidet folgende Bauformen:

- Quergeströmte Laser

Das Lasergas wird quer zur optischen Achse des Resonators umgewälzt. Je nach Strömungsgeschwindigkeit des Gases variiert die erzielbare Strahlqualität, die jedoch als eher schlecht einzustufen ist.

²Prinzipiell ist auch eine Gleichstromanregung möglich, diese ist jedoch mit einem starken Abbrand der Gleichstromelektroden verbunden, was den industriellen Einsatz unwirtschaftlich macht [20].

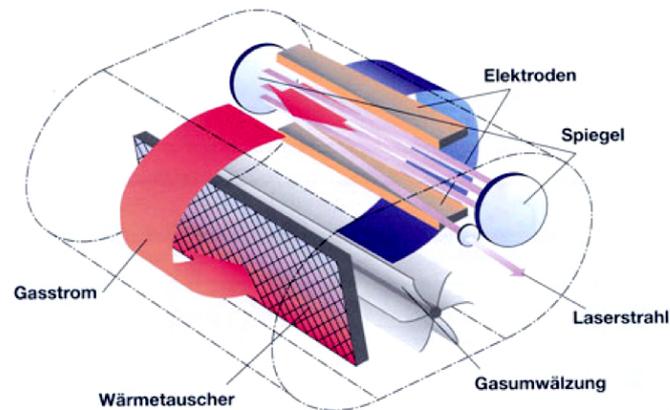


Abbildung 3.2: Quergeströmter CO₂-Laser [15]

- Längsgeströmte Laser
Diese erreichen eine bessere Strahlqualität als quergeströmte Laser. Bei dieser Bauform wird das Lasergas parallel zur optischen Achse des Resonators geführt. Jedoch muss bei dieser Anordnung das Lasergas in kürzeren Abständen erneuert werden, was die Betriebskosten erhöht. Außerdem ist der Energieverbrauch höher als beim quergeströmten Laser.

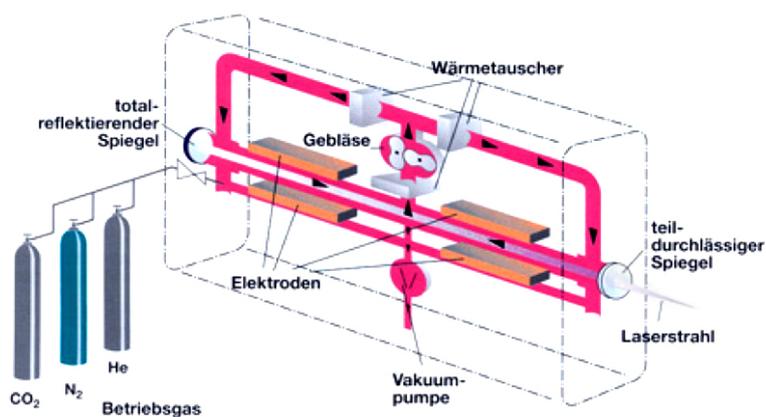


Abbildung 3.3: Längsgeströmter CO₂-Laser [15]

- Diffusionsgekühlte Laser

Hier ist besonders der CO₂-Slab-Laser zu erwähnen. Dieser erreicht Leistungen bis 8 kW und besteht aus zwei quaderförmigen Elektroden, die dicht übereinander angeordnet sind. Zwischen diesen befindet sich das Lasergas, welches durch die vergrößerte Kühlfläche sehr gut diffusiv gekühlt werden kann. Slab-Laser erreichen sehr hohe Strahlqualitäten [20].

3.2 Laserschneiden

Um einen Schnittspalt zu erzeugen, wird der zu schneidende Werkstoff durch Energie von außen so lange erwärmt, bis er entweder in den flüssigen oder den gasförmigen Zustand übergeht um mit einem Gasstrahl als Schmelze, Dampf oder Plasma ausgetrieben zu werden. Das dabei zur Anwendung kommende Schneidgas ist je nach Schneidverfahren entweder inert oder chemisch reaktiv.

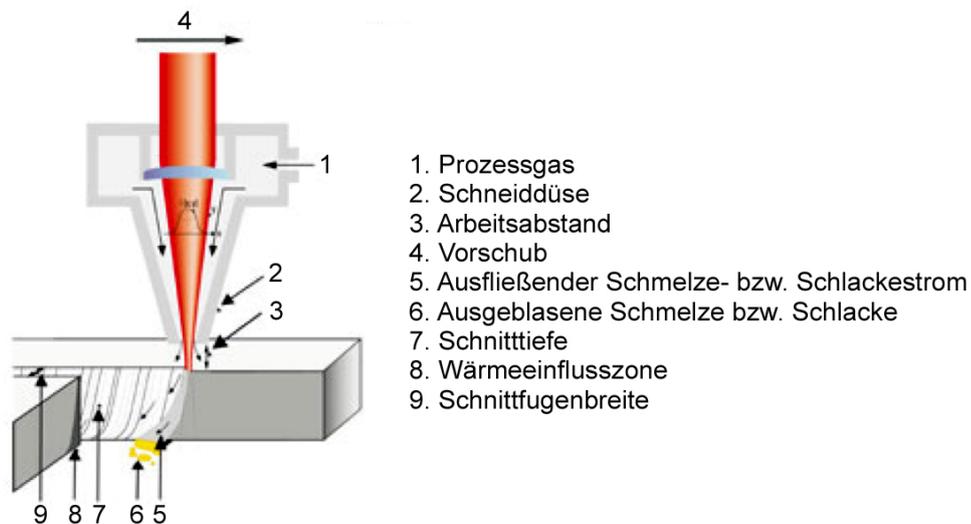


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Laserstrahlschneidens [12]

3.2.1 Sublimierschneiden

Bei diesem Verfahren wird das zu schneidende Material verdampft. Dies kommt bei Werkstoffen zur Anwendung, die keinen ausgeprägten Schmelzpunkt besitzen (z. B. Holz) aber auch bei Metallen. Um Metalle mit diesem Verfahren schneiden zu können, ist ein Laserstrahl mit einer hohen Intensität Voraussetzung. Durch das Bewegen der Dampffront durch das Werkstück entsteht die Schneidfuge. Das verdampfte Metall

muss rasch durch einen inerten Gasstrahl angetrieben werden um eine Kondensation und damit eine schlechte Oberflächenqualität im Bereich der Schnittfuge zu verhindern. Durch den hohen Temperaturgradienten in der Wechselwirkungszone ist der Bereich, in dem das Metall in flüssigem Zustand vorliegt, sehr gering, was zu einer hohen Qualität des Schnittspaltes beiträgt. Die Schnittgeschwindigkeit dieses Verfahrens ist allerdings durch die dafür erforderlichen, hohen Laserintensitäten eingeschränkt.

Vorteile:

- Glatte Schnittkanten
- Keine Oxidation der Schnittkante
- Minimale Ausdehnung der Wärmeeinflusszone

Nachteile:

- Hohe Laserintensität notwendig
- Mögliche Plasmaabschirmung des Werkstoffes

3.2.2 Schmelzschnneiden

Bei diesem Verfahren wird der Werkstoff durch den Laserstrahl erwärmt und in den flüssigen Zustand übergeführt. Die Schmelze wird wieder mit einem inerten Gasstrahl z.B. N_2 oder Ar angetrieben. Da die für das Schmelzen benötigte Energie geringer ist als für das Verdampfen beim Sublimierschnneiden, wäre beim Schmelzschnneiden eine wesentlich höhere Schnittgeschwindigkeit zu erwarten [3]. Dies ist jedoch nicht der Fall, da die Energieeinkopplung durch das fehlende Plasma beim Schmelzschnneiden schlechter als beim Sublimierschnneiden ist. Außerdem kommt es zu einer größeren Wärmeeinflusszone, wofür ebenfalls zusätzliche Energie aufgebracht werden muss.

Vorteile:

- Höhere Schnittgeschwindigkeit als beim Sublimierschnneiden (jedoch nicht so hoch als durch geringere Schmelzenergie zu erwarten wäre)

Nachteile:

- Oxidation der Schnittkanten
- Große Ausdehnung der Wärmeeinflusszone
- Riefenstruktur in der Schnittkante aufgrund der Schmelzdynamik

3.2.3 Brennschneiden

Wie beim Schmelzschneiden, wird auch hier das zu trennende Material im Bereich der Schnittfuge geschmolzen und die flüssige Schmelze durch einen Gasstrahl ausgetrieben. Doch anders als beim Schmelzschneiden wird hier ein chemisch reaktives Gas verwendet, z.B. Sauerstoff, wodurch es zu einer intensiven exothermen Reaktion des Sauerstoffes mit der Metallschmelze kommt. Damit erfolgt eine zusätzliche Energiezufuhr in der Wechselwirkungszone, die eine relativ hohe Schnittgeschwindigkeit ermöglicht [3].

Vorteile:

- Hohe Schnittgeschwindigkeit
- Schneiden von Metallen mit großer Dicke möglich

Nachteile:

- Oxidation der Schnittkante
- Sehr große Ausdehnung der Wärmeeinflusszone
- Ausgeprägte Riefenstruktur (Nachbehandlung der Schnittkante notwendig)

3.3 Physikalische Grundlagen der zu untersuchenden Strahlung

Jeder Körper, dessen Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (0 Kelvin = $-273,15^{\circ}\text{C}$) liegt, emittiert elektromagnetische Strahlung, die als Wärmestrahlung bezeichnet wird. Die Intensität dieser Wärmestrahlung steigt mit zunehmender Temperatur. Ebenfalls stark temperaturabhängig ist die spektrale Verteilung.

Elektromagnetische Wellen unterscheiden sich durch ihre Wellenlänge λ , ihre Wellengeschwindigkeit u und ihre Frequenz ν . Für diese drei Größen besteht folgender Zusammenhang:

$$u = \lambda \cdot \nu \quad (3.1)$$

Die Wellengeschwindigkeit u ist vom Medium, in dem sich die Welle ausbreitet, abhängig. Im Vakuum gilt:

$$u = c \quad (3.2)$$

Das Verhältnis der Vakuumlichtgeschwindigkeit c zur Wellengeschwindigkeit u in einem Medium bezeichnet man als Brechungsindex n .

$$n = \frac{c}{u} \quad (3.3)$$

Der Brechungsindex ist eine dimensionslose Größe und bildet die Grundlage für das **Snelliussche Brechungsgesetz**, welches die Richtungsänderung einer ebenen Welle beim Übergang in ein anderes Medium beschreibt.

Das Spektrum elektromagnetischer Strahlung variiert über einen großen Bereich. Nur ein kleiner Teil ist für uns als Licht sichtbar. Dieser Bereich reicht von ca. $\lambda=380\text{nm}$ bis $\lambda=780\text{nm}$, wobei die Grenzen fließend sind und sich von Mensch zu Mensch unterscheiden.

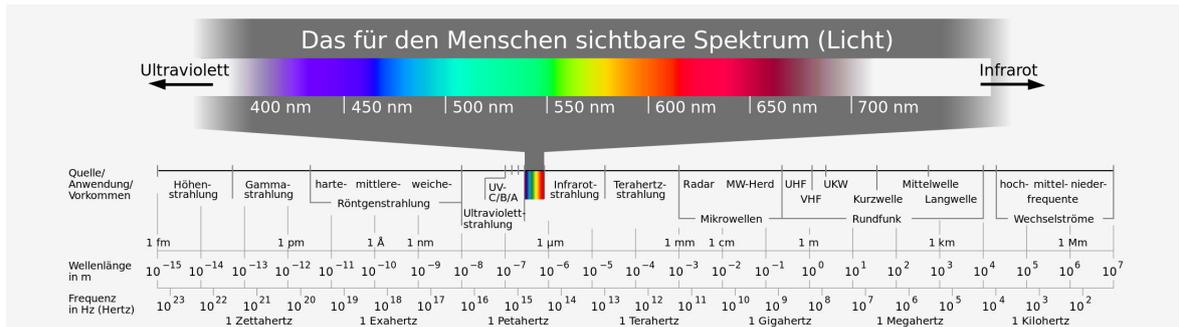


Abbildung 3.5: Elektromagnetisches Spektrum [19]

Die im Zuge dieser Arbeit zu untersuchende Strahlung liegt mit ca. $\lambda=800\text{nm}$ bereits im infraroten Bereich. Dieser wird in mehrere Teilbereiche unterteilt:

- IR-A (nahes Infrarot) $0,78\ \mu\text{m}$ bis $3\ \mu\text{m}$
- IR-B (mittleres Infrarot) $3\ \mu\text{m}$ bis $7\ \mu\text{m}$
- IR-C (langwelliges Infrarot) $7\ \mu\text{m}$ bis $14\ \mu\text{m}$

3.4 Grundgrößen

Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die verschiedenen Grundgrößen elektromagnetischer Strahlung gegeben. Leider sind in der Physik und der Optik (Beleuchtungstechnik) oft unterschiedliche Bezeichnungen für die selben Größen gebräuchlich. Um Irrtümer zu vermeiden, werden in diesem Fall beide, in der Literatur gängigen, Ausdrücke angeführt.

3.4.1 Strahlungsleistung (auch Strahlungsfluss/-strom)

Ein Körper strahlt im Zeitintervall dt die Strahlungsenergie dQ ab, wodurch sich die Strahlungsleistung ergibt als:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \tag{3.4}$$

Die Strahlungsleistung hat die Einheit W .

3.4.2 Strahlstärke (auch Strahlintensität)

Hier ist nicht die gesamte, vom Strahler emittierte, Leistung von Bedeutung, sondern jener Anteil, der durch einen bestimmten Raumwinkel $d\Omega$ fließt. Die Strahlstärke I ist definiert durch:

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (3.5)$$

Die Strahlstärke hat die Einheit W/sr .

3.4.3 Strahldichte

Bei einer nicht punktförmigen Strahlungsquelle ist die Strahlstärke von der Fläche dA der Strahlungsquelle und des Betrachtungswinkels ϑ abhängig. Die Fläche dA erscheint unter dem Betrachtungswinkel ϑ um den Faktor $\cos\vartheta$ verkleinert, was zu folgender Gleichung führt:

$$dI = L_{(\vartheta,\varphi)} \cdot dA \cdot \cos(\vartheta) \quad (3.6)$$

und

$$d^2\Phi = dI \cdot d\Omega = L_{(\vartheta,\varphi)} \cdot dA \cdot \cos(\vartheta) \cdot d\Omega \quad (3.7)$$

Der Proportionalitätsfaktor $L_{(\vartheta,\varphi)}$ heißt Strahldichte und hat die Einheit $Wm^{-2}sr^{-1}$.

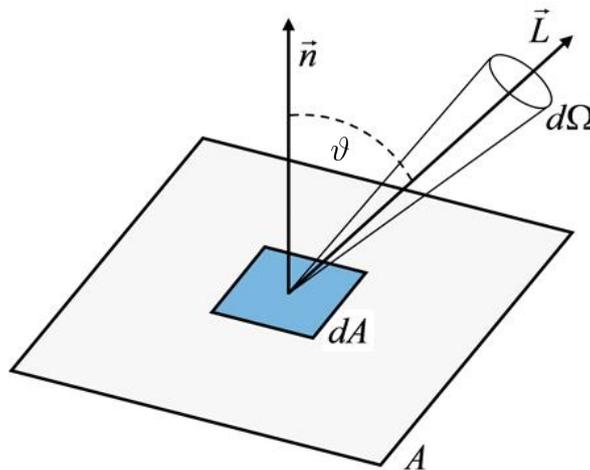


Abbildung 3.6: Strahldichte

Im Falle, dass $L_{(\vartheta,\varphi)}$ von den Winkeln ϑ und φ unabhängig ist, wird die Strahlungsquelle als **Lambertscher Strahler** bezeichnet. Das bedeutet, dass die Strahldichte in jeder Richtung gleich groß ist. Beispiele hierfür sind diffus strahlende Oberflächen, der Schwarze Körper oder auch Hohlraumstrahler.

Das **Lambertsche Gesetz** lautet:

$$I = I_0 \cdot \cos(\vartheta) \quad (3.8)$$

3.4.4 Bestrahlungsstärke

Der Strahlungsstrom pro Flächeneinheit am Empfänger wird als Bestrahlungsstärke³ bezeichnet:

$$E = \frac{\Phi}{A} \quad (3.9)$$

Die Einheit für die Bestrahlungsstärke ist Wm^{-2} .

Schließt die Einfallrichtung der Strahlung den Winkel ε zur Flächennormalen der Empfängerfläche dA ein, so gilt:

$$\Omega = \frac{dA}{r^2} \cos(\varepsilon) \quad (3.10)$$

Dabei steht r für den Abstand des Empfängers von der Strahlungsquelle. Mit

$$\Phi = I \cdot \Omega \quad (3.11)$$

ergibt sich für die Bestrahlungsstärke folgende Gleichung:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos(\varepsilon) \quad (3.12)$$

3.4.5 Strahlungsübertragung

Aus den Gleichungen 3.5 und 3.6 und der Definition des Raumwinkels ergibt sich für den allgemeinen Fall, d.h. L ist nicht konstant, folgende Grundformel für die Strahlungsübertragung:

$$d^2\Phi = \frac{\cos(\varepsilon_1) \cdot \cos(\varepsilon_2)}{r^2} dA_1 \cdot dA_2 \quad (3.13)$$

3.4.6 Spektrale Reflexion, Transmission und Absorption

Trifft elektromagnetische Strahlung auf Materie, so wird ein Teil dieser Strahlung reflektiert, ein Teil wird transmittiert und ein Teil wird absorbiert. Das Verhältnis von Reflexion, Transmission und Absorption wird grundsätzlich von drei Faktoren bestimmt:

- Material (Art, Dicke, Oberflächenbeschaffenheit, ...)
- Einfallende Strahlung (Wellenlänge, Polarisation, ...)
- Geometrie (Einfallswinkel, Beobachtungswinkel, ...)

Um die Wechselwirkung der Strahlung mit Materie zu beschreiben, wurden folgende Materialkennwerte definiert:

³In der Elektrotechnik wird die Bestrahlungsstärke oft auch als Intensität bezeichnet.

- Spektraler Reflexionsgrad $\varrho(\lambda)$:
Ist der Quotient aus reflektierter Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda,R}$ und einfallender Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda,E}$:

$$\varrho(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda,R}}{\Phi_{\lambda,E}} \quad (3.14)$$

- Spektraler Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$:
Ist der Quotient aus durchgelassener Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda,T}$ und einfallender Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda,E}$:

$$\tau(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda,T}}{\Phi_{\lambda,E}} \quad (3.15)$$

- Spektraler Absorptionsgrad $\alpha(\lambda)$:
Analog zu den vorigen Definitionen ist auch der Absorptionsgrad der Quotient aus absorbiertem Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda,A}$ und einfallender Strahlungsleistung $\Phi_{\lambda,E}$:

$$\alpha(\lambda) = \frac{\Phi_{\lambda,A}}{\Phi_{\lambda,E}} \quad (3.16)$$

Diese drei Materialkennwerte sind dimensionslose Größen, deren Zahlenwert zwischen 0 und 1 liegt. Aufgrund der Energieerhaltung muss

$$\varrho(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1 \quad (3.17)$$

erfüllt sein.

3.4.7 Spektraler Emissionsgrad

Für die Charakterisierung von Strahlungsquellen wurde der spektrale Emissionsgrad $\varepsilon(\lambda)$ als Quotient der emittierten Strahldichte L_λ zur emittierten spektralen Strahldichte $L_{\lambda,s}$ eines Schwarzen Strahlers definiert:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L_\lambda}{L_{\lambda,s}} \quad (3.18)$$

Der Emissionsgrad ist wieder eine dimensionslose Größe und ist von vielen Faktoren abhängig. Da der Emissionsgrad für die späteren Messungen von Bedeutung ist, wird hier auf diese Faktoren näher eingegangen.

Die Faktoren sind:

- Material
- Oberflächenbeschaffenheit
- Wellenlänge

- Temperatur
- Beobachtungswinkel

Abhängigkeit vom Material

Die Materialabhängigkeit des Emissionsgrades realer Körper ist sehr groß und reicht von annähernd 0 bis fast 1. Dabei kann verallgemeinert festgehalten werden, dass dunkle Nichtmetalle einen großen Emissionsgrad ($\varepsilon \approx 1$) haben, Metalle dagegen einen sehr geringen ($\varepsilon \approx 0$). Allerdings ist zu beachten, dass diese allgemeine Betrachtung mit kleiner werdender Wellenlänge ihre Gültigkeit verliert, wie in Abbildung 3.7 zu erkennen ist.

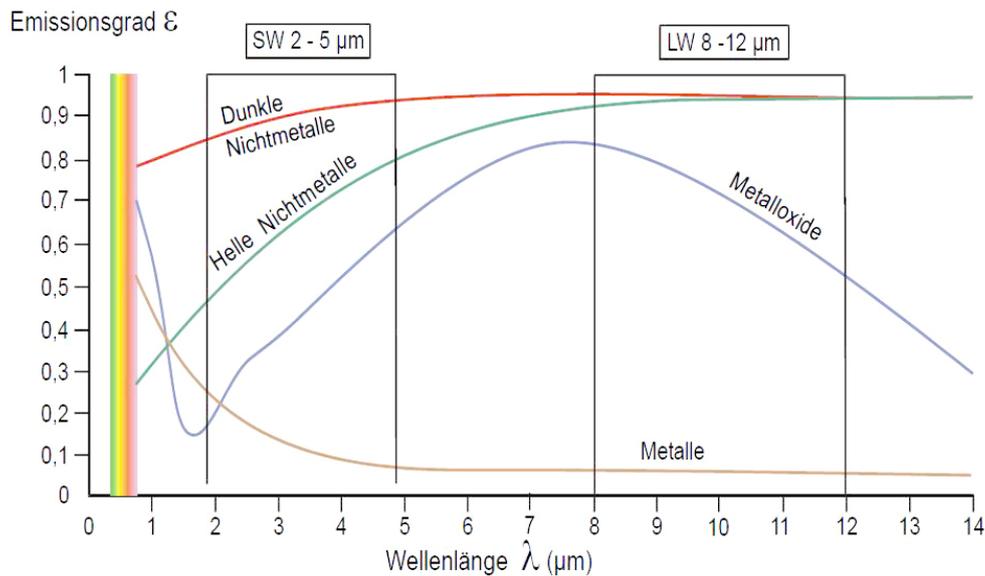


Abbildung 3.7: Emissionsgrad unterschiedlicher Materialien [27]

Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit

Auch die Oberflächenrauigkeit hat einen entscheidenden Einfluss auf den Emissionsgrad. Risse und mikroskopisch kleine Krater in der Oberfläche wirken wie winzige Hohlraumstrahler und erhöhen dadurch den Emissionsgrad. Allgemein kann gesagt werden, dass raue Oberflächen einen höheren Emissionsgrad aufweisen, als glatte Oberflächen des gleichen Materials.

Abhängigkeit von der Wellenlänge

Der ideale Schwarze Körper hat laut Definition einen Emissionsgrad von 1 ($\varepsilon = 1$), welcher darüber hinaus für alle Wellenlängen gilt. Reale Körper, deren Emissionsgrad zwar kleiner 1, ($\varepsilon < 1$) doch ebenfalls wellenlängenunabhängig ist, bezeichnet man als Graue Strahler. Körper, deren Emissionsgrad kleiner 1 ist und mit der Wellenlänge variiert, werden als Selektive oder Nichtgraue Strahler bezeichnet.

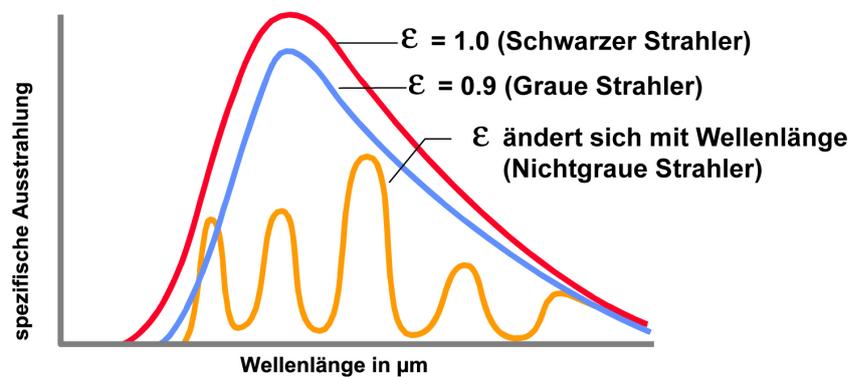


Abbildung 3.8: Wellenlängenabhängigkeit des Emissionsgrades [7]

Es gilt zu beachten, dass die Gesetzmäßigkeiten des Schwarzen Strahlers unter bestimmten Voraussetzungen auf Graue Strahler, jedoch nie auf Selektive Strahler übertragen werden dürfen.

Abhängigkeit von der Temperatur

Die Temperaturabhängigkeit des Emissionsgrades ist im Allgemeinen als gering anzusehen und kann für die meisten Anwendungen vernachlässigt werden. Eine Ausnahme bildet jedoch der Phasenübergang, bei dem der Emissionsgrad stark schwanken kann. Als Beispiel sei Gusseisen angeführt, das im festen Zustand bei 1000°C einen Emissionsgrad von $\varepsilon = 0,95$ aufweist, wo hingegen der Emissionsgrad im flüssigen Zustand bei 1300°C auf geringe $\varepsilon = 0,28$ absinkt [22].

Abhängigkeit vom Beobachtungswinkel

Die Abhängigkeit des Emissionsgrades vom Beobachtungswinkel ist besonders bei blanken Metallen sehr hoch. Hier steigt mit dem Beobachtungswinkel (gemessen an der Flächennormalen) auch der Emissionsgrad, bis er bei ca. 80° sein Maximum erreicht, um dann wieder zu sinken.

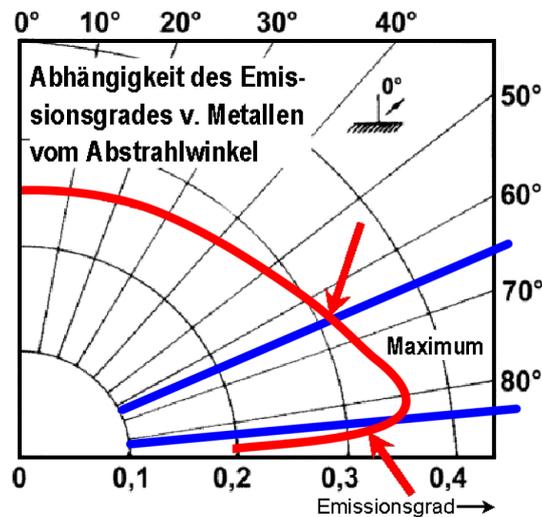


Abbildung 3.9: Winkelabhängigkeit des Emissionsgrades von Metallen [24]

3.5 Der Schwarze Körper

Der Begriff „Schwarzer Körper“ wurde von Gustaff Kirchhoff im Jahr 1860 eingeführt, um die sehr komplexen Strahlungsvorgänge realer Körper zu beschreiben. Er ist ein idealisierter, hypothetischer Körper, der auftreffende elektromagnetische Strahlung bei jeder Wellenlänge vollständig absorbiert. Strahlung wird weder reflektiert noch transmittiert, somit ist er ein idealer Absorber.

Steht der Schwarze Körper mit seiner Umgebung im thermischen Gleichgewicht, so muss die von ihm abgegebene Strahlungsleistung, gleich der von ihm aufgenommenen sein. Er ist damit auch eine ideale Strahlungsquelle, die elektromagnetische Strahlung in einem nur von der Temperatur abhängigen Spektrum aussendet.

3.5.1 Hohlraumstrahler

Der Schwarze Körper ist ein idealisiertes Modell, das sich in der Wirklichkeit nicht realisieren lässt. Es gibt kein Material, das elektromagnetische Strahlung unabhängig von der Wellenlänge vollständig absorbiert. Deshalb werden Schwarze Körper in der Praxis durch sogenannte Hohlraumstrahler angenähert. Dabei kann es sich beispielsweise um eine Hohlkugel mit einer kleinen Öffnung handeln, deren Innenwände mit Ruß geschwärzt sind. Trifft ein Strahl auf diese Öffnung, wird dieser an der Innenwand mehrmals reflektiert. Dabei wird jedes Mal ein Großteil der Strahlung absorbiert, so dass nur ein verschwindend kleiner Teil diese Öffnung auch wieder verlässt. Damit sind die Eigenschaften dieser Öffnung denen eines Schwarzen Körpers sehr ähnlich [26].

3.6 Strahlungsgesetze

3.6.1 Das Kirchhoffsche Gesetz

Gustaff Kirchhoff bewies im Jahr 1859, dass ein Körper, der mit der ihm umgebenden Wärmestrahlung im thermischen Gleichgewicht steht, die auftreffende Strahlung in solcher Weise absorbiert und reflektiert, dabei gleichzeitig auch Strahlung emittiert, sodass sich bei konstant bleibender Temperatur all diese Prozesse kompensieren.

Damit konnte er zeigen, dass die spektrale Strahlungsdichte von den chemischen oder physikalischen Eigenschaften eines Strahlers unabhängig ist und nur von der Temperatur T und der Wellenlänge λ abhängt.

Die mathematische Formulierung des **Kirchhoffschen Gesetzes** lautet

$$\frac{L_\lambda(\lambda, T)}{\alpha(\lambda, T)} = L_{\lambda,S}(\lambda, T) \quad (3.19)$$

und besagt, dass das Verhältnis der Strahldichte zum Absorptionskoeffizienten eines beliebigen Temperaturstrahlers, gleich der Strahldichte des Schwarzen Strahlers ist.

Für einen realen Strahler ist der Absorptionsgrad $\alpha(\lambda) < 1$, womit auch die spektrale Strahldichte eines realen Strahlers bei gleicher Temperatur und gleicher Wellenlänge immer kleiner ist als die eines Schwarzen Strahlers.

Mit der Definition des spektralen Emissionsgrades nach 3.18 kann man 3.19 auch schreiben als:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \quad (3.20)$$

Hierbei handelt es sich um eine andere Formulierung des Kirchhoffschen Gesetzes, welche besagt, dass bei gegebener Temperatur T und Wellenlänge λ , der spektrale Emissionsgrad gleich dem spektralen Absorptionsgrad ist. $\alpha(\lambda)$ ist auf den Wertebereich $0 \dots 1$ beschränkt, was damit auch für $\varepsilon(\lambda)$ gelten muss. Nach der Definition des spektralen Emissionsgrades 3.18 kann die spektrale Strahldichte eines beliebigen Strahlers niemals größer als die eines Schwarzen Strahlers sein. Unter allen Strahlern besitzt der Schwarze Strahler mit $\varepsilon = 1$ das größtmögliche Emissionsvermögen.

3.6.2 Das Wiensche Verschiebungsgesetz

Wilhelm Wien konnte im Jahr 1876 durch rein thermodynamische Überlegungen zeigen, dass die Strahldichtefunktion $L_{\lambda,T}$ gleich dem Produkt von $\lambda \cdot T$ ist. Für die spektrale Strahldichte erhielt er durch Ähnlichkeiten zum idealen Gas folgende Formulierung:

$$L_{\lambda,S}(\lambda, T) = \frac{\beta}{\lambda^5} \cdot F(\lambda \cdot T) \quad (3.21)$$

Laut dieser Darstellung reicht es, die Abhängigkeit der spektralen Strahldichte von der Wellenlänge bei nur einer Temperatur zu kennen, um sie für alle anderen Temperaturen

berechnen zu können. Daher auch der Name „Verschiebungsgesetz“. Da $L_{\lambda,S}(\lambda, T)$ bei einer Wellenlänge von $\lambda = 0$ bzw. $\lambda = \infty$ verschwindet, muss es für jede Temperatur ein Maximum geben, das durch $\frac{\partial}{\partial \lambda} L_{\lambda,S}(\lambda, T) = 0$ berechnet werden kann. Die Lösung dieser Gleichung ergibt für das Produkt $\lambda \cdot T$ einen konstanten Wert, der zu folgender Beziehung führt:

$$\lambda_m \cdot T = b = \text{const.} \quad (3.22)$$

Daraus ist klar ersichtlich, dass sich mit höher werdender Temperatur das Maximum der Wellenlänge zu kürzeren Wellenlängen hin verschiebt. Die spektrale Strahldichte selbst ist am Maximum proportional zu T^5 . (3.22 in 3.21)

Die Gleichung 3.21 kann aber auch bezüglich λ , mit der Variable $x = \lambda \cdot T$ integriert werden, was zum **Stefan-Boltzmannschen-Gesetz** führt:

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (3.23)$$

Dabei stellt M die spezifische Ausstrahlung dar und σ wird als Stefan-Boltzmann-Konstante bezeichnet, mit dem Wert $\sigma = 5,670373 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$.

3.6.3 Das Plancksche Strahlungsgesetz

Im Jahr 1900 schlug Max Planck seine Strahlungsformel vor, welche die Strahlung Schwarzer Körper korrekt beschreibt. Sie enthält das Rayleigh-Jeans-Gesetz und das Wiensche Strahlungsgesetz als Grenzfälle und wurde zunächst eher intuitiv aufgestellt, ohne sie beweisen zu können. Erst in den folgenden Jahren entwickelte Planck auch den theoretischen Beweis dafür.

Seine zur damaligen Zeit revolutionäre Annahme, dass die in seinem Modell benutzten Resonatoren Energie nicht stetig aufnehmen bzw. abgeben können, sondern dies nur in bestimmten Einheiten, den sogenannten Quanten tun, legte den Grundstein für die Quantenphysik.

Mit dieser Theorie leitete er das Plancksche Strahlungsgesetz her, welches die spektrale Strahldichte $L_{\lambda,S}(\lambda, T)$ des Schwarzen Körpers in Abhängigkeit von Temperatur und Wellenlänge beschreibt:

$$L_{\lambda,S}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi \cdot \lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (3.24)$$

c_1 und c_2 sind die Planckschen Strahlungskonstanten, die wie folgt lauten:

$$\begin{aligned} c_1 &= 2\pi \cdot h \cdot c^2 = 3,7415 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2 \\ c_2 &= \frac{h \cdot c}{k} = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ mK} \end{aligned}$$

h = Plancksches Wirkungsquantum

c = Vakuumlichtgeschwindigkeit

k = Boltzmann-Konstante

Die folgende Abbildung stellt das Plancksche Strahlungsgesetz in Abhängigkeit von Temperatur T und Wellenlänge λ dar.

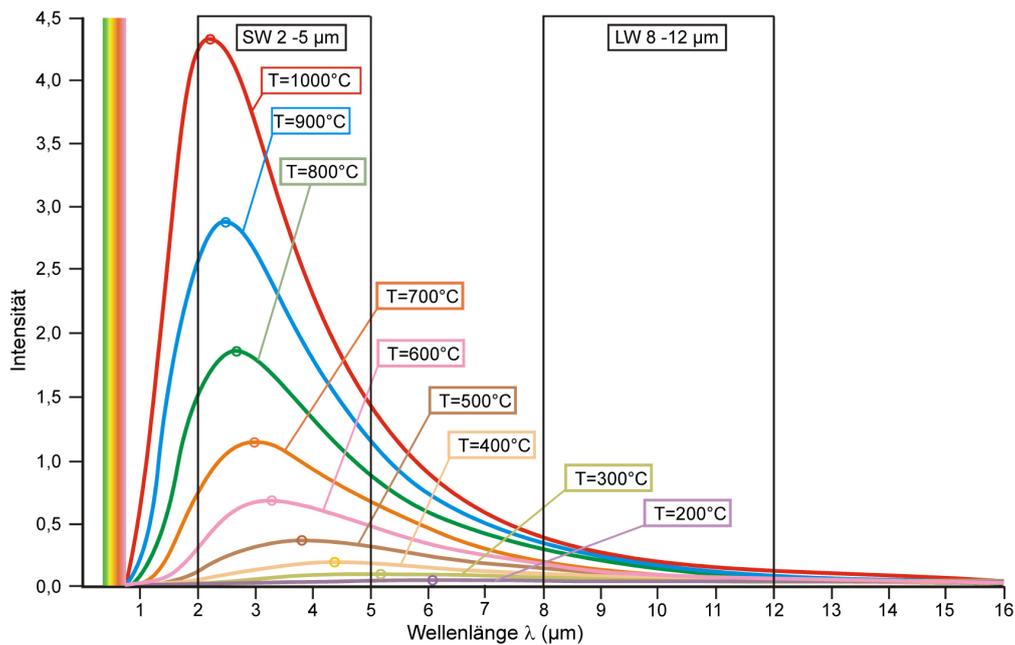


Abbildung 3.10: Plancksches Strahlungsgesetz [27]

Streng genommen ist das Plancksche Gesetz nur für Vakuum gültig, für reale Medien müsste der jeweilige Brechungsindex berücksichtigt werden. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass der Unterschied so gering ist, dass er für die meisten Anwendungen vernachlässigt werden kann.

Kapitel 4

Sicherheitsaspekte

Bevor es daran geht, erste praktische Versuche durchzuführen, sollten die grundlegendsten Punkte im sicheren Umgang mit Laserquellen behandelt werden. Denn Laserstrahlung, die ins Auge gelangt, kann irreparable Schäden vor allem an der Netzhaut verursachen. Dies kann im schlimmsten Fall eine Erblindung zur Folge haben. Doch auch die Haut kann durch höhere Laserleistungen verletzt werden - hier kann es zu teils schweren Verbrennungen kommen.

4.1 Wechselwirkung Laser-Gewebe

4.1.1 Das menschliche Auge

Von Netzhautverletzungen geht die größte Gefahr aus, da diese meist irreparabel sind. Welchen Schaden eine bestimmte Wellenlänge verursacht, hängt dabei stark von der Eindringtiefe der Strahlung ab. Darum ist es wichtig zu wissen, welcher Wellenlängenbereich von der Linse auf die Netzhaut fokussiert wird. Dieser Bereich geht über das Spektrum des sichtbaren Bereiches hinaus und liegt bei etwa 400nm bis 1400nm und reicht damit in den Infrarot-Bereich.

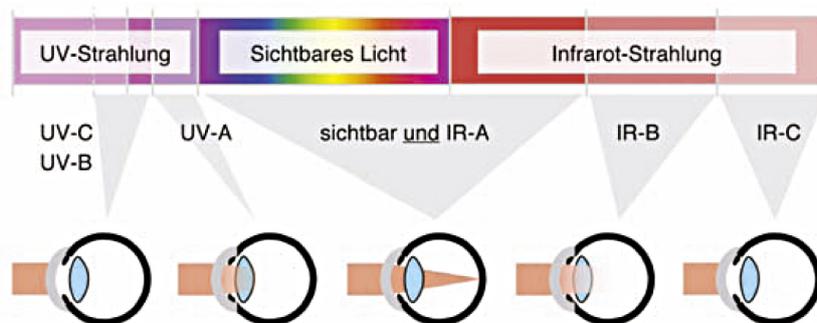


Abbildung 4.1: Augenabsorption von optischer Strahlung [30]

4.1.2 Schädigungsmechanismen

Bei der Schädigung von Gewebe muss man zwischen zwei Wirkmechanismen unterscheiden:

- Photochemische Schädigung: sie entsteht durch Auslösung einer chemischen Reaktion, die ihre Ursache in der spezifischen Absorption bestimmter Moleküle hat. Durch diesen Effekt kann die Haut, die Augenlinse oder die Netzhaut geschädigt werden, wobei die Größe der bestrahlten Fläche keinen Einfluss auf die Verletzung hat. Die photochemische Schädigung wird durch eine Bestrahlung mit einer Wellenlänge im UV-Bereich verursacht und hat meist irreversible Veränderungen zur Folge.
- Thermische Schädigung: sie wird durch Absorption der auftreffenden Strahlung durch das Gewebe verursacht. Die absorbierte Leistung wird in Wärme umgewandelt und schädigt damit das Gewebe. Bis ca. 45°C sind keine irreversiblen Schäden zu beobachten. Ab 60°C setzt eine Koagulation (Gerinnung von Blut) ein, ab 150°C beginnt eine Karbonisierung des Gewebes und bei Temperaturen über 300°C wird das Gewebe schlussendlich verdampft.

Im Gegensatz zur photochemischen Schädigung ist hier der Schaden von der Größe des bestrahlten Gewebereiches abhängig, da durch Wärmeleitung die maximale Temperatur verringert werden kann. Natürlich haben auch optische Eigenschaften des bestrahlten Gewebes Einfluss auf den zu erwartenden Schaden, denn von diesen hängt die Größe der eingebrachten Leistung ab. In diesem Zusammenhang ist der spektrale Absorptionskoeffizient sehr hilfreich, da dieser angibt, welche Leistung beim Durchdringen einer Gewebeschicht von dieser absorbiert wird [30].

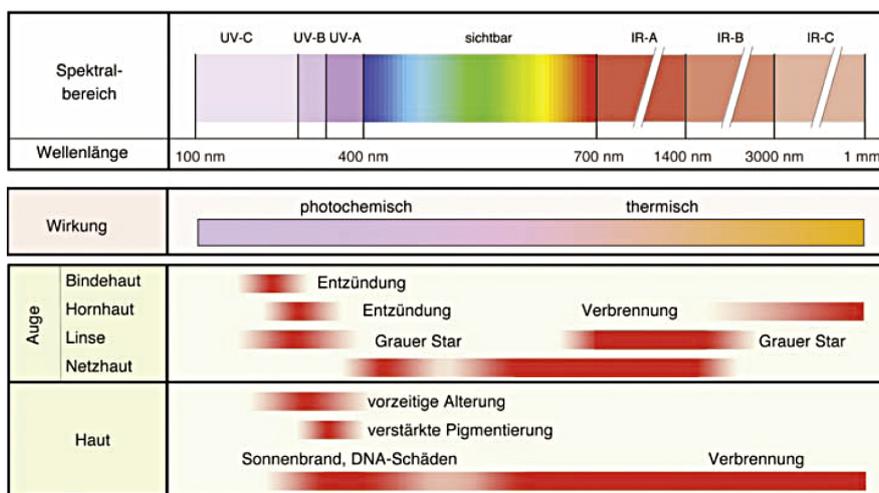


Abbildung 4.2: Gewebeschädigung [30]

4.2 Laserklassen

Um als Anwender einen schnellen Überblick bezüglich der Gefährlichkeiten von Laserstrahlung zu erhalten, wurde eine Klassifizierung vorgenommen. Die Einteilung in Klassen ist weltweit für alle Hersteller von Laserquellen verpflichtend und beschreibt die größtmögliche Gefahr, die von dem jeweiligen Laserstrahl ausgehen kann. Dabei werden Laser der Klasse 1 als ungefährlich eingestuft, wohingegen von Laserquellen der Klasse 4 das größte Gefährdungspotential ausgeht.

Die folgende Abbildung gibt die Klassifizierung in anschaulicher Weise wieder:

	Direkte Langzeitbestrahlung		Direkte Kurzzeitbestrahlung		Diff. Refl.		Direkte Bestrahlung
	opt. Inst.	freies Auge	opt. Instr.	freies Auge	Auge	Haut	Haut
Klasse 1	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 1M		sicher		sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 2			sicher	sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 2M				sicher	sicher	sicher	sicher
Klasse 3R			Geringes Risiko	Geringes Risiko	sicher	sicher	sicher
Klasse 3B					Geringes Risiko	sicher	Geringes Risiko
Klasse 4							

Abbildung 4.3: Gefahrenpotenzial der einzelnen Laserklassen [30]

4.3 Schutzmaßnahmen seitens des Herstellers

Der Hersteller ist verpflichtet sein Produkt zu klassifizieren und die entsprechenden Schutzmaßnahmen vorzusehen. Diese beinhalten technische Vorrichtungen, Hinweisschilder und genaue Informationen für den richtigen Umgang mit der Laserquelle.

Von der Fülle dieser Maßnahmen wird hier kurz auf die konstruktiven Maßnahmen, die bei Laserquellen der Klassen 3B und 4 vorgeschrieben sind, eingegangen:

- **Interlock**
Dabei handelt es sich um eine automatische Sicherheitseinrichtung, die beim Öffnen der Sicherheitsabdeckung, -türe, u.ä. den Laserstrahl sofort ausschaltet.
- **Schlüsselschalter**
Für das Einschalten des Lasers muss ein Schlüssel, eine Magnetkarte, ein Code oder etwas ähnliches erforderlich sein.
- **Emissions-Warneinrichtung**
Es muss optisch und/oder akustisch signalisiert werden, dass Laserstrahlung emittiert wird. Dieses Signal muss redundant oder ausfallsicher sein.
- **Shutter**
Ist eine Einrichtung, mit der der Strahlaustritt unabhängig von der Laserquelle verhindert werden kann.
- **Steuerung**
Die Steuerung muss so platziert sein, dass der Betrieb sowie eventuelle Justagearbeiten außerhalb des gefährlichen Bereiches ausgeführt werden können.

4.4 Schutzmaßnahmen seitens des Anwenders

Neben der Einrichtung eines Laserkontrollbereiches, der entsprechend gekennzeichnet und gesichert sein muss und auch nur von Personen die einer Sicherheitsunterweisung unterzogen wurden betreten werden darf, sind auch einige einfache Maßnahmen zu beachten:

- Der Arbeitsplatz ist gut zu beleuchten.
- Spiegelnnde Oberflächen im Arbeitsbereich müssen vermieden werden.
- Die eingesetzten Optikelemente sind gut zu fixieren.
- Der Arbeitsraum muss frei von brennbaren Materialien sein.

Kapitel 5

Versuchsaufbau

5.1 Vorgangsweise

Es muss zuerst entschieden werden, in welcher Weise die Strahlungsemission erfasst werden soll. Dies kann mit einem **Lichtwellenleiter** geschehen, der an geeigneter Stelle am Bearbeitungskopf montiert wird. Allerdings ist bei dieser Methode die Erhaltung des Polarisationsverhältnisses der Strahlungsemission problematisch. Daher scheidet der Lichtwellenleiter aus.

Eine andere Möglichkeit ist eine kleine **Bohrung im Kupferumlenkspiegel** des CO₂-Lasers, durch welche die Erosionsfront beobachtet werden kann. Dabei ist es aber nicht möglich, die beobachtete Stelle zu variieren, ohne dabei den Spiegel zu verschieben und so jeweils eine neue Ausgangssituation zu schaffen. Damit sind die erzielten Ergebnisse nur bedingt vergleichbar.

Die eleganteste Variante scheint ein **Strahlauskoppelspiegel** zu sein, der unter einem Winkel von 45° in den Strahlengang des Rohstrahls gesetzt wird, und dabei die emittierte Strahlung reflektiert.

Für ein strukturiertes Vorgehen in der Planung, wird der gesamte Versuchsaufbau in übersichtliche Gruppen unterteilt:

- Optische Komponenten
- Mechanischer Aufbau
- Messelektronik
- Messdatenerfassung

5.2 Optische Komponenten

5.2.1 Strahlauskoppler

Die zu untersuchende Strahlung verläuft koaxial zum Bearbeitungsstrahl. Die wichtigste Aufgabe des Strahlteilers bzw. -auskopplers besteht darin, die emittierte Strahlung ohne jegliche Veränderung des Polarisationsverhältnisses auszukoppeln. Des Weiteren muss der Strahlteiler eine möglichst hohe Transmission der $10,6\ \mu\text{m}$ Laserstrahlung gewährleisten. Diese Forderung schränkt die Materialauswahl stark ein. In der Industrie hat sich Zinkselenid¹ (ZnSe) als Standardmaterial für CO_2 -Laseranwendungen durchgesetzt. Bei Sonderanwendungen ist auch der Einsatz von Germanium und Gallium-Arsenid möglich. Für den Versuchsaufbau soll auf Standardbauteile zurückgegriffen werden, die üblicherweise fast ausschließlich aus Zinkselenid gefertigt werden. Daher fällt die Wahl auf dieses Material. Es hat gute Transmissionseigenschaften, gute thermische Eigenschaften und kann zu einem wirtschaftlich vernünftigen Preis hergestellt werden. Zudem ermöglicht eine geeignete Beschichtung die Transmission, die bei unbeschichtetem ZnSe bei ca. 70% liegt, auf bis zu 99,5% zu steigern. Diese hohen Werte sind nicht nur wegen des Wirkungsgrades der Anlage wünschenswert, viel wichtiger ist es, den Anteil an absorbiertem Strahlung gering zu halten. Diese würde zur Erwärmung der Optik führen, was den Einsatz eines aufwändigen Kühlsystems notwendig machen, und einen erheblichen Mehraufwand bedeuten würde.

Für die oben erwähnte Beschichtung zur Verbesserung der Transmissionseigenschaften wird eine geringe Menge radioaktives Thorium verwendet. Um mögliche Gefahren, die von diesem Material ausgehen zu minimieren, ist das Thorium in mehrere, nicht radioaktive Schichten eingebettet. Somit kann in unbeschädigtem Zustand keine Radioaktivität austreten [14].

Die bisherigen Überlegungen sind notwendige Bedingungen um die Anlage nach dem Einbau des Strahlauskopplers sicher und ohne Einschränkungen betreiben zu können. Für die eigentliche Aufgabe des Strahlteilers, nämlich die emittierte Strahlung aus dem Strahlengang auszukoppeln, wird der Strahlteiler speziell beschichtet. Der Reflexionsgrad dieser Beschichtung ist eine Funktion der Wellenlänge. Um eine geeignete Beschichtung für die späteren Versuche wählen zu können, muss der Wellenlängenbereich der auszukoppelnden Strahlung eingeschränkt werden. Der zu untersuchende Zusammenhang zwischen Polarisationsverhältnis und Neigungswinkel der Erosionsfront besteht in einem Wellenlängenbereich von 500 nm bis 2000 nm [31].

Doch ist zu berücksichtigen, dass die emittierte Strahlung, bevor sie vom Strahlteiler durch Reflexion ausgekoppelt wird, die Fokussierlinse (Bearbeitungslinse) passieren

¹Zinkselenid ist kein reines Element sondern setzt sich 1:1 aus der stöchiometrischen Menge aus Zink-Kationen und Selen-Anionen zusammen. Die Erscheinungsform ist ein gelblicher, geruchsloser Kristall mit einem Schmelzpunkt von über 1100°C [4].

muss. Diese ist ebenfalls aus Zinkselenid gefertigt und deren Transmissionsfähigkeit nimmt unterhalb einer Wellenlänge von ca. 630 nm schlagartig ab. Damit besteht eine systembedingte Einschränkung des Wellenlängenbereichs nach unten, auf die kein Einfluss genommen werden kann.

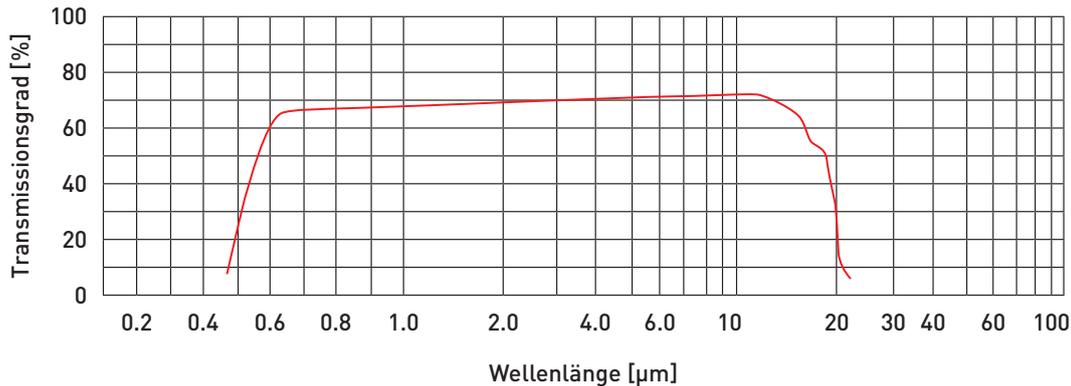


Abbildung 5.1: Transmissionskurve für ZnSe [21]

Bei der Recherche nach verfügbaren Standardbauteilen, werden sogenannte „Strahlkombinierer“ aus ZnSe gefunden. Sie werden von mehreren Firmen angeboten und haben die Aufgabe, einen Ziellaserstrahl, dessen Wellenlänge im sichtbaren Bereich liegt, in den Strahlengang eines CO₂-Lasers einzukoppeln. Typischerweise wird für den Ziellaser ein Helium-Neon-Laser verwendet, der einen Strahl mit einer Wellenlänge von 633 nm emittiert. Demnach ist die Beschichtung der meisten Strahlkombinierer auf eine maximale Reflexion der Wellenlänge von 633 nm ausgelegt. Diese Wellenlänge liegt allerdings am unteren Ende der Transmissionskurve von ZnSe (Abbildung 5.1) und kann von der Bearbeitungslinse, die ebenfalls aus ZnSe gefertigt ist, gerade noch transmittiert werden. Erfreulicherweise geht aus den Datenblättern der Hersteller hervor, dass der Reflexionsgrad der Strahlkombinierer auch für etwas größere Wellenlängen noch eine akzeptable Größe hat und diese daher gut für die geplanten Versuche einsetzbar sind. Da die angebotenen Strahlkombinierer für den Einsatz in CO₂-Laseranlagen konzipiert sind, liegt deren maximale Transmission bei der für CO₂-Laser typischen Wellenlänge von 10,6 µm. Folgende Fragen müssen vor der Bestellung geklärt werden:

- Kann der Strahlkombinierer auch als Strahlauskoppler verwendet werden? (D.h. der reflektierte Strahl verläuft in die entgegengesetzte Richtung.)
- Wird durch die Reflexion das Verhältnis von s- zu p-Polarisation verändert?
- Muss der Strahlkombinierer gekühlt werden?

Die Angaben der Hersteller sind durchwegs deckungsgleich und es zeigt sich, dass der Strahlkombinierer auch als Strahlteiler bzw. Strahlauskoppler eingesetzt werden kann. Des weiteren wird bestätigt, dass das Verhältnis von s- zu p- Polarisation durch die Reflexion weitgehend erhalten bleibt. Zum Thema Kühlung wird zwar versichert, dass bei einem optimalen Wärmeübergang zum Optikkhalter und geringem Verschmutzungsgrad ein Kühlsystem nicht unbedingt erforderlich ist, aber vor allem bei längerem Betrieb durchaus sinnvoll sein kann.

Der Preisunterschied zwischen den Herstellern ist sehr groß. Die Wahl fällt auf einen Strahlkombinierer der Firma II-VI Infrared, mit einem Durchmesser von 38,1 mm, einer Dicke von 5,1 mm und folgenden Transmissions- und Reflexionseigenschaften.

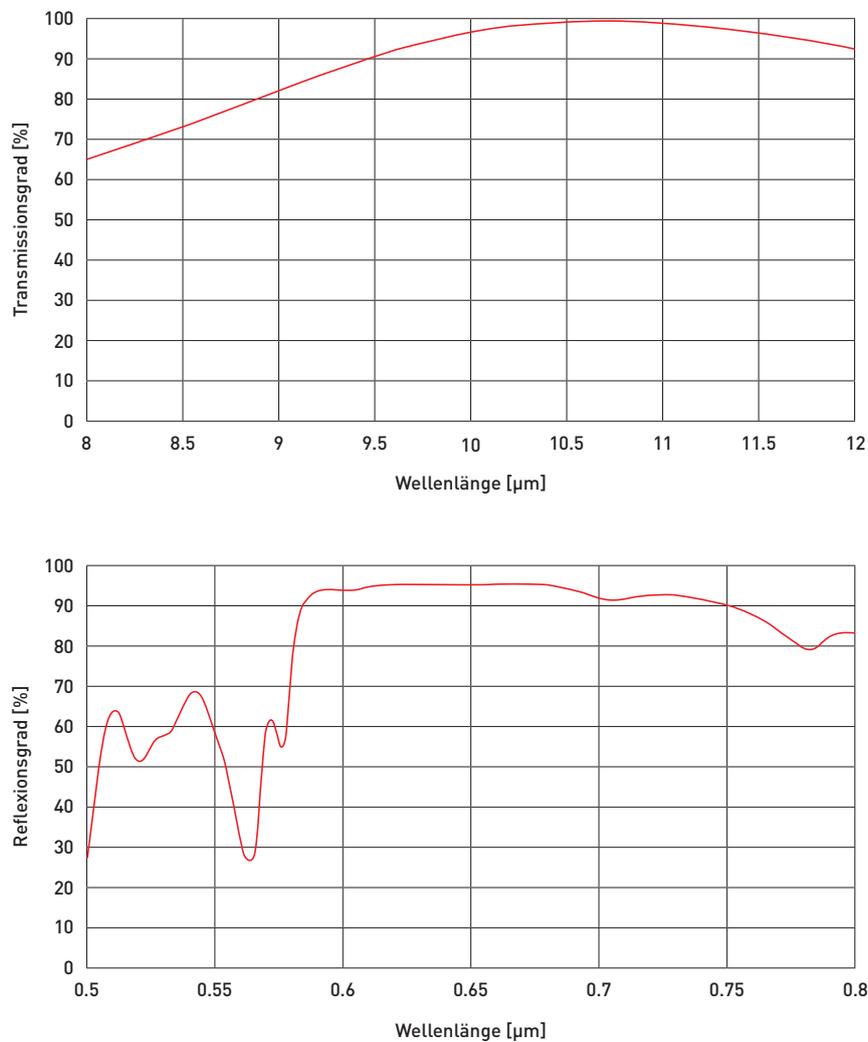


Abbildung 5.2: Transmissions- und Reflexionskurve für Strahlkombinierer aus ZnSe (II-VI Infrared) [11]

Leider stellt sich bei den ersten Versuchen heraus, dass es bei der Bestellung ein Missverständnis gab und eine falsche Optik geliefert wurde. Nachdem mit dem zuständigen Kundenbetreuer von II-VI Infrared keine zufriedenstellende Lösung bezüglich eines Umtausches gefunden werden kann, wird nach neuerlicher Recherche ein anderer Strahlkombinierer bei ULO Optics bestellt. Dieser ist ebenfalls aus ZnSe gefertigt, hat aber bei einer Wellenlänge von 740nm einen stark verkleinerten Reflexionsgrad, der unbedingt berücksichtigt werden muss, denn in diesem Bereich sollen später die Messungen der emittierten Strahlung durchgeführt werden. Der Transmissionsgrad der CO₂-Laserstrahlung mit 10,6 μm liegt bei über 99%.

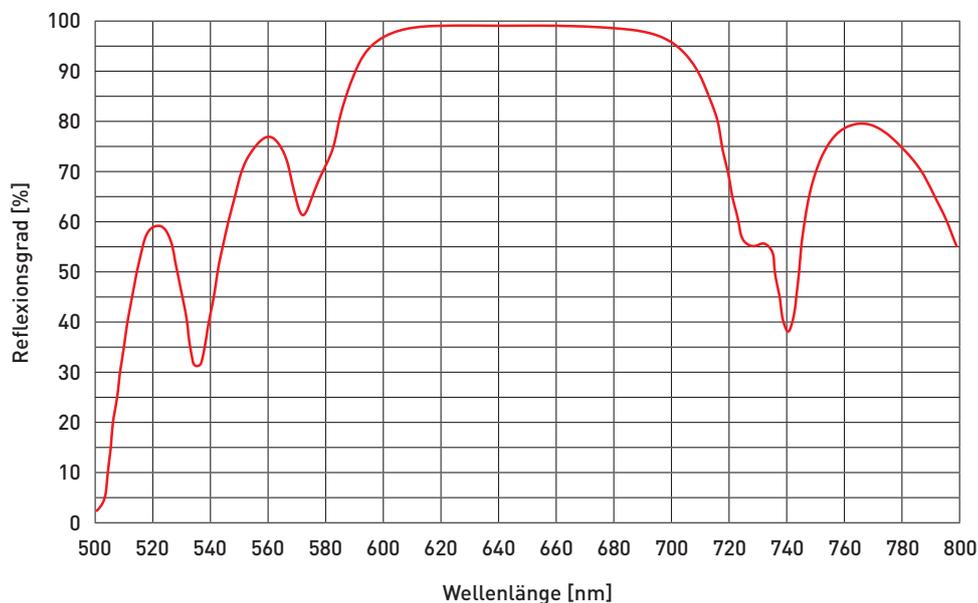


Abbildung 5.3: Reflexionskurve für Strahlkombinierer aus ZnSe (ULO Optics) [28]

5.2.2 Polarisator

Dieser Bauteil wird eingesetzt um den ausgekoppelten Strahl in einen s- und einen p-polarisierten Strahl aufzuteilen. Für diese Aufgabe stehen mehrere, nach verschiedenen Prinzipien arbeitende, Systeme zur Verfügung:

- Polarisation durch Absorption
Diese Art der Polarisierung beruht auf dem Phänomen des Dichroismus. Darunter versteht man die Eigenschaft zahlreicher Materialien, verschiedene Polarisationsrichtungen unterschiedlich zu absorbieren. Meist verwendet man dazu Kristalle, die aus langen, ausgerichteten Kohlenwasserstoffmolekülen aufgebaut sind. Je

nach Ausrichtung dieses Kristalls wird die eine Polarisationsrichtung absorbiert, die andere transmittiert.

Polarisation durch Absorption ist nicht zur Aufteilung in zwei Strahlen geeignet, sondern wirkt wie ein Polarisationsfilter, der die Transmission von nur einer Schwingungsrichtung zulässt. Für die geplanten Anforderungen ist sie daher ungeeignet.

- Polarisation durch Doppelbrechung

Bei diesem Verfahren macht man sich die doppelbrechenden Eigenschaften optisch anisotroper Kristalle zu nutze. Dabei hängt der Brechungsindex dieser Materialien von der Polarisation der elektromagnetischen Welle ab. Damit werden unterschiedliche Polarisationsrichtungen unterschiedlich stark gebrochen und nehmen dadurch verschiedene Wege durch den Kristall. Diese Eigenschaft kann zur Trennung in einen s- und einen p-polarisierten Strahl genutzt werden.

Einen Spezialfall stellt das Glan-Prisma dar. Grundlage ist die Tatsache, dass der kritische Winkel eine Funktion des Brechungsindexes ist und damit von der Polarisationsrichtung abhängt. Um einen Polarisationsteiler zu bauen, schneidet man einen doppelbrechenden Kristall in zwei rechtwinkelige Prismen, und zwar so, dass die optische Achse parallel zu einer der Endflächen ist. Danach werden beide Hälften mit einem durchsichtigen Kleber wieder zusammengefügt. Sind nun der Schnittwinkel der Prismen und der Brechungsindex des Klebers passend gewählt, wird der ordentliche Strahl² an der Grenzfläche totalreflektiert. Der außerordentliche Strahl wird hingegen ungehindert transmittiert.

- Polarisation durch Reflexion

Fällt unpolarisiertes Licht unter dem Brewsterwinkel auf eine ebene, dielektrische Oberfläche, wird ein Teil der Strahlung reflektiert und ein anderer Teil transmittiert. Der reflektierte Teil wird dabei vollständig linear polarisiert und zwar senkrecht zur Einfallsebene des Lichts. Der Anteil, der transmittiert wird, ist dagegen nur teilweise polarisiert. Durch die Anordnung mehrerer Platten hintereinander, die alle um den Brewsterwinkel geneigt sind, lässt sich jedoch auch dieser Teil nahezu vollständig linear polarisieren. Diese Methode ist allerdings sehr empfindlich gegen Veränderungen an der Oberfläche sowie Verschmutzungen [16] [25].

Die Wahl fällt auf einen Polarisationsstrahlteilerwürfel der nach dem Prinzip der Doppelbrechung mit einem Glan-Prisma funktioniert. Ausschlaggebend für diese Wahl ist die Tatsache, dass sich die Strahlen in einem Winkel von 90° zueinander aufteilen lassen. Dadurch kann die Konstruktion des restlichen Aufbaus einfach gehalten werden, was die Fertigungskosten reduziert. Bei dem gewählten „Polarizing Beamsplitter Cube“ der Firma „Thorlabs“ ist der eigentliche Polarisationsstrahlteilerwürfel bereits in einem Aluminiumgehäuse (Würfel mit einer Kantenlänge von 25,4mm) integriert. Es verfügt

²Als ordentlicher Strahl wird der Anteil eines einfallenden Strahls bezeichnet, dessen elektrisches Feld senkrecht zur optischen Achse des Kristalls steht.

über vier Anschlussgewinde an jeder Würfelseite und lässt sich so sehr flexibel einsetzen. Die Wellenlängenbandbreite für die der Strahlteiler ausgelegt ist, liegt zwischen 620 und 1000nm. Damit fällt die zu untersuchende Emissionsstrahlung in die Mitte dieses Bereichs und lässt Spielraum nach oben und unten. Die folgenden Diagramme stellen die Transmission- bzw. Reflexionseigenschaften des Polarisationsstrahlteilerwürfels dar.

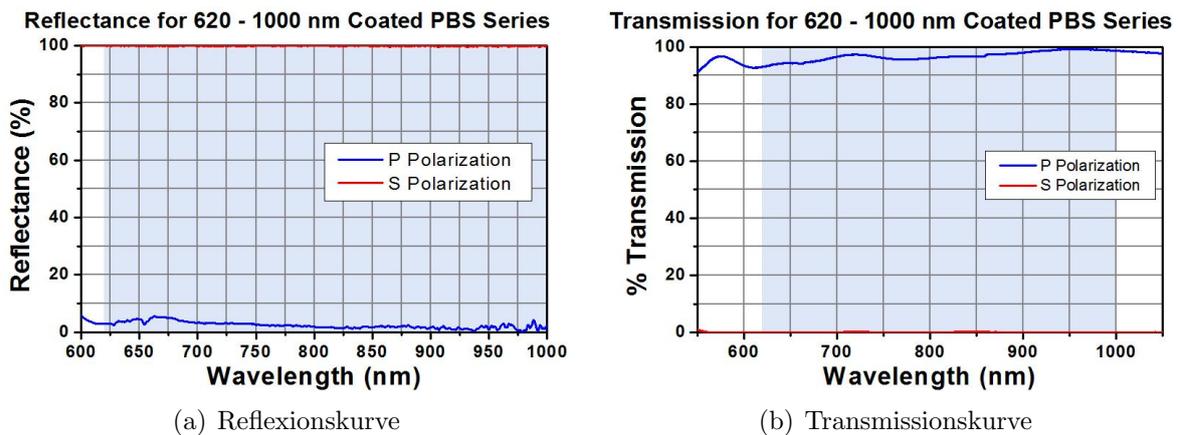


Abbildung 5.4: Kennlinien des Polarisationsstrahlteilerwürfels [25]

5.2.3 Sammellinse

Eine Sammellinse ist eine sphärische Linse mit positiver Brechkraft. Zur optischen Achse parallel eintreffende Strahlen werden im Brennfleck gesammelt. Im späteren Versuchsaufbau ist das, der vom Strahlteilerwürfel aufgespaltene Strahl, der jeweils auf die fotoempfindliche Fläche einer Fotodiode fokussiert wird. Dafür wird eine plankonvexe Linse mit einer Brennweite von 50mm gewählt.

5.3 Mechanischer Aufbau

In diesem Abschnitt werden wesentliche Überlegungen vorgestellt, die bei der Konstruktion des Versuchsaufbaus zu treffen sind.

Als erster Schritt muss eine geeignete Stelle an der Laserscheidanlage gefunden werden, an welcher der Rohstrahl ohne große Umbaumaßnahmen zugänglich ist. Dafür bietet sich eine Revisionsöffnung am Bearbeitungskopf an, die durch eine einfache Abdeckplatte verschlossen ist. Die Gewindebohrungen zur Befestigung dieser Platte können zur Montage des Auskoppelmechanismus verwendet werden, wodurch an der bestehenden Anlage nichts verändert werden muss.

Eine Vorgabe für die Konstruktion ist, den gesamten Aufbau mit wenigen Handgriffen abnehmen zu können um ihn bei Bedarf genauso einfach, möglichst in der gleichen Position, wieder montieren zu können.

Ausgehend von den Abmessungen der Strahlauskoppeloptik wird mit der Konstruktion einer entsprechenden Aufnahme begonnen. Um den Strahlauskoppler beim Vorliegen nicht optimaler Betriebsbedingungen nicht unzulässig zu erwärmen, wird am Aufnahmeblock die Möglichkeit für den Anschluss an ein Kühlwassersystem vorgesehen. Dafür werden Bohrungen eingebracht die sich im Winkel von 90° mehrmals schneiden und so den Kühlwasserstrom durch den Aufnahmeblock leiten. Zur Wasserzu- und -abfuhr dienen Schnellverschlusskupplungen für Kunststoffschläuche mit einem Innendurchmesser von 4 mm. Besonderes Augenmerk wird darauf gelegt, dass der Laserrohstrahl den Aufnahmeblock ungestört passieren kann. Würde der Rohstrahl am Aufnahmeblock streifen, könnte die absorbierte Strahlung zu einem unzulässigen Temperaturanstieg führen. Folglich soll ein Sicherheitsabstand von mindestens 3 mm zum Rohstrahl möglichst nicht unterschritten werden. Allerdings sind die Außenabmessungen der Haltevorrichtung, infolge der Bedingung, dass diese durch die relativ kleine Revisionsöffnung im Bearbeitungskopf passen muss, gegeben. Des weiteren ist noch zu beachten, dass die $10,6\mu\text{m}$ Strahlung bei der Transmission durch den Strahlauskoppler aufgrund seiner Dicke einen nicht zu vernachlässigenden Strahlenversatz erfährt.

Berechnung des Strahlenversatzes d:

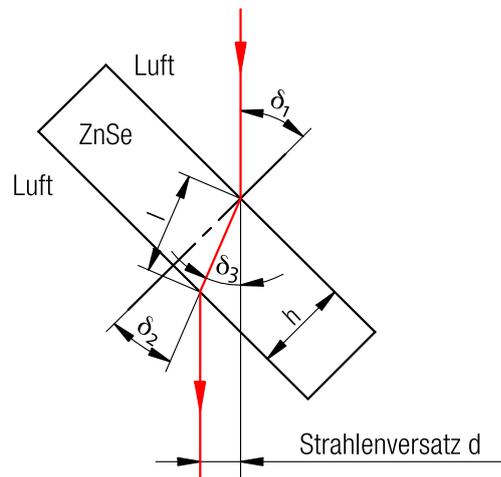


Abbildung 5.5: Versatz des Laserstrahls beim Durchdringen von ZnSe

- Brechungsindex für Luft: $n_1 \cong 1$
- Brechungsindex für ZnSe bei $\lambda = 10,6\mu\text{m}$: $n_2 = 2,4028$

Das **Snelliussche Brechungsgesetz** beschreibt die Änderung der Ausbreitungsrichtung eines Strahles beim Übergang in ein anderes Medium.

$$n_1 \cdot \sin(\delta_1) = n_2 \cdot \sin(\delta_2) \quad (5.1)$$

Durch einfaches Umformen erhält man:

$$\delta_2 = \arcsin \frac{n_1 \cdot \sin(\delta_1)}{n_2} \quad (5.2)$$

Brechungsindizes und Einfallswinkel eingesetzt ergeben:

$$\delta_2 = 17,11^\circ \quad (5.3)$$

In Abbildung 5.5 ist zu erkennen, dass bei einem Einbauwinkel des Strahlauskopplers von 45° die Summe der Winkel δ_2 und δ_3 wiederum 45° ergeben muß. Daraus lässt sich der Winkel δ_3 bestimmen:

$$\delta_3 = 45^\circ - \delta_2 = 27,89^\circ \quad (5.4)$$

Der Weg l , den der Strahl im Medium ZnSe zurücklegt, lässt wie folgt berechnen:

$$\cos(\delta_2) = \frac{h}{l} \Rightarrow l = \frac{h}{\cos(\delta_2)} = 3,14 \text{ mm} \quad (5.5)$$

Damit kann nun der Strahlenversatz d berechnet werden:

$$\sin(\delta_3) = \frac{d}{l} \Rightarrow d = l \cdot \sin(\delta_3) = 1,47 \text{ mm} \cong 1,5 \text{ mm} \quad (5.6)$$

Die Aufnahme für den Strahlauskoppler muss also so ausgelegt sein, dass trotz des Strahlenversatzes von 1,5 mm noch der geforderte Sicherheitsabstand eingehalten wird.

Bei der Fixierung der Optik ist es wichtig, dass Dehnungen durch Wärmeeinflüsse nicht behindert werden und so zu unzulässig hohen Spannungen und zum Versagen des Bauteils führen. Ein Zwischenring aus Kupferdraht bzw. -blech soll zwischen der Optik und dem Niederhaltering positioniert werden. Dieser Zwischenring ist an einigen Stellen erhaben, wodurch sich eine leichte Federwirkung ergibt. So ist zwar ein sicherer Halt des Strahlauskopplers gewährleistet, dennoch kann er sich in gewissen Grenzen bewegen. Es werden verschiedene Varianten an Zwischenringen gefertigt um im praktischen Versuch den am besten geeigneten auszuwählen.



(a) Verschiedene Zwischenringvarianten



(b) Ausgewählter Zwischenring aus Kupferdraht

Abbildung 5.6: Zwischenring für Strahlauskoppler

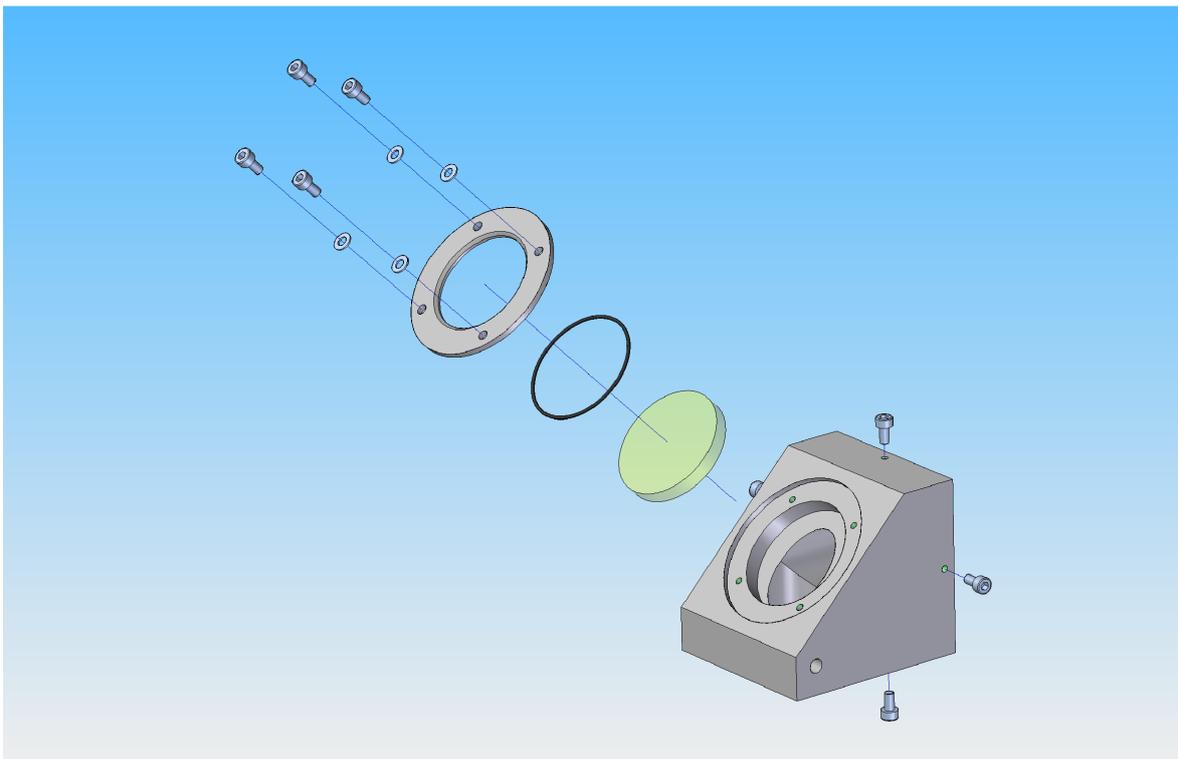


Abbildung 5.7: Strahlauskoppler in Haltevorrichtung

Der ausgekoppelte Strahl gelangt in den Strahlteilerwürfel, der mit seinem Gehäuse an der Würfelhalteplatte festgeschraubt ist. An dieser Halteplatte sind wiederum vier Stangen montiert, die am anderen Ende den Strahlauskoppelblock tragen. Dazwischen befindet sich die Stangenhalteplatte, mit der das gesamte System über die Grundplatte

am Bearbeitungskopf montiert ist. Die Stangen ermöglichen ein horizontales Verschieben der Einheit gegenüber der Stangenhalteplatte. Außerdem kann die Stangenhalteplatte ihrerseits horizontal und vertikal verschoben bzw. gedreht werden, was die Einstellarbeiten vereinfacht. Zur raschen Montage bzw. Demontage wird die Stangenhalteplatte mit vier Schrauben an der Grundplatte montiert. Um bei einer neuerlichen Montage nicht sämtliche Einstellarbeiten wiederholen zu müssen, findet ein einfacher Mechanismus Verwendung: er besteht aus drei Fixpunkten auf der Grundplatte (die ihrerseits aber verstellbar ausgeführt sind) und gibt damit eine definierte Einbaulage vor.

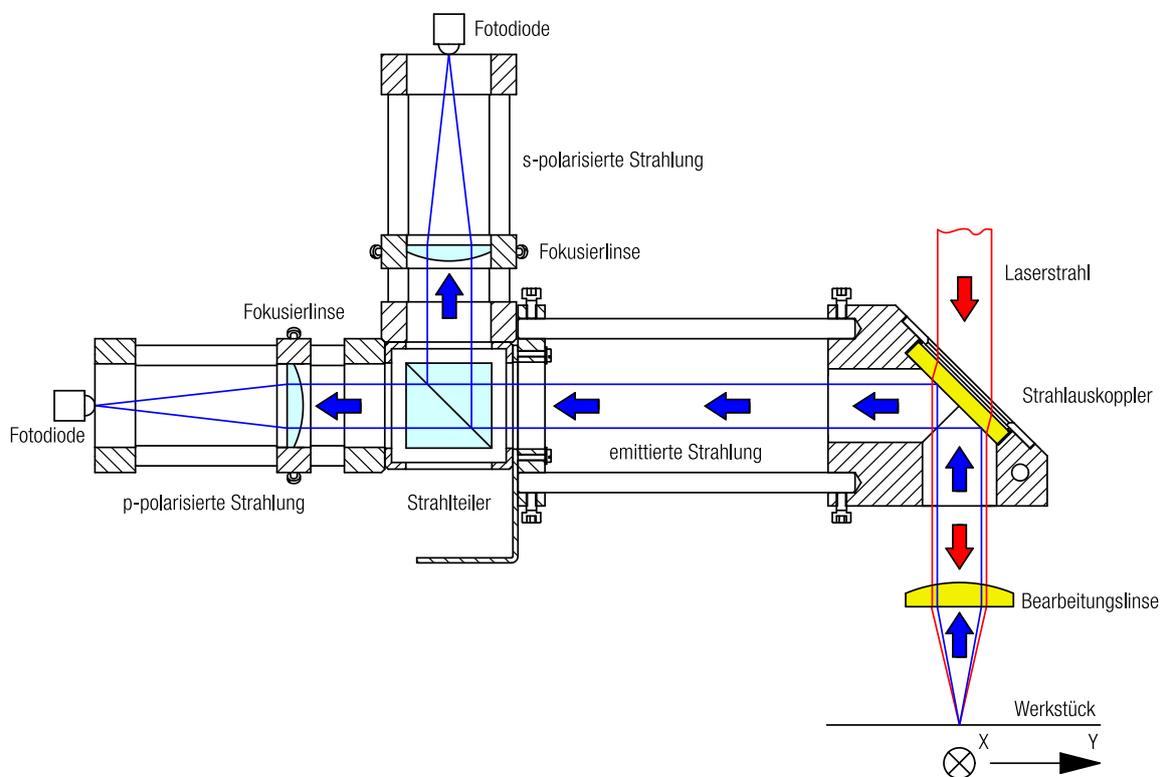


Abbildung 5.8: Strahlenverlauf

Das gewählte Stangensystem bietet des weiteren den Vorteil, spätere Veränderungen des Versuchsaufbaus (z. B. Einbau zusätzlicher Filter) leichter durchführen zu können. Aus diesem Grund wird auch für die Haltevorrichtung der optoelektronischen Sensoren ein Stangensystem gewählt. Dabei kann teilweise auf ein am Institut bereits vorhandenes System zurückgegriffen werden, wodurch einige Teile (z. B. der Linsenhalter) aus diesem Baukastensystem verwendet werden können.

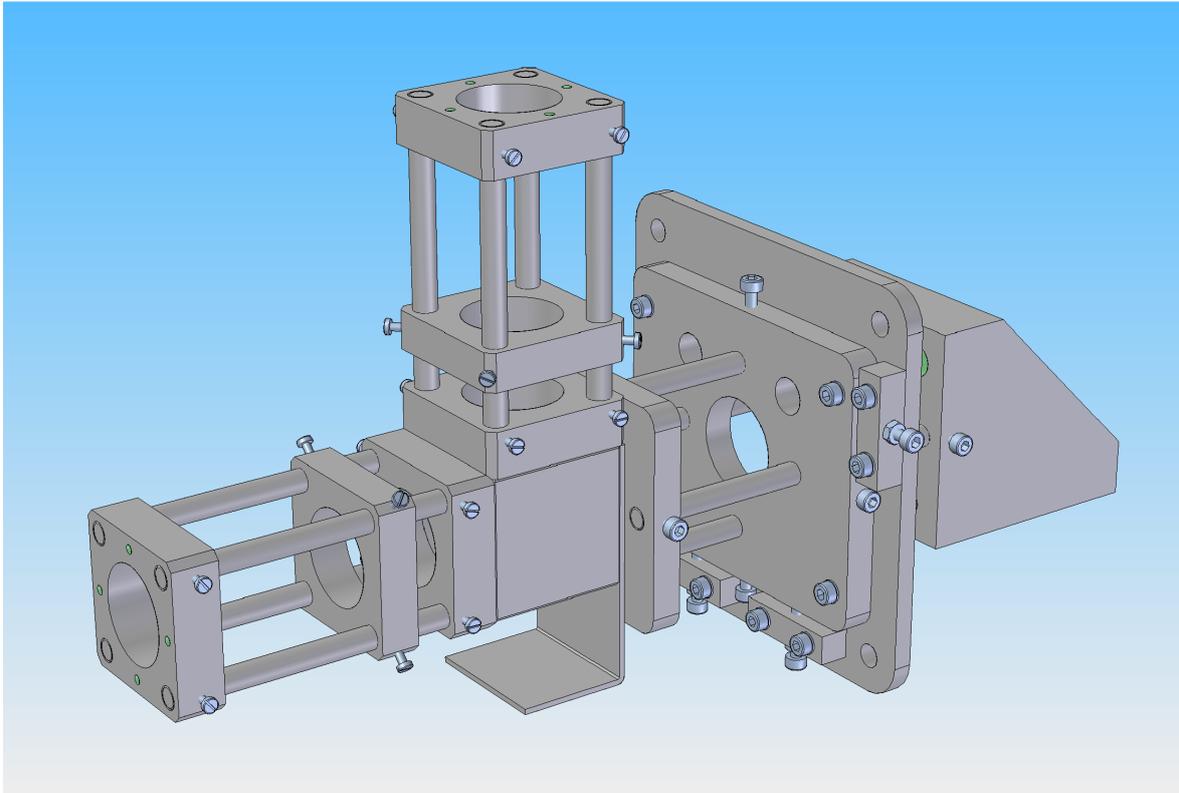


Abbildung 5.9: Gesamter Aufbau

5.4 Messelektronik

5.4.1 Optoelektrische Sensoren

Um eine Aussage über das Verhältnis von s- zu p-polarisierter Strahlung treffen zu können, wird die jeweilige Bestrahlungsstärke E gemessen. Dafür stehen verschiedene elektronische Halbleiterbauelemente zur Verfügung.

Hier die wichtigsten Vertreter:

- Fotowiderstand

Beim Fotowiderstand handelt es sich um einen Halbleiter, dessen Widerstand sich in Abhängigkeit zur auftreffenden Strahlung verändert. Grund dafür ist der innere Fotoeffekt, wodurch Ladungsträger im halbleitenden Material erzeugt werden. Dieser Vorgang wird von der Anzahl und der Energie der auftreffenden Photonen bestimmt. Die Empfindlichkeit eines Fotowiderstandes hängt vom verwendete-

ten Halbleiter und der Wellenlänge der einfallenden Strahlung ab. Der sich bei Bestrahlung einstellende Widerstand ist stark temperaturabhängig. Zusätzlich reagieren Fotowiderstände mit einer relativ großen zeitlichen Verzögerung auf Bestrahlungsänderungen (kann bis weit in den Millisekundenbereich gehen). Darüber hinaus besteht eine Nichtlinearität zwischen der Bestrahlungsstärke und dem sich einstellenden Widerstand [10].

- Fotodiode

Eine Fotodiode setzt sich aus halbleitenden Materialien zusammen und entspricht im wesentlichen Aufbau dem einer Diode. Doch bei der Fotodiode liegt die Sperrschicht dicht unter der Oberfläche, sodass Strahlung auf diese Sperrschicht einwirken kann. Durch diese Lichteinwirkung entstehen freie Elektronen, welche sich in der N-leitenden Zone ansammeln. Hingegen sammeln sich die Defektelektronen in der P-leitenden Zone, wodurch eine Potentialdifferenz, auch Fotospannung genannt, entsteht. Die Fotodiode kann auch in Sperrrichtung vorgespannt werden, womit die, durch den Lichteinfall entstehenden Ladungsträger, den Sperrstrom erhöhen [23] [6].

Fotodioden können in drei Betriebsarten (Abbildung 5.10) eingesetzt werden:

- Betrieb als Fotoelement (4. Quadrant)
Hier arbeitet die Fotodiode als Solarzelle und liefert elektrische Energie. Bei größer werdendem Lastwiderstand ($R \Rightarrow \infty$) strebt die Spannung einem Grenzwert zu, der sogenannten Leerlaufspannung. Deren Wert ist von der Beleuchtungsstärke weitgehend unabhängig. Wird der Lastwiderstand gesenkt ($R \Rightarrow 0$), sinkt auch die Spannung und der Strom steigt bis er letztendlich sein Maximum, den sogenannten Kurzschlussstrom, erreicht.
- Betrieb im Kurzschluss
Hier wird die Fotodiode kurzgeschlossen und es fließt wie oben bereits erwähnt der Kurzschlussstrom. Für diesen besteht über viele Größenordnungen ein streng linearer Zusammenhang zur Beleuchtungsstärke. Daher wird diese Betriebsart gerne für Messaufgaben gewählt.
- Betrieb als Fotodiode (3. Quadrant)
Die Fotodiode wird mit einer Spannung in Sperrrichtung vorgespannt. Bei Beleuchtung fließt der Sperrstrom, welcher wieder proportional der Beleuchtungsstärke ist. Mit größer werdender Vorspannung steigt auch der sogenannte Dunkelstrom, der den Sperrstrom überlagert und bei geringen Beleuchtungsstärken zu unerwünschtem Rauschen führt.

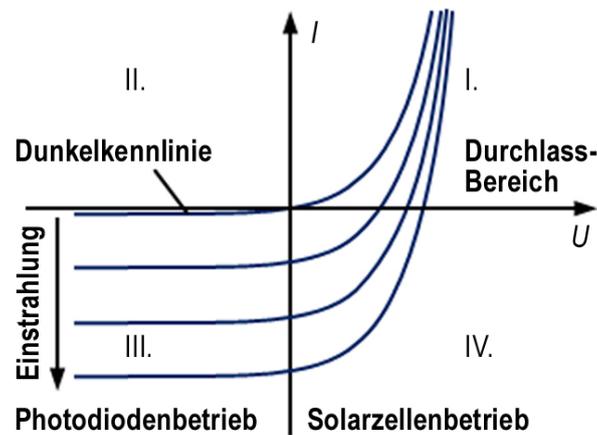


Abbildung 5.10: Kennfeld einer Fotodiode [17]

- Fototransistor

Im Fototransistor befinden sich zwei Sperrschichten, wovon eine - die Kollektorsperrschicht - strahlungsempfindlich ist. Ähnlich wie bei der Fotodiode der Sperrstrom, wird hier der Kollektor-Basis-Strom durch auftreffende Photonen erhöht. Dieser wird durch den Fototransistor verstärkt und steht als Kollektorstrom zur Verfügung. Durch diese Verstärkung ist der Fototransistor deutlich empfindlicher als Fotodioden. Doch das Kennfeld eines Fototransistors ist nicht linear und das zeitliche Ansprechverhalten ist deutlich schlechter als das von Fotodioden [10].

Die lineare Proportionalität macht die Fotodiode zum idealen optoelektronischen Sensor für die anstehende Messaufgabe. Als Betriebsart wird der Kurzschlussbetrieb gewählt, um Störungen des Messsignals durch Rauschen möglichst auszuschließen.

Die relativ kleinen Fotoströme können allerdings nicht direkt aufgenommen werden. Der Strom wird dafür in eine proportionale Spannung umgewandelt. Für diese Aufgabe wird in der Messtechnik gerne die nachfolgende Schaltung eingesetzt.

5.4.2 Transimpedanzverstärker

Diese Verstärkerschaltung hat als Eingangsgröße einen kleinen Strom (z. B. Fotostrom) und liefert eine, diesem Strom proportionale, Ausgangsspannung. Typischerweise besteht eine solche Schaltung aus einem spannungsgesteuerten Operationsverstärker und einem Rückkoppelwiderstand. Der nichtinvertierende Eingang liegt auf Masse. Das Stromsignal wird an den invertierenden Eingang gelegt, wodurch der Eingang stromgesteuert wird. Dieser Strom fließt vollständig über den Rückkopplungswiderstand (idealer OP vorausgesetzt, in dessen Eingang kein Strom fließt) und erzeugt somit die Aus-

gangsspannung. Da die Sperrkapazität der Fotodiode zu unerwünschten Schwingungen führen kann, wird in der Regel eine Kapazität parallel zum Rückkopplungswiderstand geschaltet [2].

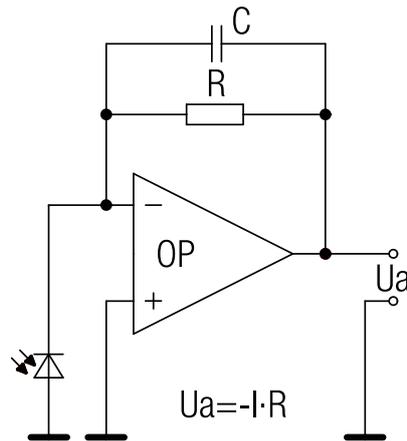


Abbildung 5.11: Transimpedanzschaltung

5.4.3 Testschaltung

Diese Schaltung dient zur Auslegung der eigentlichen Messschaltung, die aufgrund einiger nicht bekannter Parameter, wie z. B. der zu erwartenden Bestrahlungsstärke, nicht rein numerisch, sondern zum Teil experimentell ausgelegt werden muss. Dazu wird die im vorigen Punkt beschriebene Schaltung auf einem Steckbrett aufgebaut. Der Rückkoppelwiderstand setzt sich dabei aus einem festen und einem verstellbaren Widerstand zusammen, die in Serie geschaltet, die passende Verstärkung für die noch nicht bekannte Bestrahlungsstärke ergeben sollen. Die Größe für die Rückkopplungswiderstände wird so gewählt, dass ein, mit Tageslicht beleuchteter Raum, bei größter einstellbarer Verstärkung, einen Spannungsabfall von ca. 0,5 V am Ausgang verursacht. Als Spannungsquelle dient eine 9 V Blockbatterie.

Fotodiode	BPW 34
Operationsverstärker	TLC 272
Kohleschichtwiderstand	1/4 W, 5 %, 100 k Ω
Drehpotentiometer	100 k Ω
Kondensator	1 nF

Tabelle 5.2: Bauteilliste

Die Testschaltung wird zwei Tests unterzogen, um ihre einwandfreie Funktion sicherzustellen:

- Es soll überprüft werden, ob die Schaltung der Gleichung 3.12 für die Bestrahlungsstärke genügt. Dazu muss im Experiment die Beleuchtungsstärke E_v mit dem Quadrat der Entfernung r von der Lichtquelle abnehmen. Dabei wird ein Einfallswinkel von 90° zur Empfängerfläche vorausgesetzt [23].

$$E_v = \frac{I_v}{r^2} \quad (5.7)$$

In Abbildung 5.12 ist gut zu erkennen, dass der Verlauf der Kurven sehr gut mit der oben angeführten Gleichung für die Beleuchtungsstärke übereinstimmt.

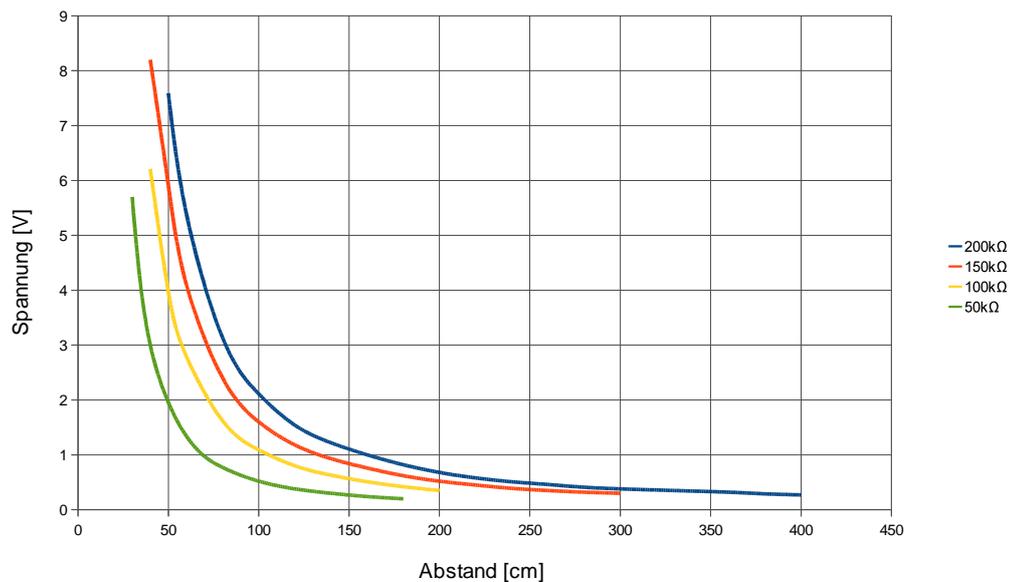


Abbildung 5.12: Beleuchtungsstärke über Abstand

- Im zweiten Versuch soll der lineare Zusammenhang zwischen Rückkoppelwiderstand und Spannung bei konstanter Bestrahlungsstärke gezeigt werden. Der Versuchsaufbau wird bei drei unterschiedlichen Entfernungen getestet.

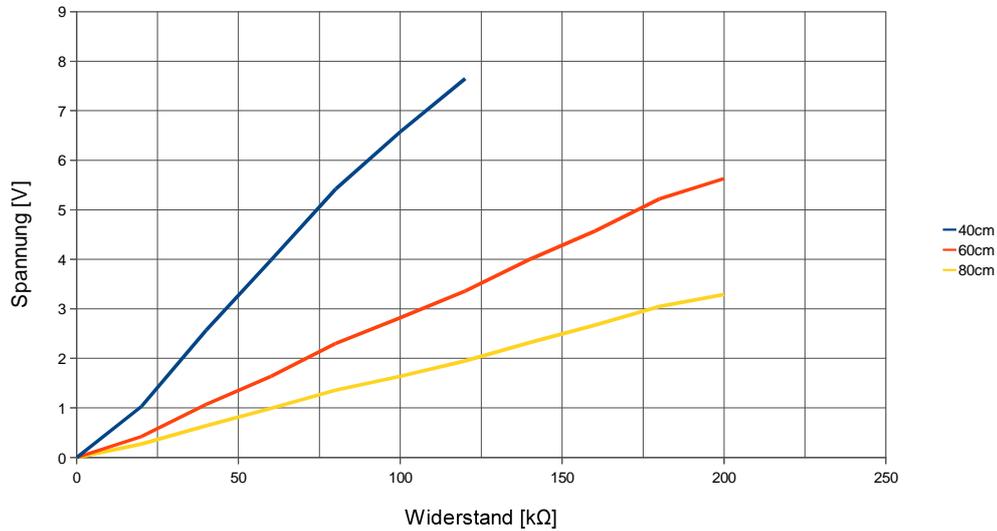


Abbildung 5.13: Spannung über Widerstand

Nachdem diese beiden Versuche erfolgreich abgeschlossen sind, werden die Anforderungen für den Aufbau der Testschaltung festgelegt:

- Die gesamte Schaltung, samt Blockbatterie ist in einem Gehäuse zu verbauen.
- Im Gehäuse soll eine zuschaltbare Spannungsanzeige des Ausgangs integriert werden (dient zur schnellen Funktionskontrolle der Schaltung).
- Die Fotodiode ist fest am Gehäuse zu verbauen, wobei zusätzlich die Möglichkeit bestehen soll, eine externe Fotodiode anzuschließen.
- Für die Weiterverarbeitung der Messdaten ist eine einfache Anschlussmöglichkeit vorzusehen, ohne, dass das Gehäuse dabei geöffnet werden muss.

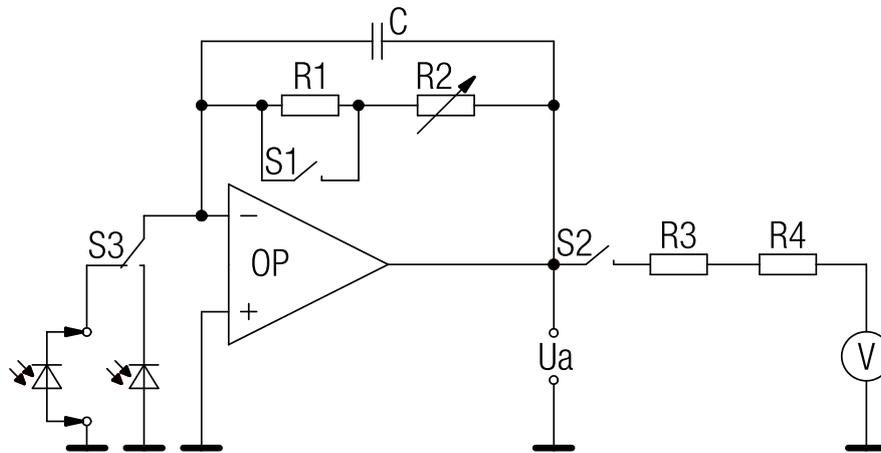


Abbildung 5.14: Testschaltung

Nach diesem Anforderungsprofil wird die Schaltung auf einer Lochrasterplatte aufgebaut und in einem passenden Gehäuse verbaut.



(a) Vorderansicht



(b) Geöffnetes Gehäuse

Abbildung 5.15: Testschaltung, in Gehäuse verbaut

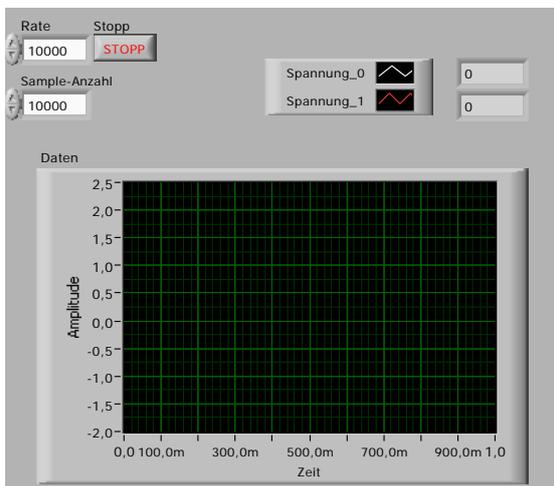
5.5 Messdatenerfassung

5.5.1 Hardware

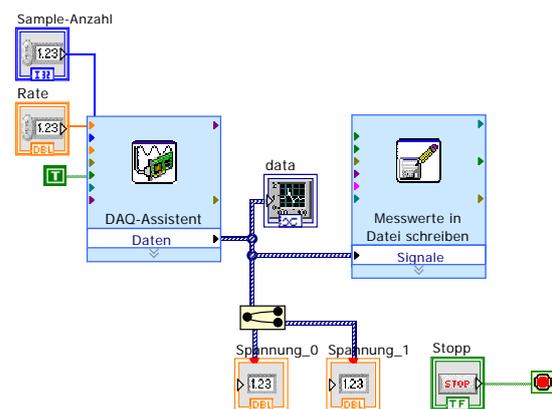
Hierfür steht das Datenerfassungsmodul NI USB-6009 von National Instruments zur Verfügung. Es besitzt acht Analogeingänge, zwei Analogausgänge und eine USB-Schnittstelle. Die Eingänge sind für einen Spannungsbereich von $\pm 10\text{V}$ konzipiert.

5.5.2 Software

Für die Datenerfassung wird LabVIEW 2012, ein graphisches Programmiersystem von National Instruments, verwendet. Dabei stehen dem Programmierer Funktionsblöcke zur Verfügung, die, genau wie vollständige Programme, als *Virtuelle Instrumente* (VIs) bezeichnet werden. Sie bestehen aus dem Frontpanel, das die Benutzerschnittstelle repräsentiert und dem Blockdiagramm, in dem der graphische Programmcode dargestellt wird. VIs besitzen des weiteren Ein- und Ausgänge, die durch Linien („Drähte“) miteinander verbunden werden und damit den Datenfluss festlegen. Liegen alle Eingangsdaten eines VIs vor, so werden diese erst vollständig abgearbeitet, bevor die Ergebnisse gesammelt an den Ausgängen zur Verfügung stehen. Dadurch ist die Reihenfolge, in der VIs abgearbeitet werden, durch den Datenfluss bestimmt und kann nicht beeinflusst werden [18].



(a) Frontpanel



(b) Blockdiagramm

Abbildung 5.16: Komponenten des VIs

Kapitel 6

Versuchsdurchführung

6.1 Laserquelle

Für die Versuche wird ein industrieller CO₂-Laser mit schnellem Axialfluss und einer Nennleistung von 2000 W verwendet, der von der Firma Oerlikon hergestellt wurde (Bezeichnung: OPL-2000).

Der Laser setzt sich aus folgenden Baugruppen zusammen:

- Steuerkasten
- Resonator (eigentlicher Laser)
- Kühlsystem
- Hochspannungstransformator



Abbildung 6.1: Verwendete CO₂-Laserquelle

6.1.1 Der Resonator

Im Resonator findet die Gasentladung statt, die mit Hilfe, der an seinen Enden angeordneten optischen Elemente, den Laserstrahl erzeugt. Daher kann der Resonator als Hauptbestandteil des gesamten Systems betrachtet werden.

6.1.2 Versorgung

Gasversorgung

Die Gasversorgung des Lasers mit den Betriebsgasen Kohlendioxid (CO_2), Stickstoff (N_2) und Helium (He) muss zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein und erfolgt mit Gasflaschen, die über Druckreduzierventile an den Laser angeschlossen sind. Die Mischung dieser drei Gase erfolgt im Inneren des Lasers. Das Mischungsverhältnis ist werkseitig optimiert und sollte nicht verändert werden.

Die Gase gelangen über einen Filter in die Mischeinheit, welche zuerst die Drücke überprüft. Anschließend strömen sie durch einen Druckregler, ein Magnetventil und eine kalibrierte Düse, die eine exakte Dosierung der einzelnen Gase gewährleisten.

Prinzipiell kann von einem durchschnittlichen Gasverbrauch von etwa 50l/h ausgegangen werden, bei Maximalleistungen oder nach längeren Betriebsunterbrechungen sind jedoch auch Werte bis zu 100l/h möglich, um eine ausreichende Stabilität im Resonator zu gewährleisten. Beim Einschalten des Lasers wird der Gasverbrauch für ca. 15 Minuten automatisch auf etwa 400l/h angehoben um nach Ablauf dieser Zeit wieder den am Verbrauchsregler eingestellten Wert anzunehmen.

Im Stillstand kann durch Drücken der „Manual Backfill-Taste“ der gesamte Gaskreislauf mit Stickstoff auf Atmosphärendruck gebracht werden.

Befindet sich der Laser in einem Raum mit einem Volumen unter 400m^3 , muss das verbrauchte Gas, das durch die mit „Exhaust“ bezeichnete Öffnung an der Frontplatte abgegeben wird, durch eine geeignete Vorrichtung ins Freie geleitet werden.

Gasumwälzung

Das Gasgemisch wird dem Resonator, in dem ein Unterdruck vorherrscht, über eine Entspannungskammer zugeführt. Für die Gasumwälzung ist ein sogenannter „Blower“ zuständig. Um jegliche Verschmutzung des Resonators mit Getriebeöl des Blowers auszuschließen, steht das gesamte Blowersystem ebenfalls unter diesem stark reduzierten Druck.

Vakuumpumpe

Diese Pumpe hat die Aufgabe den beim Einschaltvorgang des Lasers benötigten Unterdruck im Resonator, im Blower (bzw. Blowergetriebegehäuse) und in den entsprechenden Verbindungsrohren zu erzeugen. Ist ein bestimmter Wert erreicht, schließt das Schnellevakuierventil und das System kann mit dem benötigten Gasgemisch befüllt werden. Der Eingang der Vakuumpumpe ist mit einem Rückschlagventil versehen. Es soll

bei Stillstand der Pumpe ein Zurückströmen des Gases und damit eine Verunreinigung des Resonators mit Öl, das für den Betrieb der Pumpe notwendig ist, verhindern. Am Ausgang der Pumpe befindet sich ein Ölabscheider der mitgeführtes Öl herausfiltert und dem Ölkreislauf wieder zuführt.

Kühlung

Die Wärmeabfuhr des Lasers erfolgt durch ein Kühlwassersystem, das im Volllastbetrieb eine thermische Leistung von bis zu 19kW abführen muss. Für die Einhaltung der benötigten Temperatur, Durchflussmenge und Reinheit sowie des nötigen Drucks des Kühlwassers, wird ein geschlossener Kühlkreislauf mit externem Wärmetauscher und Kältemaschine eingesetzt.

Die Eingangstemperatur des Kühlwassers ins System muss so gewählt werden, dass an optischen Einrichtungen oder hochspannungsführenden Teilen zu keinem Zeitpunkt die Temperatur unter den Taupunkt (abhängig von Temperatur und Luftfeuchtigkeit) sinkt, was zur Bildung von Kondensat führen würde.

Im gesamten Kühlsystem, aber speziell im Bereich des Resonators, sind die Querschnitte der Kühlleistungen sehr eng gewählt, wodurch die Gefahr des Zulegens bzw. Verstopfens besteht. Daher darf kein reines Frostschutzmittel als Kühlfüssigkeit verwendet werden. Zusätzlich wird die Kühlfüssigkeit durch einen Filter (100 μm) geleitet, um so jegliche Verunreinigung auszuschneiden.

Für einen störungsfreien Laserbetrieb muss die Durchflussmenge der Kühlfüssigkeit mindestens 20l/min, bei einem Druck zwischen 4,5 und 5,5bar, betragen.

Stromversorgung

Der OPL-Laser ist mit den drei Phasen und dem Neutralleiter (3x400 V, 50 Hz) des Stromnetzes verbunden und wird so mit elektrischer Energie versorgt. Die für die Gasentladung erforderliche Hochspannung von 20kV wird vom Transformator mit nachgeschaltetem Gleichrichter geliefert und an den Modulator weitergeleitet. Dieser hat die Aufgabe, die Hochspannung über flexible Leitungen den verschiedenen Entladeelektroden zuzuführen und ermöglicht außerdem Leistungsmodulationen wie z. B. Hyperpulse, Superpulse und Gated.

Im Laser befinden sich eine Reihe hochspannungsführender Teile, sodass er niemals mit geöffneter Abdeckung betrieben werden darf!

6.1.3 Bedienungsorgane am Laser

Alle Bedienungs- und Anzeigeorgane befinden sich an der Frontplatte des Elektronikschranks.

1. Hauptschalter „Not Aus“

Unterbricht augenblicklich die Stromversorgung des Lasers sowie sämtliche Stromkreise.

2. **Schlüsselschalter „Laser Ein“**
Dient zum Ein- und Ausschalten der Steuerkreise.
3. **Stundenzähler**
Zählt die effektiven Betriebsstunden des Lasers (Entladung eingeschaltet).
4. **Milliampermeter**
Zeigt den Entladungsstrom an.
5. **Wählschalter**
Für die Anzeige des Entladungsstromes.
6. **Anzeige „Arbeitsdruck/Ausgangsleistung“**
Zeigt je nach Stellung des Umschalters den Resonatorruck oder die Ausgangsleistung an.
7. **Umschalter**
Für Druck bzw Leistung.
8. **Taste „Alarmkontrolle“**
Zeigt am Display alle Fehlermeldungen an. Durch das Drücken dieser Taste während des Laserbetriebs wird die Stromversorgung unterbrochen.
9. **Taste „Rückstellung/Reset“**
Nach einer Fehlermeldung und deren Behebung muss diese Taste gedrückt werden, um den Laser wieder in Betrieb nehmen zu können. Im Normalbetrieb wird durch die Betätigung dieser Taste der Laser abgeschaltet.
10. **BNC-Buchse**
Hier kann ein Oszilloskop angeschlossen werden, um den Entladungsstrom als Funktion der Zeit darzustellen. Dient auch zur Kontrolle des Entladeverhaltens im gepulsten Betrieb.
11. **Wählschalter „Gas-Verbrauch“ (50 bis 100l/Std.)**
Beim Einschalten des Lasers ist der Gasverbrauch für ca. 15 Minuten sehr hoch (400l/h). Danach kann er mit Hilfe dieses Wählschalters bis auf einen Minimalwert von 50l/h gesenkt werden.
12. **Taste „Gasrückfüllung“**
Nach dem Abschalten des Lasers wird der gesamte Gaskreislauf mit Stickstoff auf Umgebungsdruck gebracht. Damit wird das Eindringen von Luft und Feuchtigkeit in den Resonator verhindert, was die Lebensdauer des Lasers erhöht. Die vollständige Befüllung dauert 5 bis 10 Minuten. Durch das Drücken dieser Taste während des Betriebs wird die Stromversorgung unterbrochen.
13. **Display „Fehlermeldung“**
Wenn die Taste „Alarmkontrolle“ gedrückt wird, müssen alle 24 Fehlermeldungen aufleuchten.

6.1.4 Fehlermeldungen

Während des Laserbetriebes kann es zum Auftreten von Fehlern kommen, die durch entsprechende Fehlermeldungen am Display oder der Steuereinheit angezeigt werden. Es gibt 24 unterschiedliche Fehlermeldungen, die, zusammen mit möglichen Ursachen und deren Behebung, im Betriebshandbuch zu finden sind.

6.1.5 Inbetriebnahme des Lasers

Vor der Inbetriebnahme des Lasers sollte man mit den grundlegenden Funktionen der Anlage vertraut sein, die Sicherheitsbestimmungen kennen und diese einhalten.

- Gasventile der externen Gasversorgung öffnen.
- Kühlkreislauf einschalten.
- Hauptschalter auf „On“ stellen.
Damit wird die Steuertafel aktiviert. Falls Fehlermeldungen auftreten, diese durch Drücken der Taste „Reset“ zurücksetzen. Falls die Fehlermeldung weiter besteht, im Betriebshandbuch nachlesen.
Vor dem nächsten Schritt überprüfen, ob sich am Steuerpanel das Potentiometer für die Einstellung der Laserleistung in der Minimalstellung befindet und sich die Kippschalter für Rampenbetrieb, Laserstrom und Reststrom in der unteren Position befinden.
- Schlüsselschalter auf „Laser ein“ stellen.
Alle weiteren Bedienvorgänge werden am Panel vorgenommen.
- „Laser ein“.
Damit wird der Startzyklus eingeleitet und der Resonator evakuiert (dies kann einige Minuten dauern). Gleichzeitig beginnen verschiedene Wasser- und Ölpumpen zu arbeiten, die entsprechenden Magnetventile werden automatisch geöffnet.
Nachdem der Druck im System auf 8 Torr gesunken ist, beginnt der Füllvorgang des Resonators mit den Lasergasen. Dabei steigt der Druck wieder an, bis er beim Erreichen von ca. 87 Torr konstant gehalten wird.
- Kippschalter auf „Laserstrom“ stellen.
- „Hochspannung ein“.
Damit wird Hochspannung an die Elektroden des Resonators angelegt.
- Reststrom auf „Normal“ schalten.
- „Rampe einschalten“.
Nun kann die Leistung langsam erhöht werden. Dabei ist ein kontinuierlicher Anstieg der Stromanzeige zu beobachten. Im Falle eines plötzlich stark anwachsenden Stromes, ist die Leistung sofort wieder zu reduzieren. Nach einer kurzen

Wartezeit kann erneut damit begonnen werden die Leistung langsam zu erhöhen, bis der gewünschte Wert erreicht ist.

- „Verschluss ein“.
Öffnet den Shutter und der Laserstrahl wird emittiert.

6.1.6 Kurzzeitiges Abschalten

- Leistung reduzieren.
- „Hochspannung aus“.

6.1.7 Herunterfahren des Lasers

- Leistung auf Null drehen.
- „Hochspannung aus“.
- „Laser aus“.
- Sicherstellen, dass alle Wippschalter am Panel in unterer Position sind und Füllvorgang abwarten (Resonator wird mit Stickstoff auf Atmosphärendruck gefüllt).
- Schlüsselschalter auf „Laser aus“.
- Hauptschalter auf „Off“.
- Ventile für externe Gasversorgung schließen.
- Wasserkühlung ausschalten.

6.2 Versuchsvorbereitung

Zur leichteren Justage wird der Versuchsaufbau schrittweise zusammengestellt. Als erster Schritt wird der Strahlauskoppler in die Haltevorrichtung gesetzt und mit seinem Stangensystem und der Grundplatte an der Revisionsöffnung des Bearbeitungskopfes montiert. Beim Umgang mit Optiken muss Folgendes beachtet werden:

- Handschuhe tragen, um eine Verunreinigung der Optik durch Schmutz oder das Fett der Haut zu vermeiden.
- Keine Werkzeuge verwenden (auch keine Pinzetten oder ähnliches).
- Die Optik immer auf einer geeigneten Unterlage z. B. auf mitgeliefertem Papier-tuch ablegen.
- Niemals auf eine harte oder raue Oberfläche legen.

Die Position der Haltevorrichtung soll so eingestellt werden, dass der Rohstrahl die Durchgangsbohrung der Haltevorrichtung koaxial verlässt. Zusätzlich muss der Strahlenversatz, der durch den Strahlauskoppler verursacht wird und in Gleichung 5.6 ermittelt wurde, berücksichtigt werden.

Es zeigt sich, dass diese Forderung ohne zusätzliche Hilfsmittel nicht umgesetzt werden kann. Ein Fadenkreuz, das in die Durchgangsbohrung der Haltevorrichtung eingesetzt wird, soll bei der Lösung dieses Problems helfen. Passiert der Rohstrahl den Versuchsaufbau, so wird das Kreuz auf einer am Bearbeitungstisch liegenden Sperrholzplatte abgebildet.

Zur praktischen Umsetzung dieser Idee wird eine Laserleistung von ca. 100 W eingestellt und der Shutter für einen kurzen Moment geöffnet. Auf der Sperrholzplatte sind nun zwei sich kreuzende, unverbrannte Linien auf einer sonst schwarz-verbrannten Kreisfläche zu erkennen. Jetzt kann die Haltevorrichtung so positioniert werden, dass sich das Fadenkreuz genau im Zentrum des Einbrandes befindet und damit der Rohstrahl koaxial die Durchgangsbohrung verlässt.

Bevor der weitere Versuchsaufbau zusammengesetzt wird, soll die prinzipielle Funktion des Strahlenskopplers getestet werden. Dazu wird eine Lichtquelle im Fokus der Bearbeitungslinse positioniert. An Stelle des Polarisationssteilerwürfels wird die Testschaltung mit integrierter Fotodiode montiert. Das vom Strahlauskoppler reflektierte Licht trifft auf diese Fotodiode, was zu einem deutlichen Zeigerausschlag der Testschaltung führt. Damit ist die Funktion des Strahlenskopplers bewiesen, die Testschaltung kann demontiert und der weitere Versuchsaufbau fortgesetzt werden.

Dazu wird der Polarisationssteilerwürfel mit Hilfe einer Adapterplatte am Stangensystem montiert. Mit einem weiteren Stangensystem wird an den beiden Ausgängen des Polarisationssteilerwürfels je eine Fotodiode angebracht. Davor befindet sich noch eine Sammellinse um den zu untersuchenden Strahl zu fokussieren. Mit Hilfe, der im Brennpunkt der Bearbeitungslinse angebrachten Lichtquelle, kann die Fotodiode so positioniert werden, dass der Lichtstrahl genau in der Mitte der wirksamen Sensorfläche fokussiert wird. Damit ist der mechanische Aufbau abgeschlossen.

6.2.1 Parameterfindung

Als Nächstes werden einige Schneidversuche mit Stahl und Edelstahl unterschiedlicher Dicke durchgeführt um den richtigen Rückkoppelwiderstand der Transimpedanzschaltung zu finden. Dazu wird die Testschaltung mit verstellbarem Widerstand und Anschlussmöglichkeit zur Datenerfassung verwendet.

Beim Schneiden von Stahl ist eine höhere Bestrahlungsstärke der Fotodiode zu erwarten als bei Edelstahl. Dafür ist der beim Brennschneiden verwendete Sauerstoff verantwortlich, durch den es zu einer exothermen Reaktion mit der Schmelze kommt, was sich auf die Intensität der emittierten Strahlung auswirkt.

Da bei diesen Vorversuchen das Verhältnis von s- zu p-polarisierter Strahlung nicht entscheidend ist, wird die Bestrahlungsstärke nur von einem Ausgang des Polarisationssteilerwürfels aufgezeichnet.

Im Folgenden wird eine Auswahl der aussagekräftigsten Versuchsreihen dargestellt, wobei jeweils zu Beginn die gewählten Parameter tabellarisch aufgelistet werden. Im Anschluss daran finden sich Diagramme, Kommentare und Rückschlüsse, die das weitere Vorgehen begründen.

	Versuch 1.1	Versuch 1.2	Versuch 1.3
Material	Baustahl	Baustahl	Baustahl
Materialstärke	2 mm	3 mm	5 mm
Laserleistung	1000 W	1000 W	1000 W
Prozessgas	Sauerstoff	Sauerstoff	Sauerstoff
Gasdruck	2,5 bar	1 bar	0,8 bar
Vorschub	4000 mm/min	2300 mm/min	1000 mm/min
Düsendurchmesser	1,5 mm	1,5 mm	1,8 mm
Düsenabstand	1 mm	1 mm	1 mm
Fokuslage	0 mm	0 mm	1 mm
Verstärkung	200 k Ω	200 k Ω	200 k Ω

Tabelle 6.2: Parameter für erste Versuchsreihe

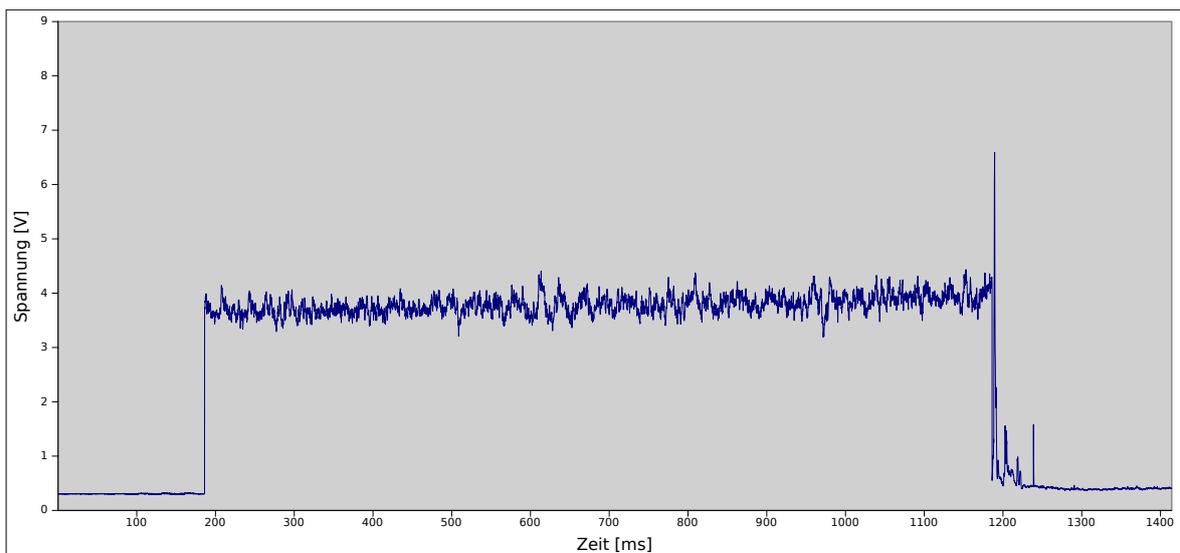
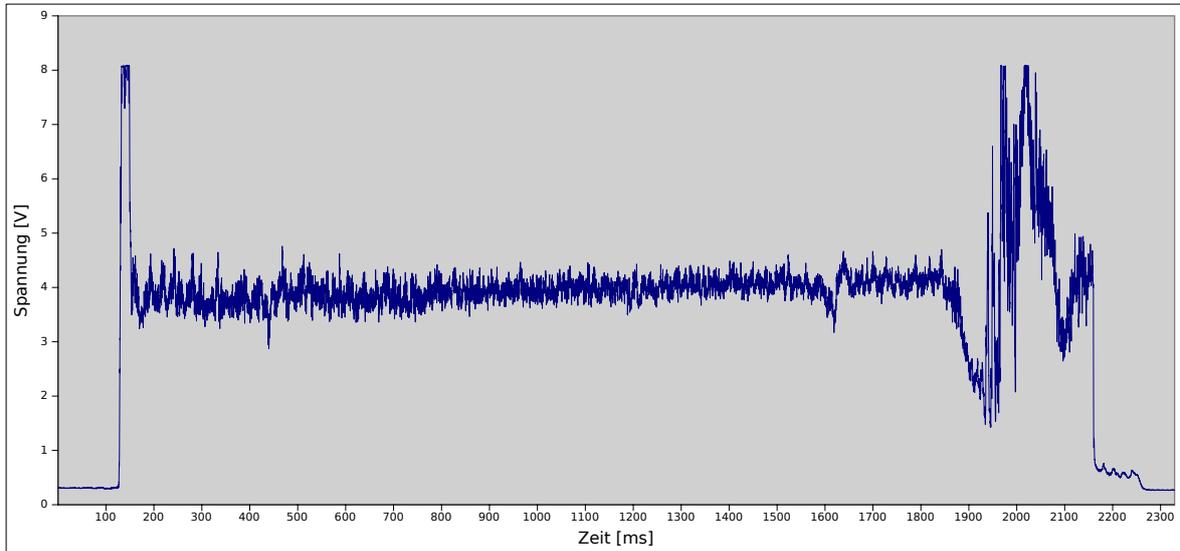
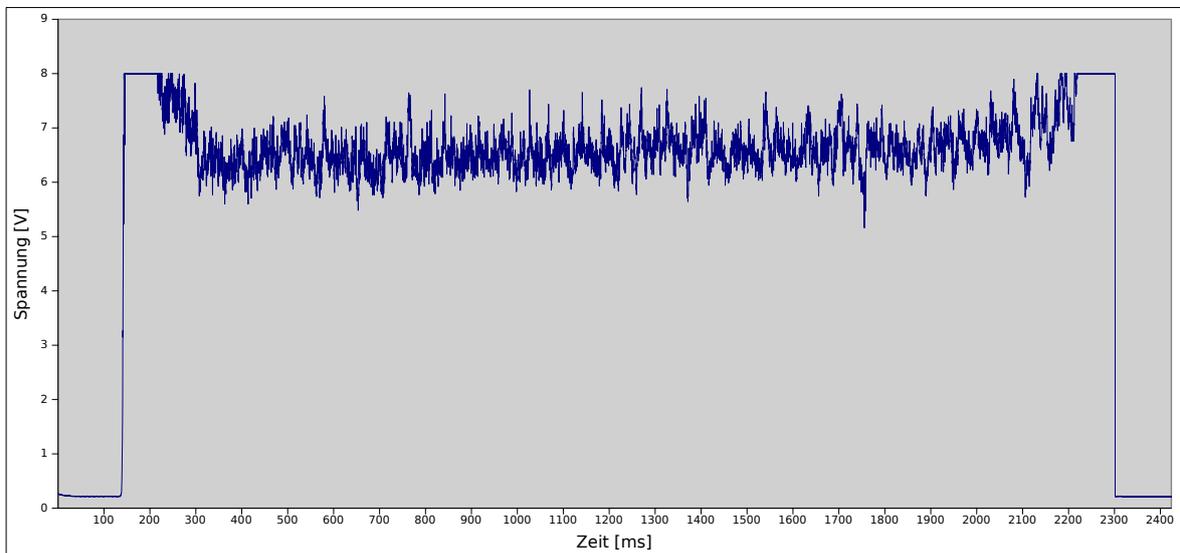


Abbildung 6.2: Versuch 1.1: Baustahl mit 2 mm, Verstärkung 200 k Ω

Abbildung 6.3: Versuch 1.2: Baustahl mit 3 mm, Verstärkung 200 k Ω Abbildung 6.4: Versuch 1.3: Baustahl mit 5 mm, Verstärkung 200 k Ω

Der eingestellte Widerstand von 200 k Ω ist für die Materialstärken 2 mm und 3 mm passend, für 5 mm jedoch zu hoch (Messbereich: 0 bis 8 V). Bei größeren Blechdicken wird bei gleicher Laserleistung die Vorschubgeschwindigkeit reduziert. Dadurch erhöht sich die Streckenenergie, was zu einer größeren Strahlungsleistung führt. Daher wird

der Widerstand auf $150\text{k}\Omega$ reduziert und die Versuche mit den gleichen Parametern wiederholt.

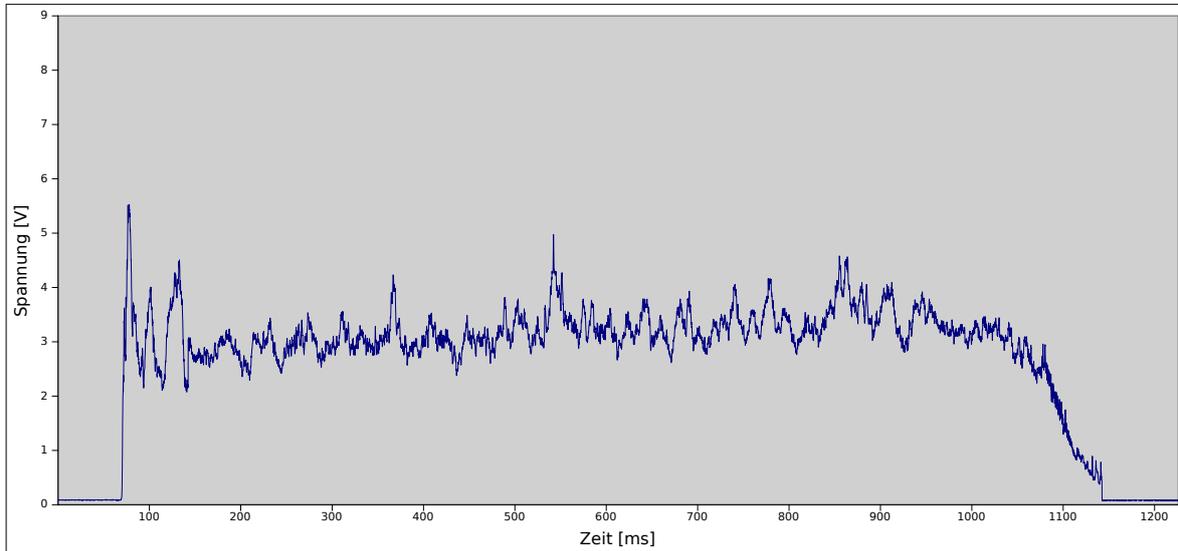


Abbildung 6.5: Versuch 1.4: Baustahl mit 2 mm, Verstärkung $150\text{k}\Omega$

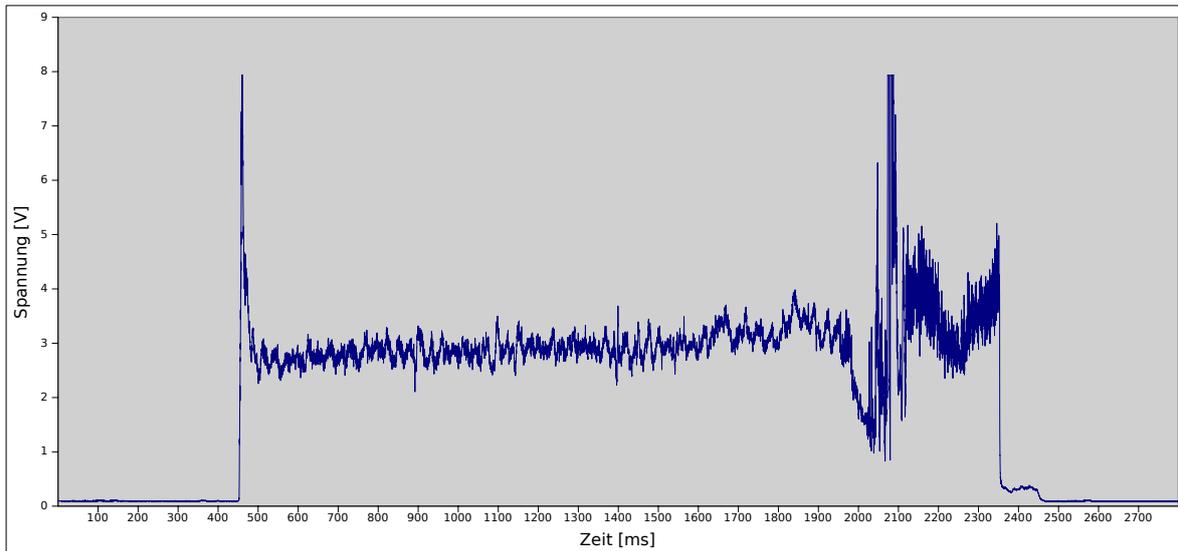


Abbildung 6.6: Versuch 1.5: Baustahl mit 3 mm, Verstärkung $150\text{k}\Omega$

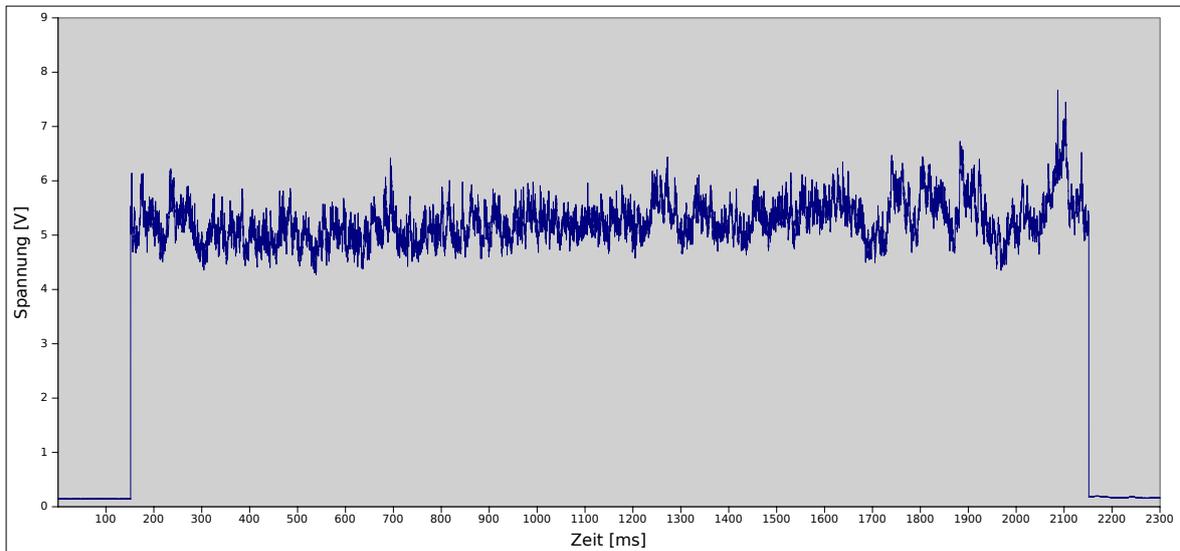


Abbildung 6.7: Versuch 1.6: Baustahl mit 5 mm, Verstärkung $150\text{k}\Omega$

Wie in den Diagrammen zu erkennen ist, erweist sich eine Verstärkung von $150\text{k}\Omega$ als passend.

Die bisherigen Messungen wurden alle am Ausgang für s-polarisierte Strahlung des Polarisationssteilerwürfels aufgenommen. Am zweiten Ausgang (p-polarisierter Strahl) sollte bei gleichen Scheidparametern das gemessene Signal von ähnlicher Größenordnung sein. Dazu werden erneut Versuche durchgeführt, die nahezu keinen Unterschied der beiden Ausgänge erkennen lassen, weshalb auf die Darstellung dieser Diagramme verzichtet wird.

Da nun die Größe der Rückkoppelwiderstände feststeht, wird die eigentliche Messschaltung nach Abbildung 5.11 aufgebaut. Der in der Testschaltung verwendete verstellbare Rückkoppelwiderstand wird durch einen Präzisions-Messwiderstand ersetzt.

6.3 Schneidversuche mit Baustahl

Mit der Messschaltung können zeitgleich beide Ausgangssignale des Polarisationssteilers aufgezeichnet werden. Dazu werden die Spannungsverläufe der Messschaltung über das Datenerfassungsmodul auf den PC übertragen und von Labview dargestellt.

	Versuch 2.1	Versuch 2.2	Versuch 2.3
Material	Baustahl	Baustahl	Baustahl
Materialstärke	2 mm	2 mm	5 mm
Laserleistung	1000 W	800 W	1000 W
Prozessgas	Sauerstoff	Sauerstoff	Sauerstoff
Gasdruck	2,5 bar	2,5 bar	0,9 bar
Vorschub	4000 mm/min	4000 mm/min	1000 mm/min
Düsendurchmesser	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm
Düsenabstand	1 mm	1 mm	1 mm
Fokuslage	0 mm	0 mm	1 mm
Verstärkung	150 k Ω	150 k Ω	150 k Ω

Tabelle 6.4: Parameter für zweite Versuchsreihe

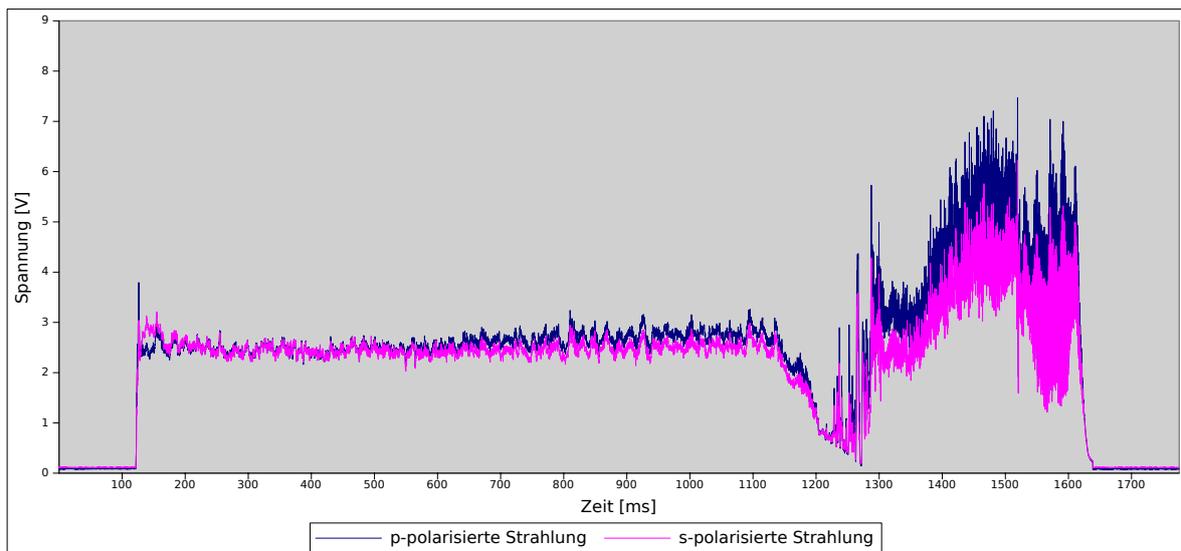


Abbildung 6.8: Versuch 2.1 mit 1000 W Laserleistung

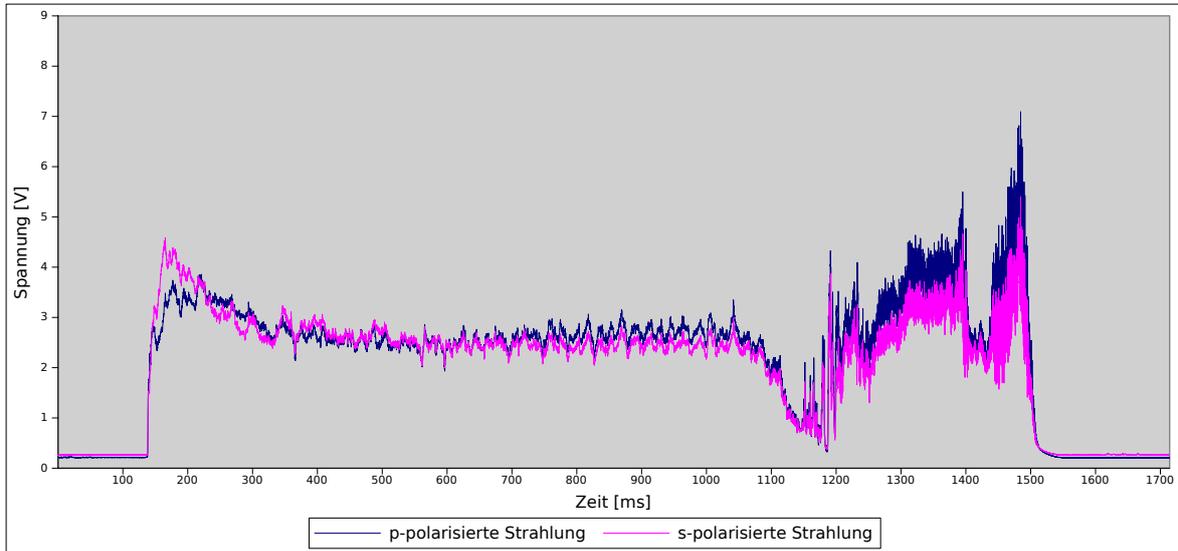


Abbildung 6.9: Versuch 2.2 mit 800 W Laserleistung

In den Abbildungen 6.8 und 6.9 sind am Anfang und Ende der Schnitte auffällige Signalverläufe zu erkennen, wobei das Signal am Schnittende durch das Stoppen der Verfahrenanlage bei noch voller Laserleistung zustande kommt (das händische Ein- und Ausschalten des Shutters bringt eine gewisse Zeitverzögerung mit sich). Der Anfangsverlauf könnte auf einen, sich zu Beginn des Schnittes erst langsam einstellenden Schneidfrontwinkel hindeuten, der eine gewisse Zeit braucht um konstant zu bleiben. Diese Vermutung wird durch die Tatsache, dass in Versuch 2.2 dieses Verhalten noch deutlicher zu erkennen ist, hier jedoch mit reduzierter Laserleistung (800 W) geschnitten wurde, verstärkt. In Abbildung 6.10 ist der Beginn des Schnittes von Versuch 2.2 noch einmal vergrößert dargestellt.

Die Vermutung, bei größerer Materialstärke und geringerer Schnittgeschwindigkeit eine noch deutlichere Differenz zwischen s- und p-polarisierter Strahlung beobachten zu können, erweist sich allerdings als nicht richtig, wie Abbildung 6.11 zeigt. Es wird eine umfangreiche Versuchsreihe dazu durchgeführt wobei verschiedene Einstellungen des Versuchsaufbaus verändert werden, das gewünschte Ergebnis kann jedoch nicht erzielt werden.

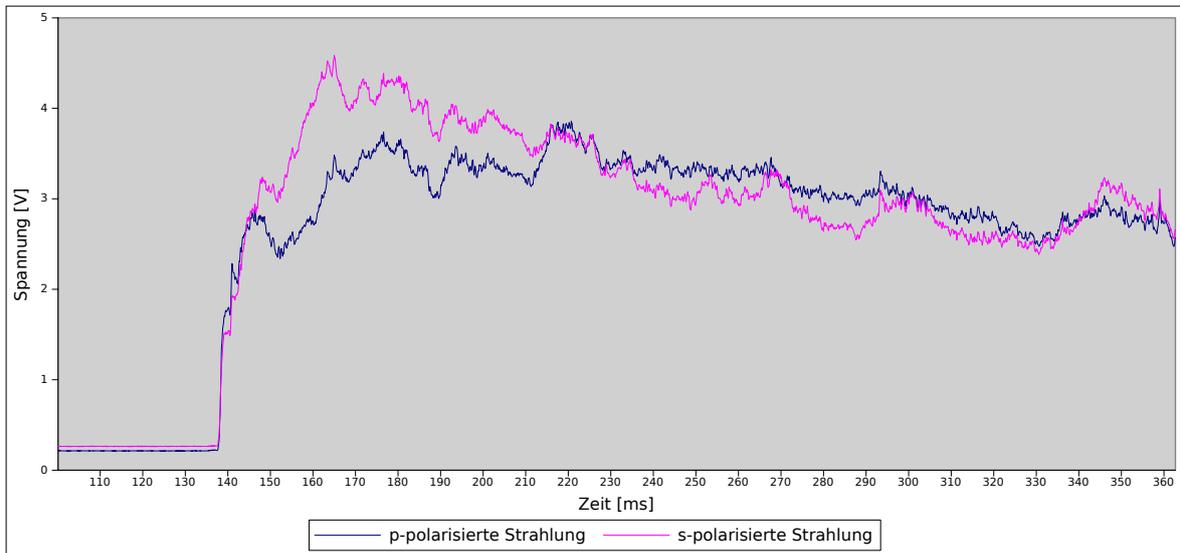


Abbildung 6.10: Vergrößerter Schnittbeginn von Versuch 2.2

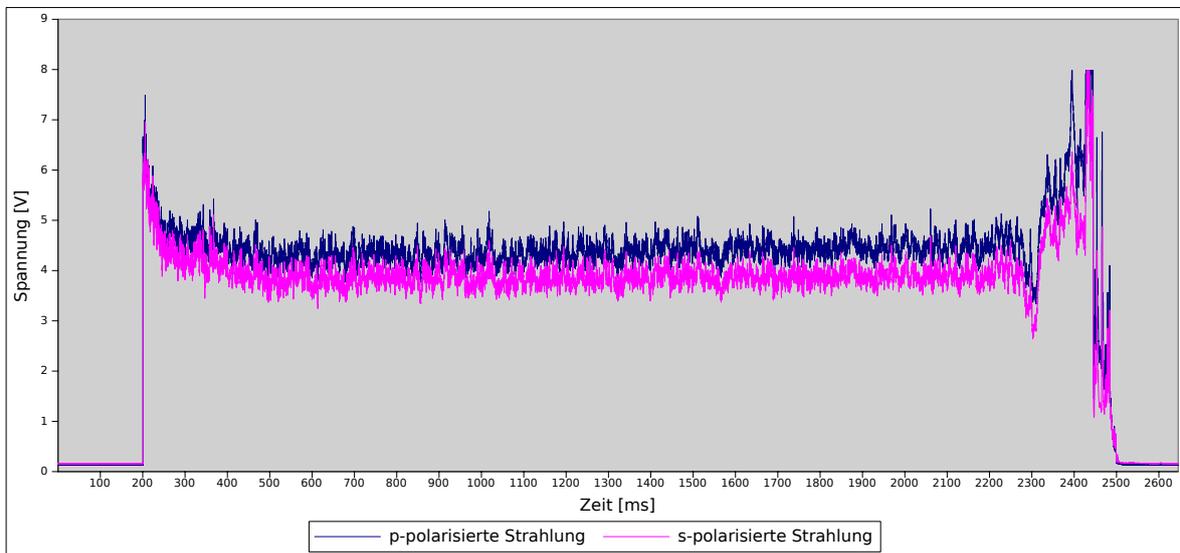


Abbildung 6.11: Versuch 2.3 mit 1000 W Laserleistung und 5 mm Baustahl

6.3.1 Strahlungsemission einer erhitzten Materialprobe

Da die vorangegangenen Versuche keine deutliche Differenz zwischen den zwei, vom Polarisator aufgespaltenen Strahlen zeigen, soll in einer weiteren Versuchsreihe die prinzipielle Funktion des Messaufbaus getestet werden. Zu diesem Zweck erwärmt der Laserstrahl eine Materialprobe bis kurz vor den Schmelzpunkt. Dabei wird erneut die emittierte Strahlung aufgespalten und ausgewertet, wobei das zu erwärmende Blech unter verschiedenen Winkeln beobachtet werden kann. Nun soll sich die Abhängigkeit des Quotienten (s-/p-polarisierte Bestrahlungsstärke) vom Betrachtungswinkel deutlich zeigen. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, müssen folgende Parameter aufeinander abgestimmt werden:

- Laserleistung
- Vorschubgeschwindigkeit
- Prozessgas (Sauerstoff oder Stickstoff)
- Gasdruck
- Fokusslage
- Düsendurchmesser
- Beobachtungswinkel

	Versuch 3.1	Versuch 3.2
Material	Baustahl	Baustahl
Materialstärke	5 mm	5 mm
Laserleistung	500 W	1500 W
Prozessgas	Stickstoff	Stickstoff
Gasdruck	0,5 bar	1 bar
Vorschub	200 mm/min	200 mm/min
Düsendurchmesser	1,8 mm	1,8 mm
Düsenabstand	1 mm	1 mm
Fokusslage	1 mm	1 mm
Beobachtungswinkel	45°	45°
Verstärkung	150 k Ω	150 k Ω

Tabelle 6.6: Parameter für dritte Versuchsreihe

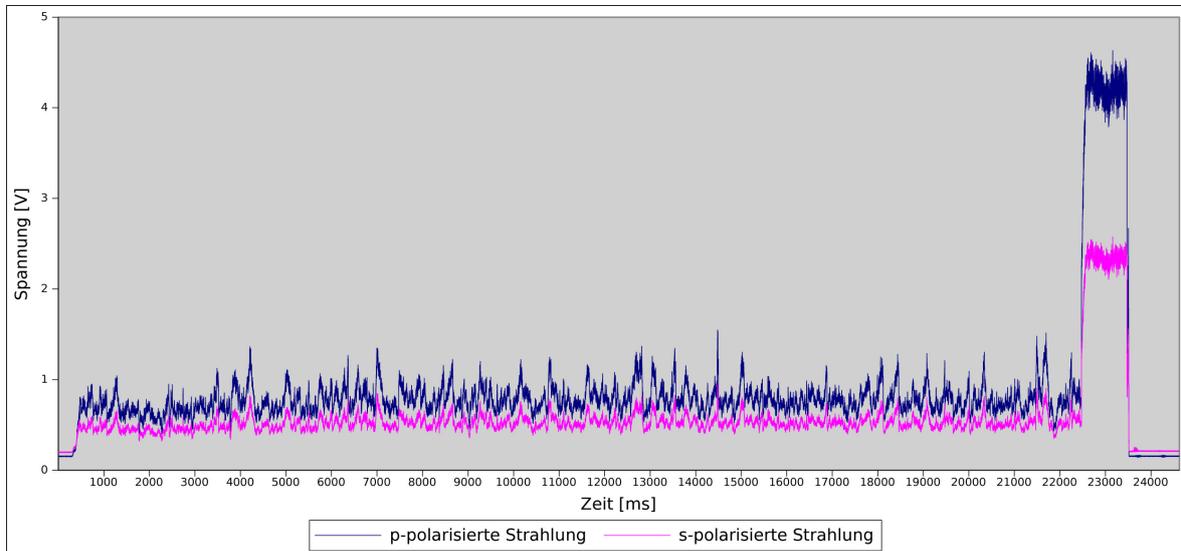


Abbildung 6.12: Versuch 3.1 mit 500 W Laserleistung

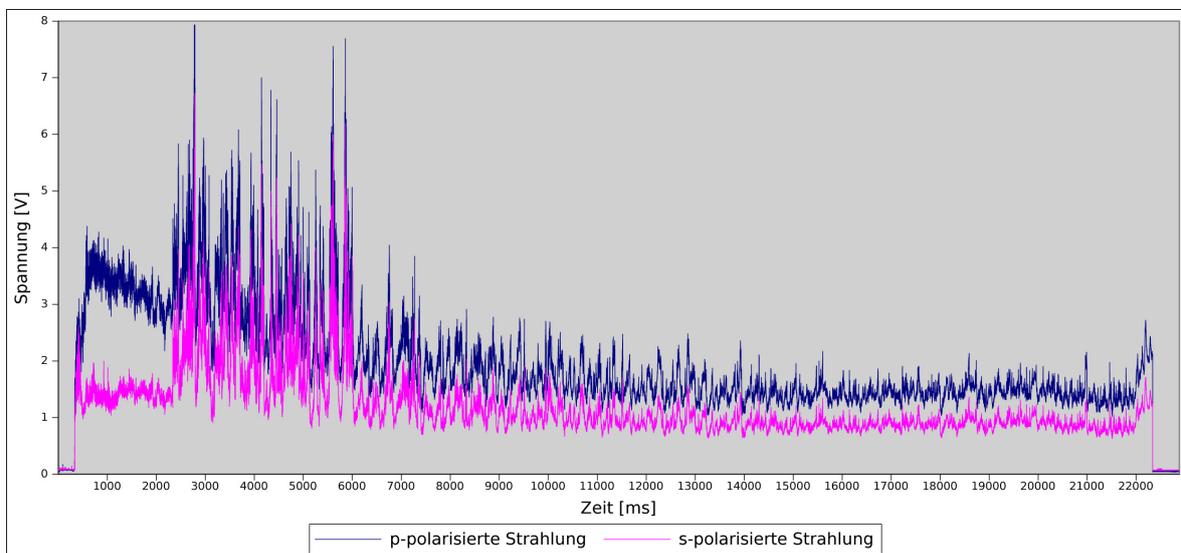


Abbildung 6.13: Versuch 3.2 mit 1500 W Laserleistung

In der gesamten Versuchsreihe kann nur ein einziges Mal für ein kurzes Stück ein Signal gemessen werden, bei dem die beiden Bestrahlungsstärken eine signifikante Differenz aufweisen (siehe Abbildung 6.13, gleich zu Messbeginn). Beim späteren Betrachten der Probe ist zu erkennen, dass das Material in diesem Bereich aufgeschmolzen und vom

Gasstrom verblasen wurde. Dadurch änderte sich die Geometrie und somit auch der Winkel unter dem das Material beobachtet wurde.

6.3.2 Anpassung des Versuchsaufbaus

Die bisherigen Versuche zeigen zwei, meist parallel verlaufende Signale, die nur eine geringe Differenz zueinander aufweisen. Ein möglicher Grund dafür kann eine zusätzliche Strahlungsquelle sein, die das zu messende Signal überlagert. Die Empfindlichkeit der verwendeten Fotodioden reicht von 400nm bis 1100nm, was keine genaue Eingrenzung eines möglichen Störsignals zulässt. Daher soll ein schmalbandiger Interferenzfilter vor dem Polarisationssteiler eingebaut werden. Um für diesen eine passende Nennwellenlänge zu finden, muss der Strahlenverlauf (siehe Abbildung 5.8) genau betrachtet werden. Der Strahl durchläuft mehrere Optiken (verschiedene Medien), für die die jeweiligen Transmissions- bzw. Reflexionskurven berücksichtigt werden müssen.

Die am besten geeignete Wellenlänge liegt bei $\lambda=770$ nm. Die Wahl fällt auf einen entsprechenden Filter der Firma „Edmund optics“, der folgende Charakteristik aufweist:

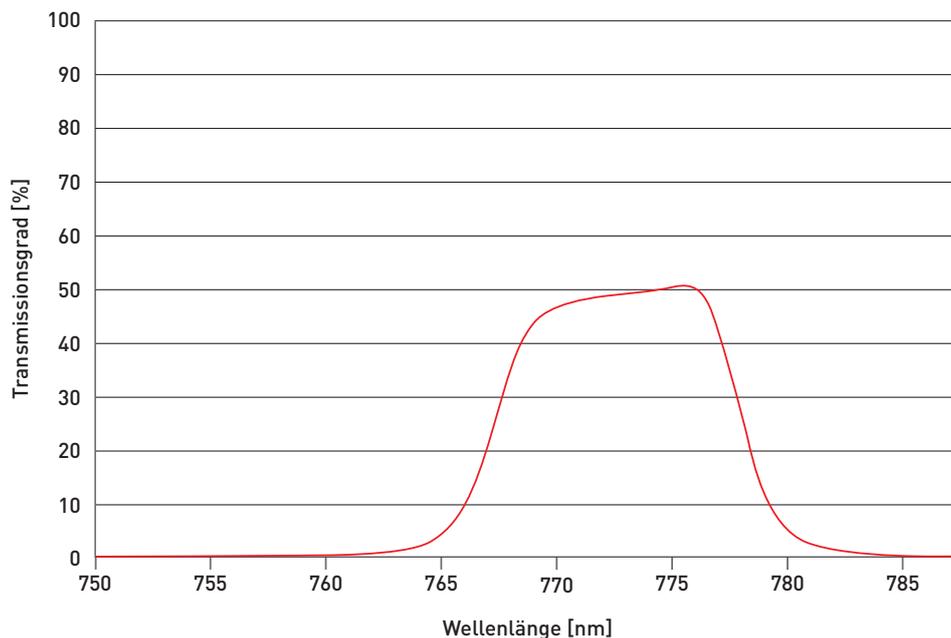


Abbildung 6.14: Transmissionkurve des Interferenzfilters für $\lambda=770$ nm

Für den Interferenzfilter wird eine passende Aufnahme gefertigt, die an der Halteplatte des Polarisationssteilerwürfels montiert wird und im Bedarfsfall wieder leicht entfernt werden kann.

Durch die schmale Bandbreite des Filters und der in Abbildung 6.14 ersichtlichen Tatsache, dass der Filter nur rund 50% der Nennwellenlänge passieren lässt, ist ein deutlich schwächeres Signal als in den bisherigen Versuchen zu erwarten. Möglicherweise muss der Rückkoppelwiderstand der Transimpedanzschaltung an die neuen Gegebenheiten angepasst werden.

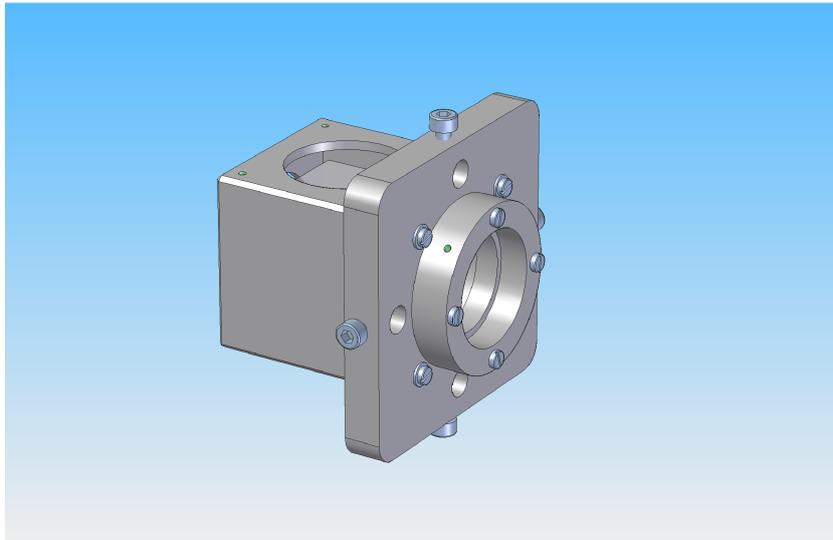


Abbildung 6.15: Filteraufnahme, auf Halteplatte montiert



Abbildung 6.16: Gesamter Messaufbau

6.3.3 Messung mit Interferenzfilter

	Versuch 4.1	Versuch 4.2
Material	Baustahl	Baustahl
Materialstärke	5 mm	5 mm
Laserleistung	1000 W	1000 W
Prozessgas	Sauerstoff	Sauerstoff
Gasdruck	0,9 bar	0,9 bar
Vorschub	1000 mm/min	1000 mm/min
Düsendurchmesser	1,8 mm	1,8 mm
Düsenabstand	1 mm	1 mm
Fokuslage	1 mm	1 mm
Verfahrriichtung	parallel zu s-/p-Ebene	normal auf s-/p-Ebene
Verstärkung	150 k Ω	150 k Ω

Tabelle 6.8: Parameter für vierte Versuchsreihe

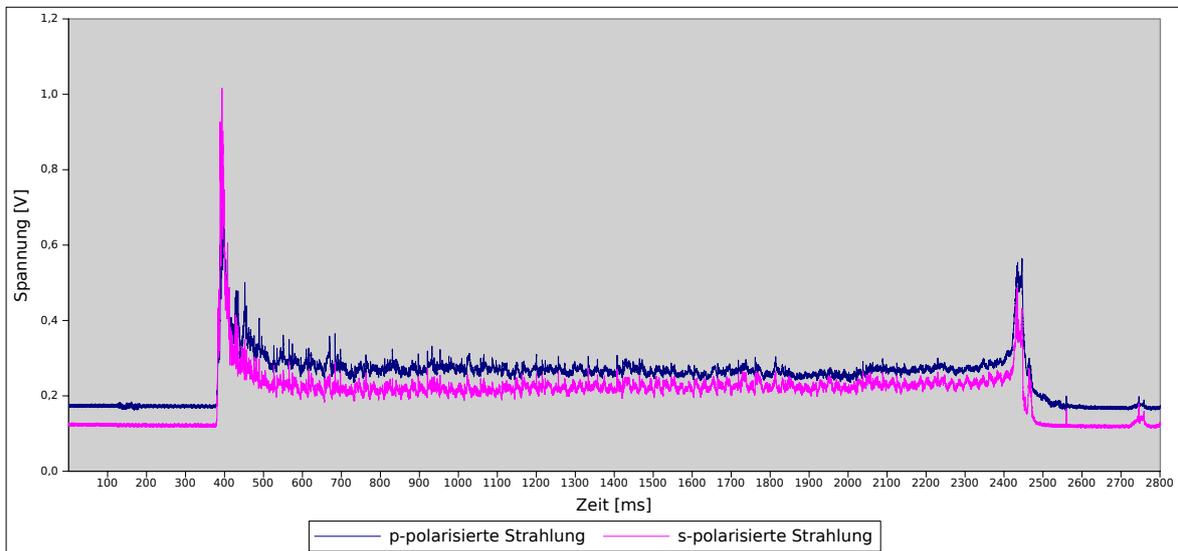


Abbildung 6.17: Versuch 4.1 mit 1000 W Laserleistung, in Y-Richtung geschnitten

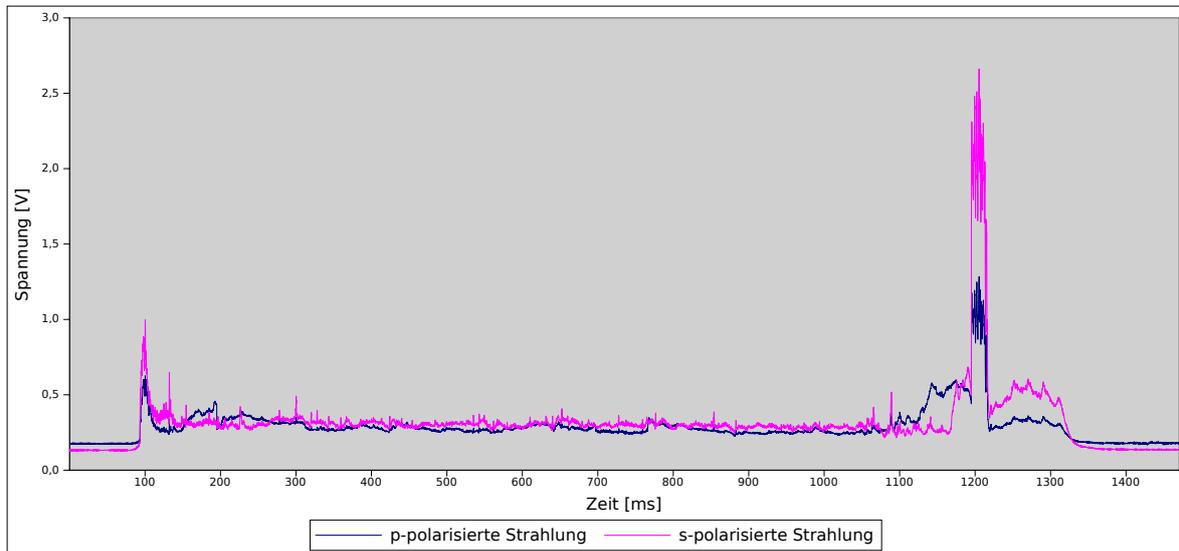


Abbildung 6.18: Versuch 4.2 mit 1000 W Laserleistung, in X-Richtung geschnitten

Wie erwartet, ist die gemessene Bestrahlungsstärke wesentlich geringer als in den vorangegangenen Versuchsreihen, was vorerst kein Problem darstellt. Aber auch sonst zeigt sich durch den Einsatz des Interferenzfilters kein wesentlicher Unterschied zu den bisherigen Messungen (Abbildung 6.17).

Bislang wurde in allen Versuchen in Y-Richtung geschnitten. Die Y-Achse liegt parallel zur Ebene, die durch die Aufspaltung (mittels Polarisator) des emittierten Strahls in zwei Strahlen, aufgespannt wird. Nun wird erstmals in X-Richtung geschnitten (die X-Achse steht orthogonal zur oben erwähnten Ebene). Dabei zeigen sich zwei zueinander unterschiedliche Signalverläufe (Abbildung 6.18), die sich zwar in ihrer Größe nach wie vor nur minimal unterscheiden, doch sie verlaufen nicht parallel zu einander, wie es sonst meist der Fall war.

Daraus kann geschlossen werden, dass die Verfahrerrichtung einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat und bei weiteren Versuchen unbedingt berücksichtigt werden muss.

6.3.4 Messung mit Filter und angepasster Verstärkung

Die durch den Interferenzfilter abgeschwächte Bestrahlungsstärke führt zu einem schwächeren Messsignal. Ein größerer Rückkopplungswiderstand von $510\text{ k}\Omega$, soll dies ausgleichen. Möglicherweise wirkt sich bei dieser relativ großen Verstärkung das Umgebungslicht bereits als Störfaktor aus (ev. Abschirmung der Fotodiode nötig).

	Versuch 5.1	Versuch 5.2
Material	Baustahl	Baustahl
Materialstärke	5 mm	5 mm
Laserleistung	1000 W	1000 W
Prozessgas	Sauerstoff	Sauerstoff
Gasdruck	0,9 bar	0,9 bar
Vorschub	1000 mm/min	1000/1300 mm/min
Düsendurchmesser	1,8 mm	1,8 mm
Düsenabstand	1 mm	1 mm
Fokuslage	1 mm	1 mm
Verfahrrichtung	normal auf s-/p-Ebene	normal auf s-/p-Ebene
Verstärkung	$510\text{ k}\Omega$	$510\text{ k}\Omega$

Tabelle 6.10: Parameter für fünfte Versuchsreihe

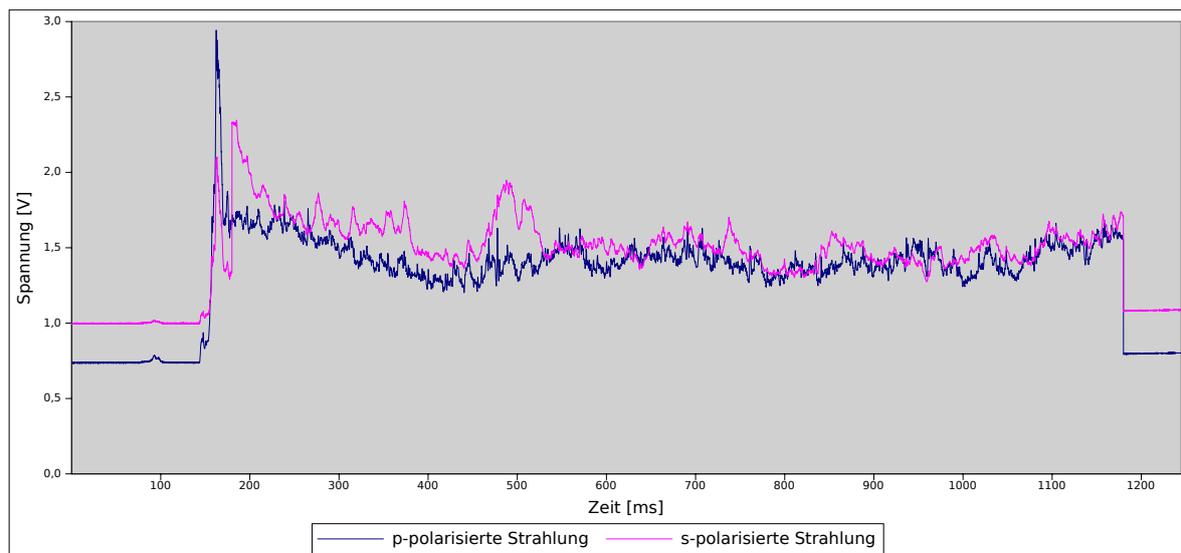


Abbildung 6.19: Versuch 5.1 mit 1000 W Laserleistung, in X-Richtung geschnitten

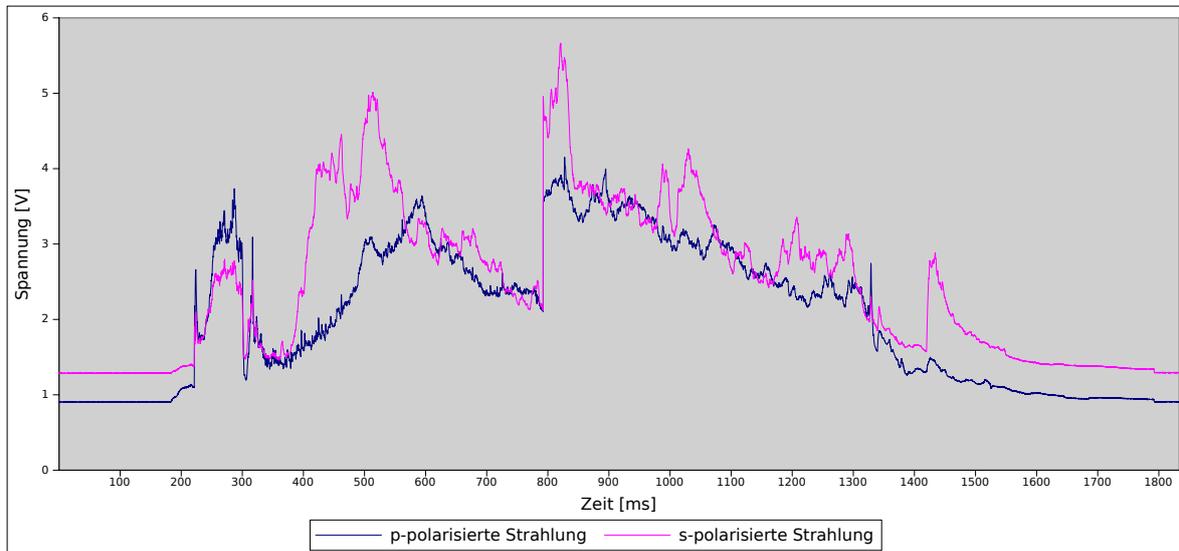


Abbildung 6.20: Versuch 5.2 mit 1000 W Laserleistung, in X-Richtung geschnitten

In Abbildung 6.19 ist die Auswirkung der größeren Verstärkung deutlich zu erkennen. Außerdem zeigt sich wieder die Abhängigkeit des Ergebnisses von der Verfahrerrichtung. Um diese Auffälligkeit genauer zu untersuchen, sollen in den nächsten Versuchsreihen einfache Geometrien, wie Rechtecke und Kreise, geschnitten werden.

Abbildung 6.20 zeigt einen Versuch, bei dem auf halber Strecke die Vorschubgeschwindigkeit von 1000 mm/min auf 1300 mm/min erhöht wurde. Im Diagramm ist an dieser Stelle eine steile Flanke (bei ca. 800 ms) zu erkennen. Es kann aber nicht eindeutig festgestellt werden, ob die Geschwindigkeitssteigerung die Ursache dafür ist, da bei dem gesamten Versuch generell ein unregelmäßiger Signalverlauf zu beobachten ist.

Die später untersuchte Probe weist an der Schnittunterseite einen Grat auf, durch den es beim Verfahren in X-Richtung zu ruckartigen Höhenverschiebungen des Bleches gekommen ist. Die verwendete Verfahrenanlage ist als Halbportalmaschine ausgeführt, d. h. beim Verfahren in Y-Richtung bewegt sich der Bearbeitungskopf und das Blech befindet sich in Ruhe. Bei Bewegungen in X-Richtung verhält es sich umgekehrt - ein Grat an der Blechunterseite wirkt sich somit negativ auf das Schnittergebnis aus, da sich dadurch der Düsenabstand zur Blechoberseite verändert.

6.4 Schneidversuche mit Edelstahl

Es sollen nun auch einige Messungen mit Edelstahlblech durchgeführt werden. Zum Schneiden von Edelstahl kommt das Verfahren des Schmelzscheidens bevorzugt zum Einsatz, wobei meist Stickstoff als inertes Schneidgas verwendet wird. Damit ist, anders als beim Brennschneiden, wo durch die exotherme Reaktion des Sauerstoffs mit der Schmelze eine zusätzliche Energiequelle vorliegt, beim Schmelzschneiden der Laser die einzige Energiequelle. Die damit herabgesetzte, zur Verfügung stehende Leistung, erklärt auch die geringeren Blechstärken, die mit dem Verfahren des Schmelzscheidens bearbeitet werden können. Des weiteren resultiert aus der reduzierten Leistung auch ein schwächeres Messsignal, da in Folge dessen die Strahlungsleistung der vom Werkstück emittierten Strahlung geringer ist.

In dieser Versuchsreihe sollen nicht nur gerade Schnitte, sondern auch verschiedene Figuren, wie z. B. Rechtecke und Kreise, geschnitten werden.

	Versuch 6.1	Versuch 6.2	Versuch 6.2
Material	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl
Materialstärke	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm
Laserleistung	1500 W	1500 W	1500 W
Prozessgas	Stickstoff	Stickstoff	Stickstoff
Gasdruck	8 bar	8 bar	8 bar
Vorschub	2280 mm/min	2280 mm/min	2280 mm/min
Düsendurchmesser	2 mm	2 mm	2 mm
Düsenabstand	1 mm	1 mm	1 mm
Fokusslage	-0,5 mm	-0,5 mm	-0,5 mm
Abgefahrene Figur	Rechteck	RE, 3. Ecke rund	Kreis
Verstärkung	510 k Ω	510 k Ω	510 k Ω

Tabelle 6.12: Parameter für sechste Versuchsreihe

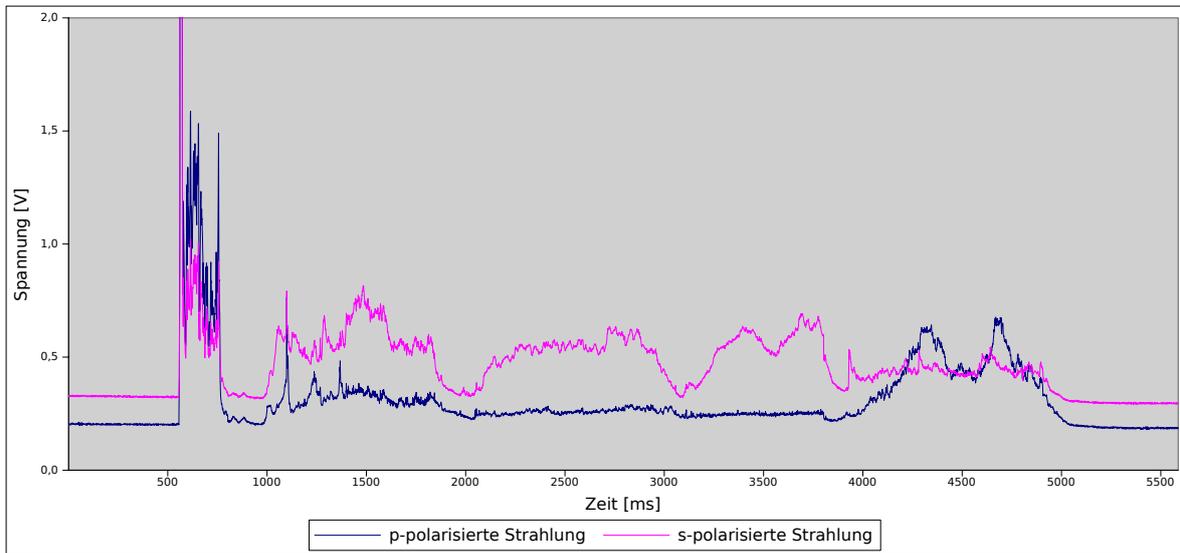


Abbildung 6.21: Versuch 6.1 mit 1500 W Laserleistung, Rechteck in Edelstahl

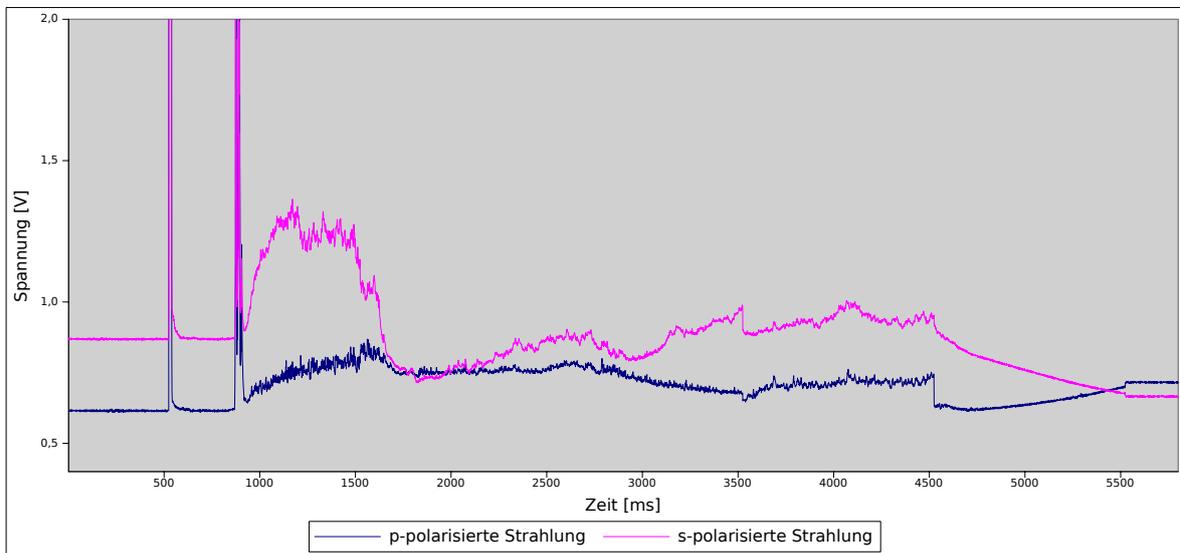


Abbildung 6.22: Versuch 6.2 mit 1500 W Laserleistung, Rechteck in Edelstahl

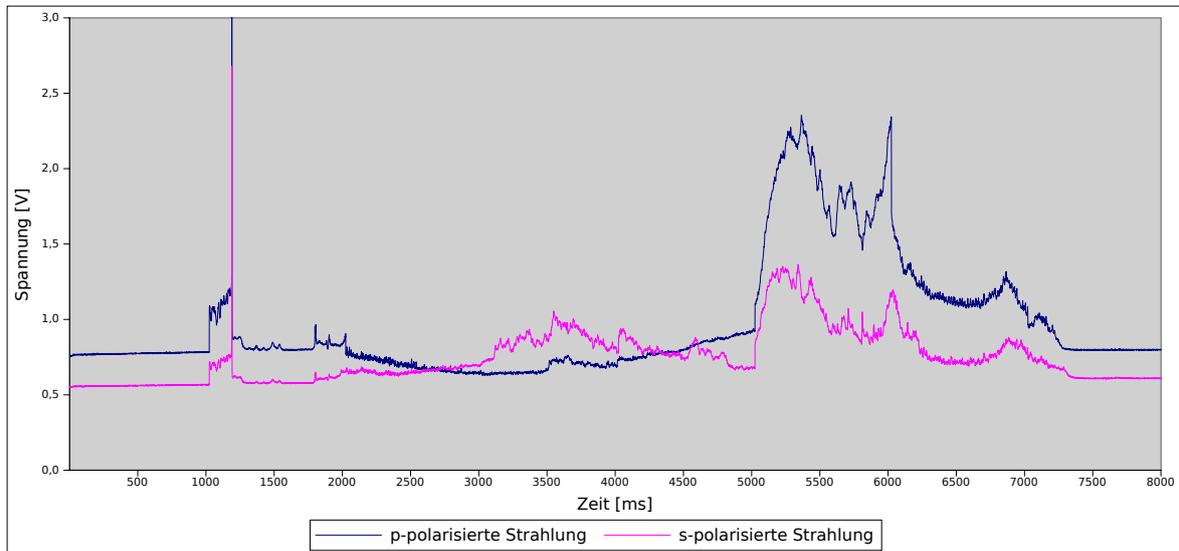


Abbildung 6.23: Versuch 6.3 mit 1500 W Laserleistung, Kreis in Edelstahl

Auch bei Edelstahl haben die Signale der s-/p-polarisierten Strahlung unterschiedliche Verläufe. Durch die bereits beobachtete Richtungsabhängigkeit und die hier geschnittenen Geometrien, sind die unterschiedlichen Signalverläufe noch deutlicher zu erkennen. Die Schneidfront emittiert ein, vom Winkel abhängiges, Verhältnis der s-/p-polarisierten Strahlung. Da sich, insbesondere bei dieser Versuchsreihe, das Polarisationsverhältnis über den Verlauf des Schnittes deutlich ändert, kann dies als Bestätigung für die prinzipielle Funktion des verwendeten Verfahrens betrachtet werden.

In den Diagrammen ist allerdings nicht deutlich auszunehmen, wo die Richtungsänderungen im Verlauf des Schnittes stattfinden. Die Versuche in Abbildung 6.21 und 6.22 wurden mit gleichen Parametern durchgeführt, dennoch unterscheiden sich die Ergebnisse. Auch ein nachträgliches Zurückrechnen über die Abtastfrequenz, um die Positionen des Richtungswechsels zu bestimmen, ist nicht exakt möglich, da die Verfahrenanlage vor Richtungsänderungen bremst bzw. danach wieder beschleunigt.

Die Idee, ein Positionssignal aus der Steuerung zu generieren, welches an beliebiger Stelle im CNC-Code gesetzt werden kann und so einen Richtungswechsel anzeigt, erscheint interessant.

Beim Abfahren eines Kreises, wie in Abbildung 6.23 dargestellt, ist nach dem Einstechen und einer kurzen Verweildauer ein Anstieg der s-polarisierten Strahlungskurve zu erkennen. Das Absinken der p-polarisierten Strahlungskurve unter den Ausgangswert liegt mit großer Wahrscheinlichkeit am Umgebungslicht, das sich störend auf das Ergebnis auswirkt. Dies ist auch beim Versuch in Abbildung 6.22, zu erkennen, da die Positionen der s- und p-polarisierten Signalkurven vor und nach dem Schnitt vertauscht sind.

Der nächste Schritt verlangt somit eine Abschirmung der Fotodioden.

6.4.1 Messungen mit eingebauter Fotodiodenabschirmung

Die Fotodiode wird mit schwarzem Karton abgeschirmt. Zusätzlich wird die Messschaltung erneuert und bietet nun die Möglichkeit, den Rückkoppelwiderstand mittels einer Schraubverbindung zu tauschen.

	Versuch 7.1	Versuch 7.2	Versuch 7.3
Material	Edelstahl	Edelstahl	Edelstahl
Materialstärke	1,5 mm	1,5 mm	1,5 mm
Laserleistung	1500 W	1500 W	1500 W
Prozessgas	Stickstoff	Stickstoff	Stickstoff
Gasdruck	8,5 bar	8,5 bar	8,5 bar
Vorschub	2,5 m/min	1/2/3 m/min	1,5/2/2,5 m/min
Düsendurchmesser	2 mm	2 mm	2 mm
Düsenabstand	1 mm	1 mm	1 mm
Fokuslage	-0,5 mm	-0,5 mm	-0,5 mm
Abgefahrene Figur	X dann Y dann X	Gerade in X	Gerade in X
Verstärkung	4,7 MΩ	4,7 MΩ	4,7 MΩ

Tabelle 6.14: Parameter für siebende Versuchsreihe

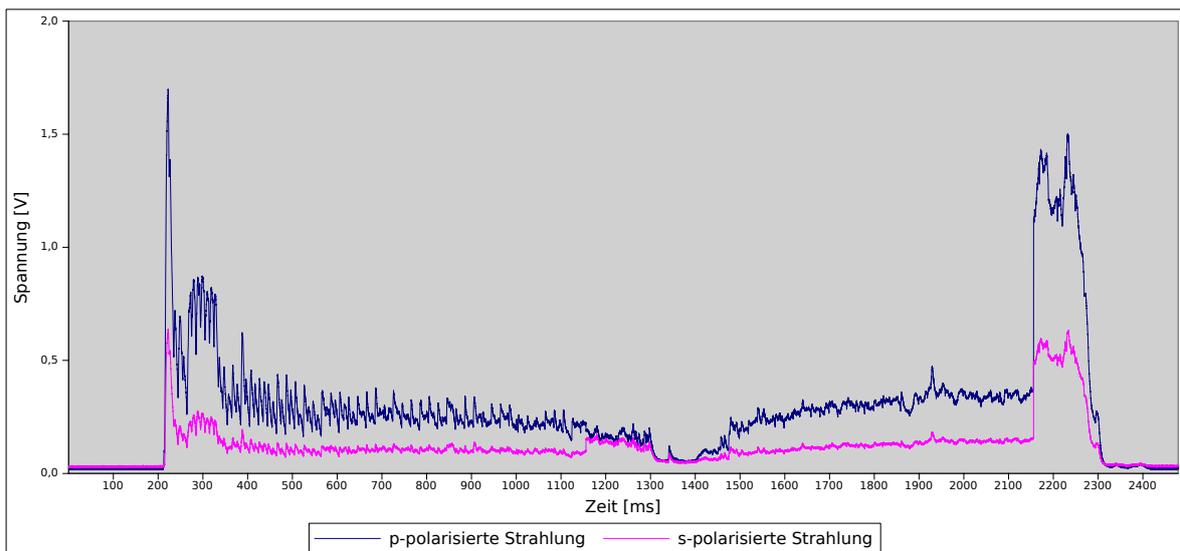


Abbildung 6.24: Versuch 7.1 mit 1500 W Laserleistung, 50 mm in X-Richtung, 10 mm in Y-Richtung, danach wieder 50 mm in X-Richtung

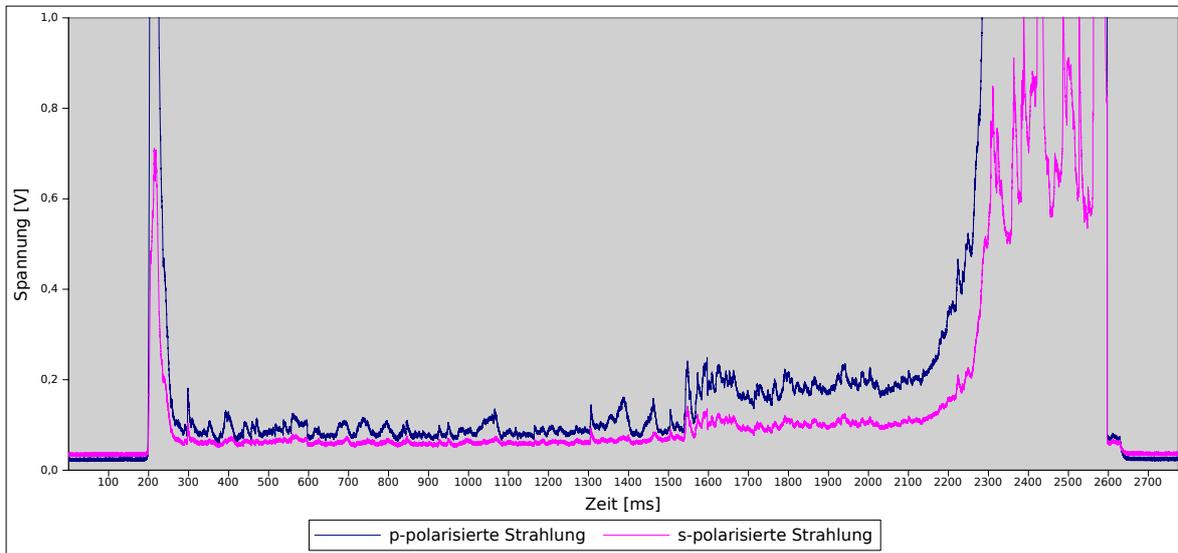


Abbildung 6.25: Versuch 7.2 mit 1500W Laserleistung und steigender Vorschubgeschwindigkeit

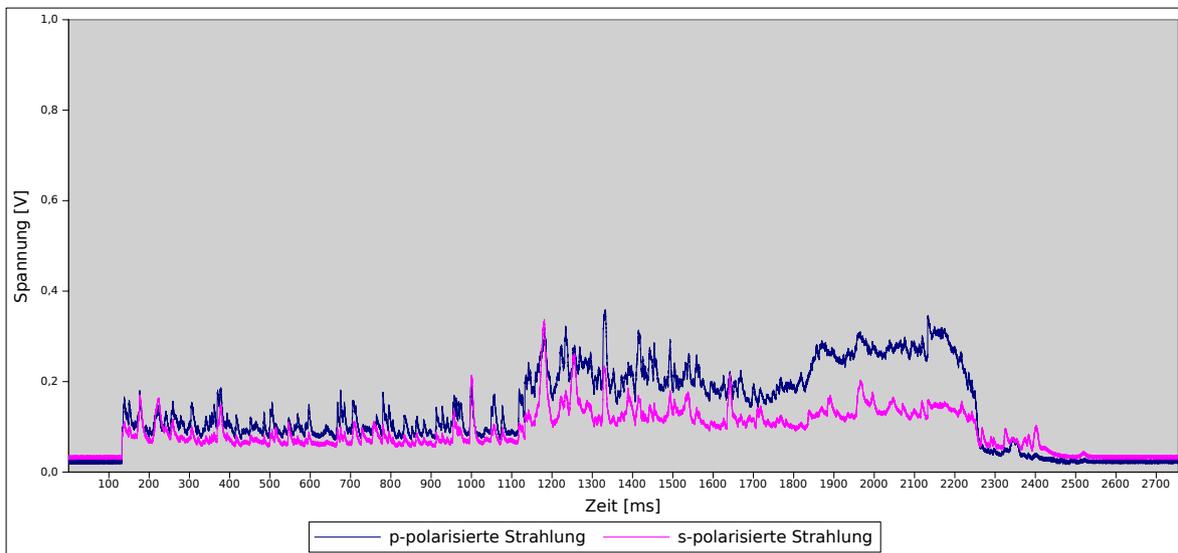


Abbildung 6.26: Versuch 7.3 mit 1500W Laserleistung und steigender Vorschubgeschwindigkeit

Bei dieser Versuchsreihe ist die Auswirkung der Fotodiodenabschirmung gut zu erkennen. Beide Kurven liegen sehr knapp beieinander und befinden sich vor dem Be-

ginn des Schneidversuches nur wenig über 0V. Um auch ohne Positionssignal Richtungsänderungen besser zu erkennen, wird anstelle eines Rechtecks eine Gerade mit 50 mm in X-Richtung, danach eine Gerade mit 10mm in Y-Richtung und anschließend wieder eine Gerade mit 50mm in X-Richtung geschnitten. In Abbildung 6.24 ist der kurze Schnitt in Y-Richtung, zwischen den beiden längeren, in X-Richtung geführten Schnitten, deutlich zu erkennen. In den Abbildungen 6.25 und 6.26 ist das Schneiden einer Geraden (99mm) in X-Richtung dargestellt, wobei nach jeweils 33mm die Geschwindigkeit gesteigert wird. In Abbildung 6.25 ist die letzte Geschwindigkeitssteigerung zu groß und das Blech wird nicht mehr geschnitten, was zu einem extrem steilen Signalanstieg führt. Die Geschwindigkeitserhöhung davor (bei ca. 1550 ms), sowie jene des Versuchs in Abbildung 6.26, sind allerdings gut zu erkennen.

6.4.2 Überprüfung des Versuchsaufbaus

Beim Betrachten der Messergebnisse ist wiederholt ein abschnittsweise parallel verschobener Kurvenverlauf der beiden Signale zu erkennen. Es fragt sich, ob hier womöglich ein unpolarisierter Strahl durch den Versuchsaufbau so verändert wird, dass das Verhältnis von s-/p-Polarisation nicht mehr dem Wert eins entspricht. Um dies zu untersuchen, werden Messungen mit unpolarisiertem Licht, dessen Quelle im Brennpunkt der Bearbeitungslinse angeordnet ist, durchgeführt. Dafür kommt eine Kaltlichtquelle mit Schwanenhals-Lichtleiter zum Einsatz. Sie sendet unpolarisiertes Licht mit stark reduziertem Infrarotanteil aus, womit sie nur auf den ersten Blick für diesen Versuch unbrauchbar erscheint. Denn durch die große Verstärkung der Messschaltung wird trotz des geringen Anteils an Infrarotstrahlung ein gutes Ergebnis erzielt.

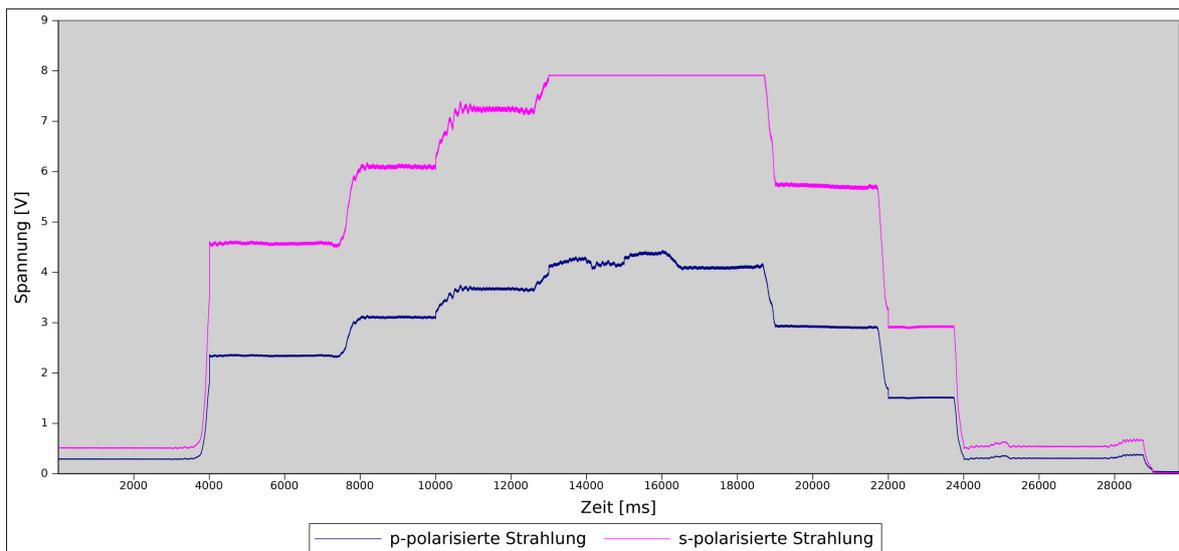


Abbildung 6.27: Versuch 8.1: Blende an Kaltlichtquelle verstellt

Das unpolarisierte Licht der Kaltlichtquelle wird mit einem größeren s-polarisierten Strahlungsanteil dargestellt (Abbildung 6.27). Dies bestätigt, dass an einer Stelle des Versuchsaufbaus das Polarisationsverhältnis verfälscht wird. Um sicher zu stellen, dass die Kaltlichtquelle tatsächlich unpolarisiertes Licht abstrahlt, wird sie um 90° gedreht und die Messung wiederholt - das Ergebnis bleibt unverändert. Nun soll geprüft werden, ob eine der verwendeten Optiken die Intensität des p-polarisierten Lichts abschwächt. Dazu wird einmal mit und einmal ohne Interferenzfilter gemessen.

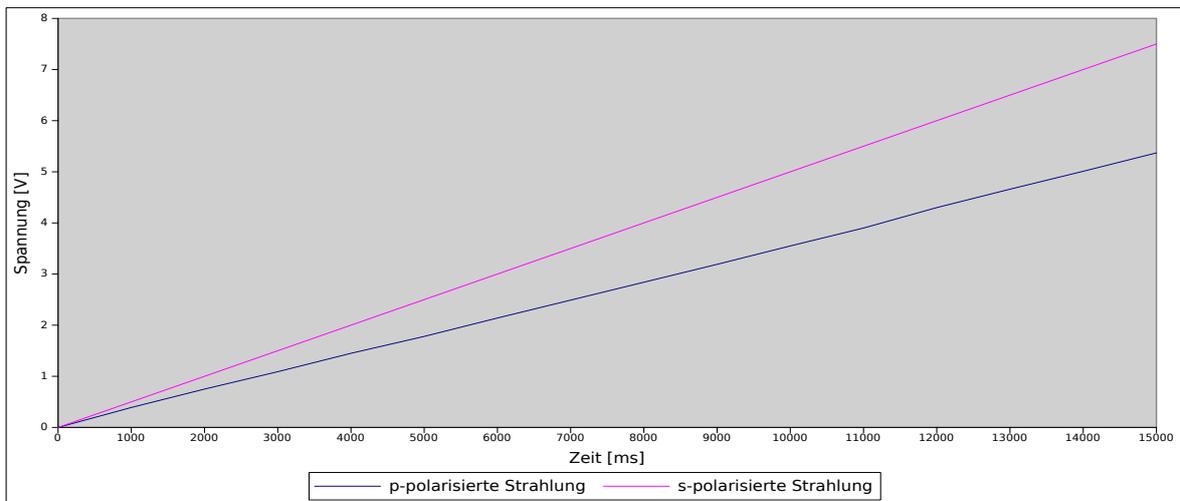


Abbildung 6.28: Versuch 8.2: Ohne Interferenzfilter und mit $R = 156\text{k}\Omega$

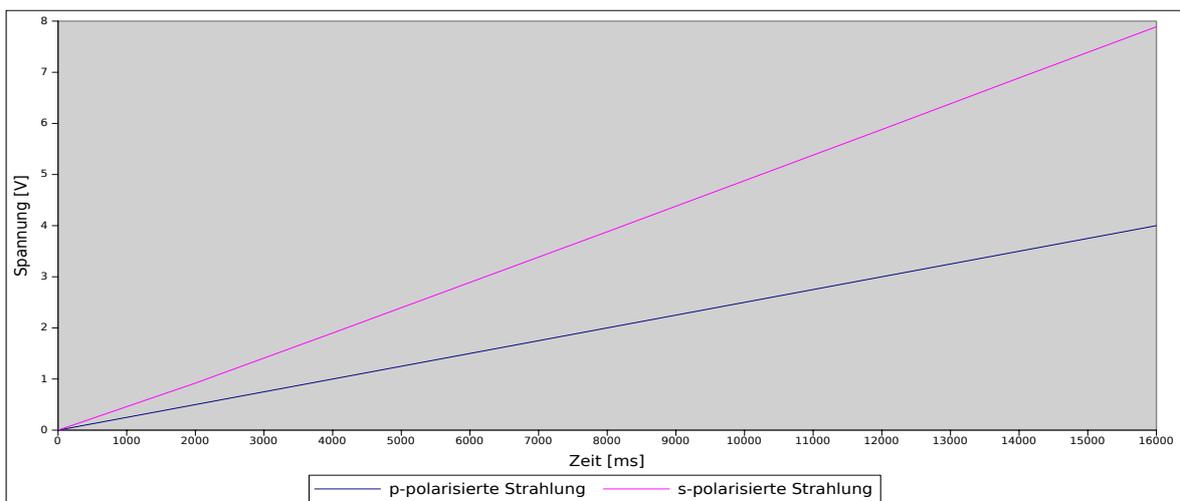


Abbildung 6.29: Versuch 8.3: Mit Interferenzfilter und mit $R = 4,7\text{M}\Omega$

Die Divergenz zwischen dem s- und dem p-polarisierten Signal wird offensichtlich nicht alleine durch den Interferenzfilter verursacht. Sie fällt bei der Messung mit dem Filter zwar größer aus, ist aber auch bei der Messung ohne Filter vorhanden.

Ein Bauteil, das die Divergenz ebenfalls verursachen könnte, ist der Strahlauskoppler, für den es vom Hersteller keine genauen Informationen bezüglich seiner Reflexionseigenschaften von polarisierter Strahlung gibt (Herstellerangabe: „Das Verhältnis von s- zu p-polarisierter Strahlung bleibt durch die Reflexion weitgehend erhalten“).

Als letztes Bauteil wird der Polarisationssteiler genauer betrachtet. Aus den Diagrammen in Abbildung 5.4 geht hervor, dass bei der Aufspaltung eines unpolarisierten Strahls, das Signal für die s-Polarisation etwas größer als das für die p-Polarisation ausfällt. Allerdings ist die dabei entstehende Divergenz relativ gering.

Es ist also davon auszugehen, dass der Strahlauskoppler den größten Einfluss auf die Divergenz hat und der p-polarisierte Anteil des Strahls am Strahlauskoppler schlechter reflektiert wird als der s-polarisierte.

Dieses Problem lässt sich durch einen elektronischen Abgleich der Messschaltung lösen. Um bei der verwendeten Schaltung einen Abgleich zu erreichen, wird das s-polarisierte Signal mit einem Rückkoppelwiderstand von $R=3,3\text{M}\Omega$ und das p-polarisierte Signal mit $R=6,82\text{M}\Omega$ verstärkt.

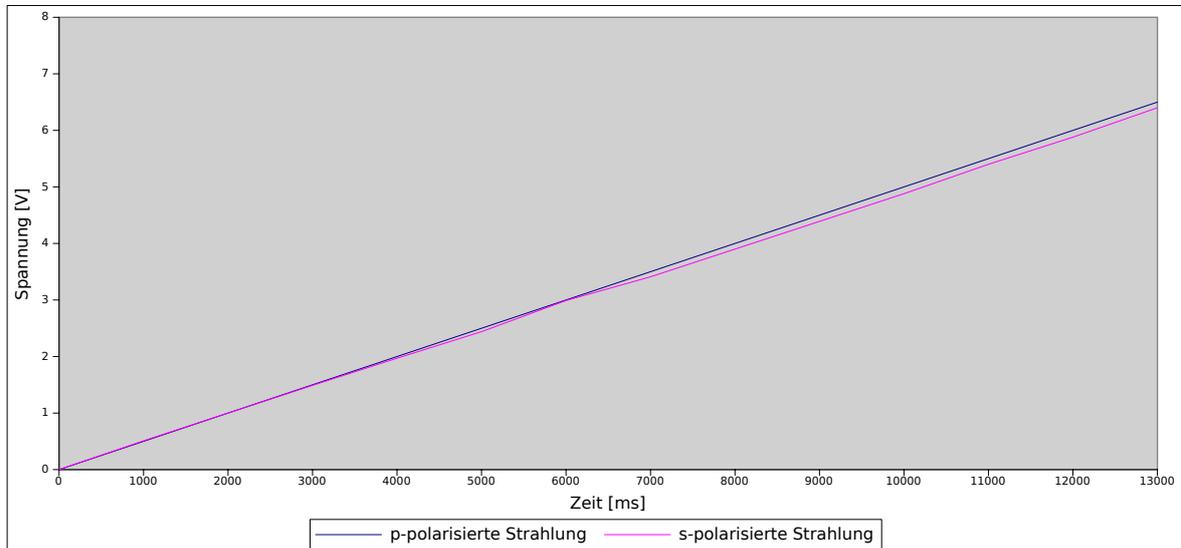


Abbildung 6.30: Versuch 8.4: Abgleich des Versuchsaufbaus

6.4.3 Versuch mit abgeglichenem Versuchsaufbau

Mit der nun abgeglichenen Messschaltung sollen einige der bisher durchgeführten Versuche wiederholt werden. In Versuch 7.1 wurde ein interessantes Ergebnis erzielt, weshalb er als erstes wiederholt werden soll. Leider liegt ein, zu diesem Zeitpunkt nicht lösbares Problem bei der Versorgung mit Stickstoff vor, sodass mit einem Druck von 4 bar anstelle von benötigten 8,5 bar gearbeitet werden muss.

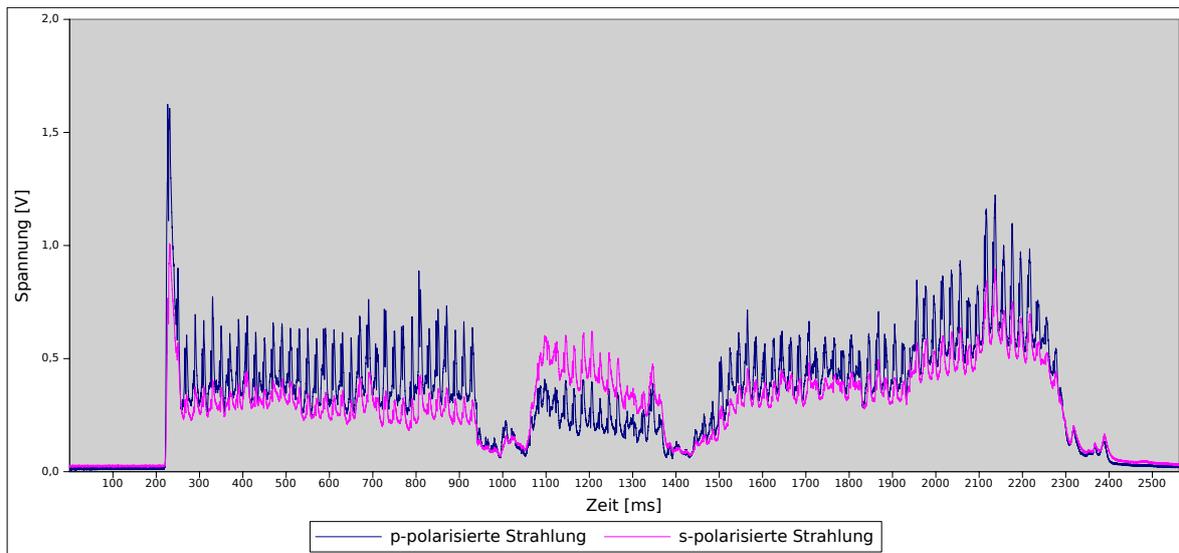


Abbildung 6.31: Versuch 9.1 mit 1500 W Laserleistung, 50 mm in X-Richtung, 10 mm in Y-Richtung, danach wieder 50 mm in X-Richtung

Wie in Abbildung 6.31 ersichtlich, führt der zu niedrige Stickstoffdruck zu einem stark fluktuierenden Signal, welches durch das suboptimale Austreiben der Schmelze aus dem Schneidspalt zustande kommt.

Trotzdem ist in der Mitte des aufgenommenen Diagramms die in Y-Richtung geschnittene Strecke durch den Wechsel des Polarisationsverhältnisses deutlich zu erkennen.

Um den zeitlichen Rahmen dieser Diplomarbeit nicht zu sprengen, finden die Versuchsreihen mit diesem vielversprechenden Ergebnis ihren Abschluss. Zusätzliche Anregungen in der Schlussbetrachtung zeigen auf, wie das Verfahren in Zukunft weiter optimiert werden kann.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Schlussbetrachtung

Das untersuchte Verfahren, durch das Erfassen des Polarisationsverhältnisses der emittierten Strahlung, einen Indikator für die Schnittqualität zu erhalten, erscheint nach den bisherigen Versuchen durchaus vielversprechend.

Ziel der Experimente war die Machbarkeit einer solchen Messung darzulegen. Dabei zeigten sich aber auch jene Probleme, die dieses Verfahren mit sich bringt, denn die Toleranzen, die über eine erfolgreiche Messung entscheiden, sind sehr eng. Das Justieren der Messeinrichtung gestaltete sich aufwendiger als ursprünglich angenommen und auch danach führten bereits geringe Abweichungen der Randbedingungen zu unbrauchbaren Ergebnissen. Trotzdem konnte immer wieder ein sich änderndes Polarisationsverhältnis in den Messergebnissen beobachtet werden. Daraus kann geschlossen werden, dass der sich ändernde Winkel der Erosionsfront den Emissionsgrad der beobachteten s-/p-polarisierten Strahlung beeinflusste und so zum jeweiligen Signalverlauf führte. Aufgrund des einfachen Versuchsaufbaus, können aus den erzielten Ergebnissen noch keine Rückschlüsse auf die Qualität des Schnittes gezogen werden, mit einer Weiterentwicklung des Aufbaus sollten jedoch in Zukunft klare Aussagen diesbezüglich möglich sein.

7.2 Anregungen

Um den zeitlichen Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, konnten nicht alle Ideen zur Verbesserung des Versuchsaufbaus praktisch umgesetzt werden. Daher wird an dieser Stelle eine kurze Zusammenstellung von Verbesserungsvorschlägen angeführt.

7.2.1 Positionssignal

Ein Positionssignal kann zukünftig dabei helfen, den Richtungswechsel beim Schneiden genauer zu erkennen und damit die Interpretation des Messsignals erleichtern.

Bei der verwendeten Verfahrenanlage kann mithilfe eines M-Befehls, der an beliebiger Stelle im CNC-Schneidprogramm gesetzt wird, ein Ausgang der SPS-Steuerung angesteuert werden. Damit springt beim Erreichens des M-Befehls die Spannung am Ausgang von 0 auf 24V und kann so als Positionssignal vom Datenerfassungsmodul (Spannungsteiler¹ notwendig) aufgezeichnet werden.

7.2.2 Referenzkurve

Um die erzielten Messergebnisse besser beurteilen zu können, wäre eine anfänglich erstellte Referenzkurve unter Verwendung der späteren Messanordnung sehr hilfreich. Damit könnte die s- und p-polarisierte Strahlungsemission einer erhitzten Materialprobe unter verschiedenen Winkeln aufgezeichnet werden. Die so entstehenden Kurvenverläufe geben das winkelabhängige Polarisationsverhältnis wieder und würden die fehlerfreie Funktion des Messaufbaus beweisen. Außerdem zeigt eine derartige Messung das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten und gibt damit einen Anhaltspunkt für mögliche Einstellarbeiten um später ein optimales Ergebnis zu erzielen.

7.2.3 Verstellmechanismus

Der verwendete Messaufbau verfügt zwar über mehrere einfache Verstellmöglichkeiten, allerdings ist die zu beobachtende Stelle sehr klein und es erwies sich als schwierig, diesen Punkt exakt zu treffen. Für eine genauere Justage ist daher der Einsatz eines präziseren Systems notwendig, vor allem wenn es um die Wiederholbarkeit bestimmter Einstellungen geht. Für diese Aufgabe wäre ein kleiner Kreuztisch der zwischen Strahlauskoppler und Strahlteilerwürfel montiert wird, gut vorstellbar.

7.2.4 Einfluss der Plasmawolke

Das beim Schneiden entstehende Plasma kann das Messergebnis durch unterschiedliche Mechanismen beeinflussen. Der naheliegendste ist eine Störung durch die Emission des Plasmas selbst. Wenn dessen Wellenlängenbereich sich mit dem Empfindlichkeitsspektrum der Fotodiode überschneidet, wird durch die Plasmastrahlung das eigentliche Messsignal überlagert.

Ein weiteres Problem kann auftreten, wenn der zu untersuchende Strahl das Plasma durchdringt, da dieses eine Brechung des Strahls verursacht. Durch das fluktuierende Plasma wird eine fluktuierende Ablenkung des Strahls verursacht und damit ist sein

¹Ein Spannungsteiler setzt sich aus zwei Widerständen R_1 und R_2 , die in Serie geschaltet sind, zusammen. Legt man an diese Serienschaltung eine Spannung U , so kann am Widerstand R_1 die Spannung U_1 und am Widerstand R_2 die Spannung U_2 abgegriffen werden.

zuverlässiges Auftreffen auf der kleinen fotoempfindlichen Fläche der Fotodiode nicht mehr gewährleistet [1].

Durch die Verwendung eines schmalbandigen Filters kann der Einfluss des Plasmas auf die Messergebnisse reduziert werden.

7.2.5 Wellenlänge

Der Wellenlängenbereich, in dem das Phänomen, des von der Polarisierung und dem Beobachtungswinkel abhängigen Emissionsgrades, beobachtet werden kann, reicht etwa von 500 nm bis 2000 nm [31]. Aus Zeit- und Kostengründen wurde der Versuchsaufbau, der dieser Arbeit zugrunde liegt, nur für einen kleinen Wellenlängenbereich um $\lambda \approx 770$ nm ausgelegt. Bei neuerlichen Versuchen wäre ein Vergleich der Ergebnisse bei einer anderen Nennwellenlänge interessant.

7.2.6 Optische Blende

Sowohl die Randzone des Schneidspalts, als auch bereits ausgetriebene Tröpfchen der Schmelze, emittieren Strahlung, die das Messergebnis verfälschen kann. Durch den Einsatz einer Schlitz- oder Irisblende könnte dieser Einfluss reduziert und Strahlung, die nicht direkt von der Schneidfront stammt, besser abgeschirmt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] BERGER, Peter ; GRAF, Thomas: *Physikalische Prozesse der Lasermaterialbearbeitung*. Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart, 2012
- [2] BÖHMER, Erwin: *Elemente der angewandten Elektronik*. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 2001
- [3] BIMBERG, Dieter: *Materialbearbeitung mit Lasern*. Expert-Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1991
- [4] CRYSTRAN: Zinc Selenide (ZnSe). In: <http://www.crystran.co.uk/optical-materials/zinc-selenide-znse> (16.8.2012)
- [5] DEININGER, Christoph: Prozessüberwachung in der Lasermaterialbearbeitung. In: *Laser Technik Journal* 4 (2006), S. 29
- [6] FRIEDRICH, Wilhelm ; HOMBORG, Gerhard ; LIPSMEIER, Antonius: *Tabellenbuch Metall- und Maschinentchnik*. Dümmlers Verlag, Bonn, 1993
- [7] GRUNER: Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung. In: www.thermografie.co.at/files/raytec.pdf (19.2.2013)
- [8] HERZIGER, Gerd ; BACKES, Gerd ; HERZIGER, G. (Hrsg.) ; LOSSEN, P. (Hrsg.): *Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1993
- [9] HÜGEL, Helmut ; GRAF, Thomas: *Laser in der Fertigung*. Vieweg + Teubner GWV Fachverlag GmbH, Wiesbaden, 2009
- [10] HOFFMANN, Jörg: *Handbuch der Meßtechnik*. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1999
- [11] II-VI-INFRARED: High-Efficiency Dual Wavelength Beam Combiner Coating on ZnSe. (2003)
- [12] KAAST: Laserschneiden. In: http://www.kaast.de/_technologie/_schneid-systeme/_allg_laser (15.2.2013)

- [13] KALLIES, Bernd: Integration der Lasertechnik in die Produktionstechnik. In: *Materialbearbeitung durch Laserstrahl* (1993), S. 3.2.3–6
- [14] LASERCOMPONENTS: Hinweise zum Umgang mit optischen Elementen, die mit AR für 10,6 μm beschichtet sind. In: http://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc/applikationsreport/hinweise-umgang-optische-elemente.pdf (15.10.2012)
- [15] LINDE: Material bearbeiten. In: http://www.linde-gas.at/laser/material_bearbeiten.html (3.9.2013)
- [16] LIPSON, Stephen G. ; LIPSON, Henry S. ; TANNHAUSER, David S.: *Optik*. Springer-Verlag, Berlin, 1997
- [17] MERTENS, Konrad: *Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*. Carl Hanser Verlag, München, 2011, www.lehrbuch-photovoltaik.de
- [18] NATIONAL-INSTRUMENTS: LabVIEW. In: <http://www.ni.com/labview/> (10.9.2012)
- [19] NIGGLI, Hugo: Was ist Licht. In: <http://www.ionic-pulser.eu/was-ist-licht.htm> (18.2.2013)
- [20] POPRAWA, R.: *Lasertechnik für die Fertigung*. Springer-Verlag, Berlin, 2005
- [21] RMI: Transmission Curves. In: <http://rmico.com/technical-notes/baf2-znse-antir-gaas> (20.8.2013)
- [22] SCHINDEL, Bernd: Thermografie in der Theorie und Praxis, 2007. In: www.thermografie.co.at/files/ebs.pdf (19.2.2013)
- [23] SCHMIDT, Wolf-Dieter: *Sensorschaltungstechnik*. Vogel Buchverlag, Würzburg, 2002
- [24] SCHWEIGER, Harald: Industriethermografie. In: <http://www.thermografie-schweiger.de/theorie/grundlagen/oberflaechen.htm> (19.2.2013)
- [25] THORLABS: Cube-Mounted Polarizing Beamsplitter Cube. In: http://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4137 (10.7.2013)
- [26] TIPLER, Paul A. ; GERLICH, Dieter (Hrsg.): *Physik*. Spektrum-Verlag, Heidelberg, 2000
- [27] TOBER, Stefan: *Möglichkeiten und Grenzen der Infrarot-Thermografie bei der Untersuchung des Rad-Schiene-Kontakts*. Diplomarbeit, TU Wien, 2006
- [28] ULO-OPTICS: Standard Beam Combiner ZnSe. (2013)

- [29] UNO, Kazuyuki ; PESHKO, Igor (Hrsg.): *Laser Pulses - Theory, Technology, and Applications*. InTech, 2012
- [30] VEES, Georg ; AUVA (Hrsg.): *Grundlagen der Lasersicherheit. In: Sicherheitsinformation der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt*. AUVA, Wien, 2009
- [31] WEBERPALS, Jan ; HERMANN, Tobias ; BERGER, Peter ; SINGPIEL, Holger: Utilisation of Thermal Radiation for Process Monitoring. In: *Physics Procedia* 12 (2011), S. 704–711, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389211001672> (9.7.2012)